

ELÓI MARTINS SENHORAS
(organizador)

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Teoria & Prática



EDITORA

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Teoria & Prática

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Teoria & Prática

ELÓI MARTINS SENHORAS
(organizador)

BOA VISTA/RR
2022

Editora IOLE

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei n. 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.



EXPEDIENTE

Revisão
Elói Martins Senhoras
Maria Sharlyany Marques Ramos

Capa
Alokike Gael Chloe Hounkonnou
Elói Martins Senhoras

Projeto Gráfico e Diagramação
Elói Martins Senhoras
Rita de Cássia de Oliveira Ferreira

Conselho Editorial
Abigail Pascoal dos Santos
Charles Pennaforte
Claudete de Castro Silva Vitte
Elói Martins Senhoras
Fabiano de Araújo Moreira
Julio Burdman
Marcos Antônio Fávaro Martins
Rozane Pereira Ignácio
Patrícia Nasser de Carvalho
Simone Rodrigues Batista Mendes
Vitor Stuart Gabriel de Pieri

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO (CIP)

Se28 SENHORAS, Elói Martins (organizador).

Resíduos Sólidos Urbanos: Teoria & Prática. Boa Vista: Editora IOLE, 2022, 279 p.

Serie: Ciências Ambientais. Editor: Elói Martins Senhoras.

ISBN: 978-65-998357-7-3
https://doi.org/10.5281/zenodo.7245901

1 - Brasil. 2 - Ciências Ambientais. 3 - Resíduos Sólidos Urbanos. 4 - Sustentabilidade.
I - Título. II - Senhoras, Elói Martins. III - Ciências Ambientais. IV - Série

CDD–333.72

A exatidão das informações, conceitos e opiniões é
de exclusiva responsabilidade dos autores



EDITORIAL

A editora IOLE tem o objetivo de divulgar a produção de trabalhos intelectuais que tenham qualidade e relevância social, científica ou didática em distintas áreas do conhecimento e direcionadas para um amplo público de leitores com diferentes interesses.

As publicações da editora IOLE têm o intuito de trazerem contribuições para o avanço da reflexão e da *práxis* em diferentes áreas do pensamento e para a consolidação de uma comunidade de autores comprometida com a pluralidade do pensamento e com uma crescente institucionalização dos debates.

O conteúdo produzido e divulgado neste livro é de inteira responsabilidade dos autores em termos de forma, correção e confiabilidade, não representando discurso oficial da editora IOLE, a qual é responsável exclusivamente pela editoração, publicação e divulgação da obra.

Concebido para ser um material com alta capilarização para seu potencial público leitor, o presente livro da editora IOLE é publicado nos formatos impresso e eletrônico a fim de propiciar a democratização do conhecimento por meio do livre acesso e divulgação das obras.

Prof. Dr. Elói Martins Senhoras

(Editor Chefe)

Copyright © Editora IOLE
2022

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO | 09

CAPÍTULO 1 |
Ensaios Triaxiais em Composto Oriundo de Resíduos Sólidos Urbanos 13

CAPÍTULO 2 |
Parâmetros Físico-Químicos na Delimitação de Contaminação
por Lixiviado em Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos Urbanos 37

CAPÍTULO 3 |
Energia Renovável e Passivo Ambiental: Incentivos ao
Uso de Energia Produzida por Meio de Resíduos Sólidos 65

CAPÍTULO 4 |
Resíduos Sólidos Urbanos: Análise do Setor Energético em
Ascensão com Base no Impacto Ambiental e na Qualidade de Vida 87

CAPÍTULO 5 |
Resíduos de Podas e Aparas Urbanas: Uma
Abordagem sobre a Valorização do Ponto de Vista Energético 113

SUMÁRIO

CAPÍTULO 6 |
Avaliação da Evolução Geomecânica de
Aterros Sanitários com Base em Ensaios de Campo 141

CAPÍTULO 7 |
Viabilidade Econômica da Reciclagem dos Resíduos Urbanos em
Lisboa, Portugal: Uma Análise Utilizando o Aplicativo Verdes-PT 175

CAPÍTULO 8 |
Resíduos Sólidos Urbanos: Percepção Ambiental dos
Moradores do Bairro Maracanã, Barra do Bugres (MT) 189

CAPÍTULO 9 |
Geração de Biogás a Partir da Disposição de Resíduos
Sólidos Urbano na Região Metropolitana de Recife (PE) 227

SOBRE OS AUTORES | 265

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

O presente livro, "Resíduos Sólidos Urbanos: Teoria & Prática" aborda o estado da arte no campo das Ciências Ambientais, por meio de uma coletânea diversificada de estudos teóricos e empíricos, os quais refletem uma riqueza de temáticas estratégicas na área nos planos de abstração e da materialidade, sem perder o contexto de especificidades subnacionais do território brasileiro.

A elaboração deste projeto editorial contou com o esforço colaborativo de cinco pesquisadores portugueses e vinte e oito brasileiros oriundos de instituições públicas e privadas de ensino superior e pesquisa, permitindo assim uma panorâmica visão sobre a temática de resíduos sólidos nos laboratórios e em distintos localidades.

Esta obra trata-se do sexto livro de coletânea sobre resíduos sólidos a ser publicado pela editora IOLE no ano de 2022, demonstrando assim a relevância socio-ambiental e científica que a temática possui, especialmente em uma conjuntura internacional permeada por um campo de poder em conflito polarizado entre a comunidade epistêmica ambientalista e os grupos e políticos negacionistas.

É neste complexo contexto de crise da agenda ambiental nono Brasil que surge este livro, uma vez que os nove capítulos apresentados neste livro foram construídos por um seleto grupo de profissionais que colabora direta e indiretamente para a construção e revitalização multidisciplinar do campo científico das Ciências Ambientais no Brasil por meio de uma série de estudos teóricos e empíricos sobre a realidade dos resíduos sólidos urbanos no país.

Caracterizado por uma natureza exploratória, descritiva e explicativa quanto aos fins e uma abordagem quali-quantitativa, este

livro foi estruturado por meio de diferentes abordagens multidisciplinares para abordar a ampla agenda temática dos resíduos sólidos que vai do plano teórico até o plano empírico da realidade material.

A proposta implícita nesta obra tem no paradigma eclético o fundamento para a valorização da pluralidade teórica e metodológica, sendo este livro construído por meio de um trabalho coletivo de pesquisadoras e pesquisadores de distintas formações acadêmicas e expertises, o que repercutiu em uma rica oportunidade para explorar as fronteiras das discussões sobre resíduos sólidos urbanos.

O livro proporciona uma fácil imersão no campo das Ciências Ambientais, tanto para um público de leitores leigos, quanto de acadêmicos, estudantes e profissionais da área, ao conciliar o rigor de marcos teórico-conceituais com a empiria de ricos estudos de caso, demonstrando que a despeito de uma realidade permeada por complexidades é possível construir cientificamente novos conhecimentos sobre resíduos sólidos urbanos dentro de parâmetros didáticos e sem excessos de jargões ou tecnicismos.

Ótima leitura!

Prof. Dr. Elói Martins Senhoras

(organizador)

CAPÍTULO 1

Ensaios Triaxiais em Composto Oriundo de Resíduos Sólidos Urbanos

ENSAIOS TRIAXIAIS EM COMPOSTO ORIUNDO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Claudio Fernando Mahler

Luiza Cantuária Costa

Gabriel de Pinna Mendez

Resíduos sólidos urbanos (RSU) apresentam elevada heterogeneidade, no que se refere à sua composição, formas e dimensões. Visando maior segurança em projetos de aterros tem aumentado o número de estudos geomecânicos em laboratório e campo para a determinação de parâmetros que permitam uma análise mais confiável de movimentos e estabilidade de aterros em operação ou encerrados. A heterogeneidade dos resíduos, com tempos de degradação muito diferentes, conduz a uma produção irregular, intensa e prolongada de gases e lixiviado. Apesar da pesquisa no tema resíduos sólidos ter se intensificado nas últimas décadas, há ainda carência de registros e referencial bibliográfico. Mais ainda, no caso do composto, pouco tem se estudado no Brasil, quanto à resistência deste material, pois sua obtenção e uso em aterros encontra-se ainda em fase incipiente.

Ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em laboratório e in situ, têm sido desenvolvidos e realizados, ao longo das últimas décadas para a determinação de parâmetros de resistência em resíduos sólidos urbanos frescos, envelhecidos, pré-tratados mecânica biologicamente e compostos. As dificuldades compreendem a falta de padronização de métodos de amostragem e dos ensaios, a diferença de composição dos resíduos ensaiados, os tamanhos de amostras insuficientes para serem representativas, a limitação dos equipamentos para as condições impostas durante os

ensaios e a dificuldade na comparação de resultados frente a todas estas variações. Os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos são extremamente dependentes do nível de extensões impostos, conforme constatado por diversos autores (JESSBERGER; KOCKEL, 1993; GRISOLIA *et al.*, 1995; MAHLER; DE LAMARE NETO, 2006; FUCALE *et al.*, 2007; CALLE *et al.*, 2011; MACHADO; KARIMPOUR-FARD, 2011).

Nos ensaios realizados, admitindo a validade do critério de Mohr-Coulomb, a ruptura não tem sido claramente identificada para os níveis de deformação factíveis aos equipamentos, mesmo para elevadas tensões de compressão, e os resíduos apresentam um comportamento do tipo "strain hardening", ou seja, continuam a ganhar resistência com o aumento das extensões a que são submetidos. Desta forma, faz-se necessário incorporar um critério de deformação para que os parâmetros de resistência fiquem claramente definidos (KONIG; JESSBERGER, 1997).

Embora os RSU apresentem granulometricamente e em termos de propriedades físico-químicas dos materiais enormes diferenças com relação aos solos, e tenham comportamento tensão deformação bastante diferente, um critério de ruptura de Mohr-Coulomb modificado tem sido reconhecido como útil. Da mesma maneira que em solos, a resistência dos resíduos sólidos urbanos aparentemente aumenta com o incremento da tensão normal. Porém, devido ao seu alto teor de matéria orgânica e sua estrutura fibrosa, os resíduos sólidos se comportam mais como um solo orgânico fibroso do que simplesmente como um solo.

A resistência ao cisalhamento nos resíduos é resultante da soma dos efeitos de atrito e tração provocados pelas fibras presentes, além de um efeito que pode ser considerado como equivalente a uma coesão, mas não sendo como ela, de forma que se usa o termo intercepto de coesão para este aspecto que surge ao se traçar o gráfico da envoltória de resistência. Kölsch (1993) com ensaios de

cisalhamento direto e ensaios de tração em amostras com resíduos sólidos em corpos de prova a grandes dimensões observou que a resistência ao cisalhamento dos RSU pode ser dividida em duas distintas parcelas de resistência: a 1ª corresponde ao cisalhamento e, a exemplo dos solos, resulta do atrito entre as partículas expresso matematicamente pelo ângulo de atrito e pela coesão; a 2ª corresponde ao reforço pela resistência à tração das fibras, sendo expresso pelo ângulo de tensão. Mahler e Lamare Neto (2006) apontam a existência de aspectos intrínsecos aos materiais que também fazem parte da resistência dos resíduos sólidos, que acabam por surgir no gráfico da envoltória de resistência como um intercepto da coesão.

Nos aterros de resíduos pré-tratados ou composto, o objetivo é atingir o máximo de densidade e uniformidade na compactação, o que pode ser feito com o auxílio de máquinas compactadoras como trator de esteira. Tal prática promove uma conformação geométrica estável, onde a execução dos taludes contribui para diminuição do acúmulo de lixiviado no interior do aterro e permite, quando associado a uma cobertura, o escoamento superficial da precipitação, o que facilita o seu posterior encaminhamento para as redes de drenagem.

Neste trabalho são apresentados os resultados de um programa de ensaios triaxiais em amostras de composto realizados em laboratório, juntamente com uma discussão sobre a metodologia adotada e os parâmetros de resistência encontrados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Características do resíduo submetido aos ensaios

O material utilizado compreendeu rejeito oriundo de tratamento na Usina de Triagem e Compostagem localizada na

Estação de Transbordo do Caju. Na Usina, o resíduo sólido urbano "*in natura*" (Figura 1) passa por um processo no qual há uma separação manual com o auxílio de esteiras, dos materiais com valor comercial (plástico, papelão, garrafas PET, latas de alumínio, etc.), à exceção dos metais que são separados pelo processo de indução magnética. Na Figura 2A é possível visualizar o processo de peneiramento. Em seguida, é feita a homogeneização e disposição do material não reciclável em leiras de compostagem ao ar livre (Figura 2B). O rejeito compostado obtido é então finalmente peneirado. As amostras foram confeccionadas com o material peneirado conforme a estrutura apresentada na Figura 1. O peneiramento final e material analisado podem ser observados na Figura 2.

Figura 1 – Vista do processo de separação dos materiais recicláveis na Usina do Caju



Fonte: ALMEIDA (2011).

Nota: (a) e (b) Garra para coleta do lixo; (c) Esteira utilizada na separação dos recicláveis; (d) Material reciclável já separado.

Figura 2 – Pilha de composto recém peneirado na Usina de Tratamento do Caju e Composto utilizado nas amostras

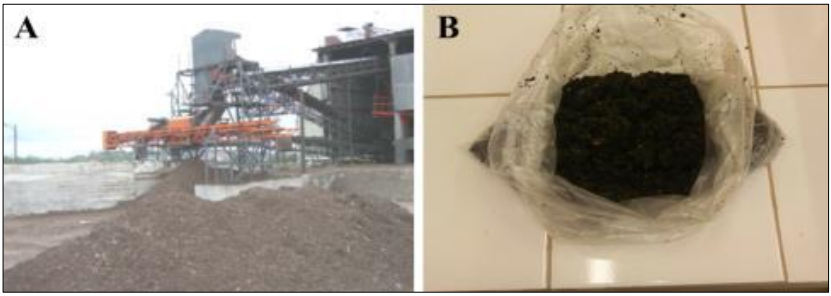


Tabela 1 – Composição gravimétrica do lixo – Município do Rio de Janeiro- 2004 – 2010

Componentes (%)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Recicláveis	**29,20**	**29,33**	**28,85**	**32,67**	**36,12**	**37,94**	**38,15**
Papel - Papelão	10,32	10,95	11,42	12,12	14,57	14,11	14,83
Plástico	15,01	14,65	14,08	17,04	17,75	20,09	19,60
Vidro	2,30	2,29	1,88	2,03	2,28	2,05	2,46
Metal	1,57	1,44	1,48	1,48	1,52	1,69	1,26
MatériaOrgânica	**61,90**	**65,27**	**64,63**	**59,29**	**58,96**	**56,76**	**55,99**
Rejeitos	**8,90**	**5,40**	**6,51**	**8,05**	**4,92**	**5,30**	**5,86**
Inerte total	1,20	0,51	0,60	1,05	0,86	0,46	0,98
Folha / flores	3,30	1,00	2,19	2,37	1,11	1,58	1,66
Madeira	0,58	0,46	0,38	0,29	0,29	0,37	0,26
Borracha	0,21	0,27	0,43	0,33	0,27	0,30	0,25
Pano - Trapo	1,92	1,82	1,98	2,67	1,74	1,79	1,93
Couro	0,26	0,24	0,00	0,27	0,24	0,14	0,14
Osso	1,43	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Coco	...	1,07	0,91	1,05	0,30	0,48	0,37
Vela / parafina	...	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00
Eletro/ Eletrônico	...	...	...	...	0,08	0,16	0,27
Total (%)	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**
Peso Específico(kg/m³)	152,27	155,22	157,38	153,70	136,14	129,23	110,45
Teor de Umidade (%)	77,13	47,22	61,06	68,06	60,47	41,89	...
Peso da amostra (kg)	...	1.315,33	1.455,13	1.228,34	3.705,82	3.739,84	1.194,02
Conteineres	...	...	117,00	...	285,00	121,00	129,00

Fonte: Comlurb (2011).

É importante ressaltar que a composição dos resíduos a serem testado interfere nos resultados, como por exemplo, o intercepto de coesão depende muito da quantidade de plástico da amostra. A composição gravimétrica do resíduo utilizado encontra-se na Tabela 1.

Ensaio Triaxial

Os ensaios foram realizados com o auxílio do equipamento da GEOCOMP (Flow Trac-II) que permite que as fases de saturação por contrapressão, consolidação e ruptura sejam programadas distintamente, de forma a controlar toda a operação de ensaio e aquisição de dados de uma só vez, diminuindo consideravelmente o tempo de acompanhamento do técnico.

O equipamento utilizado é composto por uma prensa eletromecânica com capacidade de 50 kN (Figura 3), com visor e controles digitais que permite seu uso individualmente ou acionada por sistema de aquisição de dados que controla a velocidade de carregamento. As medidas de deslocamento são registradas por um transdutor de deslocamento com curso de 75 mm, acoplado ao prato inferior da prensa. Na parte superior da prensa é fixado um transdutor de força com capacidade de 45 kN, onde são registradas as forças de carregamento aplicadas à amostra.

A pressão confinante (s_3) e a contra-pressão (u_c), são aplicadas individualmente por módulos de pressão, que também podem ser acionados individualmente de forma mecânica ou pelo sistema de aquisição de dados, utilizando os softwares programados adequadamente para os ensaios. As pressões são registradas por um transdutor de pressão com capacidade de 1350 kPa, conectado a um reservatório de água, cilíndrico e metálico, com capacidade de armazenamento de 220 ml, comandado por duas válvulas solenóides que controlam o fluxo de entrada e saída de água.

A célula triaxial suporta até 1200 kPa de pressão, permitindo que sejam ensaiadas amostras com 50,8 e 76 mm de diâmetro (Figura 3 e Figura 4).

O sistema de aquisição de dados converte o sinal analógico em digital por meio de um conversor A/D, onde são lidos por um microcomputador interligado aos módulos de pressão e a prensa de carregamento. O software TRIAXIAL utilizado permite que todas as operações de ajustes da prensa como aplicação das pressões na fase de saturação, adensamento (isotrópico e anisotrópico), e ruptura (velocidade de carregamento) sejam inseridas no programa de uma só vez. O programa acompanha em tempo real todas as fases, gerando gráficos e tabelas com os parâmetros obtidos no ensaio.

Figura 3 – Prensa eletromecânica

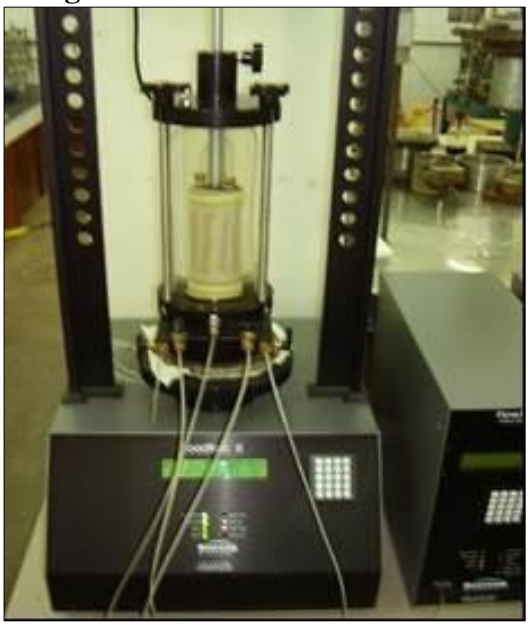
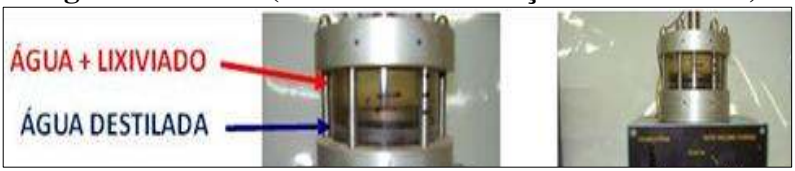


Figura 4 – Célula triaxial desmontada



Com o objetivo de preservar o equipamento das condições químicas de agressividade da mistura da água do ensaio com o resíduo, foi desenvolvida uma adaptação à configuração original do sistema utilizando uma câmara para transferência de pressão, permitindo a troca dos fluidos no ensaio, de forma a evitar contato de água contaminada pelo composto com o equipamento. Foi usado um medidor de variação volumétrica entre a célula triaxial e o equipamento, que desempenhou a função protetora do equipamento e permitiu o desenvolvimento do trabalho, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – MVV (Medidor de Variação Volumétrica)



Metodologia dos ensaios

Foram realizados ensaios triaxiais do tipo CD, em amostras de composto de RSU, de acordo com a norma técnica ASTM D4767/2002. Nos primeiros ensaios o material foi compactado com o ajuste para umidade ótima e com a composição original, no intuito de obter um parâmetro para futuras investigações acerca da influência da granulometria na resistência ao cisalhamento.

Os corpos de prova foram preparados com dimensões médias de 12cm de altura e 5,08cm de diâmetro, para as amostras totais, compactados manualmente com o auxílio de um pistão confeccionado especialmente para o molde tripartido utilizado. Depois de moldados, os corpos de prova foram identificados, envolvidos em sacos plásticos e dispostos em um isopor posteriormente guardado em câmara úmida com o objetivo de manter a umidade desejada para os ensaios. As tensões confinantes aplicadas foram de 100, 150, 200 e 300 kPa.

Para a confecção das amostras foram utilizados moldes tripartidos de duas e três polegadas conforme o exposto na Figura 6.

Figura 6 – Componentes do molde tripartido



Após a execução dos ensaios com ajuste para umidade ótima, foi realizada uma segunda fase de ensaios triaxiais CU e CD, com as

granulometrias separadas em partículas menores que 2mm, entre 2mm e 9mm e maiores que 9mm. Os corpos de prova foram preparados com dimensões médias de 12cm de altura e 5,08cm de diâmetro para as duas primeiras granulometrias e 15cm de altura e 7,5cm de diâmetro para a terceira analisada. As tensões confinantes aplicadas nesta segunda fase foram de 25, 50, 100 e 200 kPa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais drenados das amostras total, x <2mm, 2mm < x < 9mm e x > 9mm, realizados no composto da Usina de Compostagem do Caju, utilizando o equipamento GEOCOMP (FlowTrac-II), no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Figura 7a – Curva Tensão x Deformação (partículas de amostra total)

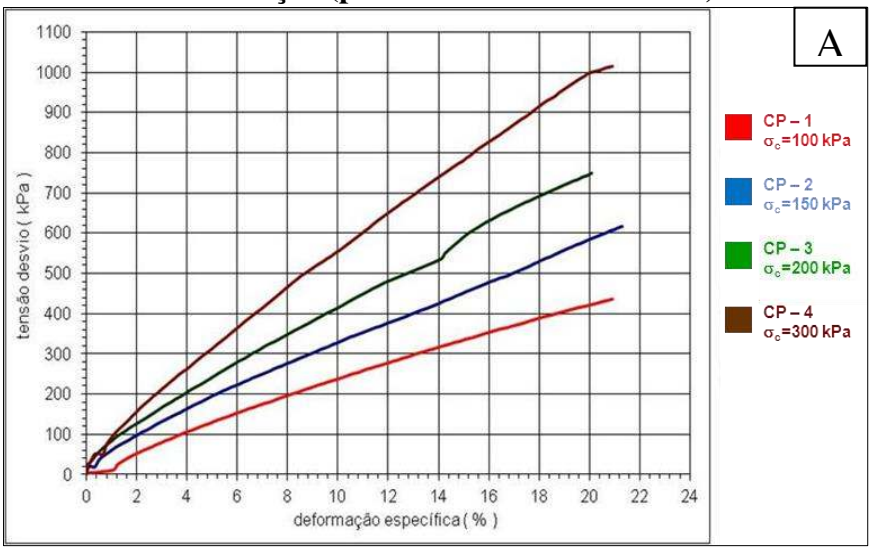


Figura 7b – Envoltória de tensões (partículas de amostra total)

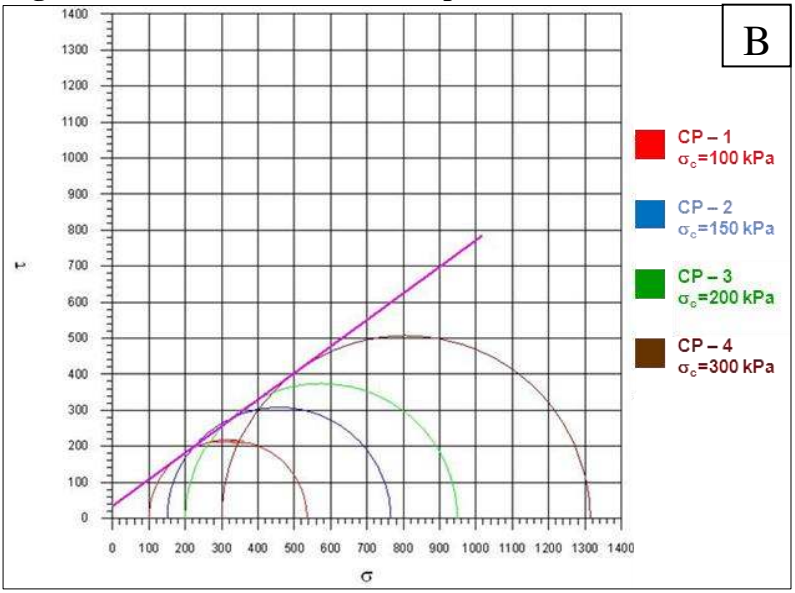


Figura 7c – Curva deformação vol. x deformação específica (partículas de amostra total)

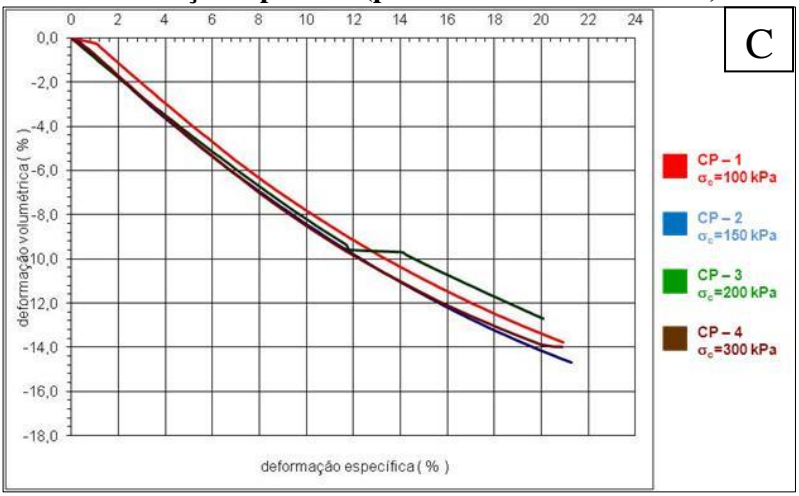


Figura 8a – Curva Tensão x Deformação (partículas com dimensão x<2mm)

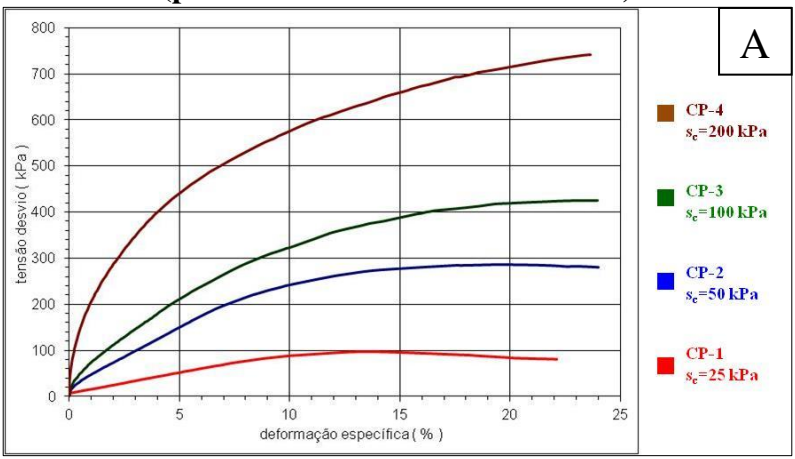


Figura 8b - Envoltória de tensões (partículas com dimensão x<2mm)

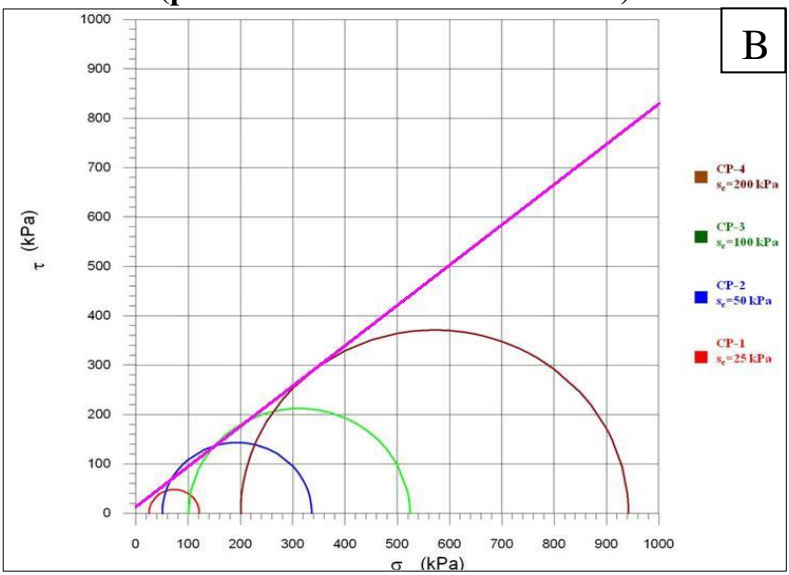


Figura 8c - Curva deformação Vol. x deformação esp. (partículas com dimensão x<2mm)

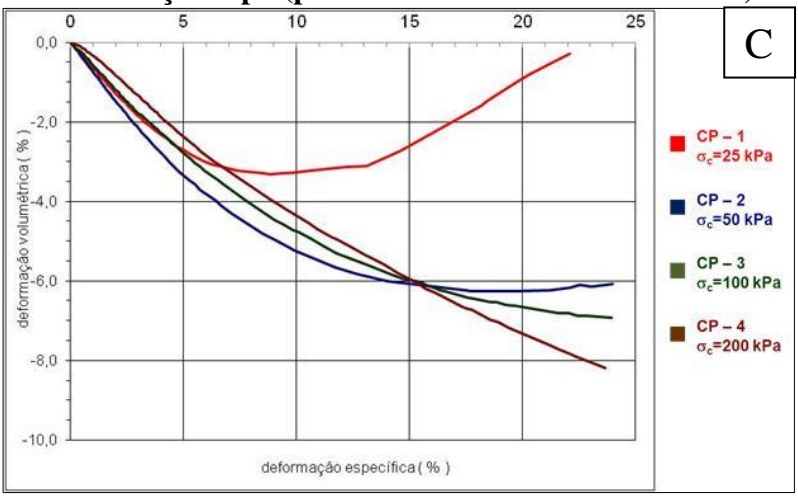


Figura 9a – Curva Tensão x Deformação (partículas com dimensão 2mm < x < 9mm)

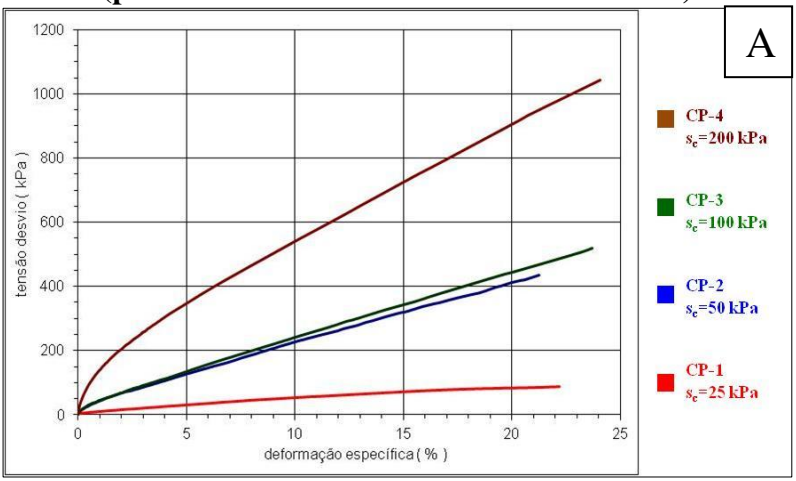


Figura 9b – Envoltória de tensões (partículas com dimensão 2mm < x < 9mm)

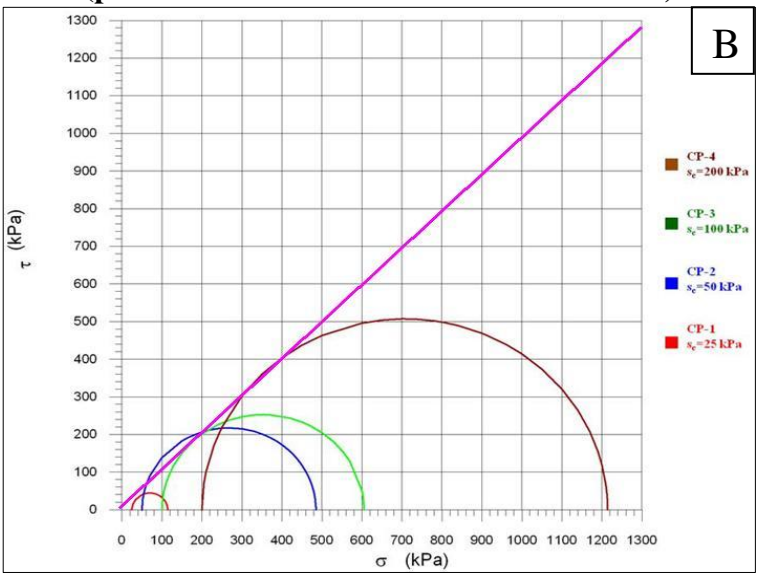


Figura 9c – Curva deformação Vol. x deformação específica (partículas com dimensão 2mm < x < 9mm)

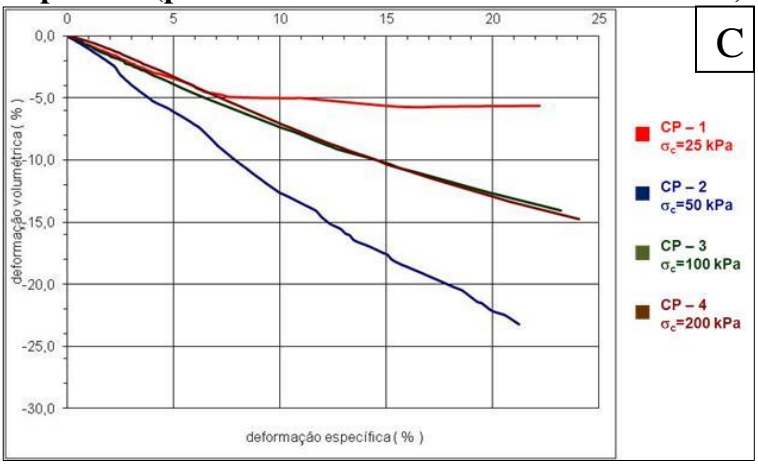


Figura 10a – Curva Tensão x Deformação (partículas com dimensões x > 9mm)

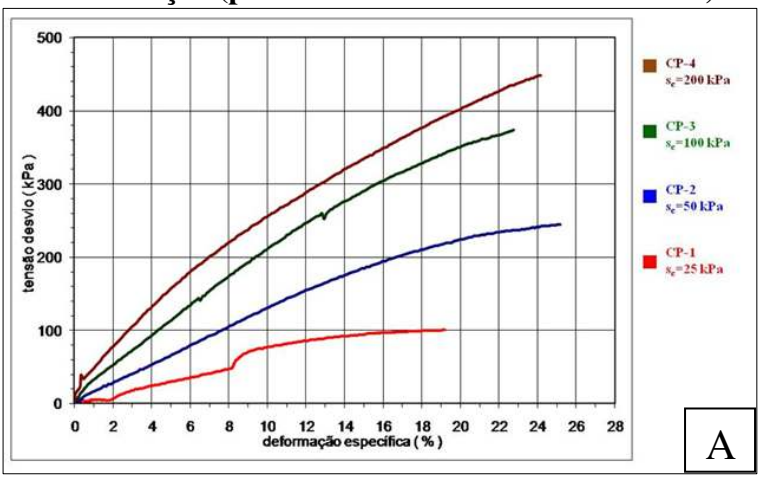


Figura 10b – Envoltória de tensões (partículas com dimensões x > 9mm)

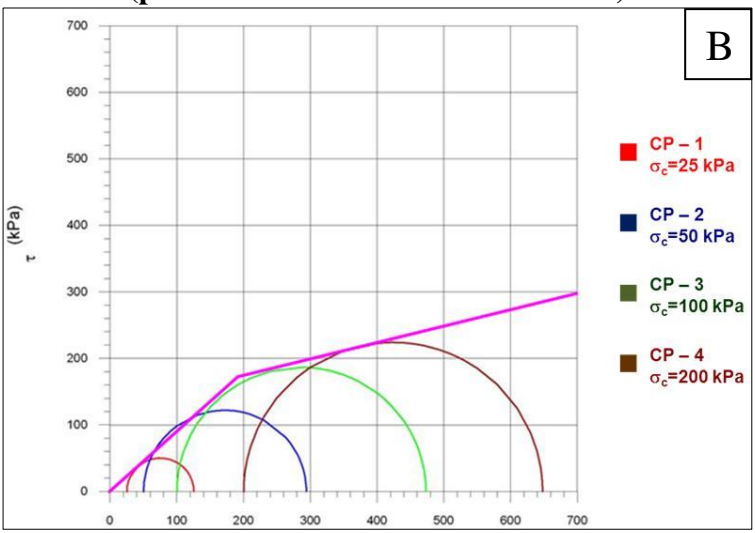
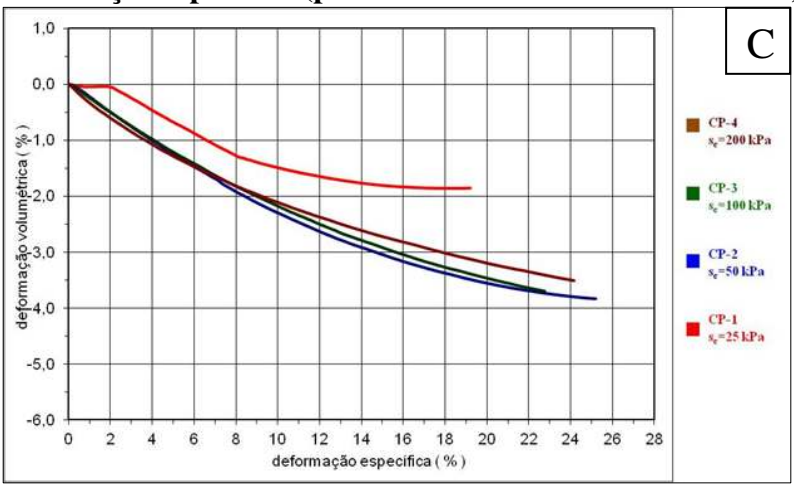


Figura 10c – Curva deformação Volumétrica x deformação especifica (partículas com dimensões x > 9mm)



Na fase de cisalhamento, a amostra original, sem a separação granulométrica, mostrou uma variação volumétrica homogênea, com valores próximos, mesmo com diferentes tensões confinantes. É possível observar tal comportamento em ensaios drenados de areias fofas e argilas normalmente adensadas.

Para o composto de granulometria mais fina, x < 2 mm, foi observado em seus gráficos um comportamento bem próximo ao dos solos granulares; pois em baixas tensões confinantes, este material, supostamente fofo, pode se comportar como compacto, ou seja, o seu comportamento não depende apenas do índice de vazios, mas sim de uma combinação entre índice de vazios e tensão confinante.

Na Figura 9 é possível observar um comportamento altamente compressível do material principalmente com o aumento da granulometria das amostras, com variações volumétricas expressivas para as tensões confinantes aplicadas nos ensaios.

No caso das amostras de partículas maiores que 9 mm, a envoltória de resistência mostra uma tendência bilinear em seu traçado. A proposta de envoltória bilinear em resíduos foi desenvolvida por Kölsch (1993) e testada por Borgatto *et al*. (2014) para resíduos pré-tratados da Alemanha, por ensaios de cisalhamento direto e ensaios de tração a grandes dimensões, fornecendo envoltórias de resistência ao cisalhamento com duas propriedades principais – o atrito, proveniente dos componentes granulares e a resistência à tração**,** advinda dos componentes fibrosos. Observa-se que o aumento de fibras induz a um maior ângulo de resistência à tração e, consequentemente, a um maior reforço advindo das fibras na resistência final da amostra ao cisalhamento. No entanto, aliado a esta análise, de acordo com o exposto sobre a participação das fibras em dimensões e quantidade, tem-se o fato de que para os resíduos pré-tratados com tamanho máximo de partícula de 60 mm, o teor de componentes fibrosos cai abaixo de 5%, o que leva a praticamente a perda do reforço adicional na resistência ao cisalhamento advindos das fibras. Isto posto, como nesta pesquisa, o composto de RSU estudado tem uma granulometria máxima de 22 mm, não é possível, sem os ensaios explicados anteriormente, admitir a participação das fibras na característica apresentada pela envoltória.

Na Tabela 2 é apresentado o resumo dos valores encontrados para os parâmetros de resistência analisados.

Como também observado nos resultados dos ensaios com amostras de resíduos frescos, as curvas de resistência ao cisalhamento das amostras crescem com o aumento dos deslocamentos horizontais sem apresentarem um comportamento de formação de ponto claro de ruptura.

A utilização do critério de Mohr Coulomb para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento mostrou-se adequada no caso dos compostos de resíduos sólidos urbanos estudados, onde as curvas obtidas pelos ensaios

apresentaram um comportamento convencional, sem pico de ruptura conforme outras pesquisas realizadas para resíduos sólidos e material pré-tratado.

Tabela 2 – Resumo dos valores dos parâmetros de resistência obtidos para os ensaios triaxiais drenados de todas as amostras analisadas

Parâmetros de Resistência		Granulometria
Φ (°)	36	ORIGINAL
	40	x < 2mm
	45	2mm < x < 9mm
	41	x > 9mm
c (kPa)	37	ORIGINAL
	20	x <2mm
	10	2mm < x < 9mm
	10	x > 9mm

Como também observado nos resultados dos ensaios com amostras de resíduos frescos, as curvas de resistência ao cisalhamento das amostras crescem com o aumento dos deslocamentos horizontais sem apresentarem um comportamento de formação de ponto claro de ruptura.

Os resultados do composto de RSU nos ensaios drenados foram compatíveis com os resultados obtidos por Gabr e Valero (1995), que encontraram valores entre 42 e 55 kPa, e Reddy *et al.* (2011) que obtiveram valores entre 21 e 57 kPa para o intercepto de coesão. Neste trabalho observou-se que o mesmo diminui

sensivelmente com o aumento da granulometria, fruto da diminuição de contato entre as partículas com o aumento do tamanho das mesmas. Já o parâmetro ângulo interno de atrito permanece em um valor dentro da faixa apresentada em publicações anteriores como de Gabr e Valero (1995), Nascimento (2007), Calle *et al*. (2011), Zekkos *et al*. (2006) e Reddy *et al*. (2011). Neste caso não foi possível, segundo os ensaios realizados, estabelecer qualquer relação entre as granulometrias testadas e os valores apresentados para o parâmetro ângulo interno de atrito, visto que estes se apresentaram muito próximos.

CONCLUSÕES

A utilização do equipamento GEOCOMP adaptado com o medidor de variação volumétrica foi bem sucedida na proteção do equipamento e na determinação de parâmetros para análise de resistência ao cisalhamento em compostos oriundos de RSU. Os resultados obtidos ficaram dentro dos intervalos apresentados por pesquisadores do assunto como Caicedo *et al*. (2002), Machado *et al*. (2010), Nascimento (2007), Zekkos (2005) e Karimpour Fard *et al*. (2011), considerando um critério de ruptura de 20% de deformação.

A presença de elementos fibrosos nos resíduos induz a um aumento do ângulo de resistência à tração e, consequentemente, a um maior reforço advindo das fibras na resistência final da amostra ao cisalhamento, no caso dos compostos de RSU com tamanho máximo de partícula de 60 mm. Quando o teor de componentes fibrosos caiu abaixo de 5%, o reforço adicional na resistência ao cisalhamento advindo das fibras foi desprezível.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. R.. **Estudo de Comportamento de Barreira Capilar em Aterros de Resíduos** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D476 02**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. West Conshohocken: ASTM International, 2002.

BORGATTO, A. V. A. *et al*. "Influence of the Fibre Component of Soft Plastic on Shear Strength Parameters of Pre-Treated Municipal Solid Waste". **Soils and Rocks**, vol. 37, 2014.

CAICEDO, B. *et al*. "The landslide of Doña Juana landfill in Bogota. A case study". **Environmental Geotechnics,** vol. 1, 2002.

CALLE, J. A. *et al*. "Caracterização e comportamento mecânico de resíduos sólidos pré-tratados". **Revista Geotecnia**, vol. 116, 2011.

COMLURB – Companhia Municipal de Limpeza Urbana. **Caracterização Gravimétrica e Microbiológica dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município do Rio de Janeiro, RJ**. Rio de Janeiro: COMLURBE, 2011.

FUCALE, S. P. *et al*. "Study of the mechanical behaviour of MBT-waste". **Annals of Sardinia 2007: Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium**. Cagliari: Environmental Sanitary Engineering Centre, 2007.

GABR, M. A.; VALERO, S. N. "Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste". **Geotechnical Testing Journal**, vol. 18, n. 2, 1995.

GRISOLIA, M. *et al*. "The Use of Triaxial Tests for the Characterization of MSW". **Annals of Sardinia: Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium**. Cagliari: Environmental Sanitary Engineering Centre, 1995.

JESSBERGER, H. L.; KOCKEL, R. "Determination and Assessment of Mechanical Properties of Waste Materials". **Annals of Sardinia: Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium**. Cagliari: Environmental Sanitary Engineering Centre, 1993.

KARIMPOUR-FARD, M. *et al.* "A Laboratory Study on the MSW Mechanical Behavior in Triaxial Behaviour in Triaxial Apparatus". **Waste Management**, vol. 31, 2011.

KÖLSCH, F. "Material values for some mechanical properties of domestic waste". **Annals of Sardinia: Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium**. Cagliari: Environmental Sanitary Engineering Centre, 1993.

KONIG, D.; JESSBERGER, H. L. "Waste Mechanics". **Environmental Geotechnics**, n. 5, 1997.

MACHADO, S. L. *et al*. "Evaluation of the Geotechnical Proprieties of MSW in Two Brasilian Landills". **Waste Management**, vol. 30, 2010.

MACHADO, S. L.; KARIMPOUR-FARD, M. "A Study on the Effects of MSW Fiber Content and Solid Particles Compressibility

on its Shear Strength Using a Triaxial Apparatus". **Soils and Rocks**, vol. 34, n. 2, 2011.

MAHLER, C. F. *et al*. "Um novo equipamento para a determinação de parâmetros geotécnicos". **Revista Geotecnia**, vol. 123, 2011.

MAHLER, C. F.; DE LAMARE NETO, A. "Effect of fibre on shear strength of residue from mechanical-biological pre-treatment of waste". **International Journal of Environment and Waste Management**, vol. 1, n. 1, 2006.

MÜNNICH, K. *et al*. "Pilot project of mechanical-biological treatment of waste in Brazil". **Waste Management**, vol. 26, n. 2, 2006.

NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento Mecânico dos Resíduos Sólidos Urbanos** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). São Carlos: UFSCar, 2007.

REDDY, K. R. *et al*. "Geotechnical Proprieties of Municipal Solid Waste at a Different Phases of Biodegradation". **Waste Management**, vol. 31, 2011.

ZEKKOS, D. **Evaluation of Static and dynamic Properties of Municipal Solid Waste** (Doctoral Dissertation of Civil and Environmental Engineering). Berkeley: UC Berkeley, 2005.

ZEKKOS, D. *et al*. "Unit Weight of Municipal Solid-Waste". **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 132, n. 10, 2006.

CAPÍTULO 2

Parâmetros Físico-Químicos na
Delimitação de Contaminação por Lixiviado
em Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos Urbanos

PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NA DELIMITAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO POR LIXIVIADO EM ÁREAS DEGRADADAS POR RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Júlia Neves da Silva

Luciano Soares da Cunha

Nicole Evelyn Carvalho de Oliveira

A contaminação dos recursos hídricos superficiais, subterrâneos e solos é um problema ambiental grave com potencial crescente quando constatado que as áreas destinadas a deposição de resíduos sólidos urbanos não se encontram adequadamente preparadas para captar, drenar e tratar os lixiviados gerados pela decomposição do material orgânico aterrado. O volume de lixiviado produzido é acrescido por parte da precipitação que infiltra a camada final de cobertura de solo e/ou as camadas intermediárias de solo durante a operação nas frentes de aterramento dos resíduos. Esse lixiviado, popularmente denominado de chorume, é um líquido escuro, de mau cheiro e com composição complexa, a qual é dependente dos estágios de decomposição da matéria orgânica, da natureza dos resíduos lançados, das condições ambientais e da idade e modo de operação da área de aterramento (DEL REY *et al*., 2020).

Devido a sua natureza complexa, uma grande diversidade de parâmetros físicos e químicos são utilizados na identificação e delimitação (ATTA *et al*., 2014; JIANG *et al*., 2019; YA *et al*., 2018; NEVONDO *et al*., 2019; MOR *et al*., 2005; ENEKWECHI; LONGE, 2007; GERAVAND *et al*., 2017; FALCÃO *et al*., 2013; ZHAI *et al*., 2019; AHMED *et al*., 2018; NAGARAJAN *et al*., 2012; NEGI *et al*., 2018; ABU-ZUID; EL-SALAM, 2014; CHIDICHIMO

et al., 2019; RAPTI-CAPUTO; VACCARO, 2006; CHRISTENSEN *et al*., 1997; KJELDSEN *et al*., 1997; VODYANITSKII, 2016; REYES-LÓPEZ *et al*., 2008; FATTA *et al*., 1999; JENSEN *et al*., 1998; BOATENG *et al*., 2018; HEATON *et al*., 2014; LOPEs *et al*., 2012; STEFANIA *et al*., 2018; MOHAMMADZADEH *et al*., 2005; PALMA *et al*., 2016; NORTH *et al*., 2005; ALEMAYEHU *et al*., 2016; AMORELLO *et al*., 2016; SCHOLL *et al*., 2006; JUN *et al*., 2008; SUN *et al*., 2019; BANCH *et al*., 2019; MANGIMBULUDE *et al*., 2008; PAPADOPOULOU *et al*., 2007; TSANIS, 2005; SZYMAŃSKI *et al*., 2018; DANG *et al*., 2009; PUJIINDIYATI *et al*., 2018; ALEYA; GRISEY, 2016; VILOMET *et al*., 2001; BAGHERI *et al*., 2017; ALSLAIBI *et al*., 2010; AN *et al*., 2013) da área contaminada, envolta dos limites das áreas degradadas pela deposição dos resíduos.

Neste sentido, o objetivo principal do estudo foi avaliar a evolução da utilização dos parâmetros físico-químicos e determinar quais parâmetros são imprescindíveis na delimitação de contaminação por lixiviado de resíduos sólidos urbanos foi realizada uma revisão sistemática de literatura com ênfase em metanálise para a compreensão do estudo. As variações sazonais, principalmente no que se diz respeito ao regime de chuvas, alteram parâmetros geoquímicos e acabam influenciando na estabilidade biológica dos aterros.

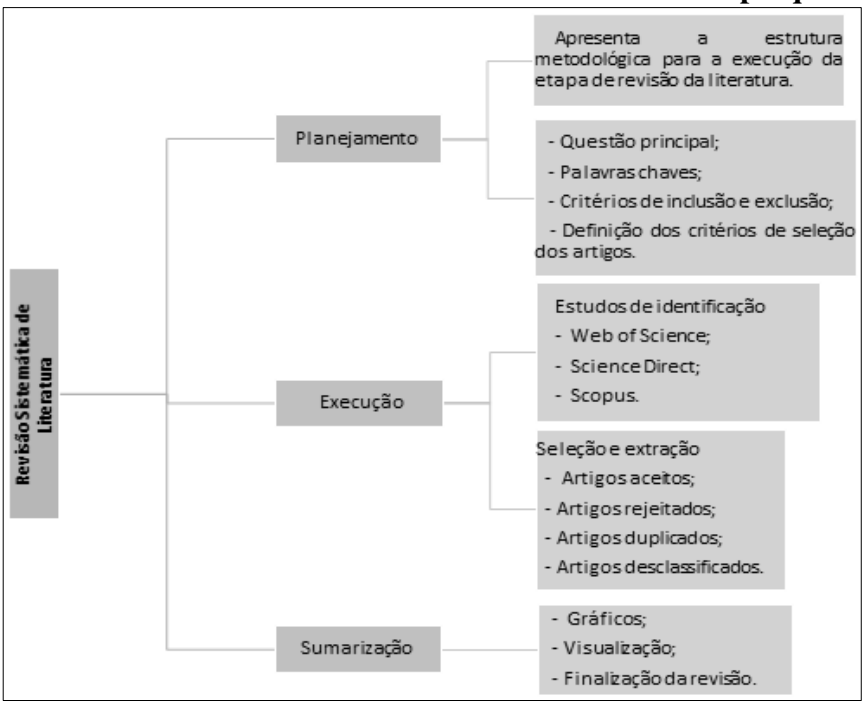
A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) é uma técnica de investigação científica com objetivo de reunir, avaliar criticamente e conduzir uma síntese dos resultados de múltiplos estudos primários. Permite, dentro de uma área do conhecimento, identificar, avaliar e interpretar os estudos mais relevantes em uma temática com a produção de uma síntese crítica das principais evidências, evolução e, talvez o mais importante, ressalta temas negligenciados que podem indicar a proposição de futuros temas no processo de tomada de decisão para novas pesquisas. Revisões sistemáticas da literatura

concentram a identificação de pesquisas anteriores; avaliação dos resultados sistematicamente e com recursos estatísticos, por meio de síntese. Tem como principais características possuir um conjunto de objetivos claramente pré-definidos, critérios de elegibilidade pré-definidos, ser explícita e reprodutível e reduzir a margem de tendência na condução de uma revisão de literatura, muito comum em revisões que não seguem essa sistemática (PETTICREW; ROBERTS, 2012). Quando a revisão sistemática apresenta uma análise estatística com o objetivo de integrar os resultados, recebe a denominação de metanálise ou enfoque metanalítico (MARIANO; SANTOS, 2017).

Compreende três etapas de desenvolvimento (Planejamento, Execução e Documentação). O Planejamento tem início com a definição do protocolo que por sua vez, especifica todos os passos do método que serão seguidos. A definição da questão principal e demais parâmetros orientadores da revisão, neste momento, garante com antecedência que os métodos empregados serão padronizados e com redução do risco de viés ("Systematic Reviews: CRD"s guidance for undertaking reviews in health care", 2009). A Execução compreende objetivamente o cumprimento do protocolo por completo onde inicia-se pelo acesso às bases de dados com a utilização das palavras-chaves em processos de buscas avançadas por meio de *strings*. A Documentação apresenta o produto da revisão que deve possuir um conjunto mínimo de itens (*Checklist*) compondo o documento final dos relatórios (GALVÃO; PANSANI *et al*., 2015). As etapas envolvidas são baseados em pesquisas por evidências tendo como principais etapas (GOMERSALL; JADOTTE *et al*., 2014), (Figura 1): Elaboração do Protocolo da revisão que contém a formulação da Questão Principal, Palavras-Chaves, Critérios de Inclusão/Exclusão e Seleção da Bases de Dados; (Busca dos estudos primários (artigos) nas Bases de Dados; Seleção dos estudos primários (baseados nos critérios de inclusão/exclusão); Extração de dados usando uma ficha-síntese

elaborada paralelamente ao protocolo; Análise e Síntese dos dados extraídos focados na formulação da resposta para a Questão Principal; Sugestão temática para novas pesquisas.

Figura 1 – Fluxograma sintetizando as etapas de Revisão Sistemática de Literatura desenvolvida nesta pesquisa



MATERIAIS E MÉTODOS

Para o planejamento e execução da revisão optou-se pela utilização do software de domínio público StArt (Lapes/UFScar)

versão 3.3 betas (http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool). Apesar de opções aparentemente com interfaces mais amigáveis e com perspectiva de possuir mais ferramentas, optou-se pelo apoio e fortalecimento do uso de um software nacional, desenvolvido em uma Universidade Federal. Esse software está estruturado de uma forma didática e objetiva, aplicando etapas bem definidas de acordo com um protocolo previamente elaborado, no caso desse estudo, apresenta a estrutura metodológica para a execução da etapa de revisão da literatura sobre o uso de parâmetros físico-químicos na delimitação de contaminação por lixiviação em áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos.

Os passos executados nesta pesquisa são os mesmos passos a serem seguidos no StArt, praticamente, onde inicia-se pela (i) definição do protocolo de pesquisa; (ii) importar os dados dos artigos obtidos nas bases de dados; (iii) seleção dos artigos; (iv) classificação dos artigos a serem lidos na íntegra; (v) sumarização por meio de gráficos com ênfase estatística dos resultados

Planejamento

O planejamento é a parte inicial do processo de revisão sistemática, é nesse momento que é feito o protocolo, um documento orientador que contém a Questão Principal formulada, Palavras-Chaves, Critérios de Inclusão/Exclusão e Seleção da Bases de Dados. Após a definição da questão principal a definição das palavras-chaves é uma consequência, mas, na revisão sistemática é importante a definição de combinação de palavras-chaves ou expressão de palavras com o uso de operadores booleanos (AND, OR etc.) para serem utilizados nas buscas avançadas das bases de dados selecionadas. É necessário definir estratégias de busca por meio dos delimitadores: período, espaço geográfico, tipo de

documento etc. A definição dos critérios de inclusão ou exclusão dos artigos serão utilizados pelo(s) revisores internos, normalmente, um membro da equipe de pesquisa, para auditar os documentos identificados nas bases de dados e avaliar sua afinidade com o tema da revisão sistemática. Os critérios de inclusão/exclusão tornam-se um filtro efetivo para evitar-se a tendência de inclusão excessiva e desnecessária de artigos de áreas afins e ao mesmo tempo não pertinentes à pesquisa em questão. Permite que a abrangência do assunto a ser estudado determina o procedimento de amostragem, ou seja, quanto mais amplo for o objetivo da revisão mais seletiva deverá ser o revisor quanto à inclusão da literatura a ser considerada. O procedimento de inclusão e exclusão de artigos deve ser conduzido de maneira criteriosa e transparente, uma vez que a representatividade da amostra é um indicador da profundidade, qualidade e confiabilidade das conclusões finais da revisão. O ideal seria a inclusão de todos os artigos encontrados, ou até mesmo a aplicação de uma seleção aleatória. Quando isto não é possível, o revisor deve deixar claro quais são os critérios de inclusão e exclusão adotados para a elaboração da revisão. A seleção das bases de dados a ser utilizada está intrinsecamente relacionada às grandes áreas de conhecimento que a pesquisa está inserida. A recomendação geral é selecionar no mínimo duas, sendo mais coerente com a sistemática de uma revisão dessa natureza selecionar todas as bases de dados na grande área de conhecimento da pesquisa em questão.

Protocolo de pesquisa

No protocolo define-se a questão principal da revisão, palavras-chave, bases de dados e os critérios de inclusão/exclusão para a seleção e classificação dos artigos (Quadro 1). A questão principal formulada para a pesquisa foi: Quais os parâmetros físico-

químicos são utilizados para um monitoramento sazonal *in situ* em áreas degradadas por RSU? As palavras-chave foram definidas pelos pesquisadores e estruturadas na *string* (landfill AND groundwater AND contamination), após ajustes e testes preliminares nas bases de dados. Essa etapa também pode ser realizada por uma análise prévia de alguns artigos que abordam o tema de forma menos sistematizada em bases de dados menos restritivas como o Google Acadêmico.

Quadro 1 - Parâmetros do Protocolo definidos para a pesquisa

Parâmetros	Identificador
Membros do Grupo de Pesquisa	Revisor A e Revisor B
Tipo de Pesquisa	Investigações em campo
Palavras-Chave estrutura em *string*	(landfill AND groundwater AND contamination)
Base de Dados	● Web of Science/Scopus/Science Direct
Delimitadores	● Ano de publicação: 1990-2020 ● Tipo de publicação: Apenas artigos disponíveis *online*. ● Idioma: Inglês. ● Área da pesquisa: sem restrição.
Critérios de: Inclusão (I) Exclusão (E)	● (I) Serão incluídos trabalhos que utilizem os parâmetros FQ em pesquisas de monitoramento ou identificação de contaminação por RSU. ● (I) Serão incluídos trabalhos publicados e disponíveis integralmente nas bases científicas buscadas. ● (I) Serão incluídos trabalhos oriundos de pesquisas sobre contaminação por RSU. ● (E) Serão excluídos os trabalhos que não façam uso de parâmetros FQ. ● (E) Serão excluídos os trabalhos que utilizem os parâmetros FQ em outras pesquisas ● (E) Serão excluídos os trabalhos que não apresentam resumo/abstract ● (E) Serão excluídos os trabalhos que não apresentam DOI.

Fonte: Elaboração própria.

Essa etapa se refere a busca nas bases de dados, nesse caso, foram realizadas nas bases de dados da Web of Science, Scopus and Sciencedirect considerando os critérios de busca por *string* junto com as palavras chaves e os outros critérios delimitadores mencionados na estrutura no Quadro 1. Como resultado das buscas, obteve-se um total de 176 artigos: 27 na Science Direct, 18 no Scopus e 131 na Web of Science. Para cada base de dados, as buscas contendo o registro do título, abstract e palavras-chave foram exportadas em formato ". bibtex"e importadas no StArt 3.0.3. A etapa de seleção e exclusão dos artigos foi feita por meio da leitura do título, do *abstract* e das palavras-chave e com a utilização dos critérios de inclusão/exclusão classificando-os em aceitos ou rejeitados. Os artigos duplicados/repetidos são classificados automaticamente e referem-se a artigos que aparecem duplicados em uma mesma base de dados devido a referências diferentes do mesmo artigo ou artigos repetidos que aparecem em diferentes bases de dados. Como resultado dessa etapa, 54 artigos foram aceitos para a etapa posterior, 91 foram rejeitados e 31 artigos estavam duplicados. Os artigos selecionados foram divididos em 4 grupos temáticos: métodos analíticos, métodos de remediação, contaminação por lixiviados e modelagem da pluma de contaminação. Neste trabalho só serão mostrados os resultados da fusão dos grupos temáticos métodos analíticos e de contaminação por lixiviados que totalizam 24 artigos selecionados.

RESULTADOS

A visualização da rede dos núcleos de pesquisas sobre a temática é apresentada na Figuras 2a e 2b para o período de 1990-2020 com a análise de coautorias sendo realizada com as publicações. Essa relação reflete como estão estruturadas as redes de

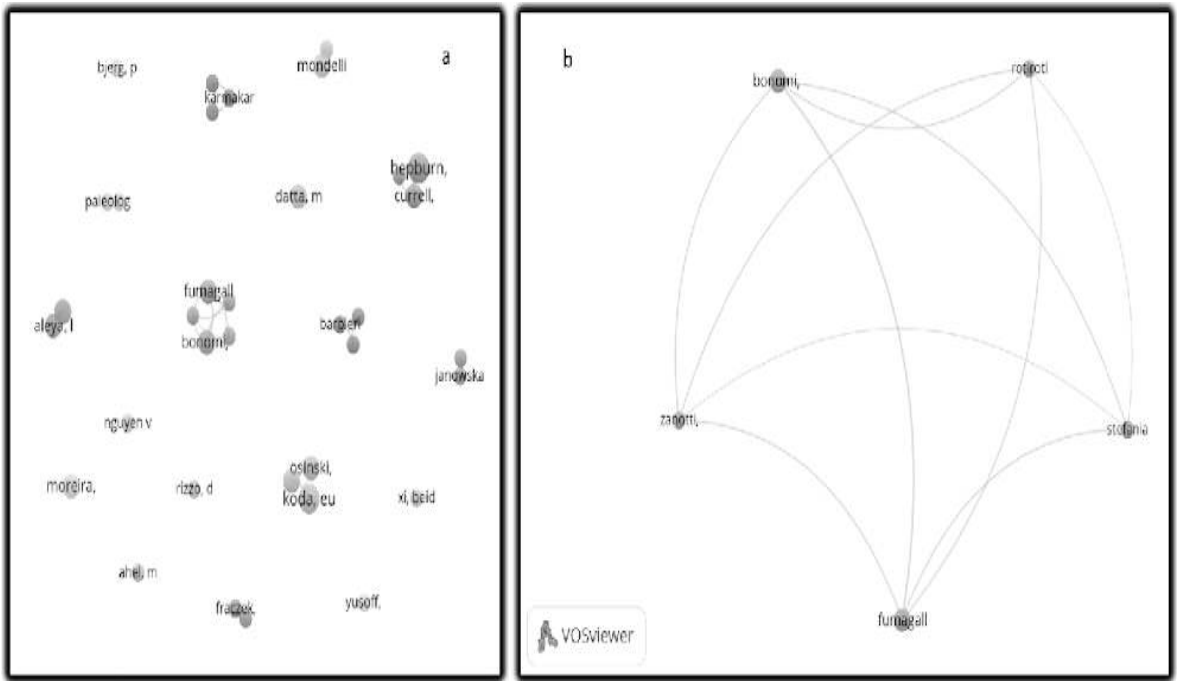
pesquisadores quando considerada no mínimo 03 documentos por autor e no mínimo 01 citação da publicação (Figura 2a). Nesta forma gráfica o tamanho do símbolo reflete o número de publicações. A intensidade das relações está refletida nas espessuras das linhas e na proximidade entre os centros dos núcleos (círculos), não apresentados aqui. Entre os diversos núcleos (*clusters*) identificados, 02 são mais estruturados. Essas relações entre eles são computadas como as mais fortes considerando as autorias como a unidade de análise e o número de publicações e citação como o peso utilizado no cálculo dessas ligações (links), ou na força total dessas ligações (total link strength). A Figura 2b ressalta a composição do Núcleo 1 (*Cluster*) composto por 05 pesquisadores de uma mesma instituição. O Cluster 2 com menos pesquisadores e de outro país tem mais citação individualmente realizada internamente dentro do cluster, mas com menor número total de documentos (não mostrado aqui).

Quadro 2 – Identificação dos núcleos de pesquisadores (clusters) associados em relação à coautoria

Cluster	Pesquisador	Instituição	País
1	Bonomi, T.	Univ. Milano	Itália
1	Fumagalli, L.	Univ. Milano	Itália
1	Rotiroti, M.	Univ. Milano	Itália
1	Stefania, G.	Univ. Milano	Itália
1	Zanoti, C.	Univ. Milano	Itália

Fonte: Elaboração própria.

Figura 2 – Rede de pesquisadores

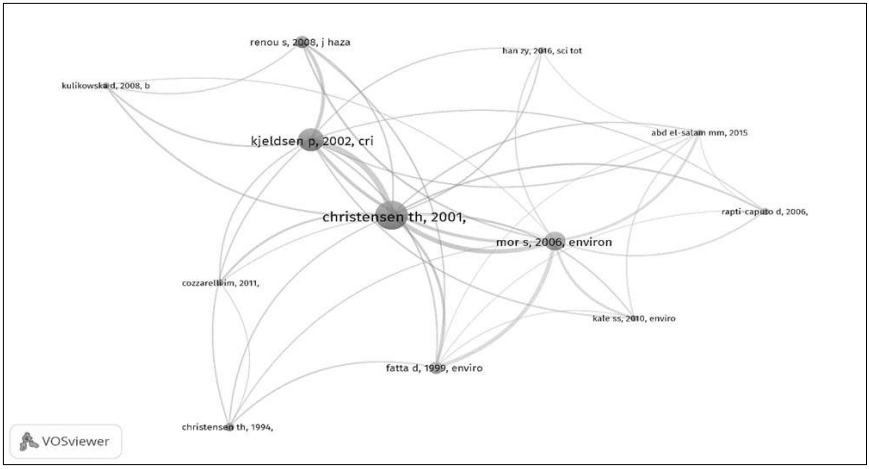


Nota: Figura 2a. Mapa de rede de coautorias entre autores dos artigos selecionados para o período de 1990-2020, elaborado no Voxviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010). Existe um grande número de redes de pesquisa bem estruturada nessa temática, mas, a rede mais estruturada está ressaltada na Figura 2b. A rede de coautoria mais estruturada quando utilizada a força da ligação entre os autores com no mínimo de 03 artigos e 01 citação sobre o tema objeto desta RSL.

As relações de associação e intensidade de coautoria podem ser avaliadas considerando os institutos de pesquisas como a unidade de análise, mas aqui não será apresentado o gráfico correspondente. As informações extraídas desses produtos foram acrescidas no Quadro 2 onde se observa que os núcleos de pesquisadores estão muito concentrados em uma mesma instituição.

Para esse mesmo período foi elaborado o mapa de cocitação (Figura 3) para identificar os autores e/ou artigos relevantes na temática a partir dos documentos selecionados. A unidade de análise considerada foi a cocitação quando um artigo cita dois artigos em comum. Os parâmetros utilizados foram de, no mínimo, 08 cocitações sobre a referência e o peso das relações sendo calculado para o número dessas cocitações (Quadro 3). De forma a não filtrar artigos que possam ser referências de citações, o período utilizado não computou o ano inicial, somente o final, 2020.

Figura 3 – Mapa de intensidade de cocitação de artigos período de 1990-2021



Fonte: Web of Science. Nota: Os trabalhos com maior força total de ligações estão representados por círculos maiores. Essa análise só considera o primeiro autor de cada citação. Essa é uma limitação dos dados exportados a partir do Web of Science.

Dos 12 artigos mais cocitados (Quadro 3), observa-se que 05 (CHRISTENSEN *et al*., 2001; KJELDSEN *et al*., 2002; RENOU *et al*., 2008; KULIKOWSKA, 2008; HAN ZY, 2016); são associados a pesquisas sobre revisões específicas a respeito dos processos biogeoquímicos, variação composicional do lixiviado, tratamento de lixiviado, relação da idade do aterro com composição do lixiviado e avaliação de índices de contaminação, respectivamente. Outros 02 artigos (KALE *et al*., 2010; COZZARELLI, 2011) foram somados aos 54 artigos que atendiam aos critérios de inclusão estabelecidos no protocolo, totalizando assim 56 artigos. Os demais artigos restantes já constavam nos artigos selecionados nas bases de dados.

Quadro 3 – Referência das publicações com no mínimo 20 citações no período de 1990-2021

Referência	Citações	Força total de ligação
CHRISTENSEN, 2001	95	164
MOR, 2006	63	150
KJELDSEN *et al*., 2002	76	147
FATTA, 1999	40	93
RENOU, *et al*., 2008	41	76
KALE *et al*., 2008	21	62
ABD EL-SALAM, 2015	20	61
COZZARELLI, 2011	20	50
RAPTI-CAPUTO, 2006	24	50
HAN ZY, 2016	23	48
KULIKOWSKA, 2008	21	46
CHRISTENSEN, 1994	28	43

Fonte: Web of Science.

As principais informações extraídas nos artigos e nas fichas sínteses foram sintetizadas na Tabela 1, disposta nas duas páginas seguintes. Os itens que estão apresentados nessa tabela foram selecionados observando-se a Questão Principal desta RSL. Implicitamente, esses itens relacionam-se a aspectos diretos da área de estudo (precipitação média anual, tipo de solo/rocha local, tipo de aquífero, área do aterro), a aspectos diretos da RSL (parâmetros físico-químicos medidos *in situ*, íons e outros elementos químicos analisados em laboratório), aspectos diretos à inovação (parâmetros físico-químicos não usuais e outras técnicas multidisciplinares complementares).

Quase a totalidade das pesquisas não apresenta dados claros sobre o tipo de depósito de resíduos sólidos (aterro ou lixão) e, por isso, esse item foi retirado da tabela. Um grande número de pesquisas não apresenta dados relativos à precipitação média anual e tamanho da área do aterro. Os parâmetros físicos Condutividade Elétrica e pH foram utilizados em 97% e 99% das pesquisas, respectivamente. A constatação de que não foram todas as pesquisas a usar esses parâmetros mesmo tendo como objetivo, detectar contaminação por lixiviados, já é um resultado importante dessa revisão. Os parâmetros químicos Oxigênio Dissolvido, íons maiores, metais pesados, compostos nitrogenados foram utilizados em 24%, 80%, 76% e 60%, respectivamente, das pesquisas. A razão DBO/DQO é um parâmetro com baixa utilização nas pesquisas sobre delimitação e monitoramento dessas áreas contaminadas por lixiviado onde somente 48% fizeram uso deste importante parâmetro. O caráter inovador com a inserção de novos parâmetros e/ou o uso de técnicas multidisciplinares nessas pesquisas não está evidenciado, uma vez que 48% e 24% utilizaram algum parâmetro não usual (isótopos estáveis) ou técnicas complementares (geofísica), respectivamente.

Tabela 1 – Síntese dos principais aspectos e parâmetros extraídos nas pesquisas de monitoramento de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por resíduos sólidos urbanos nesta RSL

Referência	Objetivo	PMA (mm)	Material da Base	Aquífero	Área (ha)	CE	pH	OD	IA	CN	DBO/DQO	M	PC	TC	Principais Resultados
ZHAI *et al.*, 2019	Analisar colóides e metais pesados para verificar a contaminação	N.I.	argila siltosa a cascalho arenoso	N.I.	N.I.	sim	sim	sim	K^+, Ca_2^+, HCO_3^- e Cl^-	-	-	Fe total, Mn, As, Hg, Cr, e Cd	-	-	Compreensão da migração de contaminação com colóides
NEVONDO *et al.*, 2019	Determinar a concentração total de mercúrio	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	-	sim	-	-	-	-	Hg	-	-	Identificou as concentrações de mercúrio total com influência de inverno e verão
JIANG *et al.*, 2019	Investigar a hidroquímica de matéria orgânica dissolvida	N.I.	Solo silte argiloso	Poroso - Livre	137.0	sim	sim	-	Cl^-	sim	-	-	COD	EF	A infiltração de lixiviado resulta em diferenças nas características de matéria orgânica nas águas subterrâneas
CHIDICHIMO *et al.*, 2019	Estatística e testes de laboratório para distinguir diferentes fontes	semi-árido	Cascalho e areia	Fraturado-Livre	15.0	-	sim	-	-	-	-	Al, Fe e Mn	-	ME-EE	A metodologia é um instrumento para distinguir a contaminação
ALEMAYEHU *et al.*, 2019	Investigar o impacto do lixiviado na qualidade das águas subterrâneas	N.I.	Folhelho intercalado com Calcáreo	Fraturado-Livre	N.I.	sim	sim	-	K^+, Ca_2^+, HCO_3^- e SO^{-4}, e Cl^-	sim	sim	-	-	-	O impacto do lixiviado é maior na estação chuvosa
NEGI *et al.*, 2018	Avaliar o efeito de 03 aterros em uma mesma região	semi-árido	N.I.	N.I.	N.I.	sim	sim		K^+, Ca_2^+, HCO_3^- e SO^{-4}, e Cl^-	sim	sim	Cr (IV, VI), Cu, Pb, Fe e Zn	-	-	Os níveis elevados de nitrogênio amoniacal e cloreto foram observados
STEFANIA *et al.*, 2018	Apresentar uma metodologia para calcular os níveis limites de proteção	N.I.	Areia e Cascalho	Poroso - Livre	55.0	sim	sim	-	-	sim	sim	Cr (IV, VI), Cu, Pb, Fe e Zn	-	-	O agrupamento de dados hidroquímicos é uma ferramenta fundamental
BOATENG *et al.*, 2018	Avaliar o impacto do lixiviado na qualidade da água subterrânea	165	N.I.	N.I.	N.I.	sim	sim	-	K+, Ca2+, HCO3− e SO−4, PO4 e Cl−	sim	sim	-	Indicadores microbiológicos	Análise multivariada	Concentrações de parâmetros físico-químicos acima dos limites e indicadores bacteriológicos indicam contaminação por lixiviado
AHMED *et al.*, 2018	Projetar uma ferramenta para determinar a vazão segura de extração de água subterrânea	N.I.	N.I.	N.I.	151.0	-	sim	-	-	-	-	As, Ba, Cr, Cu, Pb, Hg, Mo, Ni, Se e Zn	-	-	Mostrou que os metais têm um alto teor no lixiviado e podem ser traçadores
ABD El-Salam, 2015	Avaliar os impactos ambientais por lixiviado em aterro	N.I.	N.I.	N.I.	75.0	sim	sim	-	K+, Ca2+, HCO3− e SO−4, PO4 e Cl−	sim	sim	Cr, Cu, Pb, Ni, e Zn	Orgânicos	-	Resultados confirmaram contaminação de orgânicos, sais e metais pesados
ATTA *et al.*, 2014	Avaliar o impacto do lixiviado na qualidade da água subterrânea	2300	Areia sobre calcáreo fraturado	Fraturado-Livre	N.I.	sim	sim	-	K+, Ca2+, HCO3− e SO−4, PO4 e Cl−	sim	sim	Ag, As, Cd, Cu, Cr3, Cr6, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn, Mn, B, Se, Sn e Ba	Orgânicos	-	Considerável impacto devido a altas concentrações de contaminantes
BARELLA *et al.*, 2013	Evolução da degradação natural da fração orgânica	N.I.	Argilosos a areno-argilosos	Livre e fraturado	144.9	sim	sim	-	K^+, Ca_2^+, HCO_3^- e SO^{-4}, e Cl^-	-	sim	Fe, Mn, Ba, Ni, Cd, Cu, Zn, Pb e Cr	Eh	-	A degradação do contaminante altera as condições redox

Nota: NI= Não Informado; (-) = não utilizado; PMA= Precipitação Média Anual. CE= Condutividade Elétrica; OD= Oxigênio Dissolvido; IA= Íons Analizados; CN= Compostos Nitrogenados (NH3-N, NO4, NO3); DBO/DQO= Razão Demanda Bioquímica de Oxigênio em relação a Demanda Química de Oxigênio; M= Metais Pesados; PC= Parâmetros Físico-Químicos Complementares; TC= Técnicas de investigação complementares e/ou inovadoras; EF= Eletroscopia de Florência; ME-EE= Microscopia e Escaneamento Eletrônico; ER= Tomografia Elétrica.

Tabela 1 – Síntese dos principais aspectos e parâmetros extraídos nas pesquisas de monitoramento de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por resíduos sólidos urbanos nesta RSL

NAGARAJAN *et al.*, 2012	Avaliar a contaminação em 03 lixões	700.0	N.I.	N.I.	N.I.	sim	sim	sim	K^+, Ca^{2+}, HCO_3^- e SO_4, e Cl^-	sim	sim	Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Fe e Zn	-	-	A presença de Cl-, NO3- e NH4 + pode ser usada como marcador
REYES-LÓPEZ *et al.*, 2008	Identificar a contaminação com métodos tradicionais e estudos geofísicos	60.0	areias e areias argilosas	Poroso - Livre	N.I.	sim	sim	-	K^+, Ca^{2+}, HCO_3^- e SO_4, e Cl^-	-	sim	-	-	Geofísica	A extensão do contaminante foi delimitada pela geofísica e hidroquímica
KALE *et al.*, 2008	Proposição do Índice de Poluição por Lixiviado com 28 parâmetros	550	basalto fraturado e vesicular	Fraturado-Livre	9.6	sim	sim	-	Mg^{++}, Na^{+}, F^-, K^+, $Ca2^+$, $HCO3^-$ e SO-4, e Cl^-	sim	sim	Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Ag, Cd, Pb, e U	COT, Dureza	-	O fluxo lateral e vertical da água são lentos e restringe a migração de contaminantes da fonte aos receptores. Mas os poluentes mantêm um nível constante de contaminação
LONGE; ENEKWECHI, 2007	Avaliar a influência local na atenuação da contaminação.	1526.0	Cobertura laterítica	Aquífero mais raso: Poroso - Livre	42.0	sim	sim	-	PO4, K^+, Ca^{2+}, HCO_3^- e SO_4, e Cl^-	sim	-	Fe, Mn, Cu, Zn, Pb e Cr	-	-	A natureza ácida das águas subterrâneas pode não ser atribuída exclusivamente à contaminação por lixiviado
RAPTI-CAPUTO; VACCARO, 2006	Avaliar os riscos ambientais associados ao lixiviado	N.I.	argila siltosa e areia	Livre e confinado	N.I.	sim	sim	-	K, Mg, Ca, NH4, Cl, SO4, Na	sim	-	Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Ag, Cd, Pb, e U	-	-	Existe influência do aterro na contaminação do subsolo e recursos hídricos
NORTH *et al.*, 2006	Verificar o uso de isótopos estáveis de carbono inorgânico dissolvido (DIC) e hidrogênio	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	-	sim	-	-	-	-	-	d13C–DIC, dD–H2O	Razão isotópica de C e H	O lixiviado é isotopicamente distinto das águas subterrâneas tanto para dD-H2O quanto para d13C-DIC
MOR *et al.*, 2005	Avaliar o impacto do lixiviado na qualidade da água	714.6	N.I.	Poroso - Livre	N.I.	sim	sim	-	K^+, Ca^{2+}, HCO_3^- e SO_4, e Cl^-	sim	sim	Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb e Zn	-	-	Cl–, NO – 3, NH – 4, Fenol e DQO podem ser marcadores do lixiviado
HEATON *et al.*, 2004	Avaliação da contaminação com isótopos estáveis de C, N e S	N.I.	Calcáreo	Fraturado	7.2	-	sim	sim	Cl-	sim	-	-	Eh, 13C/12C 15N/14N e 34S/32S	-	O uso dos novos parâmetros auxiliou na caracterização da evolução da contaminação
COZZARELLI *et al.*, 2000	Uso combinado de geoquímica e microbiologia	N.I.	Areia	Poroso - Livre	N.I.	-	sim	sim	K+, Ca2+, HCO3– e SO-4, e Cl–	sim	-	Fe	Carbono Orgânico	Indicadores microbiológicos	Altas concentrações de ferro solúvel reduzido foram detectados em todo o aquífero e indicadores microbiológicos são muito úteis
FATTA *et al.*, 1999	Caracterizar o lixiviado e avaliar a qualidade da água subterrânea	semi-árido	Rochas calcáreas	Fissuro-Cárstico	173	sim	sim	sim	sim	sim	sim	Fe, Cd, Pb, Ni, Cu, Zi e Cr	STD, dureza		A composição do lixiviado mostrou uma variação significativa nos parâmetros
JENSEN *et al.*, 1999	Avaliar o uso de metais pesados como delimitadores da contaminação	N.I.	N.I.	Poroso - Livre	N.I.	sim	sim	N.I.	K^+, Ca^{2+}, HCO_3^- e SO_4, e Cl^-	-	-	Fe, Cd, Pb, Ni, Cu, Zi e Cr	Carbono orgânico total		Os metais pesados estão fortemente associados com matéria coloidal
CHRISTENSEN *et al.*, 1998	Avaliar a contaminação com carbono orgânico dissolvido (COD)	N.I.	N.I.	Poroso - Livre	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	Ácido fálvico, e hidrofílico	-	A fração hidrofílica tem pouco valor prático nestas investigações

Nota: NI= Não Informado; (-) = não utilizado; PMA= Precipitação Média Anual. CE= Condutividade Elétrica; OD= Oxigênio Dissolvido; IA= Íons Analizados; CN= Compostos Nitrogenados (NH3-N, NO4, NO3); DBO/DQO= Razão Demanda Bioquímica de Oxigênio em relação a Demanda Química de Oxigênio; M= Metais Pesados; PC= Parâmetros Físico-Químicos Complementares; TC= Técnicas de investigação complementares e/ou inovadoras; EF= Eletroscopia de Florência; ME-EE= Microscopia e Escaneamento Eletrônico; ER= Tomografia Elétrica.

DISCUSSÃO

A utilização de ferramentas de metanálise como, por exemplo, o mapa de coautoria (Figura 2a) permite evidenciar a diversidade e quantidade elevada de núcleos de pesquisas sobre essa temática de contaminação por lixiviados de resíduos sólidos dos recursos hídricos subterrâneos. A análise dos dados referentes do núcleo de pesquisa considerado o mais estruturado (Figura 2b) evidencia um grupo que mantém uma alta produtividade, mas com baixo engajamento com outros núcleos. Nesse contexto, vemos que outros grupos potencialmente, até aparecem com um número maior de publicações e citações, mas quando utilizamos a coautoria como unidade de análise, estes perdem força de ligação e, assim, deixam de ser considerados mais estruturados do que outros grupos. Assim, considera-se que as oportunidades para estabelecimento de parcerias com outros grupos de pesquisadores de referência, está em construção, mesmo com o número elevado de pesquisas sobre o tema.

A identificação das publicações de referência sobre o tema em questão foi complementada com o auxílio robusto do uso da ferramenta do mapa de cocitação (Figura 3) que rapidamente nos apresenta as referências a partir da maior citação pelos pesquisadores que mais publicam e mais são citados. Já com o mapa de acoplamento bibliográfico (não apresentado aqui), a partir da análise das citações das publicações dos últimos três anos, pode-se identificar as linhas de pesquisas a permanecerem fortalecidas e/ou com tendência inovadora nos próximos anos. Como tendência de novas linhas de pesquisas, considera-se que o uso de isótopos estáveis de carbono, de enxofre e elementos terras raras tenham maior crescimento. Além de pesquisas que contemplem a remediação das áreas contaminadas com técnicas integradas a

pesquisas relacionadas à geração de energia elétrica com a utilização de resíduos sólidos depositados em aterros e/ou lixões desativados.

Com relação aos parâmetros físico-químicos, percebe-se que pouco avanço tem sido implantado nas pesquisas relacionadas ao tema. O uso da condutividade elétrica e pH da destacam-se pelo fácil uso e interpretação, mas não sendo o bastante para uma análise mais eficaz e completa. Outros parâmetros que são utilizados com frequências variadas, apesar dos objetivos de as pesquisas serem quase idênticos, e que reforçam a detecção direta e indireta da contaminação são os íons maiores, compostos nitrogenados e metais pesados. Todos esses parâmetros com uso bem variado onde algumas pesquisas utilizam diversos compostos com predominância de potássio mais, cálcio dois mais, íon bicarbonato, sulfato e cloreto.

A presença de parâmetros físico-químicos em estudo sobre contaminação é imprescindível, pois, é a partir dos resultados obtidos que se pode realizar uma análise mais profunda da contaminação presente como exemplo, o oxigênio dissolvido nos possibilita entender se a água é mais ou menos oxigenada e dependendo do resultado a proliferação de bactérias que fazem mal a vida aquática e humana que se abastece, o potencial hidrogeniônico por exemplo, afeta diretamente a alteração dos efeitos de substâncias químicas que são tóxicas, tais como os metais pesados, muitos inclusive, encontrados nas pesquisas analisadas: mercúrio, chumbo, cádmio, cromo e etc, que influência na pluma de contaminação do lençol freático das pesquisas. O impacto do lixiviado nos recursos hídricos parece ser maior na estação chuvosa, quando a dispersão do contaminante é acelerada pela máxima infiltração e escoamento superficial. Os elevados níveis totais de sólidos dissolvidos e nitrato provaram que a qualidade da água não é confiável para o abastecimento humano quando comparado aos valores máximos permissíveis encontrados nas legislações de cada país onde as pesquisas foram realizadas. Desta forma, é preciso que estudos como

os analisados sejam realizados com uma determinada frequência, informando para a comunidade local e científica as adversidades de uma determinada área onde são ou foram depositados resíduos sólidos urbanos.

CONCLUSÃO

Este estudo fornece uma visão sobre a estrutura da literatura sobre contaminação por lixiviados de resíduos sólidos dos solos e dos recursos hídricos subterrâneos, analisando uma grande quantidade de literatura usando dados bibliométricos.

Esta abordagem pode ser muito útil para melhorar a compreensão de um tópico de pesquisa complexo, como a de contaminação dos solos e dos recursos por lixiviados. Este método de análise da literatura tem potencial para auxiliar na identificação de novas tendências de pesquisa realizadas por núcleos de pesquisadores nas principais instituições pelo mundo ou núcleos de pesquisadores trabalhando em rede de cooperação.

O uso da condutividade elétrica e pH continuam a ser os parâmetros comuns em praticamente todas as pesquisas, mas sempre em conjunto com outros parâmetros com combinação variada. Esses outros parâmetros reforçam a detecção direta e indireta da contaminação são os íons maiores, compostos nitrogenados e metais pesados. Nas pesquisas foi encontrada uma predominância no uso dos íons: potássio mais, cálcio dois mais, íon bicarbonato, sulfato e cloreto, devido às suas características específicas relacionadas aos principais contaminantes depositados nas áreas que contém resíduos sólidos.

Como tendência de novas linhas de pesquisas, considera-se que o uso de isótopos estáveis de carbono, de enxofre e elementos

terras raras tenham maior crescimento. Neste estudo de revisão sobre parâmetros físico-químicos nas pesquisas de contaminação em áreas de depósitos de resíduos sólidos, este método sugere que a integração de parâmetros tradicionais com novas técnicas e novos parâmetros recebe atenção relativamente limitada.

Apesar da aplicabilidade e dos resultados obtidos com essa técnica de Revisão Sistemática da Literatura terem sido muito satisfatórios, recomenda-se, uma leitura dos artigos de interesse para aprofundamento detalhado do conteúdo.

REFERÊNCIAS

ABD EL-SALAM, M. M.; ABU-ZUID, G. I. "Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt". **Revista de Pesquisa Avançada**, vol. 6, n. 4, 2015.

AHMED, A. T.; ALLUQMANI, A. E.; SHAFIQUEZZAMAN, M. D. "Impacts of landfill leachate on groundwater quality in desert climate regions". **Revista Internacional de Ciência e Tecnologia Ambiental**, vol. 16, n. 11, 2019.

ALEMAYEHU, T.; MEBRAHTU, G.; HADERA, A.; BEKELE, D. N. "Assessment of the impact of landfill leachate on groundwater and surrounding surface water: a case study of Mekelle city, Northern Ethiopia". **Sustainable Water Resources Management**, vol. 5, n. 4, 2019.

ALSLAIBI, T. M.; MOGHEIR, Y. K.; AFIFI, S. "Análise dos componentes do aterro na estimativa do lixiviado percolado para as águas subterrâneas usando o modelo HELP". **Water Science and Technology**, vol. 62, 2010.

AMORELLO, D.; BARRECA, S.; GAMBACURTA, S.; GULOTTA, M. G.; ORECCHIO, S.; PACE, A. "Um método analítico para monitorar microtraços de lixiviados de aterros sanitários em águas subterrâneas usando espectroscopia de matriz de excitação-emissão de fluorescência". **Revista Métodos Analíticos**, vol. 8, n. 17, 2016.

ATTA, M.; YAACOB, W. Z. W.; JAAFAR, O. B. "O impacto potencial das águas subterrâneas contaminadas por lixiviados de um antigo aterro sanitário em Taman Beringin Kuala Lumpur, Malásia". **Revista de Ciências Ambientais da Terra**, vol. 73, n. 7, 2015.

BANCH, T. J.; HANAFIAH, M.M.; ALKARKHI, A.F.; ABU AMR, S. S. "Planejamento fatorial e otimização do tratamento de lixiviados de aterros sanitários com coagulante natural à base de tanino". **Polymers**, vol. 11, n. 8, 2019.

BARELLA, C. F.; BACELLAR, L. D. A. P.; NALINI, H. A. "Influence of the natural oxidation of the organic fraction leached from a sanitary landfill on the quality of groundwater, Belo Horizonte: Minas Gerais, southeastern Brazil". **Environmental Earth Sciences**, vol. 70, 2013.

BICHET, V.; GRISEY, E.; ALEYA, L. "Caracterização espacial de pluma de lixiviado usando tomografia de resistividade elétrica em um aterro composto por células antigas e novas (Belfort, França)". **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia**, vol. 211, 2016.

BOATENG, T. K.; OPOKU, F.; AKOTO, O. "Qualidade do lixiviado do aterro sanitário de Oti e seus efeitos nas águas subterrâneas: um histórico de caso". **Revista de Ciências Ambientais da Terra**, vol. 77, n. 12, 2018.

CHIDICHIMO, F.; DE BIASE, M.; STRAFACE, S. “Assessment of groundwater pollution in landfill areas: is it just leachate?’’. **Waste Management**, vol. 102, 2020.

CHRISTENSEN, J. B.; JENSEN, D. L.; GRON, C.; FILIP, Z.; CHRISTENSEN, T. H. “Characterization of dissolved organic carbon in groundwater polluted by leachate from landfills”. **Water Research**, vol. 32, 1998.

DASO, A. P.; NEVONDO, V.; OKONKWO, O. J., MALEHASE, T. “Percolation of leachate from landfills: a source of groundwater mercury contamination in South Africa”. **Water SA**, vol. 45, 2019

FAR, E. O.; ENEKWECHI, L. O. “Investigation of the potential impacts of groundwater and the influence of local hydrogeology on the natural attenuation of leachate in a municipal landfill”. **International Journal of Environmental Science and Technology**, vol. 4, 2007.

FATTA, D.; PAPADOPOULOS, A.; LOIZIDOU, M. “Um estudo sobre o lixiviado do aterro e seu impacto na qualidade das águas subterrâneas da grande área”. **Geoquímica Ambiental e Saúde**, vol. 21, n. 2, 1999.

GERAVAND, F.; MOMENPOUR, M.; HOUREH, M.; DKAMARI, S. A. H. “Investigando os efeitos de metais pesados no lixiviado de resíduos na qualidade da água subterrânea perto do aterro (estudo de caso: Aterro sanitário de Saravan, Rasht)”. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, vol. 9, 2017.

GOMERSALL J. S.; JADOTTE Y. T.; XUE Y.; LOCKWOOD S.; RIDDLE D.; PREDA A. “Conducting systematic reviews of economic evaluations”. **International Journal of Evidence Based Healthc**, vol. 13, 2015.

HEATON, T. H. E.; TRICK, J. K.; WILLIAMS, G. M. "Evidence of isotopes and dissolved gases for nitrogen attenuation in landfill leachates dispersing in a chalk aquifer". **Applied Geochemistry**, vol. 20, 2012.

JENSEN, D. L.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. "Speciation of heavy metals in groundwater polluted by leachate". **Water Research**, vol. 33, 1999.

JIANG, Y.; LI, R.; YANG, Y.; YU, M.; XI, B.; LI, M.; YANG, C. "Migration and evolution of dissolved organic matter in groundwater plume contaminated by landfill leachate". **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 151, 2019.

KJELDSEN, P.; BARLAZ, M.; ROOKER, A.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. "Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate". **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, vol. 32, n. 4, 2002.

LAPES – Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos. **StArt - Software State of the Art through Systematic Review** (app). Versão 3.3 Beta 03. São Carlos: UFSCar, 2013.

LOPES, D. D.; SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S.; CELLIGOI, A.; DALL'ANTÔNIA, L. H. "Geophysical technique and groundwater monitoring to detect leachate contamination in the surrounding area of a landfill – Londrina (PR – Brazil)". **Journal of Environmental Management**, vol. 113, 2012.

MANGIMBULUDE, J. C.; GOELTOM, M. T.; VAN BREUKELEN, B. M.; VAN STRAALEN, N. M.; RÖLING, W. F. "Caracterização hidroquímica de um aquífero costeiro tropical

afetado por lixiviado de aterro e intrusão de água do mar". **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, vol. 13, n. 4, 2016.

MARIANO, A. M.; SANTOS, M. R. "Revisão da literatura: apresentação de uma abordagem integradora". **Annals of XXVI Congresso International AEDEM**. Reggio da Calabria: AEDEM, 2017.

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. P.; GALVÃO, C. M. "Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem". **Texto e Contexto - Enfermagem**, vol. 17, 2008.

MOHER D.; LIBERATI A.; TETZLAFF J.; ALTMAN D. G.; PRISA GROUP. "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement". **Annals of Internal Medicine**, vol. 151, n. 4, 2009.

MOR, S.; RAVINDRA, K.; DAHIYA, R.P.; CHANDRA, A. "Characterization of leachate and assessment of groundwater pollution near the municipal solid waste landfill". **Environmental Monitoring and Assessment**, vol. 118, n. 1, 2006.

NAGARAJAN, R.; THIRUMALAISAMY, S.; LAKSHUMANAN, E. "Impact of leachate on groundwater pollution due to undesigned municipal solid waste landfill from erode city, Tamil Nadu, India". **Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering**, vol. 9, 2012.

NEGI, P.; MOR, S.; RAVINDRA, K. "Impact of landfill leachate on groundwater quality in three cities in northern India and health risk assessment". **Environment, Development and Sustainability**, vol. 22, n. 2, 2020.

NORTH, J. C.; FREW, R. D.; VAN HALE, R. "Can stable isotopes be used to monitor the impact of leachate from landfills on surface water?". **Journal of Geochemical Exploration**, vol. 88, n. 13, 2006.

PALMA, L. D.; FERRANTELLI, P.; MERLI, C.; PETRUCCI, E. "Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis". **Waste Management**, vol. 22, n. 8, 2002.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic reviews in the social science**: a practical guide. Malden: Blackwell Publishing, 2006.

POLIT D. F.; BECK C. T. "Using research in evidence-based nursing practice". POLIT, D. F.; BECK, C. T. (eds.). **Essentials of nursing research**: Methods, appraisal and utilization. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkin, 2006.

PUJIINDIYATI, E. R.; SATRIO, S.; PRASETIO, R. "Major ions for tracing leachate migration within shallow groundwater in the vicinity of municipal landfill in Bantar Gebang-Bekasi". **Indonesian Journal of Chemistry**, vol. 19, n. 1, 2019.

RAPTI-CAPUTO, D.; VACCARO, C. "Geochemical evidence of landfill leachate in groundwater". **Engineering Geology**, vol. 85, n. 12, 2006.

REYES-LÓPEZ, J. A.; RAMÍREZ-HERNÁNDEZ, J.; LÁZARO-MANCILLA, O.; CARREÓN-DIAZCONTI, C.; GARRIDO, M. M. L. "Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in Mexico". **Waste Management**, vol. 28, 2008.

RODRIGUES, S. P.; VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L.; JANSEN, F. W. "Mapping patient safety: a large-scale literature review using bibliometric visualization techniques". **Open BMJ**, vol. 4, n. 3, 2014.

STEFANIA, G. A.; ZANOTTI, C.; BONOMI, T.; FUMAGALLI, L.; ROTIROTI, M. “Determination of trigger levels for groundwater quality in landfills located in areas historically impacted by man”. **Waste Management**, vol. 75, 2018.

SUN, S.; HATTERMANN, T.; PATTYN, F.; NICHOLLS, K. W; DREWS, R.; BERGER, S. “Ondas de plataforma topográfica controlam o derretimento sazonal perto das linhas de aterramento da plataforma de gelo da Antártida”. **Geophysical Research Letters**, vol. 46, n. 16, 2019.

SZYMAŃSKI, K.; JANOWSKA, B.; IŻEWSKA, A.; SIDEŁKO, R.; SIEBIELSKA, I. “Method of evaluating the impact of landfill leachate on groundwater quality”. **Environmental Monitoring and Assessment**, vol. 190, n. 7, 2018.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. “Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping”. **Scientometrics**, vol. 84, n. 2, 2010.

VILOMET, J. D.; ANGELETTI, B.; MOUSTIER, S.; AMBROSI, J. P., WIESNER, M.; BOTTERO, J. Y.; CHATELET-SNIDARO, L. “Application of strontium isotopes for tracing landfill leachate plumes in groundwater”. **Environmental Science and Technology**, vol. 35, n. 23, 2001.

VODYANITSKII, Y. N. “Standards for the contents of heavy metals in soils of some states”. **Annals of Agrarian Science**, vol. 14, n. 3, 2016.

ZHAI, Y.; MA, T.; ZHOU, J.; LI, X.; LIU, D.; WANG, Z.; DU, Q. “Impacts of landfill leachate on groundwater hydrochemistry and size distributions and heavy metal components of colloids: a case study in northeast China”. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 26, n. 6, 2019.

CAPÍTULO 3

Energia Renovável e Passivo Ambiental: Incentivos ao Uso de Energia Produzida por Meio de Resíduos Sólidos

ENERGIA RENOVÁVEL E PASSIVO AMBIENTAL: INCENTIVOS AO USO DE ENERGIA PRODUZIDA POR MEIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Ariel Fernandes Pretel

Priscila Elise Alves Vasconcelos

Paulo Sergio Vasconcelos

Estima-se que, atualmente, a população mundial corresponda a cerca de 7, 7 bilhões de pessoas. E este número não diminuirá nos próximos anos. Com base no relatório divulgado pela Organização das Nações Unidas (ONU), há a previsão que até o final do século XXI, a população mundial atinja a marca dos 11 bilhões de habitantes (REDAÇÃO GALILEU, 2019).

Juntamente com o crescimento da população humana, a produção de resíduos sólidos gerados aumenta de forma alarmante, o que constitui uma problemática para as sociedades atuais e as futuras. Este aumento significativo do "lixo urbano" decorre de alguns fatores dos quais dois são os principais: o aumento do consumo e produção de materiais artificiais (FIORILLO, 2017).

O aumento do consumo possui estreita relação como o crescimento na geração *per capita*, colocada pela sociedade de consumo atual (FIORILLO, 2017), em decorrência dos incentivos ao consumo, bem como o aumento de vendas de produtos. Nesse sentido, é relevante destacar um fenômeno base, por meio do qual decorrem estes incentivos e aumento de vendas de produtos, a chamada obsolescência programada.

Criada entre os anos de 1929 e 1930, durante a Grande Depressão, a expressão obsolescência programada foi uma técnica

utilizada como um modo de incentivar um modelo de mercado, voltado para a produção em série e no consumo, como um meio de recuperar a economia dos países que foram afetados pela crise da época (MARTINEZ, 2017). Essa prática consistia na compra de produtos que não tinham uma vida útil prolongada, havendo a necessidade de novas compras. Contudo, apesar de ser um fenômeno iniciado na década de 30, sua utilização se faz presente ainda nos dias atuais.

Conforme aponta o empresário espanhol Benitos Muros (MARTINEZ, 2017), fundador da empresa OEP Eletrics, os fabricantes planejam seus produtos de forma que estes já tenham uma data final para seu funcionamento. Aliado a isto, encontra-se o segundo principal fator, a produção de materiais artificiais e, consequentemente, o aumento de lixo eletrônico.

Esse fator se relaciona com a evolução dos tipos de resíduos gerados em decorrência do desenvolvimento tecnológico. Constantemente, os produtos de base tecnológica se alteram, gerando uma desatualização dos produtos dentro de meses. Em decorrência dessa desatualização, ferramentas úteis do cotidiano, como o meio de comunicação *whatsapp*, tornam-se incompatíveis de serem utilizados em aparelhos que não sejam "recentes" no mercado.

Por consequência, esses produtos tecnológicos são descartados de forma rápida e, muitas vezes, de forma indevida, para que sejam substituídos por outros mais "atuais", gerando assim, um considerável aumento de lixo tecnológico sem qualquer tipo de descarte especial.

Sob este viés, é notória a necessidade de se pensar em meios alternativos para a destinação do lixo urbano. Dentre estas formas, frisa-se o reaproveitamento destes resíduos como forma de geração de energia – seja através da biomassa seja por gases emitidos em

aterros sanitários-, bem como as inovações no tratamento de resíduos sólidos.

Portanto, tecidas as considerações sobre a destinação dos resíduos sólidos com base na Política Nacional de Resíduos Sólidos, bem como os seus possíveis reaproveitamentos, busca-se analisar o reaproveitamento com meios tecnológicos destes resíduos. Por conseguinte, procura-se verificar as possíveis medidas que promovam o desenvolvimento e aproveitamento de tecnologias limpas de forma que estas medidas minimizem os impactos ambientais ocorridos pelo aumento dos resíduos sólidos.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada é a pesquisa exploratória, tendo como base obras literárias, especializadas, além da utilização de artigos científicos, dados oficiais e pesquisas que consubstanciem a temática.

A POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O ordenamento jurídico brasileiro passa por constantes evoluções normativas. No âmbito ambiental, as normas de proteção e de incentivo ambiental se ampliam e evoluem de forma a abranger as mais diversas áreas que compõem o sistema. Dentre as evoluções neste campo, destaca-se a evolução normativa pela qual o ordenamento passou até a instituição da Lei n. 12.305/2010, que prevê as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

Devido ao aumento populacional, a geração de resíduos sólidos urbanos aumenta em escalas bem superiores ao da população. Por vezes, o aumento de resíduos de forma rápida acarreta no descarte inadequado, prejudicando a saúde humana. De forma mais clara, prejudicam as famílias que sobrevivem dos lixões de onde provém sua "fonte de sustento", bem como o meio ambiente com contaminação do solo, da água, lençol freático e a disposição de áreas de preservação permanente.

Instituída pela Lei n. 12.305 em 02 de agosto de 2010, a Lei de Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010), prevê em seu texto a busca por formas eficazes de trazer destinação ao lixo urbano. É trazido também a exigência dos setores públicos e privados para que tenham transparência no gerenciamento dos seus resíduos de modo que este "poderiam ser reciclados ou reaproveitados, poupando recursos naturais, financeiros e emissões de dióxido de carbono (CO2)" (ECYCLE, 2019).

A PNRS dispõe especificamente sobre resíduos sólidos. Essa ênfase ocorre pelo potencial dos resíduos de serem reutilizados, reciclados, objeto de logística reversa ou qualquer outra técnica que possa servir de matéria-prima base (VASCONCELOS; VASCONCELOS, 2016).

Ao contrário do lixo, definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como sendo restos das atividades advindas de condutas humanas, caracteriza-se por ser inútil ou indesejável, não sendo possível o tratamento. Nesse mesmo sentido, encontra-se a definição de rejeitos onde todas as possibilidades para a reciclagem ou uso de reaproveitamento foram esgotadas, sendo a única destinação plausível o descarte em aterro sanitário (VGRESÍDUOS, 2017).

No que tange aos resíduos sólidos, estes são classificados com base nas suas propriedades físicas, químicas e

infectocontagiosas, distintas em classes, de acordo com a nova versão da NBR 10004:2004 (FIORILLO, 2017). Assim, encontram-se na Classe I, os resíduos considerados perigosos. Os de classe II são os considerados não perigosos. Ainda, na classe II A, encontram-se os resíduos considerados não inertes, contendo propriedades como a biodegradabilidade ou combustibilidade. E, em última classificação, a classe II B, os quais fazem parte aqueles considerados inertes (FIORILLO, 2017).

MEIOS DE DESTINAÇÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A partir da análise da classificação dos resíduos sólidos é essencial abordar que em decorrência da progressão do aumento de resíduos, é necessária a intervenção do Poder Público nos diversos estames sociais (FIORILLO, 2017). Ao que se refere aos resíduos urbanos, esta é uma problemática onde é essencial a intervenção do Poder Estatal como de gerenciar e criar novas alternativas para a destinação destes resíduos.

Nesse sentido, algumas formas de tratamento dos resíduos urbanos devem ser analisadas.

Preliminarmente, cabe abordar a regulamentação e regularização das práticas que estejam relacionadas à logística reversa. Esta, por sua vez, tem seu enfoque voltado para a correta destinação de resíduos sólidos, provenientes de equipamentos como os drones (NUNES; VASCONCELOS, 2018).

De início, encontra-se a deposição. Consiste na técnica mais antiga de tratamento dos resíduos, consistindo na simples deposição do lixo em diversos espaços ambientais. Esta prática se apresenta como a menos recomendada para utilização, uma vez que a

deposição não consiste no uso de meios preventivos para o meio ambiente. Nesta senda, apesar de possuir um baixo custo, sendo de fácil e rápida implementação, esta pratica possui uma enorme periculosidade ambiental.

Ainda, um segundo método de tratamento é a compostagem. Esta prática consiste em um processo biológico, ou seja, na atuação de catalisadores de micro-organismos, no qual os resíduos orgânicos se decompõem, tendo como produto final o composto orgânico. Deste modo, recuperam-se os nutrientes presentes nos resíduos orgânicos, levando-os ao seu estado natural, ou seja, enriquecendo o solo de nutrientes e deste modo, favorecendo a agricultura ou a jardinagem. Uma das principais vantagens desta prática consiste na redução do volume de lixo produzido, dando uma correta destinação a este tipo de resíduo (MMA, 2012).

Outra prática relevante a se destacar é a aterragem. Os aterros sanitários consistem em locais apropriadamente adequados para receber o lixo, projetados de forma que sejam minimizados os perigos para a saúde pública e para a segurança (FIORILLO, 2017).

Importante ressaltar que nos aterros sanitários há outras formas, ou seja, variações de tratamento do lixo que além de viabilizarem uma destinação correta para estes, utilizam estes aterros como meio de geração energética. Fala-se aqui na extração do gás metano para geração do biogás (VASCONCELOS; VASCONCELOS, 2019).

Inovações com alta tecnologia no tratamento de resíduos

É cabível salientar que além das formas de tratamento dos resíduos, novas tecnologias têm sido empregadas para minimizarem a geração dos resíduos, bem como formas de inovações para tratar

os resíduos produzidos. Deste modo, pesquisadores tem procurado reaproveitar estes resíduos sólidos empregando a alta tecnologia, indo além de simples métodos como a reciclagem.

Alguns dos exemplos desta combinação de alta tecnologia com o reaproveitamento de resíduos são aqui analisados.

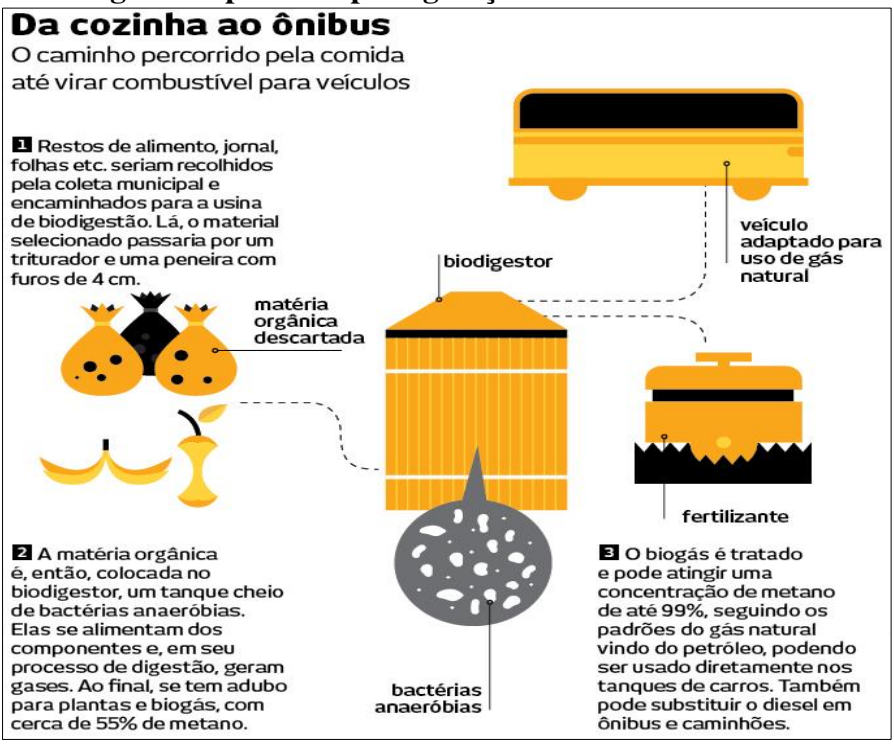
Em preliminar, cabe destacar a fórmula de um perfume, utilizando lixo. Criada por uma *startup* americana, tem como ideia principal transformar as sobras de madeira em "um tipo de açúcar que pode substituir o petróleo na fabricação de combustíveis, plásticos e embalagens, ou químicos de alto valor agregado, como os usados em perfumes" (VGRESÍDUOS, 2017). Durante o processo para a obtenção deste "açúcar", utiliza-se água em alta pressão, aliada a temperatura, como forma de dissolver a celulose encontrada no material orgânico. Após este processo, o açúcar é fermentado com a finalidade de produzir etanol e outros químicos (VGRESÍDUOS, 2017).

Outra inovação relevante a ser destacada e de grande utilidade no cotidiano é combustível o gerado a partir dos resíduos urbanos. A ideia surgiu de uma empresa americana que tem buscado formas de solucionar a destinação dos resíduos de forma eficaz e sustentável. De acordo com este processo, a empresa tem a meta de reduzir em 75% as emissões de gás carbônico, comparando com as emissões geradas pelo uso da gasolina. E ainda, a empresa tem a intenção de produzir cerca de 07 (sete) milhões de litros de etanol por ano, utilizando 90.000 (noventa mil) toneladas de lixo (VGRESÍDUOS, 2017).

Um dado relevante quanto ao uso deste combustível é que na cidade de Estocolmo, na Suécia, metade dos ônibus municipais circula a base de combustível gerado a partir do lixo orgânico, bem como do esgoto. Conforme afirma Luciano Basto, este tratamento para os resíduos urbanos é uma boa oportunidade para o Brasil, uma

vez que a maior parte do lixo produzido pela população brasileira é composta por restos de alimentos. E ainda acrescenta que estes resíduos orgânicos seriam encaminhados para biogestores ao invés de aterros. Os biogestores correspondem a usinas com enormes tanques com uma enorme quantidade de "bactérias famintas" que executam o processo de decomposição dos resíduos de forma mais rápida, aumentando, consequentemente, a produção de gás (SANTOS, 2013), conforme a imagem abaixo:

Figura 1 - processo para geração do biocombustível



Fonte: Nossa São Paulo (2013).

Nota: Reportagem "9 Soluções para o lixo".

Ademais, é de extrema importância salientar que mera gestão de resíduos, sem uma real mobilização para se concretizar estas boas gestões. Sob este viés, uma empresa americana tem investido na ideia de um *RecycleBank*, "um banco virtual de cupons". Para a obtenção destes cupons, que podem ser utilizados como vales descontos em lojas que tem suas normas pautadas no compromisso socioambiental, é necessário a existência de práticas socioambientais como economia de energia ou reciclagem. Uma das vantagens desta ideia consiste no "ganho para a conscientização e ampliação de práticas de logística reversa" (VGRESÍDUOS, 2017).

Os aterros sanitários como alternativa para novas fontes energéticas

Dentre as formas de tratamento de resíduos sólidos utilizando tecnologia e já sendo utilizadas são os aterros sanitários voltados ao aproveitamento energético.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, pode-se dizer que um aterro de resíduos sólidos é como um reator biológico, em que as principais substancias de entrada consistem nos próprios resíduos e na água e nas principais saídas consistem nos gases liberados e o chorume.

Sob este aspecto, é relevante ressaltar o processo de decomposição da matéria orgânica. Esta decomposição ocorre em dois processos, o primeiro é a chamada decomposição aeróbica. A decomposição aeróbica ocorre na presença de oxigênio. Durante este processo, a temperatura pode se elevar até 65^0C. As bactérias presentes neste primeiro processo são as mesofílicas agem em temperaturas entre 25^0C a 45^0C. Estas bactérias decompõem de forma inicial os carboidratos. Por consequência, o ph começa a

baixar, aumentando a temperatura, dando abertura para o surgimento de outros microrganismos como os termofílicos (TEIXEIRA, 2017).

Após os 60^0C entram em ação os microrganismos capazes de decompor as hemiceluloses, ceras e proteínas. Neste momento, durante a ação destes organismos a temperatura se eleva próximo aos 70^0C. Ao elevar esta temperatura ocorre a esterilização ou a morte de microrganismos patogênicos que se encontram no lixo. Deste modo, a partir da ausência de matérias orgânicas para serem descompostas, a decomposição aeróbica diminui, perdendo temperatura (TEIXEIRA, 2017). A partir deste momento, com a redução do oxigênio (O_2), outro processo se inicia, a decomposição anaeróbica.

O processo anaeróbico se inicia na ausência de oxigênio (O2). Na primeira fase deste processo ocorre a liquefação onde há a produção de ácidos orgânicos, álcoois e cetonas. Após esta fase, inicia a fase de gaseificação. Por meio desta fase há a produção de gases como o metano (CH4) e outros gases compostos pelo enxofre. Passada esta fase, entra-se na fase de estabilização e por fim a humificação do produto final (TEIXEIRA, 2017).

De acordo com Karina Salomon (2007), o gás formado no aterro durante o processo de gaseificação é composto por diversos outros gases, como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), encontrados em maiores quantidade, enquanto outros como a amônia (NH_3), hidrogênio (H_2) e o gás sulfídrico (H_2S) são encontrados em menores quantidades. Um fato relevante a se apresentar é que os gases liberados pelos aterros contribuem de forma significativa para o aumento de "emissões globais de metano" (BORBA, 2006). Neste sentido, encontra-se a importância do Aproveitamento Energético dos Aterros Sanitários.

Conforme o Ministério do Meio Ambiente (2012) cita,

> Segundo o Primeiro Inventário Nacional de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, realizado pelo Governo Federal em 2005, as emissões de metano por resíduos sólidos no Brasil, para o ano de 1990, foram estimadas em 618 Gg, aumentando para 677 Gg no ano de 1994. As emissões de metano geradas no tratamento dos resíduos líquidos de origem doméstica e comercial foram estimadas em 39 Gg para o ano de 1990, subindo para 43 Gg em 1994.

O aproveitamento energético dos Aterros Sanitários é uma medida adota para se chegar a uma solução sustentável de destinação dos resíduos, bem como uma forma de minimizar os impactos ambientais causados pela excessiva liberação de gases que contribuem para o efeito estufa. Deste modo, é relevante destacar que um dos objetivos para o projeto de aproveitamento energético do Biogás tem como fundamento transformá-lo em "uma forma de energia útil tais como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões" (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Sob este viés, o Ministério do Meio Ambiente juntamente com o Ministério das Cidades desenvolveram o Projeto para Aplicação do Mecanismo de Desenvolvimento do Limpo, em 2004. Este mecanismo, conhecido como MDL, consiste em uma forma de flexibilização como um meio de auxiliar a redução de emissões de gases de efeito estufa ou de captura de carbono por parte países contidos no Anexo I do Protocolo de Quioto (PORTAL BRASIL, 2014).

Nesse sentido,

> O projeto capacitou, em 2007 e 2008, cerca de 400 agentes locais e técnicos das prefeituras para elaboração de Planos de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos e aplicação do Mecanismo de

> Desenvolvimento Limpo - MDL em projetos de captação e tratamento de gases gerados em locais de destinação final de resíduos (MMA, 2012).

Desse modo, evidencia-se o interesse do governo de concretizar as metas e medidas proposta presente neste Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

BIOGÁS

O biogás foi descoberto no século XVII e passou a ser considerado como fonte de energia por Louis Pasteur, no século XIX, quando em sua apresentação ficou demonstrado a sua geração por meio de uma mistura que consistia em estrume e água. Após este período, este biogás começou a ser coletado em estações de tratamento de efluentes na Inglaterra e, posteriormente, em 1940, passou a ser aproveitado para geração de energia na Índia, por meio de obtenção resultante de estercos de animais em plantações. A partir de então, o modo de utilização de obtenção do biogás evoluiu (CETESB, 2019).

Hodiernamente, os aterros sanitários consistem em uma forma de extrair e utilizar o gás liberado durante o processo de decomposição orgânica como meio energético, em decorrência da mistura de gases presentes em sua composição, em especial o metano (CH_4). Contudo, para ocorrer à coleta deste gás, é necessário seguir etapas e tomar medidas adequadas para sua retirada.

Desse modo, a extração do biogás ocorre pela passagem por um filtro para que seja removido partículas que foram arrastadas com o gás. Após isso, ele segue para um separador de líquidos, para retirar possíveis gotículas de líquidos contidos no biogás. Este líquido será

encaminhado para o sistema de coleta de chorume, que será tratado. Com a retirada de possíveis partículas solidas e líquidas, o gás passa para um soprador e depois segue para a queima controlada no flare ou para outro sistema de aproveitamento energético (RUFINO, 2019).

Um fato interessante a ser explanado consiste nos diversos modelos do aproveitamento enérgico do biogás. Dentre estes, destaca-se o modelo indiano e chinês. O modelo indiano utiliza uma cúpula móvel, feita de ferro ou vidro, onde o gás é armazenado conforme o processo de fermentação for ocorrendo. Deste modo, o aproveitamento do biogás ocorre de forma ininterrupta. Quanto ao modele chinês, este é formado por duas câmaras cilíndricas que são cobertas por um teto, onde ficará armazenado o gás. Estes cilindros funcionam como reatores que funcionam por meio das oscilações de pressões em seu interior, "assim, quando há o aumento de pressão, a biomassa é deslocada da câmara de fermentação para a caixa de saída - e quando há descompressão, ocorre o movimento inverso" (ECYCLE, 2019).

Ademais, é possível possuir uma usina biodigestora residencial. Este biodigestor residencial pode ser usado em propriedades rurais e em residências urbanas, a qual é abastecida por meio de restos de alimentos, folhas, fezes de animais domésticos e outros materiais orgânicos. De acordo com o *site* Ecycle, este biodigestor pode produzir o biogás na quantidade de um botijão de gás de cozinha, bem como 20 litros de biofertilizantes.

Sob este aspecto, evidencia-se que a utilização do biogás é uma forma viável de obtenção de energia para abastecer comunidades que ficam isoladas, dando uma destinação sustentável e eficaz aos resíduos gerados na agricultura e na pecuária (ECYCLE, 2019). Ainda, como mencionado anteriormente, o aproveitamento do biogás constitui uma fonte sustentável de geração de energia,

contribuindo também, para uma destinação mais adequada aos resíduos urbanos.

Neste sentido, é importante ressaltar a instalação de usinas de biogás como a Usina da Gás Verde S.A inaugurada no dia 4 (quatro) de julho de 2019, no estado do Rio de Janeiro. As unidades desta usina encontram-se localizadas nos aterros sanitários de Seropédica em Nova Iguaçu. A unidade de Seropédica possui capacidade de produzir cerca de 200 mil metros cúbicos diários, ou seja, possui a capacidade de encher o tanque de 13 mil veículos. Ainda, espera-se que quando estiver em plena operação, esta unidade possa produzir 73 milhões de metros cúbicos de gás natural por ano (GANDRA, 2019).

Outra usina importante a se destacar consiste na usina que será construída no estado do Paraná, no município de São José dos Pinhais, a qual terá a capacidade para abastecer cerca de 2 mil casas, com a produção de 2,8 Mega Wats. A usina terá como matéria prima as estações de tratamento de esgoto, bem como o lixo produzido a partir de shoppings, restaurantes e mercados da região. Espera-se, assim, a redução de cerca de mil metros quadrados de esgoto, como também, a redução de 300 toneladas de lixo orgânico gerado (ÉPOCA NEGOCIOS, 2019).

Deste modo, de acordo com a ABiogás (2019), com base nos dados obtidos em 2018, "o Brasil apresenta um potencial suficiente para suprir 70% do consumo nacional de diesel com biometano ou 36% do consumo de energia elétrica, no caso de biogás". Cabe ressaltar, ainda, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 – EPED 2027. Este consiste em um documento informativo com a finalidade de indicar as perspectivas da expansão do setor de energia no horizonte até 2027. Neste sentido, no Capítulo III apresentou pela primeira vez, de forma explicita, "a oferta de projetos a biogás na expansão centralizada" (MME/EPE, 2018). E ainda, espera-se que

até o fim do período decenal, o biogás esteja inserido na matriz enérgica de modo significativo.

Ademais, ao abordar o biogás como fonte de energia sustentável, denota-se ainda outra forma, a bioeletricidade advinda das usinas de cana-de-açúcar, ou seja, utilizando a biomassa como fonte de energia. De acordo com Vasconcelos e Vasconcelos (2019), o Brasil possui a maior capacidade para instalação de usinas de geração de energia por meio da biomassa (derivada da cana), superando países como Estados Unidos, China, Índia e Japão.

Assim, percebe-se o potencial energético que o Brasil possui para alterar sua matriz energética de forma a torná-la sustentável e economicamente rentável.

CONCLUSÃO

O presente estudo abordou a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que tem sua origem no bojo constitucional, demonstrando, assim, uma das formas da tutela jurídica do meio ambiente. Deste modo, evidenciam-se os meios de destinação sustentável e eficaz para estes resíduos urbanos, os quais, por meio de seus objetivos presentes na Lei n 12.305/2010, buscam-se a adoção e promoção de medidas que minimizem os impactos gerados pelos resíduos sólidos.

Ademais, o biogás apresenta-se como um meio alternativo e sustentável para geração de energia, uma vez que ao destinar os resíduos urbanos a locais adequados, é possível o aproveitamento enérgico do gás gerado durante o processo de decomposição, como o metano (CH_4) e minimizar o desequilibra do efeito estufa.

Em suma, revela-se necessária a conscientização de que os recursos ambientais são fontes esgotáveis e por isso, é necessária a busca por fontes renováveis de energia e que solucione a

problemática do lixo urbano. Por isso, o aproveitamento energético de resíduos sólidos é algo que deve ser incentivado e ser implementada na política concreta de desenvolvimento urbano de cada município do País.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS. "ABIOGÁS comemora a evolução do setor de biogás em ano de reconhecimento". **ABIOGÁS** [2019]. Disponível em: <www.abiogas.org.br>. Acessado em: 02/08/2022

BORBA, S. M. P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários**: Estudo de Caso (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Brasília: Planalto, 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 09/05/2022.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Biogás**. São Paulo: CETESB, 2019. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 01/08/2022.

ECYCLE. "Biogás: o que é e como ele é transformado em energia". **Ecycle** [2019]. Disponível em: <www.ecycle.com.br>. Acesso em: 01/08/2022.

ECYCLE. "O que é Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)?" **Ecycle** [2019]. Disponível em: <www.ecycle.com.br>. Acesso em: 01/08/2022.

ÉPOCA NEGÓCIOS. “Brasil começará a produzir energia a partir de lixo e esgoto”. **Época Negócios** [2019]. Disponível em: <www.epocanegocios.globo.com>. Acesso em: 01/08/2022.

FIORILLO, C. A. P. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro**. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.

GANDRA, A. “Rio ganha duas usinas que transformam lixo em energia limpa”. **Agencia Brasil** [2019]. Disponível em: <www.agenciabrasil.com.br>. Acesso em: 01/08/2022.

MARTINEZ, M. “O que é obsolescência programada?”. **Ecycle** [2019]. Disponível em: <www.ecycle.com.br>. Acesso em: 01/08/2022.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário**. Brasília: Ministério do Meio ambiente, 2012. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 20/08/2022.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Manual da Compostagem**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 20/08/2022.

MME - Mistério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018. Disponível em:<www.mme.gov.br>. Acesso em: 01/08/2022.

NUNES, C. P. R.; VASCONCELOS, P. E. A. “A Aplicação da Logística Reversa nos Resíduos Sólidos do Agronegócio Brasileiro”. **Cadernos de Direito Actual**, n. 10, 2018.

PORTAL BRASIL. “Entendo como funciona o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL”. **Portal Brasil** [2014]. Disponível em: <www.brasil.gov.br>. Acesso em: 30/07/2022.

REDAÇÃO GALILEU. “População Mundial chegará a 11 bilhões até o fim do século, diz ONU”. **Revista Galileu** [20/06/2019]. Disponível em: <www.revistagalileu.globo.com>. Acesso em: 17/07/2022.

RUFINO, D. C. “Biogás: o aproveitamento enérgico do gás metano gerado em aterros sanitários”. **Brasil Escola** [2019]. Disponível: <www.brasilescola.uol.com.br>. Acesso em: 01/07/2022.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente do biodigestor da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade** (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica). Itajubá: UNIFEI, 2007.

SANTOS, P. “9 Soluções para o lixo”. **Revista Galileu** [2013]. Disponível em: <www.revistagalileu.globo.com>. Acesso em: 17/07/2022.

TEIXEIRA, S. “Como acontece a decomposição biológica do lixo?” **Portal Cursos CPT** [2017]. Disponível em:<www.cpt.com.br>. Acesso em: 29/07/2022.

VASCONCELOS, P. E. A.; VASCONCELOS, P. S. “A proposed Model for Bioelectricity Cogeneration Activities Management in the Sugar-Energy Industry”. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, vol. 6, 2019.

VASCONCELOS, P. E. A.; VASCONCELOS, P. S. “Logistica Reversa no Brasil: Análise da responsabilidade sob a égide da Política Nacional de Resíduos Sólidos”. **Anais do XXXVI**

Internacional Sodebras Congress. Belo Horizonte: Sodebras, 2016.

VGRESÍDUOS. "Tecnologia e inovação no tratamento de resíduos: preparados para o futuro?". **VG Resíduos** [2017]. Disponível em: <www.vgresiduos.com.br>. Acesso em: 27/07/2022.

CAPÍTULO 4

Resíduos Sólidos Urbanos: Análise do Setor Energético em Ascensão com Base no Impacto Ambiental e na Qualidade de Vida

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ANÁLISE DO SETOR ENERGÉTICO EM ASCENSÃO COM BASE NO IMPACTO AMBIENTAL E NA QUALIDADE DE VIDA[1]

Helen Gonçalves Romeiro Ferreira

Gustavo Pedroso Malavota

Rodrigo Gomes Alves

Gustavo Monnerat Cahli

Sílvia Conceição Reis Pereira Mello

A energia em todas as suas formas se tornou essencial na vida do homem. A humanidade ao longo da sua evolução sempre procurou maneiras de tornar o meio em que vive, o mais cômodo possível para si. Sendo a eletricidade a forma de energia mais vantajosa e estratégica para o desenvolvimento socioeconômico (ANEEL, 2005).

Pinas *et al*. (2016) argumentaram que esse desenvolvimento econômico impulsiona a procura de novas fontes de energia causando uma instabilidade ambiental gerando a necessidade de uma cooperação global, em prol de outras atividades produtivas menos mitigadoras ao planeta para que não comprometa a existência das futuras gerações. Medeiros *et al*. (2016) subentendem como sustentabilidade uma relação harmônica entre o homem com a natureza na utilização dos seus recursos de forma consciente para solucionar suas próprias necessidades. Pádua (2004) afirma que para

[1] Uma versão prévia deste capítulo foi publicada em: FERREIRA, H. G. R.; PEDROSO, G. M.; ALVES, R. G.; CAHLI, G. M.; MELLO, S. C. R. P. "Resíduos Sólidos Urbanos (RSU): uma análise do setor energético em ascensão com base no impacto ambiental e na qualidade de vida". *Formação (Online)*, vol. 27, n. 51, 2020.

essa relação ser harmoniosa e perpétua é necessário que a humanidade como um todo trabalhe em conjunto para construir e praticar estratégias para preservação do planeta.

Pacheco (2006) diz que energias limpas, renováveis e acessíveis são oriundas da natureza, como exemplo, conversão da radiação solar, tendo em vista ser a principal fonte de energia inesgotável na Terra. Outras fontes limpas de energia como: geotérmica, marítima, eólica, hidrelétrica e solar não alteram o equilíbrio térmico do planeta. Energias não renováveis são finitas e esgotáveis, ou seja, não se renovam, tais como: carvão mineral, petróleo, gás natural e nuclear. São as principais fontes utilizadas mundialmente e que causam danos ao planeta devido a liberação de gases poluentes na atmosfera.

De acordo com MME em pouco mais de três anos após a criação do Proinfa - Programa de Incentivo às fontes alternativas de Energia elétrica, em 2004, com objetivo de aumentar a utilização de recursos renováveis, na geração de energia baseado em fontes eólicas, biomassa ou hidrelétricas houve um aumento significativo na produção de energia. Antes do PROINFA os números eram de 22 MW gerados através de recursos renováveis. Após a criação do programa os números são de 414 MW, o que demonstra o interesse brasileiro em energias limpas.

A ONU vem trabalhando em prol da preservação do planeta através de estratégias principalmente coletivas, tendo incluso nos seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são metas a serem cumpridas até 2030 a ODS 7 que trata de assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos (ONU BRASIL, 2015).

A biomassa segundo De Paula (2015) é um campo em ascensão no Brasil, e uma das fontes com grande potencial energético e baixo impacto seria o uso da biomassa proveniente dos

resíduos sólidos urbanos (RSU). No Brasil, a destinação inapropriada leva os resíduos ao estado de putrefação ao ar livre, gerando gases de fortes odores fétidos e emissão de metano, altamente nocivo à atmosfera, bem como a produção de chorume, que contamina o solo e as águas.

Esse artigo realiza uma revisão bibliográfica, de modo a entender energias limpas e as ações antrópicas em conjunto com necessidade de se extinguir lixões e controlar aterros sanitários de modo a estimular a produção de energia transformando o metano em biometano. O presente estudo identifica os pontos positivos na utilização de aterros sanitários e estimula a exploração de matéria orgânica para a produção de biometano, de forma a contribuir na geração de empregos evitando a saturação ambiental e garantindo a soberania energética do país. Neste artigo serão abordados tópicos como: Produção de lixo, impacto ambiental e na qualidade de vida, resíduos tóxicos, aterros sanitários para geração de energia e um olhar para o futuro.

METODOLOGIA

Foi realizado um levantamento bibliográfico, através de Revisões Literárias em artigos científicos, protocolos, consensos, diretrizes e livros sobre a influência de lixões e aterros sanitários cujo gases como metano, poderia ser transformado em biometano a fim de gerar energia a localidades próximas e diminuir o impacto ambiental na atmosfera. Foram consultadas publicações nos períodos de 1983 a 2019, sob as bases eletrônicas dos portais da Scielo e Google Acadêmico. A pesquisa foi efetivada a partir dos seguintes descritores: Aterro sanitário. Energia limpa. Sustentabilidade. Impacto ambiental.

PRODUÇÃO DE LIXO

Com o crescimento das cidades houve o aumento da quantidade de resíduos gerados, consequentemente a elevação de materiais a serem descartados de forma apropriada para se evitar uma possível contaminação do solo, da água e do ar (BIDONE, 2001).

No período entre 2016 e 2017 a população brasileira apresentou aumento de 0,75% e acompanhando esse crescimento, a geração per capita de RSU apresentou aumento de 0,48% computando um total de 214.868 toneladas diárias de RSU no país (ABRELPE, 2017).

A Lei nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) enfrentando os principais problemas ambientais, sociais e econômicos resultantes da manipulação indevida dos resíduos sólidos. Impondo responsabilidade pelo resíduo gerado tanto para pessoas físicas como jurídicas, públicas ou privadas. Entretanto a essa lei não se aplica aos rejeitos radioativos, pois os mesmos possuem uma legislação específica (BRASIL, 2010) e Ferreira (2018) argumenta que o tratamento de resíduos sólidos é uma questão complexa, devido a heterogeneidade da natureza dos materiais e dos seus variados graus de poluição.

A partir de dados, estimou-se que foi produzido um montante total anual de RSU de 78,4 milhões de toneladas no país, observando um crescimento de 1% em relação ao ano de 2016. Entretanto em 2017 o montante coletado foi de 71,6 milhões de toneladas, considerando que o serviço de coleta abrange 91,2% do país o que demonstra um déficit de 6,8 milhões de toneladas de resíduos que não foram coletados e fatalmente tiveram um destino impróprio (ABRELPE, 2017).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas define na NBR 10004 os resíduos sólidos urbanos (RSU) como quaisquer resíduos que se encontram em estados sólido e semissólido resultante de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola de serviços e de varrição. Inserindo a essa os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água que foram gerados em equipamentos e instalações com o propósito de controlar a poluição e qualquer fluido que seja impraticável o seu despejo na rede pública de esgotos ou corpos de água, necessitando de uma possível solução técnica que seja economicamente viável. Sendo isentos dessas normas os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos por terem sua própria legislação específica (ABNT, 2004).

Segundo (ABRELPE, 2017) os serviços de limpeza urbana nos municípios custaram em média cerca de R$10,37 por habitante ao mês, chegando a mover R$ 28,5 bilhões no Brasil. Contabilizando que no ano de 2017 os 1.668 municípios da região Sudeste produziram 105.794 toneladas/dia de RSU onde se estima que apenas 98,1% desses do mesmo foram coletadas, deixando 27,6% desses resíduos que equivale a 28.606 toneladas/dia são destinados a lixões e aterros controlados. A região Sudeste tem um gasto mensal com os serviços de limpeza urbana de R$13,43 movimentando ao ano o equivalente R$15,4 bilhões, tendo um salto de crescimento de aproximadamente 3,4% em relação a 2016.

Leme *et al*. (2014) alegam que devido à falta de políticas adequadas nas últimas décadas cerca de 60% das cidades brasileiras ainda despejam seus resíduos de maneira inadequada e em aterros não regulamentados, contabilizando um declínio ambiental e social.

Estima - se que por ano sejam produzidas mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos no mundo e alerta que 99% do que se é comprado em cerca de seis meses serão jogados no lixo (ONU, 2018a). Considerando a existência de 7,6 bilhões de habitantes no

mundo, nesse ritmo, para absorver esse lixo gerado seria necessário 70% de outro planeta. De acordo com estudos sobre o impacto de aterros na natureza (ONU, 2018b) 45 mil toneladas ao dia de lixo são descartadas de modo errôneo, essa quantidade de resíduos é gerada por aproximadamente 170 milhões de pessoas.

Essa quantidade de lixo produzida precisa de um destino, seja ele de forma adequada ou não. Gimenes e Hising (2017) informam que o Brasil apresenta três formas de descarte sendo que o aterro sanitário funciona como um depósito de descarte de resíduos que em tese é composto principalmente de materiais não recicláveis. Devendo atender alguns requisitos como estar fora de áreas de influxos de manancial de abastecimento público, se manter distante 200 metros de rios, nascentes e demais corpos hídricos, a 1.500 metros de núcleos populacionais e 300 metros de residências isoladas. Estruturalmente o aterro precisa de um sistema de impermeabilização, oferta diária dos resíduos, monitoramento de águas subterrâneas chorume, sistema de drenagem de gases, monitoramento topográfico e hidrogeológico (ABNT, 1983).

A operação de um aterro sanitário, como um local de disposição de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) no solo deverá atender princípios de engenharia para a compressão desses resíduos visando reduzi-los ao menor volume possível e posteriormente cobrindo-os com uma camada de terra. E para o seu bom funcionamento é necessário a utilização de técnicas sanitárias por meio da impermeabilização do solo, compactação, coleta e tratamento do biogás e do chorume, além de outros processos operacionais que consigam reduzir as consequências ambientais que possam ser acarretados pelo acúmulo de resíduos (LUCAS *et al*., 2010).

Os aterros sanitários são grandes geradores de biogás, entretanto são altamente tóxicos para atmosfera devido ao seu percentual elevado de metano (CH4), que tem o potencial 21 vezes

mais elevado que o dióxido de carbono (CO2) em potencialidade para o aquecimento global (PIÑAS *et al*., 2016).

A denominação Aterro controlado compreende áreas de descarte de resíduos com baixo ou mínimo controle sobre a gestão ambiental, como isolamento, acesso restrito ou o controle de entrada e saída desses resíduos. Não atendem às normas ambientais brasileiras nem às recomendações da Política Nacional de Resíduos Sólidos (GIMENES; HISING, 2017).

Os lixões são áreas a céu aberto para despejo de resíduos, não apresentando nenhum controle ambiental ou sobre o tratamento do lixo. Além de ser uma zona de acesso irrestrito, muitos trabalhadores que vivem do lixo acabam por fazer suas moradias no local (GIMENES; HISING, 2017).

Observa - se ainda que apenas 59,1% do total anual de RSU são dispostos de forma adequada em aterros sanitários. Entretanto os lixões e aterros controlados, funcionam de maneira ativa no Brasil recebendo mais de 80 mil toneladas/dia, com uma média anual de aproximadamente 40% de disposição anual de RSU (ABRELPE, 2017).

IMPACTO AMBIENTAL E NA QUALIDADE DE VIDA

Através da análise feita pela ONU Meio Ambiente, recomenda-se o fechamento de lixões, por serem lugares insalubres e representam um grande risco de saúde para a população do entorno e indivíduos que trabalham em contato direto com o lixo como os catadores (ONU, 2018b).

A matriz energética nacional precisa ser alterada devido às variações climáticas o que pode ocorrer a diminuição de águas nos rios o que acarreta a diminuição dos recursos hidráulicos do país. Em

conjunto uma outra questão deve ser analisada, a gestão de resíduos precisa ser eficiente e deve ocorrer de modo a atenuar a poluição atmosférica, além de melhorar a qualidade de vida da população (MARCOVITCH, 2010).

As áreas de lixão emitem grande quantidade de gases de efeito estufa, além de atuar negativamente para turismo e agricultura, ameaçando a biodiversidade e interferindo diretamente na comunidade local. Por dia na América Latina e Caribe, 35 mil toneladas de lixo não são coletadas, o que vem a afetar diretamente zonas pobres e áreas rurais, chegando a atingir mais de 40 milhões de pessoas. Demonstrando que aproximadamente 90% dos resíduos coletados são conduzidos para aterros ou lixões, não sendo destinados a nenhum tipo de reciclagem ou reaproveitamento (ONU BRASIL, 2018b).

Por meio da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) mais conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos foi estabelecida a logística reversa e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Passando a oportunizar uma variedade de ações que possibilitam a restituição dos produtos e resíduos sólidos ao setor empresarial, para sua reutilização para a continuação ou novo ciclo produtivo ou uma destinação final adequada com o mínimo dano possível.

RESÍDUOS TÓXICOS

Destarte, destaca-se a relevância do entendimento da liberação de resíduos tóxicos provenientes da decomposição, gerando gases de resíduos, sendo os de maior abundância metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) sendo que a

porcentagem de gases variará conforme o tempo de existência do aterro (PIÑAS *et al*. 2016).

Por meio da pesquisa direta computou-se que apenas 3.923 municípios possuem qualquer ação referente a coleta seletiva ressaltando que em muitos desses municípios, as atividades de coleta seletiva não abarcam a totalidade de área urbana (ABRELPE, 2017).

Leme *et al*. (2014) apontaram que a implantação de usinas para geração de energia elétrica, em aterro sanitário, possui potencial para diminuir significativamente os impactos ambientais negativos.

A ONU (2018b) ressaltou a falta de tratamento específico para resíduos orgânicos, contribui para a alta liberação de gases do efeito estufa na atmosfera. Chamando atenção para o panorama dos países latino-americanos e caribenhos onde cerca de 50% do seu lixo gerado são resíduos orgânicos e os materiais de qualidade para uma possível reciclagem também não possuem em sua maioria uma destinação correta.

Outro produto oriundo de aterros sanitários ou lixões é o chorume ou lixiviado. Kjeldsen *et al*. (2002) descreveram o chorume como a fração líquida originada pela umidade natural presente nos resíduos, através do processo de decomposição de material orgânico e águas das chuvas.

Moravia (2007) e a norma brasileira NBR 8849/1985 (ABNT, 1985) definem o lixiviado com uma sopa escura com um alto grau de destruição ambiental devido ao seu poder de contaminação, e sua composição se dá pelos resíduos sólidos ao passarem por os processos de decomposição física, química e biológica ocasionando efluentes líquidos e gasosos.

Telles (2010) argumenta que as características físico-químicas do lixiviado são influenciadas por fatores como: variações climáticas, técnica de aterramento e método de compactação que

acaba por atuar na quantidade e na qualidade do lixiviado produzido no aterro.

ATERROS SANITÁRIOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Jankes *et al*. (2012) apontam a biomassa como uma importante fonte energética renovável para o futuro, principalmente nos quesitos de preocupação global como proteção ambiental e mudanças climáticas. O que faz a biomassa ser muito bem quista como fonte energética devido ao círculo fechado de dióxido de carbono.

O Ministério de Minas e Energia (MME, 2007) classifica biomassa como qualquer recurso energético nas categorias energética florestal com seus produtos e subprodutos ou resíduos, energética agrícola, agroenergéticas e os resíduos e subprodutos dessas atividades, agroindustriais e da produção animal além de rejeitos urbanos. Salientando que a disponibilidade e características de produção de cada uma dessas categorias são distintas.

Segundo Bley Jr. (2015) a energia proveniente de biogás é uma alternativa viável e de ampla disponibilidade e necessita de maior exploração no Brasil, o que permitiria um acréscimo no fornecimento de energia elétrica o que contribuiria para as garantias de equilíbrio da matriz energética nacional.

Através da Lei nº 10.438 (BRASIL, 2002) o Brasil criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia - Proinfa, com o propósito de se ampliar a participação da energia elétrica gerada por Produtores Independentes Autônomos a partir de fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH´s) e biomassa no sistema interligado nacional. Por meio do Proinfa oportuniza o uso

de novas fontes de energia renováveis como o biogás variabilidade na matriz energética brasileira.

Piñas *et al*. (2016) argumentaram que os aterros sanitários de resíduos sólidos funcionam como um reator biológico, que grosso modo se alimentariam de resíduos produzindo gases e chorume. Em síntese a decomposição de matéria orgânica ocorre por meio de duas vias, a primeira decomposição aeróbia é decorrente da decomposição de resíduos, e seguidamente da decomposição anaeróbica onde ocorre a redução do CO2 presente nos resíduos.

Durante o ano de 2017 a quantidade RSU cresceu em todo o país em relação ao ano anterior, contudo o sistema de coleta permaneceu um pouco superior a 90%. A região Sudeste equivale 53% do total de resíduos coletados no Brasil, além de possuir a maior cobertura de coleta de resíduos (ABRELPE, 2017).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por meio da Resolução Normativa nº 8 de 2015, classifica o biogás como gás bruto proveniente da decomposição biológica oriundos de produtos ou resíduos orgânicos. Essa normativa também estabelece que biometano que é originário do biogás como um biocombustível gasoso formado essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás, pode ser destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais (ANP, 2015).

De acordo com Oliveira (2009) o processo de produção de energia elétrica a partir do biogás se dá por meio da utilização de dispositivos tecnológicos que convertem a energia química presente no combustível (metano) em energia cinética de rotação, através dos motores que se conectam a um gerador, que transformando energia cinética de rotação em energia elétrica.

Abreu *et al.* (2010) avalia que para a produção de biogás para seja factível a comercialização o aterro sanitário deverá receber, no

mínimo, 200t (toneladas) ao dia de resíduos, possuir capacidade mínima de recepção de 500.000t (toneladas) e altura mínima de 10m (metros). A produção de biogás por meio de aterro sanitário pode se iniciar algumas semanas após o início do depósito dos resíduos e assim podendo continuar por 15 anos após seu encerramento.

A degradação dos acúmulos dos RSU se deve a uma variedade de Archaebacterias metanogênicas, fungos e protozoários que oxidam a matéria orgânica para suas necessidades energéticas. Castilhos Junior *et al*. (2003) também destacaram que por meio do processo oxidativo, com o consumo de substratos acaba por gerar produtos que passam a ser proveitosos para a população. Já na degradação anaeróbica os microrganismos se desenvolvem na ausência de oxigênio passando pelas etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese e tem como um de seus produtos o biogás.

O Quadro 1 demonstra os estágios de degradação da matéria orgânica para a produção de biogás.

Quadro 1 - Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário

Fase	Condição	Período Típico
I	Aeróbia	Horas a 1 semana
II	Anóxica	3 meses a 3 anos
III	Anaeróbia, metanogênica, instável	8 a 40 anos
IV	Anaeróbia, metanogênica, estável	1 a 40 anos
V	Anaeróbia, metanogênica, declinante	10 a 80 anos

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: ESMAP (2004, p. 17).

Nota: Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.

Borba (2006) salientou que a durabilidade de cada uma das fases de geração do biogás varia de acordo com a distribuição dos componentes orgânicos no aterro sanitário. Essa variação se dá pela disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica, destacando a umidade, passagem pelo aterro, além do seu grau de compactação e densidade. Ressaltando ainda que em uma média é se calculando em condições ditas normais, a velocidade de decomposição que deve ser mensurada por intermédio meio da taxa de produção de biogás pode chegar em seu ápice nos dois primeiros anos e tendo uma queda lenta ao longo de vinte e cinco anos ou mais. Entretanto, as fases do aterro sanitário são oscilantes não podendo ser claramente definidas uma vez que novos RSU são dispostos diariamente fazendo com que o mesmo tenha vários estágios de degradação simultaneamente (BORBA, 2006).

Castilhos Júnior *et al*. (2009) descreveram o processo de degradação dos resíduos sólidos como um fenômeno de interdependência de mecanismos biológicos e físico-químicos. Essa correlação se inicia após a cobertura dos RSU depositados em aterros sanitários, nessa fase ainda se encontra oxigênio presente, dando - se início a decomposição por microrganismos aeróbios. Contudo essa primeira fase apresenta curta duração, uma vez que o oxigênio existente é limitado, após o seu consumo não há reposição. Posteriormente com o declínio de oxigênio passa a predominar os chamados microrganismos anaeróbios facultativos que atuam na transformação da matéria orgânica degradada pelo processo aeróbio em compostos que são dissolvidos através dos processos de hidrólise e liquefação. O processo continua na fase anaeróbica onde por meio da hidrólise da matéria orgânica que através de ação bioquímica das bactérias presentes é transformada em compostos orgânicos simples e de alta solubilidade como ácidos graxos voláteis. Após a formação desses ácidos, os mesmos se misturam com o líquido originado da matéria orgânica, reduzindo o pH e assim formando compostos orgânicos simples. E na última fase anaeróbia as bactérias

metanogênicas consomem os compostos orgânicos simples, gerando metano (CH4) e dióxido de carbono (CO2).

Lucas, Maran e Frare (2010) descreveram o biogás como uma mistura de gases, tendo como base de sua composição metano e dióxido de carbono além de outros componentes variáveis como monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico e amônia que aparecem em pequenas quantidades. Onde o metano representa 50% e os gases variáveis podem corresponder a 1% do biogás.

Pereira *et al*., (2018) expõem a necessidade de se desenvolver de tecnologia nacional, além do incentivo público para que se viabilize ainda os empreendimentos de aproveitamento energético em aterros sanitários.

A Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) e o Global Environmenl Facility (GEF), em português Fundo Global para o Meio Ambiente aprovou um investimento de 1 milhão de dólares na cadeia de produção de biogás da agroindústria brasileira para o ano de 2019. Esse projeto tem o intuito de refrear a emissões de gases do efeito estufa e diminuir a dependência de combustíveis fósseis no Brasil com a perspectiva de reduzir o equivalente a 535 mil toneladas de gás carbônico. Ainda com o intuito de ao longo de 10 anos, por meio das usinas - piloto de biogás, produzir em média 110 mil megawatts (ONU, 2019).

O biogás resultante da degradação dos resíduos apresenta um grande aproveitamento energético, podendo ser utilizado em forma de energia elétrica, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular e também abastecer gasodutos com gás de qualidade (MMA, 2019).

Segundo Rossetto (2014) a intensidade calorífica oscila de acordo com a quantidade de metano presente na sua composição,

consequentemente quanto maior a concentração volumétrica de metano, maior também será o poder calorífico do biogás.

Salomon (2007) discorre que o biogás se assemelha ao gás natural ao se equiparar o poder calorífico, possibilitando sua substituição em diversas aplicações. A principal vantagem do biogás em relação ao gás natural é ser renovável e sua produção depender de biomassa.

Um olhar sobre o futuro

Os reatores podem ser uma maneira viável de substituição dos aterros sanitários no Brasil, já sendo utilizado em grande escala nos países europeus. Sua utilização se dá por meio da digestão anaeróbia (sem oxigênio) de resíduos possibilitando codigestão vindo a intensificar a produção de biogás (STOCKMANNS *et al*., 2016). Ao se equiparar os processos de degradação por Digestão Anaeróbia x Aterro Sanitário, pode se destacar os prós e contras de cada sistema.

Stockmanns *et al*. (2016) destacam que os aterros sanitários são economicamente mais viáveis para a disposição de FORSU, entretanto em contrapartida necessitam grande volume de áreas e a imprecisão de tempo para a estabilização da matéria orgânica causando um desaproveitamento da totalidade de biogás gerado.

Carneiro (2009) evidencia que a digestão anaeróbia em reatores apresenta inúmeras vantagens em relação aos modelos de produção de biogás por aterros sanitários como, baixo grau de poluição, potencialização elevada para a conversão de matéria orgânica, redução de odores e contribui para a diminuição da disposição desses resíduos (biodegradáveis) em aterros sanitários.

Russo (2005) dissertou que a velocidade da degradação da Fração Orgânica dos Resíduos sólidos Urbanos (FORSU) em aterros sanitários se encontra relacionada a quantidade de água disponível. Salientando que o recolhimento do biogás deve ser feito na maior totalidade possível para seu melhor aproveitamento energético e menor impacto ambiental. Expondo que obteve aproximadamente 25% sobre rendimento máximo de biogás possível em aterros sanitários, onde essa obtenção de rendimento depende da geração e da quantidade de matéria orgânica contida no aterro.

Reis (2005) apontou que a utilização do reator para a digestão anaeróbia apresentou um rendimento de 66% de biogás, demonstrando uma superioridade em energética em relação aos aterros sanitários.

Martín - González *et al*. (2010) consideram a codigestão anaeróbia uma forma alternativa que possibilita a valorização de outros substratos além de maximizar a produção de energia. Com base em uma codigestão feita entre FORSU (Fração Orgânica dos Resíduos sólidos Urbanos) e um cosubstrato rico em lipídios que podem ser gorduras óleos e graxas retirados de uma usina de tratamento de esgotos foi alcançada uma produção de biogás superior a 72% em relação a digestão anaeróbia simples de FORSU, tendo um rendimento na produção de metano de 46% a mais.

Stockmanns *et al*. (2016) analisando o ciclo de vida e as possibilidades de disposição e tratamento de resíduos apontaram que a codigestão anaeróbia possui o melhor aproveitamento de energia renovável em comparação a digestão anaeróbia convencional. Entretanto, a digestão convencional, até o presente momento representa a melhor alternativa em paralelo com a disposição da FORSU em aterros sanitários, devido os mesmos carecem de grandes áreas para estocagem dos resíduos e um longo de tempo estabilização e operação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil possui uma grande capacidade de produção de energia proveniente de fontes renováveis e apresenta todos os pontos favoráveis para investimentos nessa matriz energética. O Programa RenovaBio incentiva a Política Nacional de Biocombustíveis, foi instituída por meio da Lei nº 13.576/2017. Objetivando traçar a expansão de matrizes energética derivada de biocombustíveis, reduzir a dependência de combustíveis que propiciam gases causadores do efeito estufa. E dentre essas fontes renováveis pode-se destacar a biomassa oriunda dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos), já que em tese são resíduos sem utilidade e prontos para descarte.

Anualmente são produzidas mais de dois bilhões de toneladas de resíduos no mundo, e esse número só vem crescendo, por atender demandas de uma sociedade consumista. O Brasil computou no ano de 2017 a produção do equivalente a 78,4 milhões de toneladas de RSU, sendo que somente 71,6 milhões de toneladas foram coletados. Em um país que o serviço de coleta abrange 91,2% do seu território, apresenta um de 6,8 milhões de toneladas de resíduos não coletados assim também acabam por ter um destino incorreto.

Devido a essa exorbitante quantidade de lixo produzido, torna -se viável e factível a utilização de biomassa oriunda de RSU produzidas em aterros sanitários. Apesar do quantitativo de aterros sanitários no Brasil, esse número ainda é insuficiente para as demandas do país, devido a sua concorrência com os lixões e aterros controlados que são considerados impróprios, contudo, ainda abundantes.

A exploração do biogás traz inúmeros benefícios que vão desde maximizar o aproveitamento e a recuperação dos materiais descartados até a erradicação das práticas de destinação impróprias,

que se encontram presentes em todos os estados e os impactos negativos à saúde de milhões de brasileiros.

Contudo o Brasil ainda se prende a exploração do biogás por meio de aterros, enquanto outros países já apostam em digestão anaeróbia em reatores pois apresentam inúmeras vantagens em relação aos aterros.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419**: apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8849**: apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. São Paulo: ABRELPE, 2017.

ABREU, F. V.; ROSA L. P.; AVELINO M. R.; SOUZA M. C. L.; NACIMENTO, V. C.; SOUZA E. S. “Estudo técnico, econômico e ambiental da produção de energia através do biogás de lixo”. **Anais**

do VI Congresso Nacional de Engenharia. Campina Grande: ABCM, 2010.

ANEEL – Agência Nacional de Energia. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: Aneel, 2005.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP n. 8, de 30 de janeiro de 2015**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2015. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 08/04/2022.

BIDONE, F. A. (org.). **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais**: eliminação e valorização. Brasília: FINEP, 2001.

BLEY JR., C. **Biogás**: a energia invisível. São Paulo: CIBiogas, 2015.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários**: estudo de caso (Dissertação de Mestrado em Engenharia). Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

BRASIL. **Lei n. 10.438, de 26 de abril de 2002**. Brasília: Planalto, 2002. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 08/05/2022.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Brasília: Planalto, 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 08/05/2022.

BRASIL. **Lei n. 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Brasília: Planalto, 2017. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 08/05/2022.

CARNEIRO, D. R. C. **Viabilidade técnica e económica de uma unidade centralizada de co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos** (Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente). Porto: FEUP, 2009.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA, I. N.; LUPATINI, G.; SILVA, J. D. "Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos". *In*: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (coord.). **Resíduos sólidos urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

DE PAULA, R. "Brasil investe pouco em energias alternativas: Pesquisador do IPEA lança estudo inédito com panorama sobre os investimentos em energias renováveis na última década". **Desafios do Desenvolvimento**, vol. 12, n. 83, 2015.

ESMAP – Energy Sector Management Assistance Programme. **The World Bank Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean**. Ontário: World Bank, 2004.

FERREIRA, W, R. **Análise do potencial energético territorial do biogás proveniente de aterros sanitários para inserção na matriz elétrica do estado de Minas Gerais no horizonte de 2050** (Dissertação de Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares). Belo Horizonte: UFMG, 2018.

GIMENES, E.; HISING, E. **Aterros sanitários, aterros controlados e lixões**: entenda o destino do lixo no Paraná. São Paulo: CETESB, 2017.

JANKES, G. G.; TRNINIC, M. R.; STAMENIC, M. S.; SIMONOVIC, T. S.; TANASIC, N. D.; LABUS, J. M. "Biomass gasification with CHP production: A review of the Stateof-the-Art

technology and near future perspectives". **Thermal Science**, vol. 16, n. 1. 2012.

KJELDSEN P. I.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. "Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review". **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, vol. 32, n. 4, 2002.

LEME, M. M. V.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; LOPES, B. M.; FERREIRA, C. H. "Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil". **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 87, 2014.

LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A.; FRARE. L. M. "Proposta de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu – PR". **Anais do XIII Congresso de Engenharia Química**. Curitiba: UNIOESTE, 2010.

MARCOVITCH, J. (coord.). **Economia da mudança do clima no Brasil**: Custos e oportunidades. São Paulo: IBEP, 2010.

MARTÍN-GONZÁLEZ, L.; COLTURATO, L. F.; FONT, X.; VICENT, T. "Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: Recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield". **Waste Management**, vol. 30, n. 10, 2010.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 31/05/2022.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2007.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica (Proinfa)**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 31/05/2022.

MORAVIA, W. G. **Estudos de caracterização, tratabilidade e condicionamento de lixiviados visando tratamento por lagoas** (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Belo Horizonte: UFMG, 2007.

OLIVEIRA, M. M.; MEDEIROS, M. H. A. S.; SILVA, R. L.; LUCAS, G. A. P. "Desenvolvimento sustentável nas organizações como oportunidade de novos negócios". **Revista Valore**, vol. 1, n. 1, 2016.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono** (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica). São Carlos: USP, 2009.

ONU – Organização das Nações Unidas. "Agência da ONU e fundo ambiental liberam US$1 mi para setor de biogás no Brasil em 2019". **Nações Unidas Brasil** [19/02/2019]. Disponível em: <www.nacoesunidas.org>. Acesso em: 31/05/2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. "Humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano, diz ONU em dia mundial". **Nações Unidas Brasil** [01/10/2018]. Disponível em: <www.nacoesunidas.org>. Acesso em: 31/05/2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. "Objetivo 7. Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos". **Nações Unidas Brasil** [2015]. Disponível em: <www.nacoesunidas.org>. Acesso em: 31/05/2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. "Um terço do lixo da América Latina e Caribe acaba em aterros ou na natureza, diz ONU". **Nações Unidas Brasil** [09/10/2018]. Disponível em: <www.nacoesunidas.org>. Acesso em: 31/05/2022.

PACHECO, F. "Energias Renováveis: Breves Conceitos". **Conjuntura e Planejamento**, n. 149, 2006.

PÁDUA, J. A.; LAGO, A. **O que é ecologia**. São Paulo: Editora Brasiliense, 2004.

PEREIRA, I. O.; SANTOS, I. F. S.; SANTOS, R. E. "Estudo energético e econômico do aproveitamento do biogás de um aterro sanitário em uma turbina a gás de 5,4 MW". **ENGEVISTA**, vol. 20, n. 4, 2018.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A.; ROALCABA, O. D. C. "Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)". **Revista Brasileira de Estudos de População**, vol.33, n. 1, 2016.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Recife: UFPE, 2012.

ROSSETTO, C. **Desempenho de motor-gerador de Ciclo Otto operado com gasolina e biogás proveniente de suinocultura e de**

uma estação de tratamento de esgotos (Projeto de Qualificação em Energia na Agrícola). Cascavel: UEOPR, 2014.

RUSSO, M. A. T. **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário** (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). Braga: EEUM, 2005.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade** (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica). Itajubá: UFI, 2007.

STOCKMANNS, A. J.; CAETANO, M. O.; GOMES, L. P. "Análise de ciclo de vida da destinação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos: co-digestão anaeróbia, digestão anaeróbica e aterros sanitários". **Anais do VII Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**. Porto Alegre: FIRS, 2016.

TELLES, C. A. S. **Processos combinados para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química). Rio de Janeiro: UFRJ, 2010.

CAPÍTULO 5

Resíduos de Podas e Aparas Urbanas: Uma Abordagem Sobre a Valorização do Ponto de Vista Energético

RESÍDUOS DE PODAS E APARAS URBANAS: UMA ABORDAGEM SOBRE A VALORIZAÇÃO DO PONTO DE VISTA ENERGÉTICO

Tallita Eduarda da Veiga Reis

Ednilson Viana

Apesar da busca pelo melhor enquadramento dos resíduos de podas e aparas de vegetação arbórea aos conceitos de hierarquia dos resíduos, estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de Agosto de 2010, o município de São Paulo ainda não dispõe de instrumentos de gestão eficientes direcionados a estes resíduos, que acabam indo para a disposição no solo sob a forma de aterros sanitários ou aterros de inertes, quando há esse tipo de estrutura, desperdiçando grande quantidade de matéria prima que poderia ter uma finalidade nobre para a recuperação de energia ou nutrientes para as plantas.

A disposição das podas e aparas em aterros é uma prática coibida no município de São Paulo pela Lei Municipal do PAMPA (Programa de Aproveitamento de Madeira de Poda de Árvore), vigente desde 2008 e reforçada pela PNRS de 2010. Apesar disso, o grande volume de resíduos de podas e aparas gerados no município (por volta de 23.000 t/ano), ainda têm como destinação principal os aterros.

Por apresentarem componentes ricos em carbono e oxigênio nas formas de celulose, hemicelulose e lignina, os resíduos de podas e aparas possuem alto potencial energético associado. Quando submetidas ao processamento termoquímico, apresentam elevado poder calorífico comparado a outras espécies de biomassa

residual,possibilitando exploração no campo da valorização energética de resíduos orgânicos e biomassa residual de um modo geral. Além disso, em processos termoquímicos, as podas e aparas apresentam também baixa temperatura de ignição, baixa energia de ativação e elevada taxa de combustão e teores de voláteis.

Uma busca bibliográfica por “resíduos de poda”, “pruning waste” e “resíduos de podas e aparas” nas bases de dados do ScienceDirect e da Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica apresentou artigos específicos desde a década de 1960. No entanto, é possível observar aumento considerável de publicações a partir de 2015 com a temática mais voltada à valorização desses resíduos a partir de processos bioquímicos, físicos e termoquímicos.

Para a exploração correta desse tipo de resíduo na perspectiva energética, no entanto, é necessário que haja um maior entendimento das possíveis padronizações e caracterizações de todos as partes que compõem os resíduos de podas e aparas, como aparas de gramíneas, folhagens verdes e secas, flores e sementes, gravetos, cascas de árvores, galhos finos e grossos, troncos e raízes, bem como entender o potencial energético associado a cada uma dessas partes.

Então, para este capítulo, o foco dos trabalhos angariados trata dos resíduos de podas e aparas do ponto de vista da valorização energética a partir de trabalhos que exploram esse tipo de resíduo, ou biomassa residual, como matéria prima para processos termoquímicos, quais processos de padronização e caracterização são fundamentais para suprir as crescentes demandas dos grandes centros urbanos, recorte onde esses resíduos são gerados em abundância por diversas fontes.

RELAÇÃO ENTRE CAPITAL E GERAÇÃO DE RESÍDUOS

De acordo com Boulding (1966), a economia mundial pode ser entendida como aberta em relação a três classes principais de entradas e saídas: sistemas de matéria, energia e informação. Esses sistemas envolvem a produção de capital através da exploração de insumos energéticos naturais e a posterior distribuição dos resíduos em reservatórios não econômicos, que por sua vez não entram no sistema de câmbio. Assim, é possível identificar a relação direta entre o desenvolvimento econômico e poder de compra de um país através dos índices de geração residual, reciprocamente. No entanto, a gestão desses depósitos residuais não entra no sistema cambial e por sua vez ficam subordinados a fatores externos como aspectos sociais, econômicos e políticos (MARTINI, 2016).

Portanto, entende-se que a gestão desses depósitos residuais tem sido um dos grandes desafios da humanidade, principalmente no contexto pós revolução industrial, onde a produção de bens de consumo não duráveis aumentou significativamente e teve como efeito mais deletério o exponencial da deposição de resíduos urbanos (BOULDING, 1966).

Atualmente, a geração de resíduos atingiu um estágio tão significativo que passou a ser abordada em diferentes políticas públicas brasileiras e internacionais, como a Política Nacional do Meio Ambiente - Lei nº. 6.938/1981 -, Política Nacional de Saneamento Básico - Lei nº 11.445/2007 -, Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei nº 12.305/2010 - e também os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), metas globais determinadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) dentro da Agenda Local 2030 (BRASIL, 1981; BRASIL, 2007; BRASIL, 2010; ONU, 2015).

Apesar das medidas e do compromisso com políticas públicas, há ainda um longo caminho para que se tenha a efetiva estruturação destas ações, seja no aspecto coletivo como sociedade, quanto no aspecto individual, visto que a geração de resíduos no país cresce exponencialmente e que grande parte do que é gerado ainda não é destinado corretamente de acordo com as diretrizes impostas pela hierarquia dos resíduos determinada pela PNRS. É importante ressaltar que, uma vez que o resíduo é coletado e destinado às instalações inadequadas, como por exemplo lixões, torna-se inviável o seu reaproveitamento em qualquer aspecto devido a mistura com os demais resíduos orgânicos e inorgânicos (ABRELPE, 2019).

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) compõem, dentro outros, resíduos de limpeza pública oriundos de serviços de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas (BRASIL, 2010). A geração mais expressiva, assim como dos demais resíduos sólidos, é representada pela fração orgânica, cerca de 60%, oriunda de diversas atividades. As podas e as aparas, representantes da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, são geradas a partir de atividades de limpeza de praças, bosques e serviços de podas da vegetação arbórea e arbustiva (CORTEZ, 2011).

Além dos serviços de limpeza urbana, os resíduos de podas e aparas são gerados também em grandes quantidades por produtores de frutas e grãos, pelas secretarias municipais na prestação de serviços ambientais e de manutenção da rede elétrica através das podas de controle, por empresas de jardinagem e limpeza de terrenos, por institutos de ensino, companhias de armazenamento e abastecimento como a Ceagesp, dentre outros. Assim, as podas podem ser consideradas como sendo resíduos de natureza orgânica lignocelulósica, pertencendo tanto a biomassa florestal quanto residual urbana (MEIRA, 2010).

ASPECTOS ENERGÉTICOS EM RELAÇÃO AOS RESÍDUOS

Desde o começo da humanidade e ao longo do desenvolvimento econômico e tecnológico, o mundo usou a energia de maneira transitória. Os primeiros símbolos de seu uso vêm da mitologia e da própria bíblia na produção de calor pela queima do betume, mistura líquida de alta viscosidade composto por hidrocarbonetos, cor escura e facilmente inflamável. O uso do fogo é considerado a primeira forma de energia obtida pelo homem e proporcionou as primeiras interações sociais em volta dele principalmente por gerar conforto térmico, segurança e iluminação. A partir dele, houve diversas transições energéticas complexas e sofisticadas usadas em diversas áreas. A energia obtida através do calor foi bastante explorada na forja de metais, como cobre e ligas de ferro, e em diversas outras áreas, tendo como principal matéria prima a biomassa de madeira (ZYLBERSZTAJN, 2020).

Os grandes saltos energéticos foram proporcionados pelas grandes revoluções industriais. Na primeira delas, no século XVIII, a máquina a vapor foi desenvolvida e representou grande potencial energético utilizando como principal matéria prima o carvão mineral. No final do século XIX o mundo mudou completamente com o uso do petróleo, mistura de substâncias oleosas altamente inflamáveis como matéria prima para produção energética. Nesse momento, a grande revolução energética torna-se a possibilidade de transporte e armazenamento da energia obtida (ZYLBERSZTAJN, 2020).

Do ponto de vista mundial, é possível observar que o desenvolvimento energético se deu através de uma transição que começou com o uso da biomassa de madeira, passando pelo uso do carvão mineral e se estabelecendo no ganho em grandes escalas com o uso do petróleo. Economicamente, o petróleo possibilitou o

nascimento de diversas indústrias. Nos Estados Unidos, por exemplo, diversas indústrias se desenvolveram no século XX por conta do petróleo, tal como a automobilística. Já no Brasil, ao contrário do restante do mundo, as indústrias foram se desenvolvendo através do uso energético da biomassa de madeira, folhas, galhos e tudo de origem orgânica que pudesse ser queimado. Prova disso é que em 2009, de acordo com a EPE - Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2010), o Brasil produziu e consumiu cerca de 80 milhões de toneladas de lenha de madeira. Após este período a transição nacional passou diretamente para o uso do petróleo, sem explorar o uso do carvão mineral, acelerando a transformação de modernização no país (ZYLBERSZTAJN, 2020; ZYLBERSZTAJN, 2014).

É importante destacar que o Brasil possui a matriz energética mais limpa quando comparado ao restante do mundo em termos ambientais, mas isso não devido a investimentos ou planejamento, mas sim por razões circunstanciais. Desde os anos 60, no país, a energia é predominantemente produzida através do uso dos rios, e a partir dos anos 70 o combustível de álcool passa a ser incorporado na cadeia energética. No entanto, de maneira técnica, não existe maneira de produzir nem de consumir energia de forma limpa. De acordo com as leis da termodinâmica, a energia sempre se conserva no todo mas ela nunca será a mesma ao final do processo em termos de calor e trabalho (ZYLBERSZTAJN, 2020).

A demanda por energias renováveis aumentou significativamente devido à crise energética e ambiental, agravada pelo uso intensivo de energias não renováveis que promovem o extrativismo e contribuem diretamente para as mudanças climáticas. Por esse motivo é que nas últimas décadas houve um aumento considerável pela busca de alternativas sustentáveis e renováveis para a demanda energética global (GONÇALVES *et al*., 2010). No Brasil, inúmeros trabalhos mostram que as políticas públicas

encontram alicerce no conceito de hierarquia dos resíduos estabelecida pela PNRS, começando pelo conceito da não geração, seguida por redução, reutilização, reciclagem e/ou recuperação, tratamento e disposição final dos rejeitos em aterros sanitários (BRASIL, 2010; GUNTHER, 2016; MOALLEMI *et al*., 2019).

Além disso, tendo em vista o aumento populacional, os hábitos de consumo não sustentáveis e o esgotamento das fontes energéticas não renováveis, o aproveitamento energético da biomassa torna-se uma alternativa ao uso das fontes de origens fósseis (SILVA, 2016), além de ser um combustível neutro em carbono pois não há incremento progressivo do gás na atmosfera, fato que despotencializa o efeito estufa deletério e causador das diversas mudanças climáticas vivenciadas na última década (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

Por outro lado, as principais variáveis relevantes para a escolha de destinação adequada de resíduos são densidade populacional e produto interno bruto (PIB) per capita, isso porque: quanto mais densa a região, maior o custo do metro quadrado e por consequência torna-se menos atrativo o investimento na construção de aterros sanitários; quanto maior a renda, maior será a fração de resíduos sólidos gerados e, mediante processo de triagem e tratamento, podem apresentar características de biomassa residual de qualidade com potencial de reciclagem e recuperação energética na forma de Combustível Derivado de Resíduo, conhecido mundialmente pela sigla CDR (BOSMANS; HELSEN, 2010; JUNIOR, 2014; DE MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019).

O uso de CDR tornou-se uma realidade em muitos países como uma classe de produtos oriundos do tratamento de resíduos sólidos de onde se extrai materiais com capacidade calorífica elevada, possibilitando sua exploração na indústria ou na geração de energia elétrica. As características físico-químicas do CDR usado para estes fins estão sempre subordinadas ao tipo de biomassa

residual e ao método de pré-processamento adotado. Esse material pode também ser introduzido em sistemas de geração elétrica em âmbito domiciliar ou em plantas industriais (BOSMANS; HELSEN, 2010; SANTOS; TAMBANI, 2019).

Três classes de biomassa são as mais utilizadas para produção do CDR em contexto nacional: a florestal, agrícola e a biomassa de rejeitos urbanos. As propriedades de cada classe exercem influência tanto no método de processamento utilizado quando no controle do sistema de combustão, necessitando um entendimento aprimorado dos parâmetros que busquem otimizar os processos (GARCIA, 2010). Essa utilização, chamada de valorização, pode ser considerada uma ferramenta para englobar diferentes oportunidades de agregar valor econômico aos resíduos sólidos, beneficiando não só o meio ambiente, mas também contribuindo para a inovação tecnológica (DE MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019).

Os métodos utilizados para a valorização são bastante variados e dependem da natureza do CDR, considerando desde processos simples como reciclagem e compostagem, até processos mais sofisticados que requerem maior grau de investimento tecnológico através de processos físicos, termoquímicos ou biológicos. O processo bioquímico é considerado o mais demorado e pouco controlável pois ocorre na presença de enzimas, bactérias e outros microorganismos por digestão anaeróbia, onde a biomassa de lignocelulose é convertida em biocombustíveis líquidos.

Nos processos termoquímicos, a biomassa formada é processada através do calor e do suprimento controlado de oxigênio, podendo ser por pirólise, gaseificação e combustão direta. Nesse processo, a biomassa pode ou não ser triturada e passar por uma triagem antes de ser processada. Os processos físicos correspondem aos métodos de adensamento da biomassa através de briquetagem, extrusão ou, na maioria das vezes, peletização. Os processos físicos

podem também ser usados como métodos de preparação da biomassa em processos termoquímicos de conversão energética (CORTEZ, 2011; BOSMANS; HELSEN, 2010; GONÇALVES et al., 2019; MARTINI, 2016). Apesar das possibilidades destacadas, a utilização comercial do CDR como fonte energética esbarra em uma série de problemáticas que envolvem coleta, logística de transporte, teores elevados de contaminantes, baixa densidade, dentre outros (USHIMA, 2019).

De acordo com dados da ABREN - Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos - apesar do enorme potencial nacional, o Brasil não possui plantas de usinas *Waste-to-Energy* em operação como no restante do mundo, que chega a mais de 1.300 unidades de processamento. A associação ainda ressalta que no Brasil existem muitos aterros sanitários em operação, cada vez mais distantes dos grandes centros metropolitanos, e que a implementação da geração *Waste-to-Energy* no Brasil possibilitaria gastos cada vez menores de transporte e apoiaria a geração limpa de eletricidade nos próprios centros geradores. Um bom exemplo de investimento no setor são os países europeus, principais consumidores de CDR de biomassa tanto para aquecimento comercial e residencial, quanto como combustível para geração de energia elétrica em plantas industriais, ou até mesmo em usinas termoelétricas, com destaque para a geração através de biomassa de resíduos (GARCIA, 2010; ZYLBERSZTAJN, 2014).

Neste sentido, um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) busca aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global, melhorando não só a eficiência energética como também expandindo a infraestrutura e modernizando as tecnologias para o fornecimento de serviços mais sustentáveis para todos os países em desenvolvimento (ONU, 2015).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética mundial é composta principalmente por fontes não

renováveis, como carvão, petróleo e gás natural. De acordo com dados do International Energy Agency (IEA) de 2018, todas as energias renováveis, com exceção da hidráulica e da biomassa, representam apenas 1,6% da matriz energética mundial. Ao considerar a participação da energia hidráulica e da biomassa, as energias renováveis passam a totalizar 14% da matriz mundial. Sozinha, a energia obtida através de biomassa representa 9,8% da energia primária mundial (IEA, 2018), sendo utilizada por quase 2,5 bilhões de pessoas em ambiente domiciliar (MOALLEMI *et al*., 2019; ONU, 2015).

O uso em larga escala de biomassa lignocelulósica para geração energética nos países do hemisfério norte, por exemplo, começou no final da década de 70 em decorrência de uma das maiores crises do petróleo já vivenciadas, evento que aumentou significativamente o preço do barril e forçou a busca por combustíveis alternativos para uso principalmente nos setores industriais, comerciais e para fins de aquecimento (ZYLBERSZTAJN, 2020; ZYLBERSZTAJN, 2014).

A partir de 2000, o consumo energético através de biomassa lignocelulósica aumentou consideravelmente, chegando a 594 indústrias ao final de 2010 (ZYLBERSZTAJN, 2020). Neste aspecto, é importante ressaltar que a biomassa, do ponto de vista energético, é definida como toda matéria orgânica, vegetal ou animal que pode ser empregada na geração de energia proveniente indiretamente da energia solar (GARCIA, 2010).

Atualmente, de acordo com dados apresentados no Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, houve uma variação de +0,5% na participação da biomassa na geração elétrica interna, chegando a 52.543 GWh em 2019, enquanto que a geração elétrica através de derivados de petróleo sofreu uma variação de -25,5% (BRASIL, 2010). Os dados referem-se a biomassa de lenha, bagaço de cana e de lixívia, não sendo apresentados os dados desagregados a respeito

da geração elétrica a partir de biomassa de resíduos lignocelulósicos oriundos de podas. No entanto, sabe-se que quando essa biomassa residual de podas é destinada ao uso de tecnologias relacionadas a processos físico-mecânico, como briquetagem e peletização, o potencial de poder calorífico pode chegar a números próximos de 20 MJ/Kg (CORTEZ, 2011; SILVA, 2016).

A disponibilidade de um número variado de biomassa encontrado no Brasil abre uma série de oportunidades no aspecto de potencial energético (Tabela 1). No entanto, existem variações nos valores de poder calorífico de cada uma delas devido às diferenças químicas e físico-químicas inerentes a cada tipo de biomassa e a cada componente dela, como por exemplo: diferença de poder calorífico entre caules e folhas; densidade da biomassa utilizada (se foi densificada ou não; teor de cinzas, que representam a fração inorgânica da biomassa, que por sua vez não contribui no processo de combustão; teor de umidade, que resulta em um consumo de energia para evaporação, fato que afeta negativamente o potencial energético (SANTOS; TAMBANI, 2019; ESCOBAR, 2016; SILVA, 2016).

Apesar da ampla relevância dos resíduos orgânicos na perspectiva de gestão e valorização, principalmente no setor energético, as podas e as aparas ainda não recebem tanta atenção nas discussões quando comparadas a outros resíduos de natureza orgânica. Além disso, a maior parte dos municípios brasileiros não possuem políticas específicas, destinação adequada ou planos de reaproveitamento voltadas às podas, fazendo com que cerca de 84% destes resíduos sejam encaminhados para diferentes classes de aterros sanitários e lixões, gerando um custo médio de aproximadamente R$ 68,00 por tonelada (MEIRA, 2010; CORTEZ, 2011).

Essa disposição, que chega a números alarmante só no estado de São Paulo, representa uma série de problemas ambientais e

operacionais dos próprios depósitos residuais, além do fato de que distância percorrida para transporte do resíduo é de 15 a 30 Km até sua disposição final, favorecendo a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera (MEIRA, 2010; CORTEZ *et al*., 2009; CORTEZ; COELHO, 2012).

Tabela 1 - Fontes de biomassa e seus respectivos valores de poder calorífico em processos termoquímicos

BIOMASSA	PODER CALORÍFICO (MJ/Kg)	REF.
Galhos de macieira	18,42	Sgorla *et al*., 2018
Folhas de macieira	19,90	Sgorla *et al.*, 2018
Folha de bananeira	19,17	Sgorla *et al*., 2018
Poda de árvore *in natura*	10,41	Gonçalves *et al*., 2019
Poda de árvore briquetada	18,43	Gonçalves *et al*., 2019
Poda de árvore	20,70	Santos; Tambani, 2019
Poda de árvore sem folhas	18,76	Silva, 2016
Poda de árvore com folhas	17,53	Silva, 2016
Poda de macieira	20,25	Jacinto, 2017
Folha de poda	20,86	Silva; Cruz, 2019
Caule de poda	18,65	Silva; Cruz, 2019
Caule + folha de poda	19,69	Silva; Cruz, 2019
Pellets de madeira	18,00	Escobar, 2016

Fonte: Elaboração própria.

Em aterros sanitários, os resíduos de poda podem se misturar a outros resíduos e contribuir para a produção de gás metano e gás carbônico, gases que ao serem lançados na atmosfera representam grande quantidade de GEE, além de aumentar os riscos de combustão. Essa destinação ainda interfere negativamente na vida útil do próprio aterro devido ao grande volume representado por esses resíduos, da degradação mais lenta quando comparado aos demais resíduos orgânicos, bem como pelas características que

inviabilizam sua compactação (MEIRA, 2010; CORTEZ *et al*., 2009).

Além disso, muitos aterros sanitários não possuem uma manutenção e gestão adequada e os resíduos de poda acabam misturados a resíduos perigosos preexistentes no local, favorecendo interações químicas e biológicas semelhantes às que ocorrem em um reator, causando impactos sobre a qualidade do ar, do solo e da água (CORTEZ *et al*., 2009; CORTEZ; COELHO, 2012). Além das destinações inadequadas apresentadas, muitas vezes os resíduos de poda são queimados juntamente a outros resíduos orgânicos e inorgânicos sem que haja qualquer pré-processamento adequado, ocasionando a geração de gases nocivos à saúde, como monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_X) (SANTOS, 2011).

De acordo com os dados de cadastramento municipal na Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), a massa total de resíduos de poda recebidas pelas unidades de processamento localizadas nas regiões nordeste, sul e sudeste do país totalizaram quase 98 mil toneladas em 2018. Vale ainda destacar que, deste total, cerca de 84% são coletadas da região nordeste, onde existe lei municipal que estabelece normas de coleta e remoção dos resíduos de poda, bem como estabelece o valor cobrado por tais serviços (CORTEZ, 2011). Além disso, a política nacional (PNRS) institui a responsabilidade da gestão integrada e do gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos de qualquer natureza (BRASIL, 2010).

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DAS PODAS E DAS APARAS

Neste capítulo, a valorização dos resíduos de podas e aparas é entendida como um processo caracterizado em diversas etapas,

sendo a principal delas a etapa de pré-processamento do resíduo, onde podemos citar a segregação adequada na própria origem a partir de características morfológicas, de diâmetro das partes e do potencial de valorização associado. Uma vez separados e classificados, as podas e as aparas recebem o nome de biomassa residual, ou apenas biomassa, que do ponto de vista energético pode ser definida como "qualquer recurso renovável oriundo da matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado para produção de energia" (GBIO-USP, 2022).

Por definição, os resíduos de poda podem ser classificados como resíduos de natureza orgânica lignocelulósica devido a presença de celulose, hemicelulose e lignina, na proporção na base seca de 50:20:30 (CORTEZ, 2011). Encontram-se sob as formas de galhos, ramos e folhas e sob a classificação residual do grupo IIA, não perigosos e não inertes (NBR 10.004/04), por apresentarem biodegradabilidade. A *biomassa residual* de podas e aparas, por serem coletadas e armazenadas juntas, se apresentam como um composto de mistura heterogênea de diversas espécies arbóreas e diversos estados fitossanitários.

No entanto, independentemente da espécie vegetal, das diferenças genéticas ou de idade, as podas são constituídas por aproximadamente 50% de carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio. Enxofre e cloro estão presentes em menos de 1% (BRASIL, 2010; MEIRA, 2010). O potencial energético associado a este resíduo é devido principalmente à presença do carbono nas formas de celulose, hemicelulose e lignina. Esses elementos químicos possuem influência direta na quantidade de energia liberada sob a forma de calor durante a sua combustão em processos de valorização termoquímica (SILVA, 2016).

Do ponto de vista energético, os principais elementos químicos dos resíduos de podas e aparas são responsáveis pela influência direta na quantidade de calor liberado durante a sua

combustão em processos termoquímicos, apresentando aproximadamente 19 MJ/Kg de poder calorífico inferior, além de possuir baixa temperatura de ignição, baixa energia de ativação e elevada taxa de combustão (MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019; SILVA, 2016). Essa energia pode ser liberada para finalidades como cocção de alimentos, aquecimento de ambientes ou de água, geração de vapor e de energia elétrica (NEVES, 2018; CORTEZ, 2011).

Essa energia liberada pode ser expressa de duas formas: Poder Calorífico Superior (PCS), processo que considera que a água formada durante a combustão é condensada e que o calor gasto em sua evaporação é recuperado; Poder Calorífico Inferior (PCI), que estabelece o potencial energético teórico contido no produto da combustão pois subtrai a energia gasta para a evaporação da água formada (SANTOS; TAMBANI, 2019). No trabalho de Santos e Tambani (2019) é possível verificar que a biomassa de poda de árvores apresenta números mais elevados de poder calorífico quando comparadas a outras espécies de biomassa, como bagaços, bambu e sorgo, palha de milho e de arroz, cascas, capim, cama aviária e a própria biomassa de madeira.

A valorização e o reaproveitamento das podas e de outras classes de resíduos urbanos na perspectiva energética como CDR já é uma realidade em diversos países e faz parte da hierarquia de resíduos no aspecto da valorização em abordagens econômicas. A sua exploração contribui para a mitigação dos efeitos nocivos causados pela problemática da geração exponencial de resíduos, como a destinação inadequada em aterros sanitários, bem como a ineficiência de gestão (GUNTHER, 2016; MARTINI, 2016). Os processos termoquímicos mais elucidados que são capazes de liberar essa energia proveniente dos resíduos envolvem calor e uma série de reações químicas, sendo eles: i) combustão direta; ii) pirólise; iii) gaseificação (SILVA, 2016).

Combustão direta

Trata-se da tecnologia de conversão termoquímica mais antiga e mais difundida atualmente (SILVA, 2011). Essa tecnologia apresenta a vantagem de ser uma tecnologia simples e de baixo custo operacional, podendo ser utilizada para geração de energia elétrica em usinas termoelétricas. No entanto, por não incluir um pré-tratamento da biomassa residual antes da incineração, a alta umidade e a baixa densidade diminuem a eficiência do processo, além de impossibilitar o controle dos gases residuais produzidos pela queima (CORTEZ, 2008).

A técnica também exige um monitoramento operacional contínuo, bem como a manutenção nos pátios de estocagem para mitigação dos efeitos nocivos à qualidade do ar e solo. De maneira generalizada, essa técnica proporciona a transformação da energia química contida na biomassa residual em calor por meio da liberação de energia calorífica inicial, seguida por uma série de reações em cadeia até a oxidação total. Essas reações são proporcionadas pela interação dos elementos constituintes com o oxigênio proveniente do ar ou de maneira forçada, denominado combustão controlada (SANTOS; TAMBANI, 2019; SILVA, 2016).

A conversão de calor em energia mecânica é, normalmente, realizada por ciclos termodinâmicos de vapor pelo uso de caldeiras, turbinas a vapor, condensador e bomba de alimentação da caldeira. Os gases da combustão estão submetidos a uma temperatura entre 800ºC e 900ºC e durante o processo trocam calor com as paredes do incinerador e trocadores de calor, gerando vapor que será utilizado para geração energética ou para aquecimento (SANTOS; TAMBANI, 2019).

Pirólise

A pirólise de biomassa sólida de podas e aparas ocorre a partir da decomposição térmica da biomassa residual na ausência parcial ou total de oxigênio, e temperatura controlada entre 300ºC e 500ºC. Essa técnica possibilita a conversão da matéria orgânica em subprodutos de maior qualidade e maior densidade energética, como por exemplo o carvão vegetal, a partir da perda de compostos voláteis de oxigênio e hidrogênio e concentração de carbono, bem como pela perda de volume e densidade (CORTEZ, 2008). Além do combustível gasoso, a pirólise também produz ácido pirolenhoso e resíduo sólido de alcatrão (BRITO, 1990; PEDROZA *et al*., 2017).

Existem outros métodos de pirólise de biomassa residual que são considerados mais avançados quando comparado ao processo de produção de carvão mineral, cujo produto final são bio-óleos com maior valor agregado. Tais métodos necessitam de intervalos maiores de temperatura, de 600ºC a 1200ºC, bem como de um pré-processo mais controlado onde os resíduos são transformados em partículas inferiores a 2 mm e possuam umidade em torno de 10%.

Então, apesar da valorização energética de resíduos de podas e aparas por meio da pirólise representar uma importante ferramenta na produção de biocombustíveis, que por sua vez representam parcela importante na matriz energética nacional, há ainda um grande gargalo na implementação de usinas de aproveitamento energético deste tipo de resíduo por questões de licenciamentos ambientais do empreendimento e econômicos relacionados à falta de investimento pelos poderes públicos relacionados ao setor (PEDROSA *et al*., 2017).

Gaseificação

O processo de valorização térmica a partir de gaseificação envolve a conversão de qualquer espécie de hidrocarboneto sólido em um produto gasoso, considerado gás de síntese, com um poder calorífico na ordem de 5 MJ/Kg por meio da oxidação parcial do O_2, gerando H_2 e CO. O processo pode ocorrer em condições de leito fixo ou leito fluidizado em fluxo contínuo ou em batelada. Além da valorização energética dos resíduos em processo de gaseificação, o método produz também combustíveis líquidos com potencial de introdução na cadeia energética renovável por meio de processos de síntese química catalítica, como por exemplo o diesel, gasolina, metanol, dentre outros, e etanol a partir da fermentação do gás de síntese (SILVA, 2016; SANTOS; TAMBANI, 2019).

Apesar do processo de gaseificação apresentar diversas vantagens no aspecto produtivo em relação a queima direta da biomassa, considerando o manuseio e custo de instalação e manutenção ela é um processo tecnicamente mais complexo de se realizar. A manutenção é estritamente necessária para que haja regularidade na limpeza dos gases para evitar a emissão atmosférica de material particulado e alcatrão (ARDILA, 2015).

Para diminuição dos impactos negativos ao meio ambiente, tanto para os processos de gaseificação quanto os demais processos termoquímicos, faz-se necessário que haja algum pré-tratamento para retirada da umidade pela secagem em estufa e para diminuição do tamanho, ou até mesmo densificação da biomassa residual antes da gaseificação. Esses pré-tratamentos, ou pré-processamento, apesar de representarem um maior consumo energético durante o processo geral, aumenta significativamente a eficiência do processo (ARDILA, 2015; CORTEZ, 2011).

PADRONIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Mesmo grandes volumes, as podas e aparas apresentam baixa densidade e alto teor de umidade. Essas condições dificultam a sua utilização em processos de valorização nas escalas necessárias de acordo com os índices de geração. Sendo assim, a realização da etapa de processamento físico da biomassa residual a torna mais densa e com baixo teor de umidade, fato que permite aumento na densidade energética do resíduo e eficiência na conversão de energia em cerca de 75%, bem como a redução na emissão de partículas e gases poluentes como o monóxido de carbono (SILVA, 2016).

Além disso, a forma geométrica regular e o padrão no tamanho dos pellets permitem um melhor manuseio, homogeneidade do material, bem como permite um melhor armazenamento e operação em grandes escalas, reduzindo principalmente custos operacionais relacionados a transporte e logística (CORTEZ, 2011; SILVA, 2016). Tais justificativas para que se realize algum processo físico antes de converter termoquimicamente a biomassa é devido principalmente a heterogeneidade e características físicas das podas e aparas (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

Além disso, como mostrado na Tabela 1, diferentes partes dos resíduos de podas e aparas apresentam diferentes valores de poder calorífico em processos termoquímicos, fato que corrobora a necessidade de uma maior caracterização e segregação na fonte geradora do resíduo, para que todo o resíduo tenha o seu melhor aproveitamento de acordo com cada potencial de valorização associado.

Os processos físicos mais utilizados para este processo de aproveitamento são a briquetagem, extrusão ou, na maioria das vezes, a peletização (CORTEZ, 2011). Assim, do ponto de vista da valorização energética dos resíduos de podas e aparas, o processo

físico permite maior aproveitamento energético da biomassa residual, sendo transformada pelos processos de compactação em briquetes ou *pellets*. O processo de briquetagem se difere do processo de peletização em relação à temperatura em que a biomassa é submetida, acima de 200ºC, em relação ao uso de aglomerantes e em relação ao tamanho usual do produto produzido ser maior quando comparado ao *pellet* (SILVA, 2016).

A produção de *pellets* começa com a geração da matéria-prima e após seleção, passa por um processo de uniformização em moinho industrial para padronização das partículas. Os *pellets* formados devem possuir baixo teor de umidade para que tenham alto poder calorífico, fato que implica em um processo de secagem uniforme em secadores rotativos logo após a uniformização das partículas (CORTEZ, 2011; SILVA, 2016).

Após secagem ocorre o processo de compactação ou peletização, por meio da extrusão da matéria-prima por matriz perfurada, normalmente de aço, em alta pressão e temperatura. Ao final, o produto sai com alta temperatura e maciez, fazendo-se necessário o resfriamento e estabilização do elemento ligante, reforçando as estruturas internas dos *pellets* (BOSMANS; HELSEN, 2010; GARCIA, 2010).

Uma questão associada a este processo em escalas maiores de peletização está no variado número de tipos de biomassa utilizado, variando em diversos aspectos morfológicos entre si e muitas vezes não resultando em um *pellet* de qualidade (GARCIA, 2010).

O uso em larga escala de *pellets* a partir de biomassa data do final da década de 1970, no hemisfério norte, como alternativa à crise do petróleo vivenciada na época. Os altos preços forçaram a busca por combustíveis alternativos para uso no setor energético primário, como aquecimento industrial e comercial. No entanto, produzidos

apenas a partir de resíduos da indústria madeireira, o mercado de *pellets* só atingiu um ponto considerável no setor energético nos anos 2000 com a entrada de novos produtores e aumento da demanda, chegando a 594 indústrias no final de 2010 (GARCIA, 2010).

De acordo com Cortez (2010), estima-se que o consumo mundial de *pellets* em 2018 foi de cerca de 24 milhões de toneladas, tendo como principais consumidores a Europa e a América do Norte. Outros países possuem estudos de casos bem sucedidos sobre geração descentralizada de energia a partir de biomassa, como por exemplo a Índia, cuja biomassa principal é encontrada no resíduo de arroz. (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018; MARTINI, 2016).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A valorização de podas e aparas representa um importante passo rumo à sustentabilidade, especialmente no espaço urbano. O seu grande potencial de geração de energia está associado ainda à redução de desperdício de grande número de toneladas desse tipo de resíduo. Por apresentarem componentes ricos em carbono e oxigênio, os resíduos de podas e aparas representam um componente valioso para o futuro do ponto de vista energético. Seu maior aproveitamento ainda está associado à exploração pelo uso tradicional de reciclagem da matéria orgânica a partir da técnica de compostagem, cuja importância é indiscutível do ponto de vista da manutenção dos níveis de nutrientes dos solos, mas que sozinha não se apresenta como uma solução factível às grandes demandas urbanas.

Há também poucos estudos de valorização de resíduos orgânicos oriundos apenas de atividades de podas e aparas do ponto

de vista do aproveitamento energético, fato que diminui as possíveis rotas de atuação para valorização capaz de suprir as crescentes demandas frente à legislação estabelecida, uma vez que os trabalhos a respeito do tema mostram que os instrumentos de gestão dos resíduos sólidos encontram alicerce no conceito de hierarquia de resíduos estabelecido pela PNRS (MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019).

Por outro lado, alguns desafios são notados para o aproveitamento desses resíduos do ponto de vista da disseminação da valorização energética, a citar a diversidade de componentes que o constituem tais como folhagens, gravetos, cascas da árvore, troncos, raízes etc. Essa variedade reflete as diferentes condições químicas de cada componente do resíduo, o que também irá influenciar no potencial energético de valorização associado.

De modo geral, a partir da abordagem deste capítulo, entende-se que a valorização de podas e aparas é um caminho possível e importante na sociedade atual, demonstrado pelo seu potencial de geração de energia e diante de uma sociedade cada vez mais necessitada de fontes energéticas sustentáveis. Esse aproveitamento se traduz ainda como um dos instrumentos importantes da gestão sustentável de resíduos sólidos no espaço urbano, buscando aliviar aterros sanitários da sobrecarga de resíduos produzidos no espaço urbano e ainda contribuindo para evitar impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019.

ARDILA, Y. C. **Gaseificação da biomassa para produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol**: modelagem e simulação do processo (Tese de Doutorado em Engenharia Química). Campinas: UNICAMP, 2015.

BOSMANS, A.; HELSEN, L. "Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment". **Annals of International Symposium on Energy from Biomass and Waste**. Venice: Eurowaste Srl, 2010.

Boulding, K. "The Economics of the Coming Spaceship Earth". *In*: Jarrett, H. (ed.). **Environmental Quality in a Growing Economy, Resources for the Future**. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1966.

BRASIL. **Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Brasília: Planalto, 1981. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 06/03/2022.

BRASIL. **Lei n. 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Brasília: Planalto, 2007. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 06/03/2022.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Brasília: Planalto, 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 06/03/2022.

CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia-estudo de caso**: AES Eletropaulo (Tese de Doutorado em Energia). São Paulo: USP, 2011

CORTEZ, C. L. *et al.* "Alternativa sustentável para utilização de resíduos de poda provenientes da manutenção das redes de

distribuição de energia elétrica". **Anais do VII Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**. Fortaleza: CBENS, 2009.

CORTEZ, C. L.; COELHO, S. T. "Estudo do potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos de poda de árvores urbanas". **XII Safety, Health and Environment World Congress**. São Paulo: SHEWC, 2012.

ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil**: O caso dos pellets de madeira (Tese de Doutorado em Energia). São Paulo: USP, 2016

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica). São Paulo: UNESP, 2010.

GONÇALVES, F. *et al.* "Avaliação do potencial energético dos resíduos lignocelulósicos gerados no campus da Unifor". **Anais do Congresso Internacional de Biomassa**. Curitiba. CIBIO, 2019.

GUNTHER, W R. "La cuestión de los residuos sólidos en la interfaz ambiente-salud". **Anales del IV Congreso Latinoamericano y del Caribe de Salud Global**. Buenos Aires: Universidad ISALUD, 2016.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. "Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade". **Revista Estudos Avançados**, vol. 25, n. 71, 2011.

JUNIOR, P. A. F. V. O combustível derivado de resíduos no contexto das políticas nacionais de energia e resíduos sólidos. **Anais do XXIII Congresso Nacional do CONPEDI**. João Pessoa: CONPEDI, 2014.

MARTINI, A. A. **Estudo de alternativa de valorização de resíduos de serviços de saúde advindos de processo de desinfecção por desativação eletrotérmica (ETD)** (Dissertação de Mestrado em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade). São Paulo: USP, 2016.

MEIRA, A. M. **Gestão de resíduos da arborização urbana** (Tese de Doutorado em Ciências). São Paulo: USP, 2010.

MOALLEMI, E. A. *et al*. "Local Agenda 2030 for sustainable development". **The Lancet Planetary Health**, vol. 3, n. 6, 2019.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7**: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos. Brasília: ONU, 2015.

PRADHAN, P.; ARORA, A.; MAHAJANI, S. M. "Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass". **Energy for Sustainable Development**, vol. 43, 2018.

PRADHAN, P.; MAHAJANI, S. M.; ARORA, A. "Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review". **Fuel Processing Technology**, vol. 181, 2018.

SILVA, D. P. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético**: o caso do campus da USP na capital (Tese de Doutorado em Energia). São Paulo: USP, 2016

SILVA, J. B. S.; CRUZ, G. "Potencial energético dos resíduos de podas urbanas e reaproveitamento por meio da produção de biocombustíveis". **Anais do VI Congresso Brasileiro de Resíduos Sólidos**. São Luís: CEUMA, 2019.

USHIMA, A. H. "Os desafios para viabilizar resíduos agrícolas como combustíveis". **Revista Brasil Energia**, n. 457, 2019.

ZYLBERSZTAJN, D. "Conversando sobre energia". **Portal Eletrônico da FGV** [2014]. Disponível em: <www.fgv.br>. Acesso em: 09/03/2022.

ZYLBERSZTAJN, D. "Velocidade da transição energética pós pandemia". **Portal Eletrônico da UFRJ** [27/05/2020]. Disponível em: <www.ufrj.edu.br>. Acesso em: 09/03/2022.

CAPÍTULO 6

Avaliação da Evolução Geomecânica de Aterros Sanitários com Base em Ensaios de Campo

AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO GEOMECÂNICA DE ATERROS SANITÁRIOS COM BASE EM ENSAIOS DE CAMPO

Roberto Antônio Cordeiro da Silva

Sonia Maria Silva Vasconcelos

Alfran Moura Sampaio

Os aterros sanitários são empreendimentos destinados à deposição final dos resíduos sólidos gerados pela atividade humana. Estes são compostos de resíduos domésticos, comerciais, de serviço de saúde, da indústria de construção, enfim, resíduos que não sofreram nenhum destino nobre como a reutilização, reciclagem, compostagem, aproveitamento energético e mesmo os resíduos não aproveitados de usinas de reciclagem.

O aterro sanitário é a solução mais usada de disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no solo, pois quando gerenciados com o rigor em suas várias etapas, podem não causar danos e riscos à saúde, e à segurança das pessoas, com impactos ambientais minimizados, pois permite, ou pelo menos deveria o monitoramento e tratamento dos líquidos e gases gerados pela decomposição dos resíduos.

As principais propriedades mecânicas dos RSU relacionadas ao seu uso como suporte de pequenas obras de engenharia estão relacionadas à sua resistência ao cisalhamento, à sua compressibilidade e à sua permeabilidade. Todas estas propriedades são bastante influenciadas pela composição e estado de alteração do resíduo consolidado, bem como pelos índices físicos e pelo comportamento mecânico individual de cada um de seus

componentes, que apesar da grande heterogeneidade quando estão dispostos no corpo do maciço do aterro, compactados e após os recalques, com a retirada dos gases de efeito estufa (GEE) e do lixiviado, podem relativamente tornar-se estáveis, com características muito próximas as de materiais geotécnicos convencionais.

OBJETIVO

Avaliar a evolução geomecânica ao longo do tempo de aterros sanitários através da realização de ensaios de campo com o uso de equipamentos de spt, *GeoGauge* e ensaio de placa (PDC) em resíduo novo (célula experimental-CE) e em resíduo antigo (células desativadas - AA) com características semelhantes. Realizar medidas de rigidez nos RSU através do GeoGauge, para verificar de forma pioneira sua aplicabilidade em obras de maciços de aterros sanitários. Verificando se existe tendências na mudança de comportamento nos RSU ao longo do tempo.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O local escolhido foi o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), pela sua proximidade, localizando-se a 1,6 km da BR-020, em Caucaia-Ceará, 30 km do centro de Fortaleza. Também pelo histórico de trabalhos já desenvolvidos no local, por ser um aterro em atividade, o que possibilita o aproveitamento de equipamentos em uso na operação do aterro para o apoio nas pesquisas, e, por fim, por existir uma célula experimental (CE), construída em condições projetadas.

Utilizou-se a formulação de Teixeira e Godoy (1996) para a previsão dos módulos de elasticidade a partir do SPT. Obtendo-se o módulo de elasticidade do GeoGauge e a capacidade de carga a partir do ensaio de prova de carga direta (PDC) pode-se fazer uma previsão dos Módulos de Elasticidade e Comparação das Previsões. Logo a seguir a Previsão de recalques no maciço de RSU.

ENSAIOS DE CAMPO

Sondagens à Percussão (SPT)

As 5 sondagens à percussão (SPT) foram realizadas sem revestimentos, já que não houve desmoronamento de paredes e tampouco houve utilização de água para lavagem. Os valores de N adotados correspondem à soma dos valores medidos para penetrar os 30 cm finais do mostrador. Conforme relatado na primeira campanha de 2014, foram realizados 4 ensaios de sondagem à percussão, sendo 2 ensaios na célula experimental e outros 2 na célula 9 (aterro antigo).

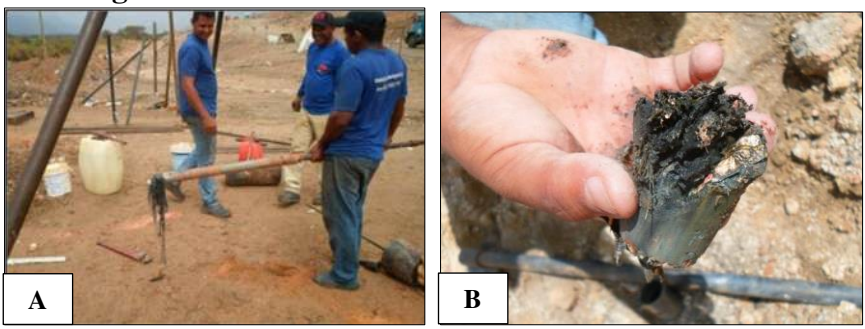
Já na campanha de 2015, foram realizados apenas 2 ensaios de sondagem à percussão, 1 na célula experimental e 1 ensaio na célula 9, condição de aterro antigo.

Na campanha de 2016, foram realizados outros 2 ensaios de sondagem à percussão: 1 na célula experimental e 1 ensaio na célula 9, do aterro antigo. Vale comentar que, durante o ano de 2016, a célula 9 voltou a ser utilizada para disposição de RSU, por isso não foi mais alvo de novos ensaios.

Vale destacar que as sondagens à percussão realizadas na Célula Experimental foram executadas até a profundidade do fundo da escavação da Célula Experimental, ou seja, 4,0 m. Durante a execução do ensaio, não era raro não virem amostras de RSU no mostrador, conforme ilustra a 1a. Já na 1b, mostra-se amostra de

RSU, obtida durante a execução das sondagens à percussão realizada na Célula Experimental.

Figura 1 - Amostrador obstruído e amostra de RSU



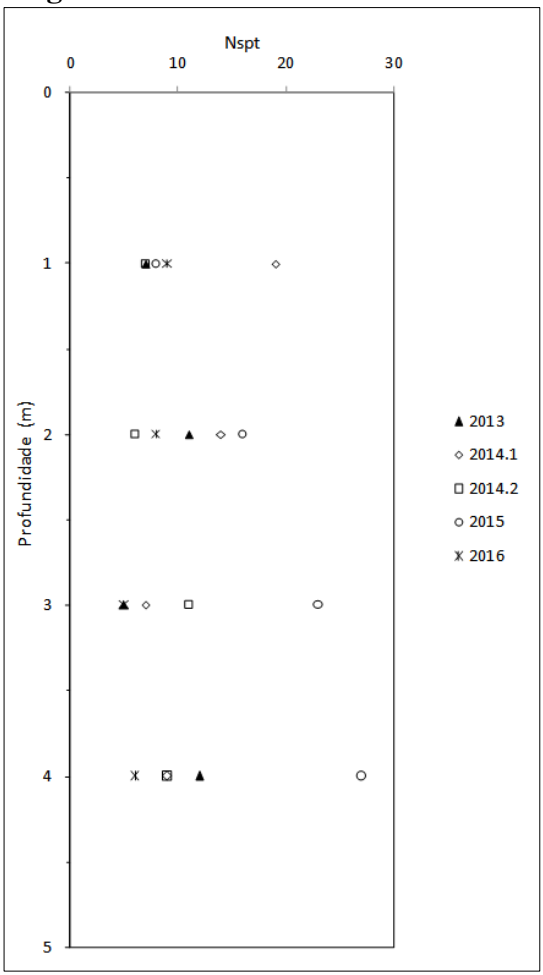
A Figura 2 mostra todos os perfis de resistência obtidos com as 5 sondagens à percussão realizadas na Célula Experimental. Vale comentar que a sondagem à percussão, realizada em 2013, foi executada por Carneiro (2013). Nesses perfis podem ser confrontados os valores de resistência à penetração (Nspt) ao longo da profundidade e do tempo.

A partir do gráfico da Figura 2, observa-se que os valores do Nspt, obtidos a partir da sondagem de 2013, apresentam a menor variação de resultados, com valores que oscilam entre 5 e 12 golpes.

As sondagens realizadas em 2014.1 apresentaram valores que variaram consideravelmente, logo na posição mais superior dos RSU, a 1 m de profundidade, evidenciando um obstáculo encontrado, em seguida os valores do Nspt apresentaram valores menores entre 7 e 13 golpes.

Já as sondagens realizadas em 2014.2 forneceram resultados com baixa variação, neste caso, o Nspt variou apenas entre 7 e 11.

Figura 2 - Perfis de resistência na CE



O ensaio de sondagem à percussão de 2015 apresenta, na profundidade de 1 m, valores de Nspt próximos dos demais, mas logo na profundidade de 2 m, inicia uma discrepância que atinge o valor máximo de 27 a 4 m de profundidade.

Os valores de Nspt de 2016 são os que apresentam resultados mais concentrados, com valores de Nspt variando apenas entre 5 e 9.

No ensaio de sondagem à percussão de 2015, observa-se um distanciamento dos valores de Nspt nas últimas profundidades, evidenciando algum resíduo mais resistente. Excluindo-se estes valores de Nspt de 2015 (de 3 m e 4 m), a variação de Nspt fica entre 5 e 19, sendo a média de N igual a 10.

Aterro Antigo

A Figura 3 apresenta os perfis de resistência obtidos com as 5 sondagens à percussão (SPT) realizadas no Aterro Antigo, as sondagens executadas no ano de 2013 foram executadas por Carneiro (2013). Nesses perfis, podem ser evidenciados os valores de resistência à penetração N e a profundidade.

Por meio do gráfico da Figura 3 pode-se notar que o SPT de 2013 apresenta-se homogêneo, com valores de Nspt entre 9 e 15.

O ensaio de sondagem à percussão de 2014.1 mostra valores de Nspt de 8 a 1 m; 12 a 2 m; 18 a 3 m; 8 a 4 m; e 9 a 5 m.

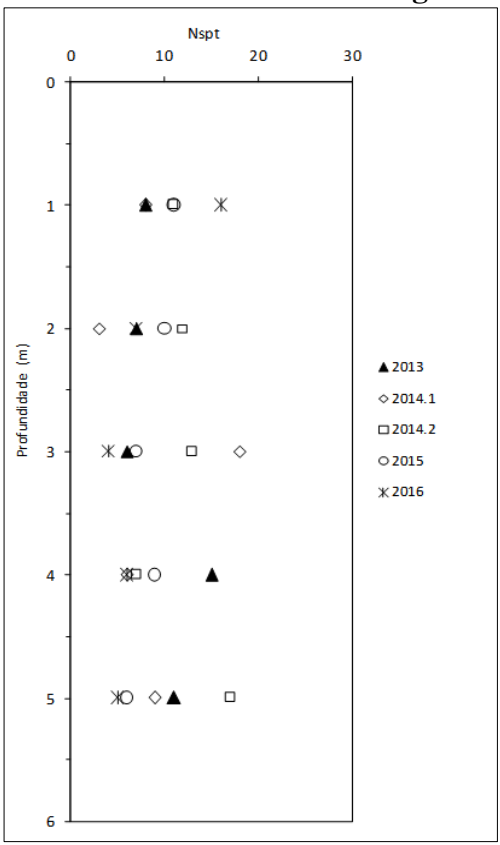
O ensaio de sondagem à percussão de 2014.2 apresenta resultados nas profundidades iniciais próximos, o Nspt varia de 8 a 13 de 1 a 4 m, só a 5 m que seu valor passa para 17.

Os resultados do ensaio de sondagem à percussão de 2015 mostraram-se bastante concentrados com valores de Nspt entre 6 e 10.

O ensaio de sondagem à percussão de 2016 apresentou resultado discrepante no primeiro metro, Nspt de 17, evidenciando obstáculos, porém, muito concentrado, sendo os mais baixos valores em relação aos demais, com Nspt variando de 4 a 7, evidenciando,

possivelmente, que os processos de biodegradação já não estão mais ocorrendo.

Figura 3 - Perfis de resistência no Aterro Antigo



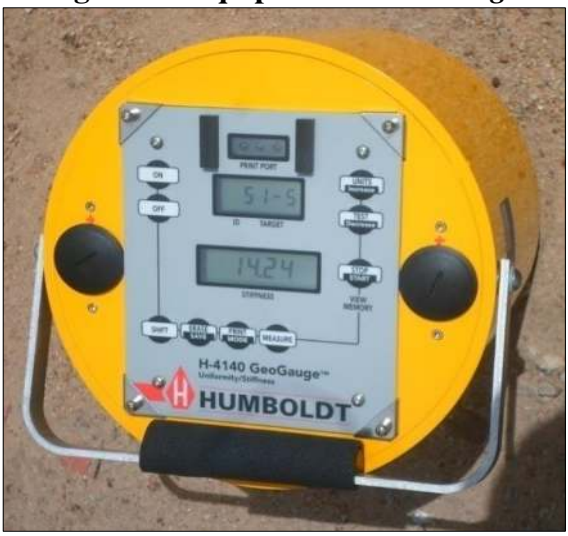
Há uma proximidade de valor de Nspt e de tendência de variação ao longo da profundidade nos anos de 2015 e 2016.

Há uma mesma concentração dos resultados de Nspt entre 5 e 15. O Nspt variou de 6 a 18, sendo a média de 10, com valores ligeiramente crescentes com a profundidade.

Ensaios de *GeoGauge*

Foram realizadas três baterias de ensaios de campo. A primeira bateria (2014), com 10 ensaios com o *GeoGauge*, 8 na Célula Experimental (CE) e 2 no Aterro Antigo (AA). A segunda bateria (2015), 4 ensaios de *GeoGauge* (2 na Célula Experimental (CE) e 2 no Aterro Antigo (AA). A terceira bateria (2016) constou de 5 ensaios de *GeoGauge*, sendo 2 na CE e 3 foram realizados no AA).

Figura 4 - Equipamento *GeoGauge*



O equipamento para medida de rigidez do solo *(Soil Stiffness Gauge – SSG*), conhecido como *GeoGauge*, foi utilizado para a obtenção do módulo de elasticidade e, portanto, da deformabilidade, tanto do solo de cobertura quanto do maciço de RSU. A Figura 1 apresenta uma vista superior do *GeoGauge.*

Os procedimentos para a utilização do equipamento *GeoGauge* são padronizados pela Norma ASTM D6758-02 e rigorosamente adotados nessa pesquisa. Para a realização de ensaios, o equipamento foi, inicialmente, colocado sobre a camada a ser avaliada. Usualmente, as superfícies das camadas a serem ensaiadas dispensam preparações que não vão além de uma limpeza e raspagem prévias, quando necessárias. Para assegurar uma razoável área de contato entre a base do equipamento e a superfície da camada, capaz de prover uma distribuição uniforme das tensões aplicadas pelo equipamento, aplicou-se uma leve prensagem e rotação do equipamento sobre a camada. Com o equipamento posicionado sobre a camada, iniciou-se o ensaio, que dura aproximadamente 75 segundos, quando, então, apresentam-se, na tela do equipamento, as leituras obtidas da camada de material escavado.

O *GeoGauge* é um equipamento que é utilizado, mais comumente, em solo natural e compactado. Nesta pesquisa é um equipamento utilizado, pioneiramente, para a obtenção de parâmetros de deformação de maciços de RSU.

O *GeoGauge* trabalha medindo a tensão imposta à superfície do solo e à velocidade resultante na superfície, como uma função do tempo. Trata-se de medir a impedância na superfície do solo. Uma razão entre força e deflexão, a rigidez resulta diretamente da medida de impedância. Para a realização do ensaio, o equipamento impõe ao solo pequenos deslocamentos ($<1{,}27 \times 10^{-6}$m) a 25 frequências fixas entre 100 e 196 Hz.

A rigidez é determinada para cada um desses 25 estágios de frequência, e a média dos valores é, então, exibida. Ainda a frequências baixas, a impedância da superfície do solo corresponde à rigidez e é proporcional ao módulo cisalhante do solo. Cabe ao usuário do equipamento fornecer ao equipamento o coeficiente de Poisson (v) do material, sendo os módulos cisalhantes e de elasticidade do solo determinados pelo equipamento.

O equipamento possui um pé circular, o qual permite ser posicionado diretamente sobre o solo. As principais características dele são os seguintes:

- Peso 10 kg;
- Altura 28 centímetros;
- Diâmetro 27 centímetros;
- Rigidez - 3 até 70 MN/m;
- Módulo de Young - 26 até 607 MPa;
- Coeficiente de Poisson: 0.20 até 0.50 em incrementos de 0.05;
- Profundidade de medida - 220 até 310 mm;
- Duração da bateria - 500 a 1.500 medidas;
- Temperatura de operação: 0 a 38°C.

Vale comentar que o equipamento *GeoGauge* impõe tensões que se encontram dentro da fase elástica do solo, e somente nesta fase é que se pode determinar valores reais de módulos de elasticidade para o solo.

O *GeoGauge* permite monitorar a variabilidade de propriedades ao longo da camada que se pretende avaliar, possibilitando a identificação de alterações nessas propriedades e

exibindo, durante o processo de compactação das camadas, as porções menos rígidas.

Ensaios de *GeoGauge*

Na primeira campanha, de 2014, foram realizados 10 ensaios *GeoGauge* na célula experimental, sendo 1 sobre o solo de cobertura, posicionando o equipamento na cobertura vegetal, em outras 2 a base do equipamento foi posicionada em alturas médias e outros dois no topo do maciço de RSU. No Aterro antigo, foram realizados quatro ensaios, dois ensaios em alturas médias e dois ensaios no contato com o RSU, com cerca de 13 anos de repouso.

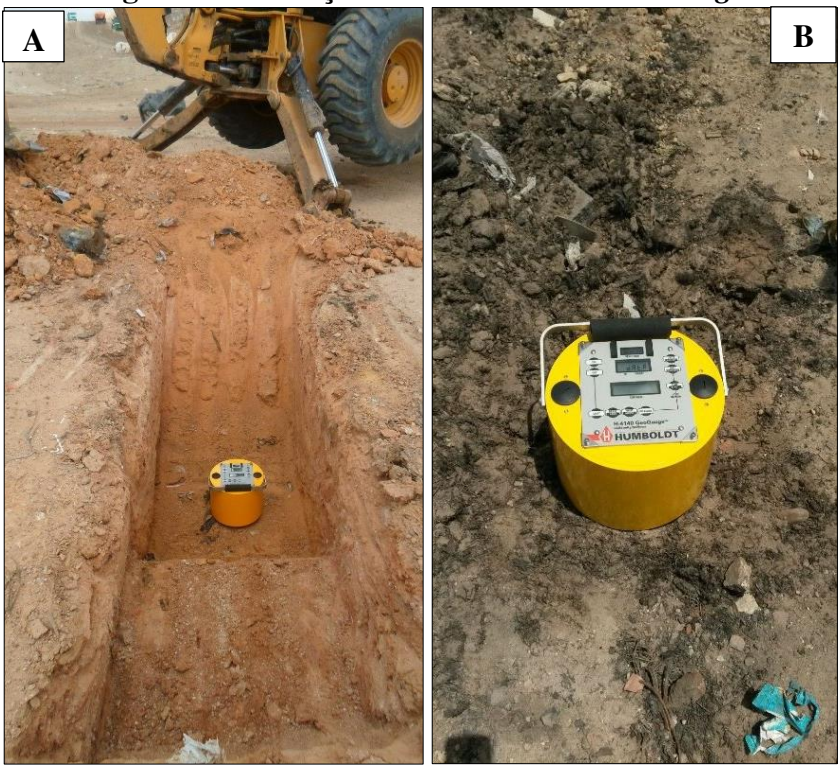
Na segunda campanha, de 2015, foram realizados 2 ensaios *GeoGauge* na célula experimental, ambos posicionando a base do equipamento no topo do maciço do RSU. No Aterro antigo, foram realizados outros 2 ensaios em posição análoga aos realizados na Célula Experimental.

Na campanha de 2016, foram realizados apenas 4 ensaios com o *GeoGauge:* 2 ensaios na célula experimental e dois ensaios na célula S-1, no aterro antigo. A célula S-9 não foi ensaiada porque no momento dos ensaios recebeu uma descarga de resíduos.

Vale comentar que uma dificuldade adicional para a realização dos ensaios era a execução das escavações e a preparação das superfícies ensaiadas, devido à necessidade de utilização de um veículo para escavação e a própria natureza do material escavado.

Na Figura 5, mostra-se o equipamento utilizado nas escavações da Célula Experimental, posicionado no interior de uma vala aberta, a cerca de 75 cm de profundidade, por uma retroescavadeira utilizada nas escavações da Célula Experimental.

Figura 5 - Execução do Ensaio com o *GeoGauge*



Nota 1: A) escavação; B) posicionamento do equipamento.
Nota 2: No fundo da vala (A) e na superfície (B).

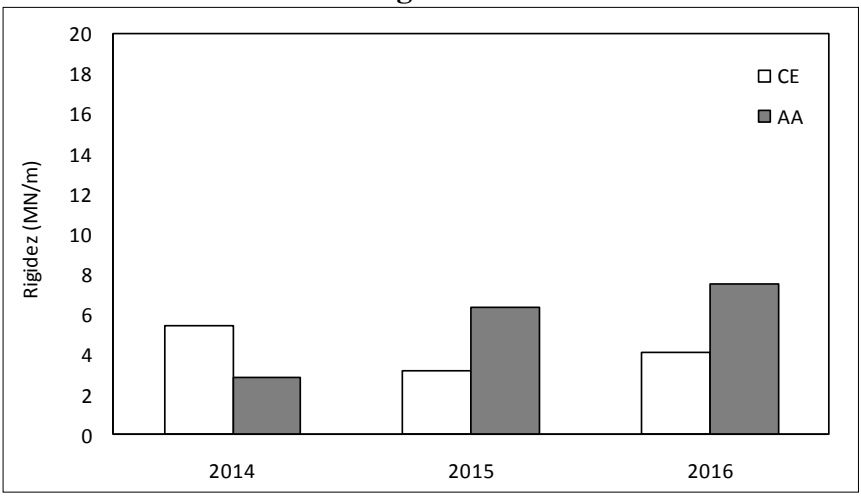
Ao longo do tempo realizaram-se ensaios nos resíduos da Célula Experimental e no Aterro Antigo nos anos de 2015 e 2016. Na Tabela 1 mostram-se os resultados dos ensaios realizados com o *GeoGauge* nos RSU da Célula Experimental e do Aterro Antigo ao longo do tempo, nos anos de 2014, 2015 e 2016.

Tabela 1 - Resultados ensaios com o GeoGauge em função do tempo

	Rigidez (MN/m)		
	2014	**2015**	**2016**
CÉLULA EXPERIMENTAL	5,38 5,50 5,54	3,12 3,24 3,25	4,62 3,08 4,61
MÉDIA	5,47	3,20	4,10
ATERRO ANTIGO	2,12 3,16 3,34	8,84 4,16 6,10	7,21 7,96 7,47
MÉDIA	2,87	6,37	7,55

A Figura 6 compara todos os resultados encontrados com o *GeoGauge* ao longo do tempo.

Figura 6 - Comparação dos resultados da rigidez na CE e no AA



Através da 6 observa-se que nos resíduos da Célula Experimental houve uma redução significativa da rigidez entre os anos de 2014 e 2015, e em seguida um rápido aumento de 2015 para 2016. Já em relação ao Aterro Antigo mais que dobrou os valores nos anos de 2014 e 2015, seguido por um relativo acréscimo entre os anos de 2015 e 2016.

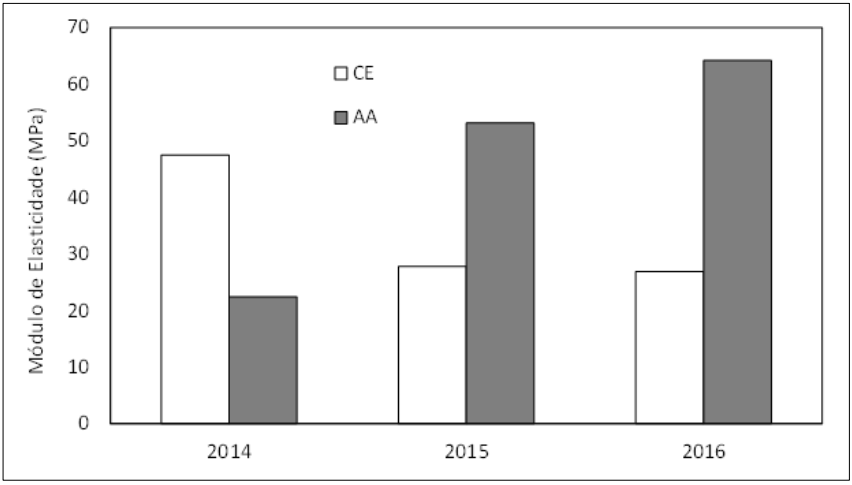
Novamente, considerando um Poisson para os resíduos, tanto na CE quanto no AA, de 0,35 determinaram-se os módulos de elasticidade ao longo do intervalo de tempo dos ensaios. A Tabela 2 mostra os valores dos módulos de elasticidade ao longo do tempo.

Tabela 2 - Resultados ensaios com o *Geogauge* em função do tempo

	Módulo de Elasticidade (MPa)		
	2014	**2015**	**2016**
CÉLULA EXPERIMENTAL	46,67 47,73 48,02	27,06 28,12 28,20	26,70 27,16 26,85
MÉDIA	47,47	27,79	26,90
ATERRO ANTIGO	18,40 23,77 25,14	76,68 36,13 46,52	62,58 64,82 65,17
MÉDIA	22,44	53,11	64,19

A Figura 7 mostra a variação obtida com relação às determinações do módulo de elasticidade realizadas ao longo do tempo. Pode-se observar que houve uma significativa redução nos valores do módulo de elasticidade na Célula Experimental do ano de 2014 para 2015 e que depois essa redução tornou-se muito pequena (de 2015 para 2016). Já no Aterro Antigo ocorreu um acréscimo significativo no módulo de elasticidade entre os anos de 2014 e 2015, entretanto entre os anos de 2015 e 2016 esse acréscimo foi um pouco menor.

Figura 7 - Variação dos módulos de elasticidade em função do tempo



Na Tabela 3 apresenta-se o resumo dos ensaios realizados nos resíduos da Célula Experimental e do Aterro Antigo, nela apresentam-se as médias das medidas das rigidezes e das determinações do módulo de elasticidade de cada ano de realização dos ensaios.

Tabela 3 - Resumo das médias de rigidez e das determinações do módulo de elasticidade ao longo do tempo

CÉLULA EXPERIMENTAL			ATERRO ANTIGO	
ANO	**Rigidez (MN/m)**	**Modulo de Elasticidade (MPa)**	**Rigidez (MN/m)**	**Módulo de Elasticidade (MPa)**
2014	5,47	47,47	2,87	22,44
2015	3,20	27,79	6,37	53,11
2016	4,10	26,90	7,55	64,19
Média	**4,26**	**34,05**	**5,60**	**39,91**

Observa-se pela Tabela 3 que enquanto a rigidez teve seus valores reduzidos ao longo dos anos na Célula Experimental, no Aterro Antigo houve um acréscimo. No caso do módulo de elasticidade aconteceu o contrário, os valores na Célula Experimental foram reduzindo seus valores ao longo dos anos, enquanto no Aterro Antigo os valores cresceram significativamente.

Entre as determinações feitas nos anos de 2015 e 2016, uma grande proximidade de valores do módulo de elasticidade e da rigidez na Célula Experimental, além de uma grande diferença destes valores em relação ao ano de 2014, tratando-se, portanto, de uma redução não regular, mas recorrente em todos os valores.

Pode ser um indício de maiores processos de biodegeneração entre os anos de 2014 e 2015 e um indício de estabilização de processos de biodegeneração entre os anos de 2015 e 2016. Isso é, esta pesquisa pode ter identificado o momento da estabilização dos processos de biodegeneração na célula experimental construída em 2011, portanto, quatro anos após a sua construção.

No aterro antigo, aparece um aumento significativo e regular nos valores do módulo de elasticidade e também na rigidez, o que era de se esperar, pois os processos de biodegeneração já se encerraram nessa idade. O interessante é a regularidade desses acréscimos, quase o mesmo valor entre os anos, tanto para o módulo de elasticidade como para a rigidez.

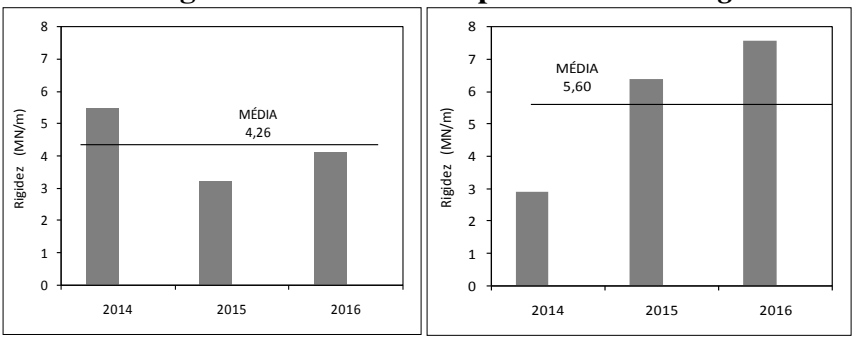
Os valores mais elevados das médias tanto dos módulos de elasticidade como da rigidez com relação a esses valores na CE corroboram a melhoria da resistência do maciço de RSU após os processos de biodegeneração.

A clareza dos valores encontrados como aparelho *GeoGauge* pode indicar sua utilização na medição de dados de módulo de elasticidade e rigidez em maciços de RSU.

São necessários mais ensaios para os resultados serem representativos, uma vez que, possivelmente, o aterro antigo não é representativo da Célula Experimental.

Na Figura 8 são apresentados os resultados das determinações da rigidez em gráficos de barras obtidos com o equipamento *GeoGauge*, onde se observam uma proximidade de valores na Célula Experimental e uma acentuada diferença de valores para o aterro antigo.

Figura 8 - Comparação dos valores médios da Rigidez determinados a partir do *GeoGauge*

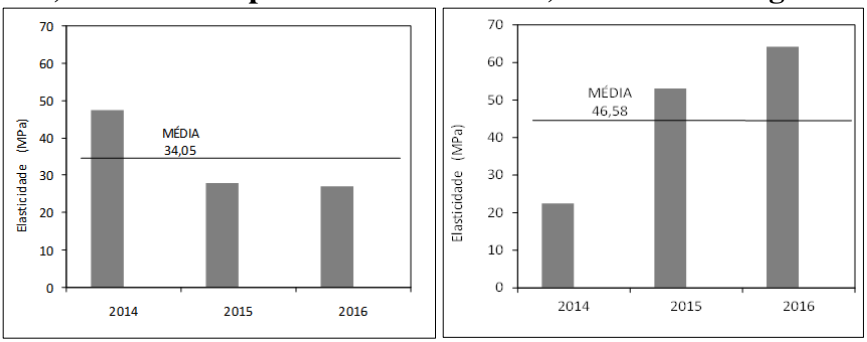


A) na Célula Experimental **B) no Aterro Antigo**

Na Célula Experimental a média da rigidez diminuiu muito de 2014 para 2015 e depois aumentou relativamente de 2015 para 2016, enquanto no Aterro Antigo a rigidez média mais que dobrou de 2014 para 2015 e que de 2015 para 2016 a rigidez continuou aumentando menos um pouco, mas de forma praticamente linear.

Na Figura 9, são comparadas as médias dos resultados das determinações do módulo de elasticidade com o equipamento *GeoGauge* a partir dos gráficos de barras.

Figura 9 - Comparação dos valores médios
Módulo de Elasticidade determinados a partir do *GeoGauge*
A) na Célula Experimental B) no Aterro Antigo



Na Célula Experimental a média do módulo de elasticidade diminuiu com o tempo enquanto no Aterro Antigo o módulo de elasticidade médio aumentou com o tempo de forma que este aumento foi praticamente.

Ensaios de Prova de Carga Direta

As provas de cargas diretas foram realizadas tanto na célula experimental quanto no aterro antigo. Os ensaios foram executados conforme as orientações da norma NBR 6489 (ABNT, 1984), com exceção do tamanho da placa, uma placa de aço rígida, que foi carregada em estágios por um macaco hidráulico, reagindo contra um sistema de reação, neste caso foram utilizados veículos aproveitados da própria obra de operação do Aterro Sanitário.

Para compatibilizar os ensaios com o sistema de reação, utilizou-se em todos os ensaios uma placa circular de aço rígido com 50 cm de diâmetro.

Assim, foram realizadas quatro provas de carga direta. De forma a simular uma condição não drenada, foram aplicados estágios

de carga do tipo rápido, com cada estágio de carga sendo aplicado em intervalos de 10 minutos, independente da estabilização dos recalques.

Foram realizados ensaios tanto no solo de cobertura quanto nos RSU do maciço do aterro sanitário, na Célula Experimental e no Aterro Antigo.

Na Célula Experimental foram realizados 2 ensaios no solo de cobertura e 2 ensaios no RSU no topo do maciço sanitário. Já no Aterro Antigo, foram realizados apenas 2 ensaios no topo dos RSU do maciço sanitário.

Vale ressaltar que todos os ensaios de prova de carga direta realizados nesta pesquisa foram executados pela mesma equipe e mesmo equipamento, reduzindo possíveis erros de repetibilidade.

Na primeira campanha de ensaios, ocorrida em 2015, foram realizados 4 ensaios de prova de carga, sendo 2 ensaios na célula experimental e 2 ensaios na célula 10, no aterro antigo. Nos ensaios realizados no Aterro Antigo, eles foram feitos em um local que não havia solo de cobertura e sobre o topo dos resíduos. Já na campanha de 2016, foram realizados apenas 4 ensaios de prova de carga, 2 na célula experimental e outros2 ensaios na célula 9, do aterro antigo.

Na Célula Experimental, foram realizadas escavações até atingir o topo da camada de RSU. Neste caso, o solo de cobertura encontrava-se a cerca de 75 cm de espessura.

A Figura 10 mostra uma vista das provas de carga realizadas, cujo sistema de reação utilizado foi um caminhão carregado, assim como a placa de aço utilizada para a realização dos ensaios e os extensômetros com os cursores liberados após o recalque.

Vale mencionar que foi realizado manutenção anteriormente à realização dos ensaios, de forma a evitar possíveis vazamentos durante a realização dos ensaios.

Figura 10 – Prova de Carga



Nota: A) vista da prova de carga direta e sistema de reação; B) Placa utilizada nas provas de carga.

Na Figura 10, observa-se o equipamento de prova de carga montado com a placa de aço, o macaco hidráulico, os pesos complementares, a régua, extensômetros apoiados na régua para as leituras dos recalques, no caso, com o cursor totalmente estendido, sinal que o recalque máximo permitido pelo cursor foi alcançado.

Na Tabela 4, encontra-se um resumo dos resultados dos ensaios de prova de carga direta. Nelas apresentam-se as cargas máximas aplicadas nos ensaios se os recalques correspondentes.

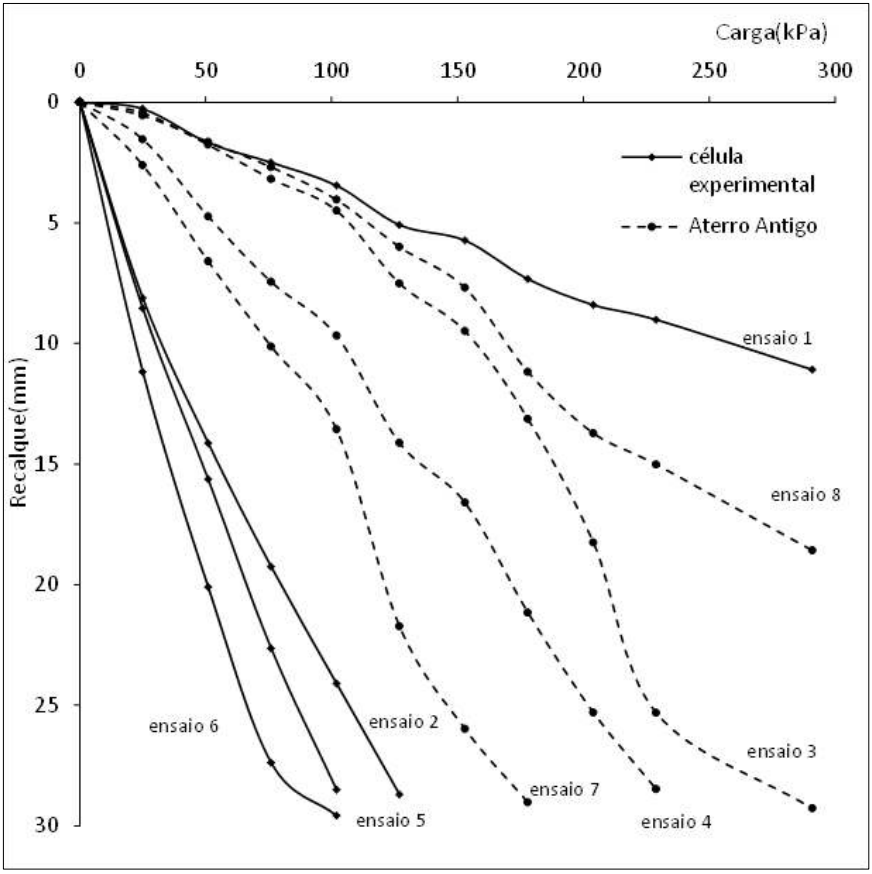
Tabela 4 - Resumo das provas de carga direta realizadas nos maciços de RSU da Célula Experimental e do Aterro Antigo

ANO	CÉLULA EXPERIMENTAL			ATERRO ANTIGO		
	CARGA MÁX. (kPa)	RECALQUE (mm)	RESIDUAL (mm)	CARGA MÁX. (kPa)	RECALQUE (mm)	RESIDUAL (mm)
2015	291	11,085	9,11	273	29,270	-
	127	28,695	-	291	29,270	-
2016	291	28,500	17,48	291	29,030	13,59
	291	29,575	8,62	291	29,030	13,59

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 11 apresentam-se as curvas de todas as provas de cargas diretas realizadas na Célula Experimental e todas as curvas das provas de carga diretas realizadas no Aterro Antigo.

Figura 11 - Curvas pressão x recalque de todos os ensaios de prova de carga direta realizadas nos RSU da Célula Experimental e no Aterro Antigo



Fonte: Elaboração própria.

As curvas dos ensaios realizados na Célula Experimental à exceção da curva do ensaio 1 são muito próximas e apresentam ruptura localizada típica de solos muito compressíveis fofos ou moles. As curvas dos ensaios no Aterro Antigo são muito mais sinuosas comparadas às curvas em solos, apresentam-se menos próximas umas das outras do que as realizadas na Célula Experimental, e com características do efeito de fibras, e segundo Marangon (2013), apresentam uma reação insuficiente.

Na sequência foram determinadas as capacidades de carga (q_{ult}), tanto nos RSU da Célula Experimental como do Aterro Antigo a partir das provas de carga realizadas. Para isso, utilizaram-se os métodos da NBR 6122 (ABNT, 2010). O referido método foi escolhido pelo formato das curvas que, quase sempre, apresenta formato nitidamente linear e, portanto, não sendo possível extrapolar a carga de ruptura física.

Vale ressaltar que, para a previsão da carga de ruptura, o método de Van der Veen (1953) não foi aplicado porque as curvas pressão x recalque das provas de carga apresentaram relação carga x recalque bastante linear, o que não permite aplicar o método.

Tabela 7 - Cálculo do q_{ult} e do q_{adm} das provas de carga diretas

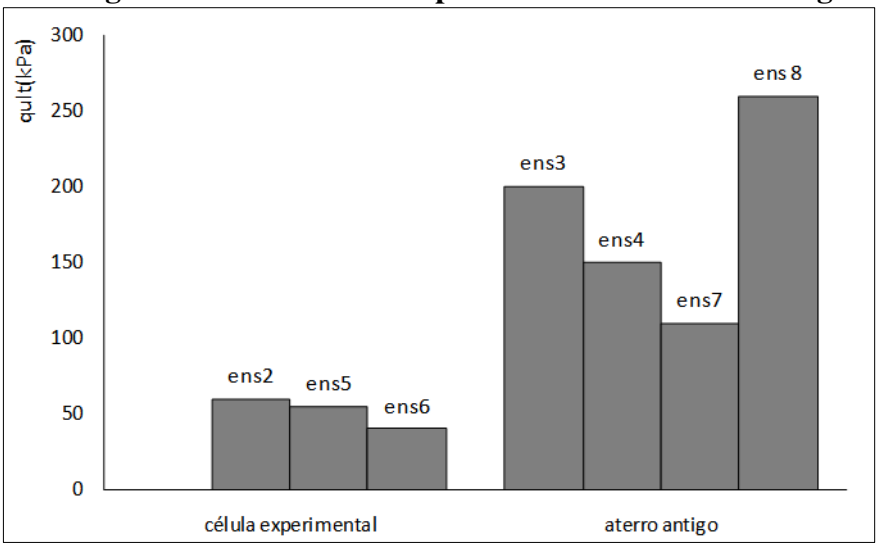
ANO	ENSAIO	CÉLULA EXPERIMENTAL	ANO	ENSAIO	ATERRO ANTIGO
		q_{ult} (kPa)			q_{ult} (kPa)
2015	1	x	2015	3	200
	2	60		4	150
2016	5	55	2016	7	110
	6	40		8	260
	Média	52		Média	180

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 7, encontra-se um resumo dos resultados dos ensaios de prova de carga direta realizadas com as respectivas cargas de ruptura calculadas a partir da utilização do método da NBR 6122 (ABNT, 2010).

A Figura 8 apresenta uma comparação entre as tensões de ruptura determinadas a partir da realização das provas de cargas diretas na Célula Experimental e no Aterro Antigo.

Figura 8 - Comparação entre as tensões de ruptura determinadas a partir da realização das provas de cargas diretas na Célula Experimental e no Aterro Antigo



Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Figura 8, conforme se pode observar, a carga de ruptura (qult) determinada pelo método da NBR 6122 (ABNT, 2010), foi cerca de 3 vezes maior no Aterro Antigo (RSU) do que na

Célula Experimental (RSD). O que corresponde à valores na literatura Carneiro (2016).

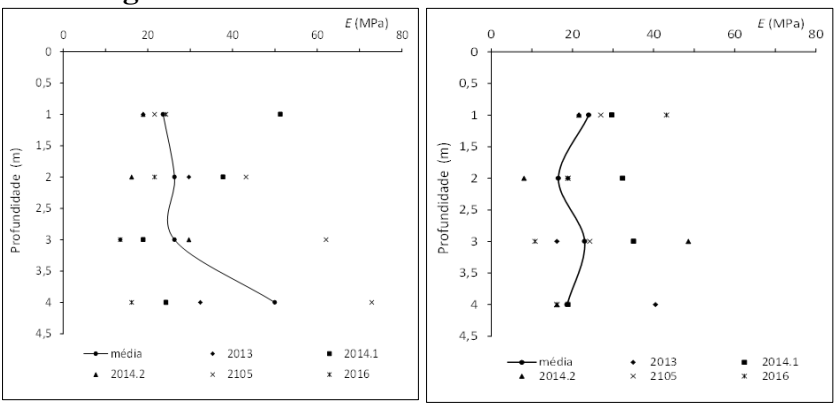
Influenciaram neste comportamento o tempo e o tipo de resíduo, além da existência de camadas intermediárias no Aterro Antigo.

Os valores de qult na Célula Experimental apresentaram quedas anuais embora pequenas, enquanto os valores de qult no Aterro Antigo apresentaram variações muito grandes, também com redução anuais, embora apresente um valor alto no último ensaio (8).

Previsão dos Módulos de Elasticidade e Comparação das Previsões

Utilizando-se da formulação de Teixeira e Godoy (1996) para a previsão dos módulos de elasticidade a partir do SPT, podem-se apresentar os gráficos abaixo na Figura 9.

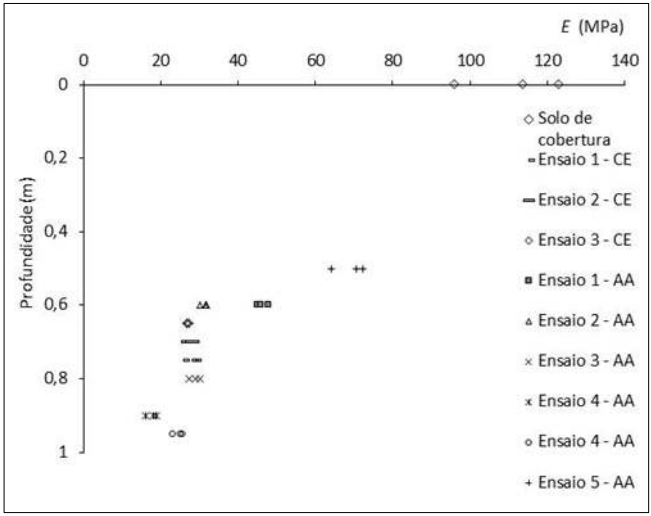
Figura 9 - Previsão dos módulos de elasticidade



A) Célula Experimental **B) no Aterro Antigo**

Para as estimativas do GeoGauge, foi adotado também um coeficiente de Poisson de 0,35 e como explicado anteriormente, o equipamento já fornece o módulo de elasticidade, mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Módulos de elasticidade obtidos no equipamento GeoGauge



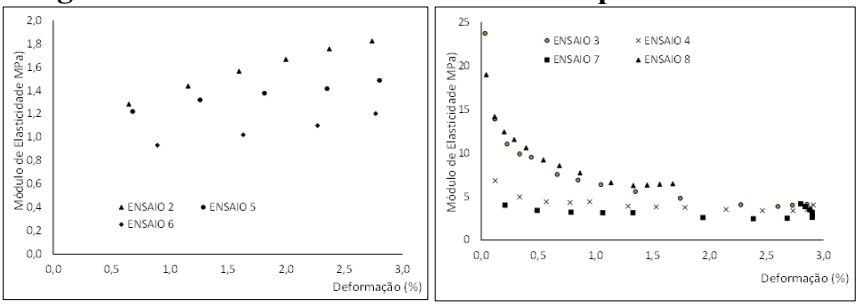
Fonte: Elaboração própria.

Finalmente, estimou-se o módulo de elasticidade a partir das provas de carga diretas realizada. A Figura 11 apresenta as estimativas dos módulos de elasticidade a partir das provas de carga diretas a) obtidas na Célula Experimental e b) obtidas no Aterro Antigo.

Ao comparar os valores estimados dos módulos de elasticidade, na Célula Experimental estes valores foram aumentando com o aumento da deformação (ε), no entanto no Aterro

Antigo, ocorreu o inverso, com o aumento da deformação (ε) houve a diminuição dos valores do módulo de elasticidade.

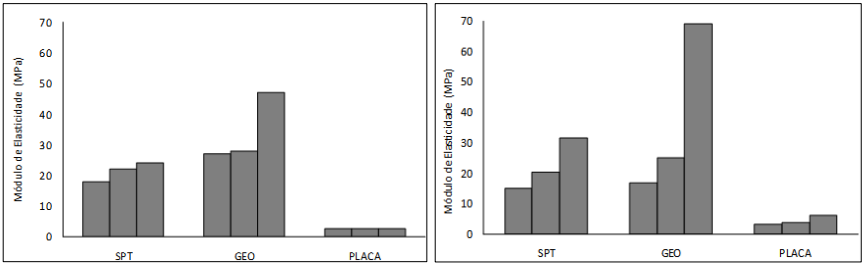
Figura 11 - Estimativas do E realizadas a partir das PCD's



A) CE **B) AA**

Já na Figura 12 comparam-se todos os valores dos módulos de elasticidade (E) estimados para a CE e para o AA pelos ensaios de campo SPT, GeoGauge e Prova de Carga Direta.

Figura 12 - Comparação dos módulos de elasticidade estimados pelos ensaios SPT, GeoGauge e PCD



A) CE **B) AA**

As faixas de variação das previsões do módulo de elasticidade (E) para o ensaio de SPT foram de 18,9 a 32,4 MPa na Célula Experimental e entre 14,9 a 31,1 MPa no Aterro Antigo.

As faixas de variação das previsões do módulo de elasticidade (E) para o ensaio de GeoGauge foram de 27,1 MPa a 47,5 MPa na Célula Experimental e entre 16,8 MPa a 77,7 MPa no Aterro Antigo.

As faixas de variação das previsões do módulo de elasticidade (E) para o ensaio de Prova de Carga Direta foram de 2,5 MPa a 2,6 MPa na Célula Experimental e entre 3,2 MPa a 6,3 MPa no Aterro Antigo.

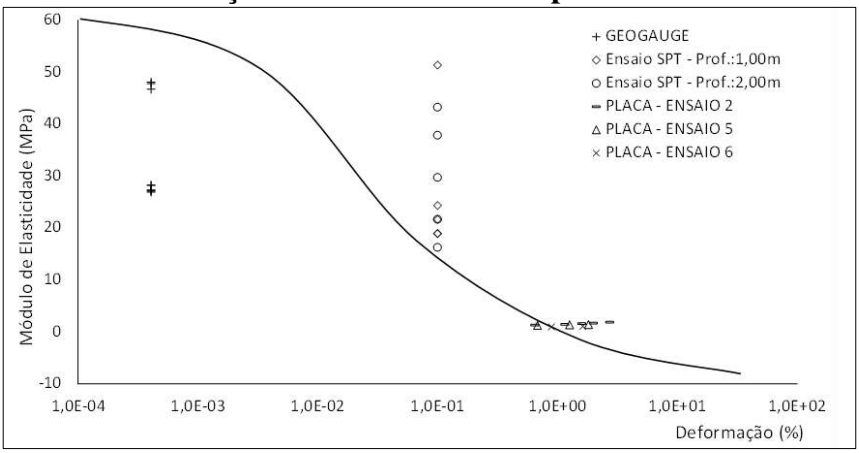
Os módulos de elasticidade obtidos pelo método do GeoGauge foram os que deram os maiores valores na Célula Experimental, já no aterro antigo pode-se dizer que o método do GeoGauge ficou compatível com o método do SPT.

Já o método do ensaio de prova de carga direta apresentou valores bem maiores no Aterro Antigo do que na Célula Experimental.

Há vários motivos que explicam, ou justificam, a obtenção de valores diferentes para o módulo de elasticidade (*E*). Diferenças de materiais, de idade e de estado já explicariam as diferenças obtidas.

Além disso, sabe-se que o *E* varia com o nível de deformação de cada ensaio. Dessa forma, para avaliar a influência do nível de deformação na previsão do módulo de elasticidade (*E*) por diferentes ensaios, determinaram-se valores do *E* da deformação de cada ensaio, dessa forma, na Figura 13 os pares de valores de "*E"* e "*ε"* obtidos em cada ensaio são confrontados da Célula Experimental.

Figura 13 - Gráfico "*E*"x "*ε*" para o maciço de RSU da Célula Experimental



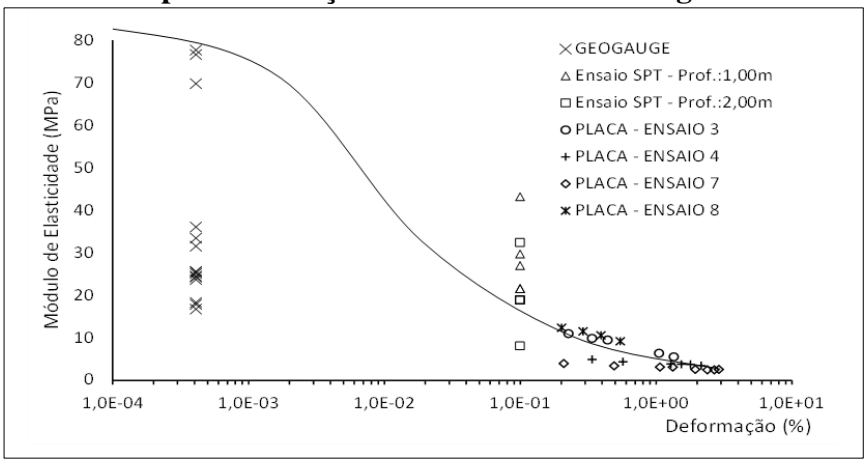
Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser observado na Figura 13, os módulos obtidos por diferentes ensaios estão diretamente relacionados com o nível de deformação imposto durante os ensaios. Dessa forma, "*E*" obtidos por ensaios que implicam ao solo menores deformações ($4{,}1x10^{-4}$%) conduzem a "*E"* mais elevados, que é o caso do GeoGauge (32,12 MPa), embora diferente do indicado por Quinta-Ferreira (2008) de (10^{-6}).

Por outro lado, previsões do "*E*" a partir de sondagens à percussão (SPT) conduzem a maiores deformações ($1{,}0x10^{-1}$%) e "*E*" menores (28,35 Mpa). Os valores para prova de carga de deformações 2,49% e módulo de elasticidade de 2,57 Mpa. Dessa forma observa-se a importância de compatibilizar a obtenção do "*ε*" com o nível de imposto na obra que se deseja prever os deslocamentos.

Na Figura 14 apresentam-se os pares de valores de "*E*" e "*ε*" obtidos em cada ensaio são confrontados do Aterro Antigo.

Figura 14 - Gráfico "*E*"x "*ε*" para o maciço de RSU do Aterro Antigo



Na Figura 14 as menores deformações são confirmadas para o método GeoGauge para as menores deformações ($4{,}1x10^{-4}$%) com os maiores módulos de elasticidade (35,17 MPa). As previsões do "*E*" a partir de sondagens à percussão (SPT) conduzem a maiores deformações ($1{,}0x10^{-1}$%) e "*E*" menores (24,03 MPa). Os valores para as deformações das provas de carga foram da ordem de 1,45% e para módulo de elasticidade de 5,37 MPa.

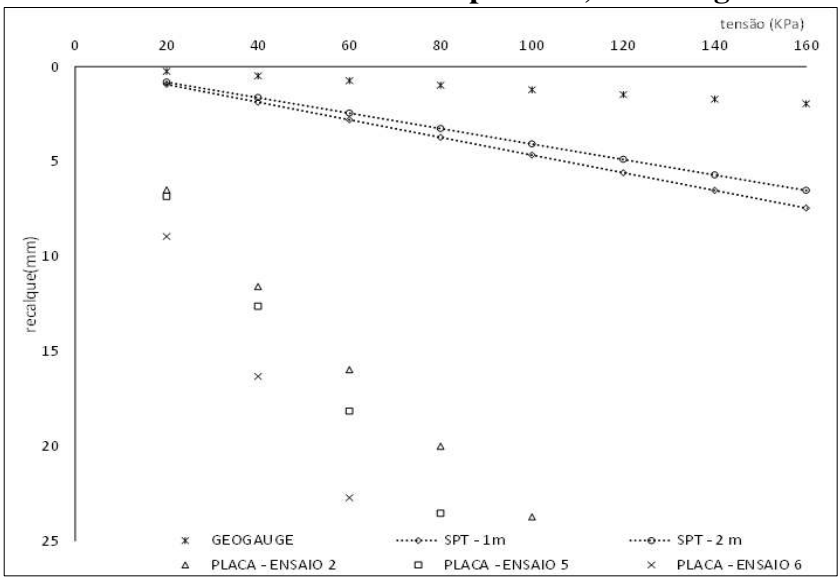
Previsão de Recalques no Maciço de RSU

Conforme relatado anteriormente, e com o objetivo de avaliar se as estimativas do módulo de elasticidade são consistentes,

determinaram-se os deslocamentos de uma placa rígida de 50 cm de diâmetro e considerando-se uma faixa de variação de carga de até 160kPa. Vale observar que essa carga foi definida com base na consideração de que a partir desse valor já poderia se ter deformações irrecuperáveis e, portanto, determinações de deslocamentos elásticos não corresponderiam à realidade, para isso, utilizou-se a expressão da Teoria da Elasticidade considerando que "B" seja igual a 0,50 m, Poisson (v) de 0,35, Fator de forma (Is) de 0,95, módulo de elasticidade (E) de cada ensaio realizado, conforme relatado em item anterior, e pressões (q) variáveis de 0 a 160 kPa.

A Figura 15 mostra a comparação das previsões dos recalques efetivadas para o maciço de RSU da Célula Experimental, considerando como referência os valores obtidos nos ensaios de prova de carga direta (PCD) dos ensaios 2, 5 e 6.

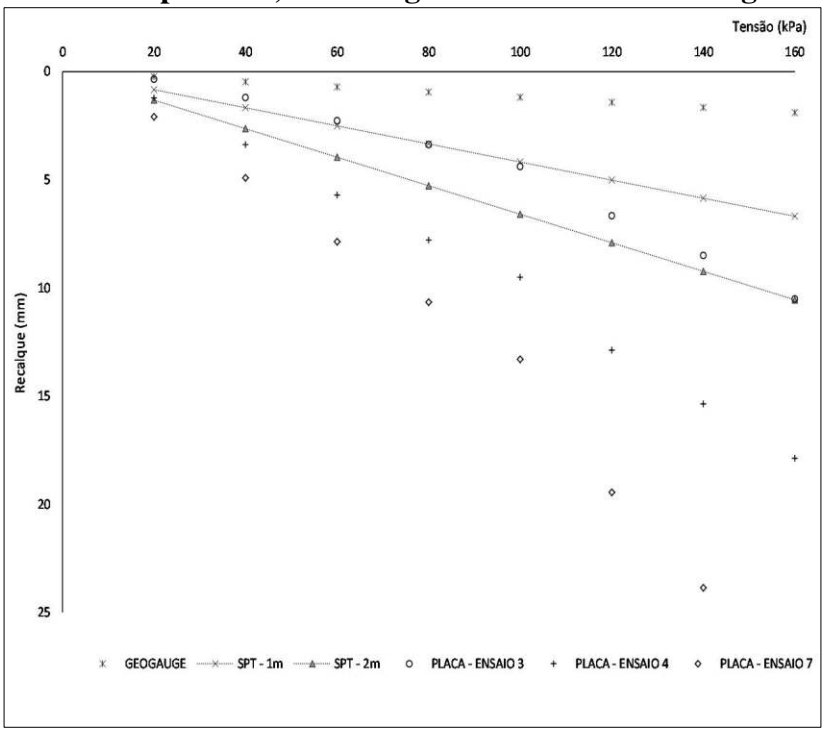
Figura 15 - Comparação das previsões dos recalques a partir do módulo de elasticidade obtidos por SPT, GeoGauge e PCD



As previsões dos recalques (w) da Célula experimental (CE) foram concordantes e as do módulo de elasticidade (*E)* proporcionaram as previsões mais precisas.

A Figura 16 mostra a comparação das previsões dos recalques efetivadas para o maciço de RSU do Aterro Antigo, considerando como referência os valores obtidos nas Provas de carga direta (PCD) dos ensaios 3, 4 e 7.

Figura 16 - Comparação das previsões dos recalques a partir do módulo de elasticidade obtidos por SPT, GeoGauge e PCD no Aterro Antigo



REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6489**: Prova de carga direta sobre terreno de fundação. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASTM - American Society for Testingand Materials. **ASTM – D6758**: Standard test method for measuring stiffness and apparent modulus of soil and soil aggregate in-place by an electro-mechanical method. West Conshohocken: ASTM, 2002.

CARNEIRO, A. A. **Estudo da capacidade de carga de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos com base em ensaios de laboratório e campo**. Fortaleza (Dissertação de Mestrado em Geotecnia). Fortaleza: UFCE, 2013.

CARNEIRO, A.; MOURA, A. S. "Avaliação preliminar da capacidade de carga de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos com base em ensaios de laboratório e campo". **Revista DAE**, vol. 64, 2016.

MARANGON, M. “Unidade 7 - Capacidade de carga dos solos”. **Portal Eletrônico UFJF** [2013]. Disponível em: <www.ufjf.br>. Acesso em: 04/05/2022.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. “Análise, projeto e execução de fundações rasas”. *In*: FALCONI, F. *et al*. (eds.). **Fundações**: teoria e prática. São Paulo: Editora Pini, 1996.

CAPÍTULO 7

Viabilidade Econômica da Reciclagem dos Resíduos Urbanos em Lisboa, Portugal: Uma Análise Utilizando o Aplicativo Verdes-PT

VIABILIDADE ECONÔMICA DA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS URBANOS EM LISBOA, PORTUGAL: UMA ANÁLISE UTILIZANDO O APLICATIVO VERDES-PT

Alessandro Marco Rosini

Fabricio Bau Dalmas

Joelma Telesi Pacheco Conceição

Márcio Magera Conceição

Ricardo Costa

Nas últimas décadas, a geração dos resíduos sólidos urbanos vem aumentando em escala exponencial, resultado do aumento do consumo de materiais descartáveis. Ecologistas, governos e instituições alardeiam aos quatros cantos que chegaremos, num futuro próximo, a uma situação de calamidade pública, tanto pela geração dos resíduos, cujas consequências já são sentidas nos aterros e na falta deles, quanto pela escassez de recursos naturais para a geração destes produtos, que, segundo a ONU, já se encontra com um déficit de 40% e vem aumentando 2,5% ao ano (MAGERA, 2013). Uma das alternativas que estão sendo propostas para minimizar esse quadro é a gestão da reciclagem de lixo urbano, cujos maiores incentivadores estão sendo os governos municipais e algumas Ongs. Portanto, os avanços nos índices de reciclagem de alguns produtos estão ligados muito mais à questão do desemprego e exclusão social do que a uma conscientização ambiental por parte dos agentes envolvidos no processo de reciclagem.

A cidade de Lisboa vem adotando a reciclagem através da coleta seletiva dos resíduos urbanos desde a década de 80, principalmente após a entrada de Portugal na Comunidade Europeia.

Este trabalho visa levantar os números econômicos da reciclagem de Lisboa e seus impactos macro-ambientais.

Lisboa é a capital de Portugal, contando em 2020 com uma população de 505 mil habitantes, mas a sua região metropolitana chega em 2,8 milhões de habitantes, quase um terço da população do país, que segundo o Pordata (2018), está concentrado também a maior parte do PIB do país (INE, 2020).

A geração anual de resíduos domésticos de Portugal é de 4.500.000 toneladas, sendo 86% recolha indiferenciada e 14% recolha seletiva. A geração per capita do país é de 452 kg.hab.ano ou 1,24 kg.hab.dia, mas a média da cidade de Lisboa é de 610 kg.hab.ano ou 1,69 kg.hab.dia, o que supera em 35% a média nacional. O que potencializa a geração de lixo urbano na cidade é a concentração do PIB nas regiões metropolitanas de países desenvolvidos, fato muito comum em países semelhantes da Comunidade Europeia (INE, 2020).

Sabemos que hoje, o lixo doméstico é um grande problema para muitas capitais do mundo, mas se houvesse uma política de reciclagem de resíduos urbanos domésticos, teríamos uma economia de recursos naturais, bem como uma geração de emprego e renda a milhões de desempregados em muitos países, sem contar com a diminuição da contaminação destes resíduos que são alocados em lugares inapropriados e sem fiscalização, contaminando o solo e o ar. Segundo estudos de Magera (2013), a cada tonelada reciclada teríamos uma economia de U$ 100,00 dólares para os cofres públicos, e a geração de um emprego de U$ 200,00 dólares por mês. Tal iniciativa ajudaria a colocar no mercado de trabalho as pessoas que têm baixa escolarização, visto que este segmento não exige uma formação técnica para sua atuação. Estes dados refletem a média do mercado de reciclagem do Brasil, enquanto, para Portugal, esta média corresponde a U$ 300,00 o valor da tonelada.

O objetivo deste artigo é mostrar quanto de valor econômico a cidade de Lisboa poderia obter com geração de emprego e renda se realizasse uma política de gestão de reciclagem de resíduos urbanos domésticos mais abrangente na cidade. Para obter estes dados/números utilizou-se o aplicativo VERDES –PT – Viabilidade Econômica dos Resíduos Sólidos de Portugal, cujo registro é ISNB 978-85-903805-3-5. Este aplicativo é o resultado de um pós doutoramento realizado pelo professor Márcio Magera Conceição na Universidade de Lisboa no ano de 2018.

METOOLOGIA DO APLICATIVO VERDES – PT

A maioria das cidades, desconhecem a geração e a composição dos resíduos sólidos urbanos, ficando o empreendedor e os órgão públicos sem saber direito como calcular a potencialidade da geração dos materiais que ele pretende reciclar e o quanto investir em infraestrutura, por desconhecer o volume total desses materiais. Neste contexto, surge a importância de existir um aplicativo que está baseado em dados científicos, possibilitando o acesso fácil para o desenvolvimento de informações precisas.

O aplicativo VERDES –PT, proporciona aos interessados nesse segmento uma facilidade em realizar várias situações e composições de resultados da reciclagem dos cinco principais produtos que compõem os "restos" da sociedade nos dias atuais, tais como: lata de alumínio, lata de aço, papel e papelão, plástico e vidro. Esses produtos somam mais de 90% dos valores mercadológicos dos produtos reciclados da cidade de Lisboa; sendo assim, o aplicativo procura dar aos empreendedores e governos um resultado de viabilidade econômica desse empreendimento ambientalmente justo e sustentável, tanto em uma visão macro-ambiental quanto mercadológica.

Seu uso é simples e seu resultado é confiável. Alguns dados são importantes para melhor alcançar o resultado esperado, tais como: população do local (cidade, estado e país) em que se queira realizar o teste; geração de lixo *per capita* dia, caso a conheça (este dado quando conhecido, torna o resultado mais preciso); salário mínimo do país; cotação do dólar; custo do processo de reciclagem e custo evitado com a coleta, caso os conheça, se não utilizam-se os valores propostos no programa; os preços de mercado, em toneladas, dos cinco produtos utilizados.

O aplicativo dará ao usuário todas as informações que se referem à viabilidade da reciclagem dos resíduos sólidos urbanos, e ele poderá ser impresso para futuras utilizações, ou ter salvo seus dados em análise, no diretório indicado.

O aplicativo VERDES- PT disponibilizará os seguintes dados de viabilidade econômica macro-ambiental:

- Geração de lixo *per capita* dia, por mês e ano.
- Geração total de lixo dia, por mês e ano.
- Economia anual e mensal possível em matéria-prima, energia, água.
- Economia anual e mensal perdida pela não-reciclagem.
- Economia anual e mensal obtida pela reciclagem formal/informal.
- Geração de empregos de um salário mínimo mensal possível.
- Geração de empregos de um salário mínimo mensal obtido.
- Empregos de um salário mínimo mensal perdidos.

- Dados econômicos e físicos de cada produto, isoladamente: lata de alumínio, papel e papelão, plástico, vidro e lata de aço.
- Resultado total da viabilidade econômica obtida e perdida com a aplicação do processo de reciclagem.
- Na análise mercadológica o programa disponibilizará:
- Resultados, em toneladas, gerados dos cinco produtos, parciais e totais.
- Valor mercadológico dos cinco produtos reciclados.
- Preço médio por tonelada dos produtos.
- Resultado econômico potencial a ser conseguido com o processo.
- Geração de emprego de um salário mínimo por mês.

A metodologia utilizada neste aplicativo tem como princípio a matemática mercadológica dos recursos naturais utilizados na composição dos produtos em análise (lata de alumínio, lata de aço, plástico, papel e papelão e vidro), bem como os preços mercadológicos dos serviços para a transformação até o consumidor final, utilizando-se, neste contexto, os preços dos serviços públicos e privados que se referem à coleta e ao processo de reciclagem dos resíduos sólidos, sem deixar de se considerar os custos do processo produtivo. Uma parte do programa está baseada no modelo proposto por Thomas Duston, no livro *How to measure the gains from recycling*.

A mensuração dos resultados é obtida analisando os mais lucrativos produtos reciclados do lixo urbano brasileiro, que são: lata de alumínio, papel e papelão, plástico, vidro e lata de aço, os quais representam mais de 90% dos valores mercadológicos conseguidos com o processo da reciclagem. Com base na quantia produzida,

reciclada e disposta em aterros, torna-se possível mensurar a economia de matéria-prima, energia, água e a redução dos danos ambientais, coleta, transporte e arranjo final do lixo. Com a quantia de lixo jogada nos aterros somada aos índices que foram reciclados temos o total produzido ou consumido de um determinado produto.

Os valores em Mwh – Megawatts hora – da energia elétrica, bem como em metro cúbico da água e a matéria-prima utilizada na composição dos produtos reciclados, foram pesquisados no mercado fornecedor de Portugal. Na análise macro ambiental os valores dos produtos reciclados vendidos não foram utilizados para efeito de cálculo, visto que quando se considera a compra desses produtos os valores se anulam. Para efeito de cálculo foi utilizado o custo do processo de reciclagem, que é definido a partir do custo de transporte, armazenamento, enfardamento, trituração, lavagem, custos administrativos, que entram na fórmula com sinal negativo. Os custos evitados com a coleta, transporte e disposição final do lixo entram como sinal positivo, visto representar uma economia com o processo de reciclagem adotado.

O ganho econômico com a energia elétrica, matéria-prima e água é computado individualmente em cada planilha de cálculo dos materiais em estudo, depois elas são somadas e temos o resultado final, subtraindo-se o custo do processo de reciclagem. Tanto o custo do processo de reciclagem quanto o custo evitado com o processo foram dolarizados para manter o cálculo sempre atualizado com a desvalorização da moeda brasileira.

Os principais indicadores utilizados nesta fórmula para se achar a viabilidade econômica da reciclagem dos resíduos sólidos da cidade de Lisboa foram:

- População do local em estudo
- Produção do lixo urbano

- Composição do lixo urbano em porcentagem
- Tarifa de energia elétrica média cobrada para as classes A1 e A2
- Peso da lata de alumínio
- Economia de energia elétrica obtida na produção por meio da reciclagem da lata de alumínio
- Índice de reciclagem da lata de alumínio
- Consumo *per capita* de latas de alumínio em Portugal
- Custo da tonelada de bauxita
- Composição de uma tonelada de alumínio
- Redução na poluição da água em 97%
- Redução na poluição do ar em 95%
- Índice de reciclagem de vidro
- Quantidade anual estimada de vidro para embalagem
- Quantidade anual estimada da reciclagem do vidro
- Produção a partir da reciclagem
- Consumo de energia
- Economia de energia a partir da produção com cacos
- Custo da fabricação do vidro Soda-Cal a partir da mistura com os cacos
- Redução na poluição do ar em 20%
- Redução no consumo de água em 50%
- Índice de reciclagem de papel e papelão
- Consumo de energia elétrica na produção da tonelada de papel a partir da matéria-prima
- Economia de água para cada tonelada de papel reciclada

- Redução na poluição da água em 35%
- Redução na poluição do ar em 74%
- Índice de reciclagem do plástico
- Consumo de energia elétrica na produção da tonelada do plástico
- Consumo de energia elétrica a partir de material reciclado
- Preço da tonelada de plástico em Lisboa, usando-se como base as resinas termoplásticas que compõem o produto
- Redução da poluição do ar em 80%
- Redução na poluição da água em 40%
- Índice da reciclagem da lata de aço em Portugal
- Quantidade de lata de aço consumida *per capita*
- Preço da tonelada de ferro-gusa
- Redução no consumo da água com a reciclagem
- Valor do metro cúbico da água
- Economia de energia elétrica a partir da reciclagem
- Redução no consumo de água com a reciclagem em 40%
- Redução na poluição do ar com a reciclagem em 85%
- Redução na poluição da água com a reciclagem em 76%

RESULTADOS FINAIS SINALIZADOS NO APLICATIVO VERDES-PT

Total de euros obtidos pela aplicação da reciclagem dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Lisboa € 77.647.334,13. Total

perdido pela não reciclagem, material que foi jogado nos aterros sanitários € 68.878.758,85. Computando o valor que foi reciclado, a geração de emprego foi de 11 mil e a perda de geração de emprego pela não reciclagem foi de 9.8 mil. Estes valores saíram do custo da reciclagem que foi: € 15.798.162,34, sendo o custo evitado com a coleta: € 4.505.401,85, e o ganho de energia elétrica: € 17.547.307,75. Ganho de matéria-prima: € 68.422.606,49. Ganho de água: € 2.970.180,38

Os impactos macroambientais causados pela reciclagem podem ser mensurados com a economia dos produtos naturais que deixaram de ser extraídos. Foram poupadas 994 mil árvores, que deixaram de ser cortadas pelo processo de reutilização das matérias primas, que antes iriam para os aterros e que neste processo de reciclagem tem uma segunda vida no mercado.

Economizou no processo 2.223 toneladas de bauxita, matéria prima das latinhas de alumínio. Neste processo economiza-se também energia elétrica, que foi de 38 mil MWH, bem como milhões de metros cúbicos de água. Mesmo assim, os cidadãos de Lisboa jogaram mais de 30 milhões de latinhas de alumínio nos aterros sanitários.

A geração por tipo de resíduos, segundo o aplicativo VERDES –PT foi de:

Orgânica: 114.250,5 (37%)

Papel e Cartão: 71.020,6 (23%)

Plástico: 40.142,0 (13%)

Vidro: 15.439,2 (5%)

Metais: 12.351,4 (4%)

O destino dos resíduos sólidos urbanos da cidade de LIsboa, segundo o aplicativo VERDES-PT é:

Aterro: 89.547,7 (29%)

Tratamento MB: 86.459,8 (28%)

Valorização do Material: 33.966,3 (11%)

Valorização Energética: 67.932,7 (22%)

Tratamento Mecânico: 24.702,8 (8%)

Valorização Orgânica: 6.175,7 (2%)

Analisando os resultados do aplicativo VERDES –PT para a cidade de Lisboa, nota-se que é viável economicamente a reciclagem dos resíduos sólidos urbanos domésticos desta cidade. Estamos falando de uma economia de 77 milhões de euros por ano e uma inclusão social de mais de 11 mil novos empregos neste segmento, sem levar em consideração a economia de recursos naturais e a não contaminação dos rios, solos e ar com a decomposição destes resíduos de forma inadequada, como vem sendo realizado por políticas públicas que não levam os interesses do Meio Ambiente como algo saudável para a população.

O aplicativo mostra também a perda anual de 68 milhões de euros que são jogados nos aterros em forma de embalagens ou matérias primas que poderiam ser reutilizadas, mas acabam sem nenhum aproveitamento e o pior a população ainda paga para coletar e depositar este material nos aterros sanitários do país.

REFERÊNCIAS

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. São Paulo: Editora Humanistas, 1997

CRUZ, F. N.; CUNHA, M. R. “Análise ecónomica do sistema da reciclagem em Portugal”. R**evista Sanitária de Engenharia Ambiental**, vol. 19, n. 3, 2014.

DUSTON, T. E. **Recycling Solid Waste**: The First Choice for Private and Public Sector Management. London: Quorum Books, 1993

INE - Instituto Nacional de Estatística. “Base de dados de Difusão”. **Portal INE** [2020]. Disponível em: <www.ine.pt >. Acesso em: 11/02/2020.

LEFF, E. **Epistemologia ambiental**. São Paulo: Editora Cortez, 2001

MAGERA, M. “Viabilidade econômica da reciclagem dos resíduos domésticos da cidade de Coimbra – utilizando o aplicativo verdes-pt”. **Revista Científica Multidisciplinar**, n. 2, 2021.

MAGERA, M. C. Verdes-PT (app). Lisboa: Universidade de Coimbra, 2018.

MAGERA, M. **Os caminhos do lixo**: da obsolescência programada à logística reversa. Campinas: Editora Átomo Alinea, 2013.

MAGERA, M. **Os empresários do lixo**: um paradoxo da modernidade. Campinas: Editora Átomo Alinea, 2005.

CAPÍTULO 8

Resíduos Sólidos Urbanos: Percepção Ambiental dos Moradores do Bairro Maracanã, Barra do Bugres (MT)

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: PERCEPÇÃO AMBIENTAL DOS MORADORES DO BAIRRO MARACANÃ, BARRA DO BUGRES (MT)

Ana Paula Silva de Andrade

Carlos Rezende de Pádua Júnior

Diego Matos dos Santos

Leandro José de Oliveira

Sonia Aparecida Beato Ximenes de Melo

A dinâmica de evolução das cidades se relaciona ao desenvolvimento econômico e tecnológico, ao aumento populacional e ao nível de padrão de consumo da população, diretamente relacionado à produção de resíduos, cuja destinação é uma das grandes questões ambientais atuais, devido à variedade e volume de materiais e escassez de áreas adequadas para sua deposição (HEGEL; CORNÉLIO, 2013; LEME, 2009).

No Brasil, em 2011, apenas 33% das cidades possuíam destino adequado para os resíduos sólidos gerados em seu território, sendo que na região nordeste 89,3% das cidades ainda adota a disposição a céu aberto - lixões - como destino final para seus resíduos (IBGE, 2010). Considerando que todo resíduo sólido é originado de algum processo produtivo e necessita destinação, a reciclagem ganha destaque por oportunizar sua reintrodução na cadeia de consumo como matéria-prima em um novo processo, mas ainda é uma prática deficitária no Brasil (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

Nesse cenário, foi regulamentada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei Federal nº 12.305/10, que estabelece um conjunto de diretrizes para adequação do tratamento dos RSU, objetivando reduzir o direcionamento para aterros/lixões e que estabelece vínculo entre os planos de resíduos sólidos e o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), que engloba as atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final do lixo doméstico e do lixo originário da limpeza de logradouros e vias públicas e que determina que até 2033 seja universalizado o acesso ao saneamento básico (LOPES, 2016; AGÊNCIA BRASIL, 2019).

Nesse contexto, Cazaroto (2012) pontua que a melhoria no meio ambiente advém principalmente de mudanças no comportamento, valores e condutas do ser humano. Assim, estudos sobre o tema percepção ambiental se justificam por contribuírem para a investigação das perspectivas de cada indivíduo por meio da análise de conhecimento, valores e opiniões, considerando que cada um percebe e se relaciona de forma diferente com o ambiente no qual está inserido (SUESS *et al.* 2013).

Dessa forma, a pesquisa buscou discorrer sobre a questão dos resíduos sólidos a partir da análise da percepção dos moradores do Bairro Maracanã no município de Barra do Bugres, estado de Mato Grosso com objetivos específicos de averiguar o perfil socioeconômico, o nível de conhecimento dos moradores acerca dos RSU, verificar a percepção econômica dos moradores em relação aos RSU e apontar as principais demandas no entendimento dos moradores em relação às ações executadas pelo poder público local acerca dos RSU.

O trabalho se divide em 4 partes, sendo a primeira parte o referencial teórico, com uma revisão de literatura que contextualiza os principais aspectos do tema, dividida em dois tópicos, trazendo

dados e fazendo conexões entre a gestão de resíduos e a legislação vigente.

A segunda parte traz os métodos utilizados para realização da pesquisa, a área de estudo e a caracterização da pesquisa, a saber pesquisa descritiva, de abordagem qualiquantitativa, tendo como instrumento de coleta de dados a aplicação de questionários semiestruturados, no período entre os meses de abril e maio de 2020, totalizando 117 questionários.

A terceira parte trata da apresentação dos resultados obtidos e sua discussão foi dividida em 4 subtópicos, sendo o primeiro o perfil socioeconômico, para caracterização do público respondente, a segunda sessão trata da percepção dos moradores com relação aos RSU, a terceira sessão acerca da responsabilidade do poder público e por fim, a quarta sessão tratando da percepção econômica dos moradores em relação aos RSU.

A quarta parte é a conclusão, com os resultados finais sobre a percepção dos moradores sobre os resíduos e seus efeitos no entorno e reflexões sobre ações que podem ser adotadas para adequação do descarte e melhoria da qualidade de vida da população da área.

REFERENCIAL TEÓRICO

Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos

Conforme NBR 10.004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2004) os Resíduos Sólidos Urbanos - RSU, denominados também como lixo urbano, são resultantes da atividade doméstica e comercial dos centros urbanos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criada pela Lei Federal nº 12.305/2010, os define como todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade e sua composição

depende da situação socioeconômica e das condições e hábitos de vida de cada consumidor.

A gestão dos RSU foi por bastante tempo realizada pelas prefeituras de forma que sua disposição final ocorria em lixões a céu aberto ou eram enterrados e queimados, sem qualquer controle ambiental e de saúde pública. Resíduos industriais, hospitalares e urbanos eram depositados no mesmo local, sem qualquer tipo de tratamento técnico específico (TROTTA, 2011).

As decisões tomadas na gestão de RSU devem ser sustentadas em estruturas de orientação essenciais como a redução de resíduos, reutilização, reciclagem, recuperação de energia e disposição final em lugar adequado e a gestão integrada, que representam um acervo de princípios de gerenciamento ambiental economicamente apropriados (BERTICELLI; PANDOLFO; KORF, 2017).

Em vista disso, as cidades têm buscado aplicar diversas tecnologias, políticas e comportamentos para o controle dos seus resíduos e para implementar meios de reutilização dos mesmos, com embasamento legal, observando os aspectos sociais de proteção ao meio ambiente, a saúde pública e aos recursos financeiros disponíveis (BERTICELLI; PANDOLFO; KORF, 2017).

O Papel das Políticas Públicas no Contexto dos RSU

As Políticas Públicas (PP) são por definição “um conjunto de programas, ações e decisões tomadas pelos governos nacional, estadual ou municipal que afetam a todos os cidadãos, de todas as escolaridades, independente de sexo, cor, religião ou classe social” (FIOCRUZ, 2018).

No Brasil, compete à União o ordenamento da matéria, aos municípios e ao Distrito Federal o estabelecimento de regras específicas. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNSR) orienta pontos importantes para o avanço no setor de RSU, como um corpo técnico qualificado, agentes da sociedade civil engajados com a problemática e ainda possibilidades econômicas para o crescimento da indústria de reciclagem, mas que necessita efetivação das ações, já que a política em si dá apenas diretrizes para sua elaboração.

No município de Barra do Bugres -MT, o plano de saneamento básico é regulamentado pela Lei Federal nº 11.445/2007, que esclarece as atividades de planejamento, prestação, regulamentação e fiscalização dos serviços de saneamento, sendo responsável pela limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos, drenagem e o manejo de água pluviais (LIMA; FILHO; MOURA, 2017).

Atualmente, a prefeitura do município não oferece coleta seletiva, apenas disponibiliza a coleta domiciliar três vezes por semana, utilizando lixão para o descarte dos resíduos, embora exista a intenção de implementação de um aterro sanitário e o planejamento de montar uma cooperativa de coleta seletiva por alguns catadores independentes, cujo projeto ainda não foi desenvolvido (RABÊLO *et al*., 2013).

Diante disso, até o município elaborar um plano de gerenciamento de resíduos, poderia fazer uso da gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos em Ecopontos. Os Ecopontos são locais que recebem resíduos como podas de árvores, descartes de entulhos, móveis inutilizáveis, entre outros, também possibilitam à população realizar o descarte de forma sustentável e não em locais inadequados (LUPPI; SILVA; ARANTES, 2019).

Embora a PNRS cite literalmente aos Ecopontos, estimula a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado

para pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão. Além disso, incentiva a criação e o desenvolvimento de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis, da educação ambiental, da reciclagem, da reutilização, do tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, que culminam na necessidade de pontos de apoio para coordenar os instrumentos propostos (VERAS JUNIOR *et al.*, 2019).

Zanta e Ferreira (2003) argumentam que, sendo a gestão dos RSU uma complexidade ambiental com impactos diretos na qualidade de vida das pessoas, essa abordagem propicia uma oportunidade para obter o comprometimento da população com a sustentabilidade, fomentando a mudança de hábitos de consumo, tanto por repensar as aquisições quanto pelo reaproveitamento e reuso dos materiais.

Nesse sentido, a Educação Ambiental (EA) tem enfoque na necessidade de modelar a postura dos seres humanos para com o meio ambiente e foi iniciada pelos movimentos ecológicos e posteriormente contemplada com a publicação da Lei Federal 9.795, de 27/4/1999, que institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras medidas.

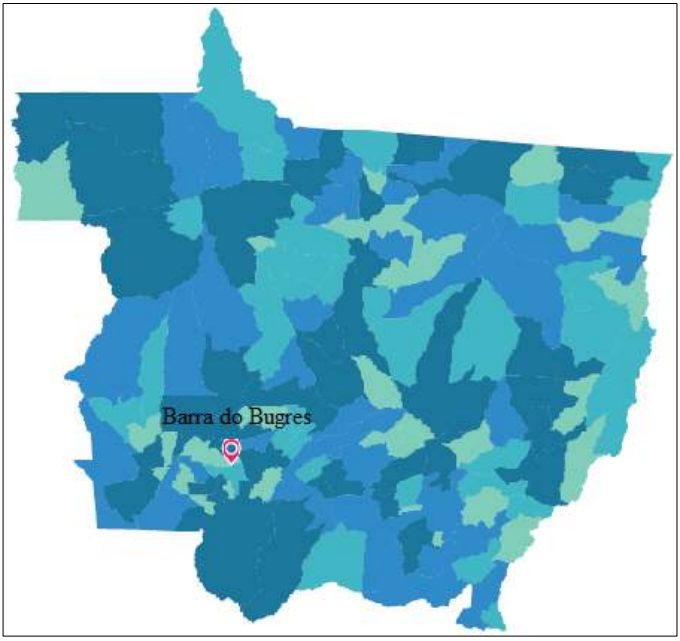
Além disso, outra ferramenta importante para o entendimento e implementação de ações coletivas de sensibilização é a percepção ambiental, que pode ser definida como o resultado da interação do indivíduo com o meio e suas constantes transformações, através da qual se atribui valores e importâncias diferenciadas em relação ao local em que está inserido e conduz a um novo olhar sobre o presente e futuro, favorecendo a introdução de novas formas de proceder e tratar o meio ambiente (FERNANDES *et al.* 2004; MACEDO, 2000).

METODOLOGIA

Área de estudo

O bairro Maracanã, local de desenvolvimento da pesquisa, possui área total de aproximadamente 11,44 km² (4,42 mi²) (IBGE, 2019) e localiza-se no município de Barra do Bugres (Figura 1), região Centro-Oeste do Brasil, no estado de Mato Grosso, a 150 quilômetros da capital Cuiabá. O município possui área de 7.186,78 km² e sua população foi estimada em 34.966 habitantes em 2019.

Figura 1 – Localização de Barra do Bugres – MT



Fonte: IBGE (2019).

Segundo a Secretaria Municipal de Obras, Viação e Serviços Públicos de Barra do Bugres, as atividades econômicas do município

estão relacionadas à agricultura, como cana-de-açúcar, a pecuária e ao comércio agroindustrial, abrigando uma usina de álcool e açúcar com média de 2 mil trabalhadores sazonais vindos da região Nordeste do país. O comércio e domicílios geram cerca de 14 toneladas diárias de RSU, que segundo Magalhães e Werle (2009) são uma das principais fontes de contaminação ambiental do município.

Caracterização da pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como descritiva e fundamenta-se em uma abordagem qualiquantitativa, pautada no levantamento bibliográfico e aplicação de questionários com o intuito de analisar a percepção ambiental dos moradores do bairro Maracanã, em Barra do Bugres-MT. A pesquisa descritiva busca delinear as características de um fenômeno em pesquisa, considerando como objeto uma situação específica, um grupo ou indivíduo (RICHARDSON *et al*., 2007; GIL, 2010).

A abordagem quantitativa é guiada pelo modelo de investigação dedutivo, que abrange a questão problema e a conjectura, testadas pela observação e experimentação e valendo-se de técnicas e procedimentos estatísticos para embasar as análises, enquanto a abordagem qualitativa, em contrapartida, visa entender o significado dos fenômenos e processos sociais, levando em consideração as motivações, crenças, valores, representações sociais e econômicas, com foco principal na compreensão interpretativa da ação social (SILVA, 2010).

Como procedimento de coleta de dados, fez-se o uso de levantamento bibliográfico, em formas de artigos científicos, livros, teses e dissertações, com a finalidade de inteirar o pesquisador sobre

o que foi escrito sobre determinado assunto, procedimento este que, segundo Marconi e Lakatos (2017) concede reforço na análise das pesquisas e organização de suas informações.

Segundo Gil (2010), para definição da quantidade de questionários aplicados, o cálculo da amostra será feito conforme a equação a seguir:

$$n = \frac{\sigma^2 . p . q . N}{e^2 . (N - 1) + \sigma^2 . p . q} \quad (1)$$

Onde:

n = tamanho da amostra;

σ^2= nível de confiança escolhido, expresso em número de desvios-padrão;

p = porcentagem com a qual o fenômeno se verifica;

q = porcentagem complementar;

N = tamanho da população;

e^2= erro máximo permitido.

Logo, para uma população de 4.548 habitantes (N=4.548); σ^2= intervalo de confiança, considerando um nível de confiança de 92%; p= representa a estimativa da proporção populacional, neste caso, 50%; q= sendo a parcela da população desconsiderada (q=100 – p= 50%); e^2= representa o erro aleatório estimado em 8%, obtém-se uma amostra (n) com tamanho equivalente a 117 pessoas que foram entrevistadas.

O instrumento de coleta de dados consistiu na elaboração de um questionário semiestruturado que abordou 4 aspectos: a) perfil socioeconômico; b) percepção acerca dos RSU; c) responsabilidade do poder público, e d) percepção econômica em relação aos RSU.

Os questionários foram aplicados em 29 ruas, com distribuição de 3 questionários por rua e somente em uma rua foi distribuído um questionário a mais. Buscou-se fazer a distribuição em ruas e locais bem distintos do bairro, com a intenção de ter respondentes de cada localização, distantes um do outro, visando evitar erros estatísticos em relação aos moradores que representaram o universo da população local. Os dados obtidos foram organizados em tabelas, quadros e gráficos e o tratamento das variáveis coletadas foi submetido a análise estatística com o uso do *Software Excel*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Perfil Socioeconômico dos Moradores do Bairro Maracanã

De acordo com as informações coletadas, a maioria dos entrevistados é do sexo feminino (55,56%) e reside entre 0 a 10 anos no bairro, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Tempo de residência no bairro

Categoria	Quantidade	(%)
0 a 10 anos	53	45,30%
11 a 20 anos	32	27,35%
21 a 30 anos	21	17,95%
31 a 40 anos	9	7,69%
Superior a 41 anos	2	1,71%
TOTAL	**117**	**100%**

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

O tempo de residência no bairro foi indicador do vínculo temporal com o local e com base na Tabela 1, percebe-se que há uma porcentagem significativa de residentes antigos, sendo válido ressaltar que muitas das respostas também são baseadas pelo que veem no município como um todo. A faixa etária foi dividida em categorias, pelas quais verificou-se que a idade dos respondentes variou entre 18 e 66 anos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Faixa etária de idade dos entrevistados

Categoria	Quantidade	(%)
18 a 25 anos	43	36,75%
26 a 35 anos	31	26,50%
36 a 51 anos	27	23,08%
52 a 65 anos	11	9,40%
Superior a 66 anos	5	4,27%
TOTAL	**117**	**100%**

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Na disposição dos entrevistados pela faixa etária, identificou-se que 36,75% dos respondentes são jovens de 18 a 25 anos, com uma margem de respondentes adultos de 36 a 51 anos correspondente a 23,08% e também pessoas de 52 a 65 anos representando 9,40%, constituindo uma amostra de respondentes de diversas idades. O valor averiguado da renda familiar dos entrevistados é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Renda familiar

Categoria	Quantidade	(%)
Até 2 salários mínimos	46	39,32%
Até 1 salário mínimo	39	33,33%
Até 3 salários mínimos	25	21,37%
Acima de 3 salários mínimos	7	5,98%
TOTAL	**117**	**100%**

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Conforme as informações coletadas, 39,32% dos respondentes tem renda de dois salários mínimos, contra 5,98% com renda acima de 3 salários mínimos. Como a maior renda favorece maior consumo, assume-se que quanto maior a renda e o número de moradores por residência (Tabela 4) maior será o volume de resíduos descartados (QUERINO, 2015). No entanto, deve-se atentar que essa variável depende do nível de conhecimento e sensibilização individual em relação às práticas de consumo e descarte.

Tabela 4 – Quantas pessoas residem na casa

Categoria	Quantidade	(%)
3 a 4 pessoas	74	63,25%
1 a 2 pessoas	24	20,51%
5 a 6 pessoas	18	15,38%
Mais de 6 pessoas	1	0,85%
TOTAL	**117**	100%

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

O nível de escolaridade dos respondentes foi verificado (Tabela 5) em virtude de que por meio da escola é que mais comumente as pessoas são apresentadas às práticas de Educação Ambiental (QUERINO, 2015).

Tabela 5 – Nível de Escolaridade

Categoria	Quantidade	(%)
Ensino médio completo	41	35,04%
Ensino médio incompleto	25	21,37%
Ensino fundamental incompleto	18	15,38%
Ensino superior incompleto	18	15,38%
Ensino superior completo	7	5,98%
Não alfabetizado	5	4,27%
Ensino fundamental completo	3	2,56%
TOTAL	**117**	**100%**

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

De acordo com os dados, apenas 4,27% dos respondentes não são alfabetizados, mas declararam um mínimo conhecimento de leitura, o que permitiu a participação na entrevista.

Percepção dos Moradores com Relação aos Resíduos Sólidos Urbanos

Entre os respondentes, 82,91% souberam identificar os materiais que são RSU, contra 17,09% que não souberam. Esse resultado é semelhante ao estudo realizado por Querino (2015) no município de São Sebastião de Lagoa de Roça, no qual 82% dos seus entrevistados souberam responder corretamente.

Ao serem questionados sobre o que consideram RSU, os respondentes apontaram garrafas PET em primeiro lugar (17,59%) seguidos pelas latas de refrigerante (17,04%). A categoria "Outros" incluiu os demais itens citados por eles como resíduos, mas que foram menos citados e que representaram (10,74%), conforme Tabela 6.

Tabela 6 – O que você considera como resíduo

Categoria	Quantidade	(%)
Garrafa Pet	95	17,59%
Lata de Refrigerante	92	17,04%
Pneu	82	15,19%
Vidro	77	14,26%
Plástico	73	13,52%
Papel	63	11,67%
Outros	58	10,74%
TOTAL	540	100%

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Os resultados demonstram que os moradores puderam identificar o que são os RSU, no entanto, no estudo realizado por Morais *et al*. (2018), no município vizinho de Tangará da Serra – MT, os resultados apontaram uma relação diferente de materiais listados pelos moradores. Portanto, nota-se pontos de vista diferentes, mas que convergem em comparação com outros estudos no que tange à natureza dos materiais citados.

Em relação ao que fazem com o lixo produzido em suas residências, (61,54%) dos moradores relataram que o amontoa em sacos, (19,05%) que participam da coleta seletiva e (8,73%) que reaproveita o lixo orgânico. Nota-se o problema através dessa questão, pelo fato de que a maioria dos respondentes não faz a separação do que pode ser aproveitado e reciclado por não existir essa opção no município.

Nesse contexto, quando questionado aos respondentes o que é reciclagem (Tabela 7), (42,74%) dos moradores consideram o processo industrial ou artesanal que converte o lixo descartado em um produto semelhante ao inicial, (21,37%) o ato de separar o lixo em casa e (17,09%) o processo para diminuir os impactos pelo lixo no aquecimento global.

Tabela 7 – O que é Reciclagem

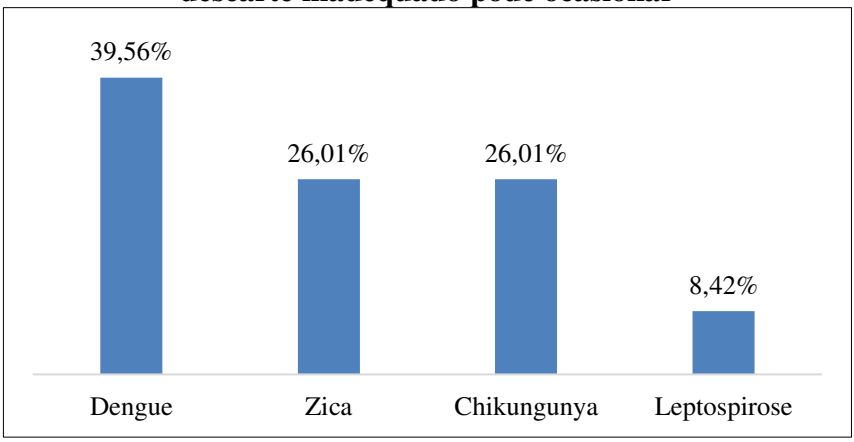
Categoria	Quantidade	(%)
É um processo industrial ou artesanal que converte o lixo descartado em um produto semelhante ao inicial	50	42,74%
É separar o lixo em casa	25	21,37%
É um processo para diminuir os impactos pelo lixo no aquecimento global	20	17,09%
É um processo para reduzir a geração de lixo	12	10,26%
Não soube	7	5,98%
Não quis responder	3	2,56%
TOTAL	**117**	**100%**

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Embora a maioria tenha apontado corretamente o que é o processo de reciclagem, uma parte significativa apontou para a separação de resíduos, que é apenas o primeiro passo, uma vez que depois há o encaminhamento para o processamento, a fim de diminuir as emissões de gases gerados pelos RSU que provocam aquecimento global.

Barros (2013) destaca que é importante saber o significado de reciclagem, para que se possa ter atitudes que ajudem a manter o local limpo, separando o lixo, participando da coleta seletiva e reaproveitando os resíduos orgânicos.

Gráfico 1 – Quais doenças o descarte inadequado pode ocasionar



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Ao serem questionados se os resíduos sólidos urbanos quando não gerenciados podem provocar doenças, 94,87% dos respondentes afirmam que sim e 77,78% dos respondentes concordam que as doenças aumentam devido ao acúmulo de lixo. Do

total de respondentes, 39,56% apontaram a dengue como a principal doença seguido pela *Zica* e *Chikungunya* com 26,01% respectivamente (Gráfico 1).

Sobre qual a destinação dos resíduos sólidos da cidade, 85,47% dos respondentes apontaram o lixão, 5,98% reciclagem e aterro sanitário e 4,28% afirmaram que estes vão para terrenos baldios. Aqui, a maioria apontou corretamente o destino dos RSU, porém, um percentual significativo afirmou que o destino era a reciclagem, que não existe no município, demonstrando que estes moradores não têm conhecimento do destino de seus resíduos e acreditam equivocadamente que os mesmos são reciclados.

Figura 2 – Entrada do Lixão Municipal da Cidade de Barra do Bugres



Fontes: Dados da pesquisa (2020).

A Figura 2 apresenta a placa de entrada do lixão da cidade de Barra do Bugres, condizendo com os resultados obtidos de que os RSU da cidade são jogados no lixão.

Figura 3 – Imagens de Resíduos Sólidos jogados no Lixão



Fontes: Dados da pesquisa (2020).

As Figuras 3 e 4 mostram a variedade de RSU, como vidros, pneus, aparelhos eletrônicos, papelão e outros resíduos descartados no lixão municipal.

Figura 4 – Imagens de Resíduos Sólidos jogados no Lixão



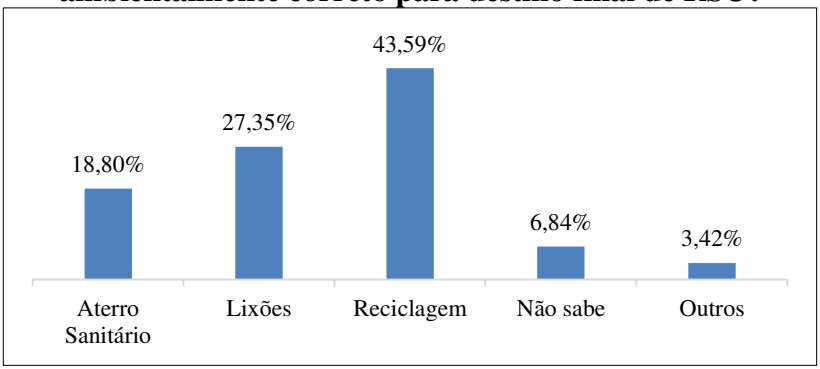
Fontes: Dados da pesquisa (2020).

Ainda na Figura 4 observa-se uma coluna de fumaça se espalhando, resultado de queimada nas proximidades, prática proibida pela Lei Federal nº 9.605/98, configurando crime ambiental, passível de penalidades e multas.

No local não há controle ou monitoramento dos resíduos depositados, fazendo com que resíduos domiciliares, comerciais, industriais e hospitalares de baixa e alta periculosidade se misturem e contaminem o solo pelo chorume - líquido que escorre dos resíduos – atraindo animais e aumentando as chances de proliferação de doenças prejudiciais à saúde humana.

Foi questionado aos moradores sobre qual seria o local correto para o descarte dos resíduos sólidos (Gráfico 2) e 43,59% dos moradores responderam que é a reciclagem, 27,35% os lixões e 18,80% que o mais correto é o aterro sanitário. Zani *et al.* (2019) tem resultado semelhante, onde os respondentes afirmaram que, o destino mais correto seja o aterro sanitário no entendimento de (70,4%), aterro controlado (19,7%) e os lixões (9,9%). Já Hempe e Nogueira (2012) identificaram que a alternativa menos viável é o lixão, que ainda domina 75% do descarte do RSU no Brasil.

Gráfico 2 – Qual o mecanismo ambientalmente correto para destino final de RSU?

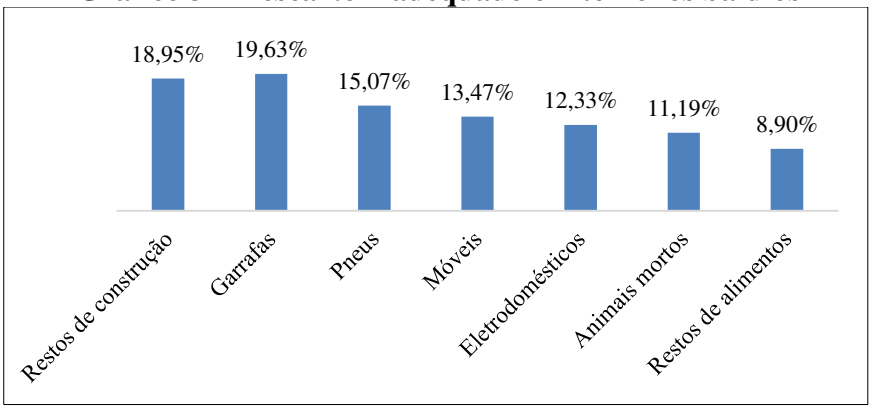


Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Nota-se que os moradores têm conhecimento sobre quais os locais corretos para descarte dos resíduos sólidos, sendo a reciclagem o destino mais indicado, já que possibilita o reaproveitamento dos materiais descartados, além da disposição em aterro sanitário, que ainda não existe no município.

Em relação aos resíduos descartados dentro do bairro, os mais citados são as garrafas (19,63%), resto de construção (18,95%), e pneus (15,07%), um dos itens que mais gera problemas como o acúmulo de água parada, conforme Gráfico 3.

Gráfico 3 – Descarte inadequado em terrenos baldios



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

A Figura 5 retrata um terreno baldio localizado no bairro, nas proximidades do rio Paraguai, um dos principais rios de planície do Brasil e o elemento fisiográfico mais importante do Pantanal Mato-Grossense (ZANI *et al*., 2008; JUNK *et al*., 2006), com resíduos, que causam poluição visual, impactam o solo e contaminam o rio, se tornando abrigo de animais transmissores de doenças e colocando em perigo a saúde e a vida dos moradores.

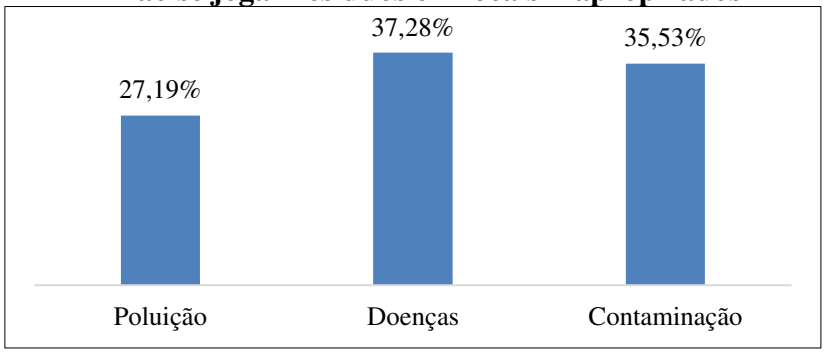
Figura 5 – Imagens de RSU jogados em terreno baldio do bairro Maracanã



Fontes: Dados da pesquisa (2020).

Quando questionado aos respondentes quais problemas ambientais são causados pelo descarte inadequado (Gráfico 4), os mesmos apontaram doenças (37,28%), contaminação do solo e das águas (35,53%), e poluição visual (27,19%), que acabam por prejudicar a saúde e a beleza cênica do bairro, além de também produzirem mau cheiro.

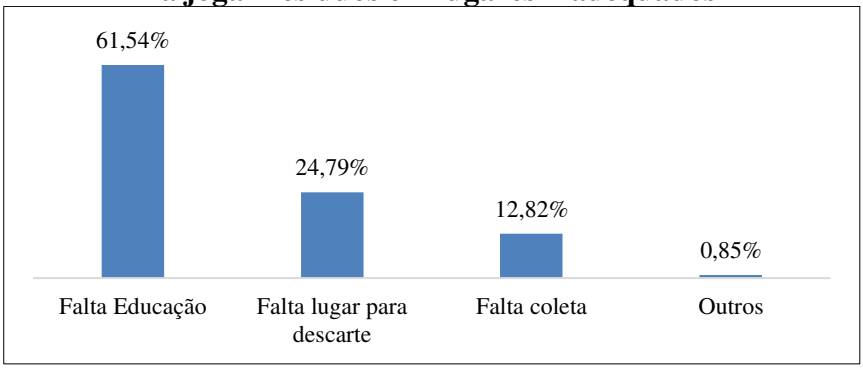
Gráfico 4 – Problemas ambientais causados ao se jogar resíduos em locais inapropriados



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Quanto ao que leva os moradores do bairro a jogar os resíduos sólidos em lugares inapropriados (Gráfico 5), 61,54% acredita que seja por falta de educação, 24,79% por falta de lugar para descartar e 12,82% por falta de coleta dos materiais. Para a maioria, o descarte é feito pelos próprios moradores, que não tem consciência dos problemas que esse procedimento causa ao bairro.

Gráfico 5 – O que leva os moradores a jogar resíduos em lugares inadequados



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Estudo realizado por Morais *et al*. (2018) no bairro Jardim Tarumã em Tangará da Serra – MT, apresentou resultado similar, no qual 72,13% dos moradores afirmaram que o descarte inadequado é causado por falta de educação e/ou falta de zelo, ou seja, a motivação do descarte inadequado dos resíduos refere-se a falta de bom senso dos próprios moradores, outros 22,13% por falta de coleta e 5,74% por falta de lugar apropriado para o descarte.

Nesse sentido, ações de Educação Ambiental, que objetivem estimular o cuidado com o meio ambiente por meio de atitudes que

sejam voltadas para sua conservação, podem ser uma das alternativas para diminuir ou eliminar o descarte inadequado.

Sobre quais problemas ambientais existem no bairro (Tabela 8), os moradores listaram os resíduos jogados na rua (15,18%), em segundo lugar as queimadas (12,68%), e em terceiro a poluição do ar (12,47%), colocando a poluição como consequência das queimadas e ainda esgoto a céu aberto, gestão inapropriada dos resíduos, doenças, falta de água, entre outros.

Tabela 8 – Problemas ambientais citados que geram mais impactos no Bairro Maracanã

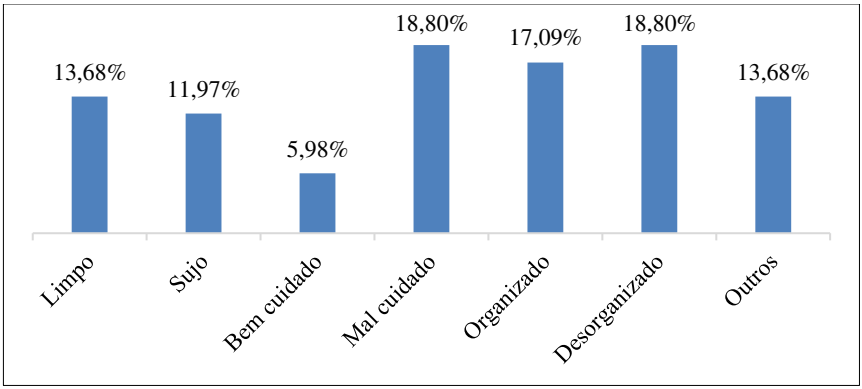
Categoria	Quantidade	(%)
Resíduos jogados na rua	73	15,18%
Queimadas	61	12,68%
Poluição do ar	60	12,47%
Esgoto a céu aberto	48	9,98%
Gestão inapropriada dos resíduos	45	9,36%
Desperdício de água	44	9,15%
Rios poluídos	41	8,52%
Doenças	40	8,32%
Falta d'água	36	7,48%
Desmatamento	24	4,99%
Outros	9	1,87%
Total	**481**	**100%**

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Sem a coleta seletiva no bairro, muitas pessoas optam por queimar os resíduos, prática que prejudica a qualidade de vida, devido a contaminação do ar e solo ou praticam o descarte nas ruas, que causa entupimento das saídas e impede o escoamento das águas, favorecendo enchentes.

Em relação a como consideram o ambiente do bairro (Gráfico 6), 17,09% dos entrevistados acham que é organizado e 13,68% que é limpo contra 18,80% que afirmam que é mal cuidado e desorganizado.

Gráfico 6 – Como você considera o ambiente do seu bairro



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Frente a isso, ao serem questionados sobre a satisfação com as condições do bairro, 46,15% responderam estar insatisfeitos com o local contra 50,43% dos respondentes que consideram a qualidade de vida no bairro regular. Sobre a responsabilidade com a preservação do ambiente do bairro, 61,54% dos respondentes se consideram responsáveis pelo cuidado, o que demonstra a consciência de que tornar o ambiente do bairro limpo e organizado é responsabilidade de todos.

Responsabilidade do Poder Público

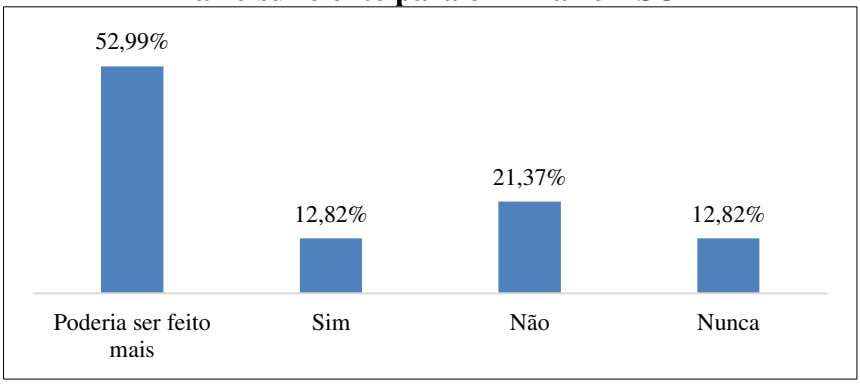
Pela Lei nº 12.350/10, os governos federal, estadual e municipais são responsáveis pela elaboração e implementação dos planos de gestão de resíduos sólidos e em vista disso, quando questionados se o poder público faz o suficiente para eliminar os

resíduos sólidos urbanos (Gráfico 7), 52,99% dos moradores acreditam que poderia ser feito mais, 21,37% que não é feito e 12,82% que já é feito o suficiente.

O total de 52,99% dos moradores atribui os RSU jogados em locais inadequados ao fato do poder público não oferecer a coleta seletiva dos resíduos sólidos. De fato, se o poder público não agir para manter o bairro limpo oferecendo a coleta, os moradores acabam se livrando dos seus resíduos por meio do descarte em lugares inadequados.

Araújo e Pimentel (2016) identificaram que é preciso que o poder público elimine a possibilidade de ser descartado resíduos em locais inadequados e para que isso aconteça é necessário que sejam concebidas estratégias como limpeza e cercamento e, se cabível, a transformação em locais como praças, bosques, entre outros.

Gráfico 7 – O poder público local faz o suficiente para eliminar o RSU

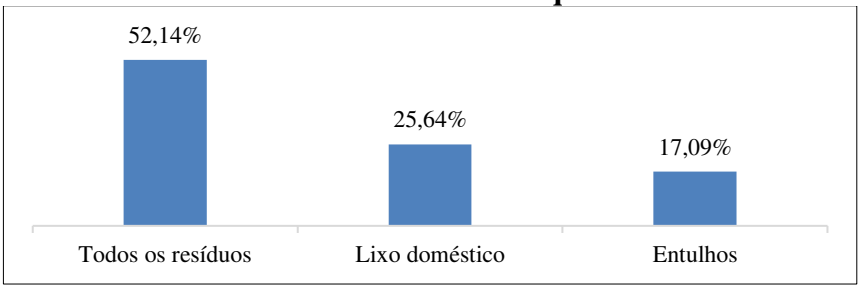


Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Quando questionado aos moradores quais RSU a coleta pública deveria recolher (Gráfico 8), 52,14% dos respondentes acreditam que deve ser coletado todos os lixos que estiverem em

volta da lixeira, 25,64% os lixos domésticos e 17,09% os entulhos dos terrenos baldios. É nítido que os moradores entendem que a responsabilidade é do poder público, mas que é necessário que os resíduos estejam separados e disponíveis para a coleta.

Gráfico 8 – O poder público local deve fazer a coleta de quais RSU



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Quanto à percepção sobre a implementação de PP para os RSU, 64,96% deles declarou que não existem políticas específicas para os RSU. É certo dizer que não existe nenhum projeto específico para os resíduos sólidos, já que por meio de conversas foi identificado que no bairro não existe coleta seletiva, e que todos os resíduos são encaminhados para o lixão.

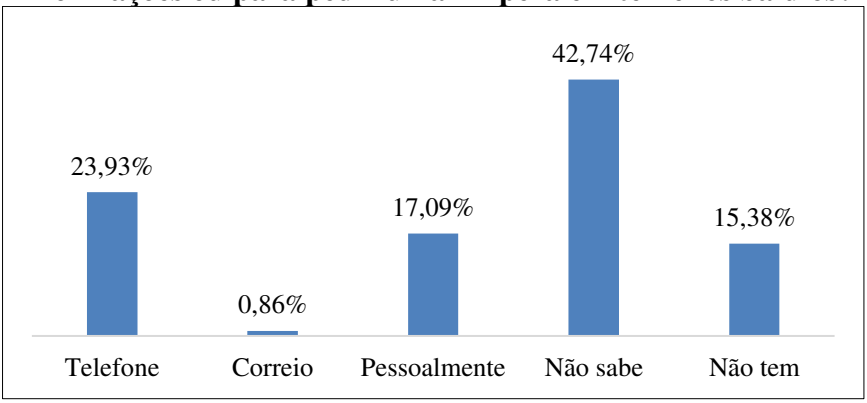
Frente a isso, é importante que o poder público elabore ações voltadas para os RSU no bairro. O estudo realizado por Araújo e Pimentel (2016), e Tullio (2019) identificou que as políticas e a educação ambiental implantadas nos locais estudados ajudaram a melhorar o ambiente do bairro e a qualidade de vida dos moradores.

Sobre os canais de atendimento para reclamações e denúncias sobre acúmulo de lixo em terrenos baldios e solicitação de limpeza dos mesmos (Gráfico 9), 42,74% dos entrevistados disseram não

saber se existe um canal, 23,93% afirmou que as reclamações e solicitações podem ser feitas por telefone e 17,09% que devem ser feitas pessoalmente na prefeitura. Cabe ressaltar que a prefeitura não soube informar se há um canal para atendimento ao público.

É de suma importância que o poder público divulgue amplamente a forma de solicitar serviços de limpeza ou denúncia de terrenos com depósito de resíduos, mas mesmo com um canal, 70,94% dos moradores relatam que o poder público não toma nenhuma providência para evitar o descarte nos terrenos baldios nem realiza a limpeza nos locais.

Gráfico 9 – O poder público disponibiliza canal de atendimento para reclamações, informações ou para pedir uma limpeza em terrenos baldios?



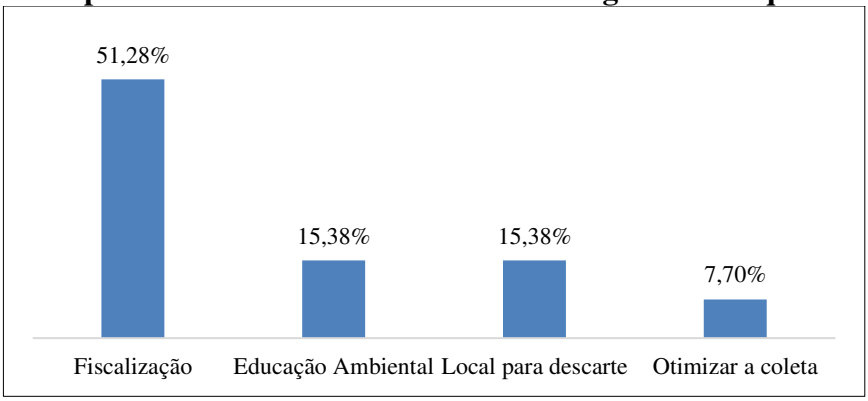
Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Sobre quais as soluções que o poder público pode empregar para evitar que a população faça o descarte nos terrenos baldios (Gráfico 10), 51,28% dos moradores acreditam que a fiscalização e aplicação de multas sejam a solução, enquanto 15,38% acredita que

seja necessário a disponibilização de local de descarte de entulho e apenas 15,38% dos moradores acreditam que seja necessário o desenvolvimento de ações de EA.

O estudo realizado por Araújo e Pimentel (2016) em dois bairros de Maceió no estado de Alagoas apontou que ações de EA, fiscalização e multa para aquele que descartar os resíduos em lugares inadequados, em conjunto com revitalização dos espaços ajudam a diminuir os pontos de descarte nos bairros.

Gráfico 10 – Soluções que o poder público poderia usar para evitar descarte de resíduos em lugares inadequados



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

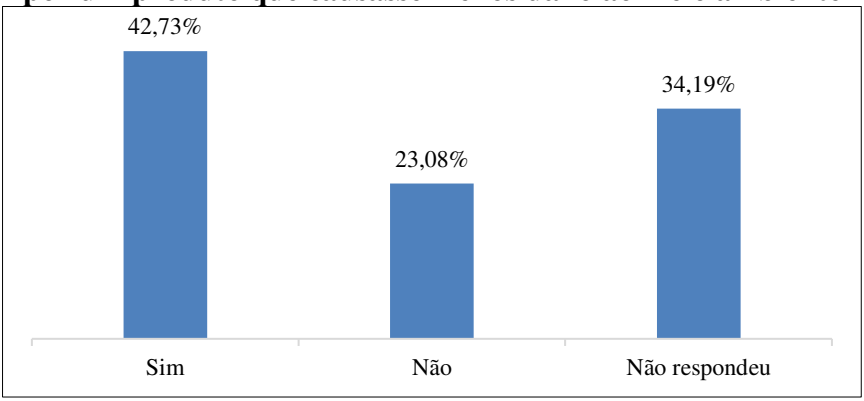
Em relação aos projetos de EA voltados para os resíduos sólidos no bairro, 39,31% não soube responder, 21,37% apontou que não existe nenhum projeto e 12,82% afirmou que não existe nenhum interesse em desenvolver um projeto. Na percepção dos moradores, o poder público não tem interesse em cuidar do bairro, não dando muita atenção as necessidades do bairro.

Os estudos realizados por Mucelin e Bellini (2008) e Araújo e Pimentel (2016) demostraram que após a implementação dos projetos, houve grandes mudanças no bairro, deixando-o mais agradável, além de ajudar na qualidade de vida da população.

Percepção Econômica em Relação aos Resíduos Sólidos Urbanos

A partir do planejamento, melhoria na infraestrutura e um bom gerenciamento é possível minimizar os impactos negativos dos RSU nas cidades, ainda mais se estiverem alinhados com ações educativas e de sensibilização quanto a mudança da cultura do consumismo. Com base nisso, foi questionado aos moradores, se em suas compras eles se preocupam em gerar menos lixo, e 58,97% dos respondentes afirmou que sim, citando que muitas vezes a compra é de apenas um pequeno item, não sendo necessário a utilização de sacolas plásticas, por exemplo.

Gráfico 11 – Você estaria disposto a pagar mais caro por um produto que causasse menos dano ao meio ambiente



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Foi questionado se estariam dispostos a pagar por um produto mais caro se ele causasse menos danos ao meio ambiente (Gráfico 11), 42,73% disse que sim, se isso pode ajudar na preservação do meio ambiente, eles pagariam a mais, 34,19% preferiu não responder, e 23,08% dos moradores afirmou que não mudaria. Nesse caso, é importante ressaltar que isso não depende apenas da intenção de ajudar na preservação do meio ambiente, mas também da renda familiar.

Assim, quando questionado aos moradores se eles já substituíram o consumo de um produto por outro similar, por ter um menor impacto ao meio ambiente, 29,91% disseram que sim, 34,19% que não mudariam e 35,90% não souberam responder.

É válido destacar que, a não mudança de um produto pode estar ligada a preferência, quando o consumidor se acostuma a uma determinada marca ou acha a qualidade de um produto melhor que o outro, mas ainda que nem todos os moradores estejam dispostos a trocar de produto, há um entendimento que pequenas atitudes podem trazer grandes benefícios ao meio ambiente e a qualidade de vida (BERTICELLI; PANDOLFO; KORF, 2017).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da realização deste trabalho foi possível averiguar o conhecimento dos moradores do bairro Maracanã sobre o que são os resíduos sólidos urbanos (RSU) e sobre quais problemas decorrem do mau gerenciamento desses resíduos, como o surgimento de doenças e poluição ambiental e visual.

Na percepção dos moradores, as melhores práticas para destinação dos RSU são a reciclagem e o aterro sanitário, entretanto, Barra do Bugres ainda não dispõe desses métodos para o descarte

correto. Esse fator colabora com a percepção de que a falta de educação é o principal motivo para os descartes em locais impróprios e como resposta, os moradores acreditam que a melhor solução seja a fiscalização e multa ao indivíduo que não faça o descarte correto de seus resíduos.

A maioria dos entrevistados externou que o poder público não dá importância para o bairro e que, mesmo após as denúncias, não são tomadas providências para limpeza dos locais, além de afirmar que não existe nenhuma política e projeto para os RSU no município de Barra do Bugres e que o poder público poderia fazer mais pela cidade referente à questão ambiental.

Diante dessa percepção, percebe-se a necessidade do desenvolvimento de PP voltadas ao desenvolvimento da infraestrutura e melhoria do gerenciamento dos RSU no bairro, como a implementação de ações de EA e criação de projetos de coleta seletiva e a construção de aterro sanitário. Além dessas medidas, a implantação de Ecopontos no bairro e em toda área urbana do município poderia amenizar os impactos gerados pelo descarte inadequado dos resíduos sólidos. Os munícipes teriam a possibilidade de dispor os resíduos que ainda não tem o destino correto.

Essas ações trazem benefícios em termos ambientais, sociais e econômicos e podem orientar os moradores na adoção de novos comportamentos, que auxiliam na melhoria da qualidade de vida e na preservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABNT **-** Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AGÊNCIA BRASIL. “Saneamento e ranking da universalização do saneamento”. **Agência Brasil** [2019]. Disponível em: <www.agenciabrasil.ebc.com.br>. Acesso em: 21/05/2020.

ARAÚJO, K. K.; PIMENTEL, A. K. “A Problemática do Descarte Irregular dos Resíduos Sólidos Urbanos no Bairros Vergel do Lago e Jatiúca em Maceió, Alagoas”. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, vol. 4, n 2, 2016.

BARROS, J. R. **A Percepção Ambiental dos Moradores do Bairro CPA II Sobre os Resíduos Sólidos Urbanos** (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental). Cuiabá: IFMT, 2013.

BERTICELLI, R.; PANDOLFO, A.; KORF, E. P. “A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: perspectivas e desafios”. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, vol. 5, n. 2, 2016.

BRASIL. **Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1998. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 04/02/2022.

BRASIL. **Lei n. 9.795, de 27, de abril de 1999**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1998. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 04/02/2022.

BRASIL. **Lei n. 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Brasília: Planalto, 2007. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 04/02/2022.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1998. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 04/02/2022.

CAZAROTO, R. B. *et al*. "Percepção Ambiental dos Alunos de Ensino Médio E.E. "Emílio Oscar Hülle" – Município de Marechal Floriano – Espírito Santo". **Revista Eletrônica Debates em Educação Científica e Tecnológica**, vol. 2, n. 02, 2012.

FERNANDES, R. S. *et al*. "Uso da percepção ambiental como instrumento de gestão em aplicação ligadas ás áreas educacional, social e ambiental". **Anais do II Encontro da ANPPAS**. Campinas: ANPPAS, 2004.

FIOCRUZ - Fundação Oswaldo Cruz. "Políticas Públicas e Modelos de Atenção e Gestão à Saúde. **Portal Eletrônico FIOCRUZ** [02/05/2018]. Disponível em: <www.portal.fiocruz.br>. Acesso em: 21/04/2022.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2010.

HEGEL, C. G. Z.; CORNÉLIO, P. F. O. "Resíduos Sólidos Urbanos: Depósitos Irregulares no Munícipio de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil". **Revista Gestão e Sustentabilidade**, vol. 2, n. 1, 2013.

HEMPE, C.; NOGUEIRA, J. O. C. "A Educação Ambiental e os Resíduos Sólidos Urbanos". **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, vol. 5, n 5, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. "Estimativa populacional de Barra do Bugres/ MT em 2019". **IBGE** [2019]. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21/05/2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. "Estimativa populacional em 2016". **IBGE** [2016]. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21/05/2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

JUNK, W. J.; CUNHA, C. N.; WANTZEN, K. M.; PETERMANN, P.; STRUSSMANN, C.; MARQUES, M. I.; ADIS, J. "Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil". **Aquatic Sciences**, vol. 68, 2006.

LEME, S. M. "Comportamento da População Urbana no Manejo dos Resíduos Sólidos Domiciliares em Aquidauana – MS". **Geografia**, vol. 18, n. 1, 2009.

LIMA, E. B. N. R.; MODESTO FILHO, P.; MOURA, R. M. P. (orgs.). **Plano Municipal de Saneamento Básico**: Barra do Bugres-MT. Cuiabá: Editora da UFMT, 2017.

LOPES, H. R. R. **Avaliação da Política Nacional de Resíduos Sólidos e modelagem de um processo para elaboração de planos municipais simplificados de gestão integrada de resíduos sólidos** (Dissertação de Mestrado em Políticas Públicas). Brasília: IPEA, 2016.

LUPPI, L.; SILVA, P. M.; ARANTES, I. B. "Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Sanitário de Tangará Da Serra/MT e a Adequação da Lei 12.305". **Anais do XXI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**. São Paulo: USP, 2019.

MAGALHÃES, L. Z.; WERLE, H. S. "Problemas ambientais de uma cidade média de Mato Grosso: o caso de Barra do Bugres". **Revista Planejamento e Políticas Públicas**, n. 33, 2009.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Editora Atlas, 2017.

MORAIS, E. K. A. *et al*. "Análise da Percepção Ambiental sobre a Geração de Resíduos Sólidos Urbanos dos Moradores do Bairro Jardim Tarumã no Município de Tangará da Serra – MT". **Anais do I Congresso Sul Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**. Gramado: IBEAS, 2018.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. "Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano". **Revista Sociedade e natureza**, vol. 20 n. 1, 2008.

PNRS - Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Versão Preliminar para Consulta Pública**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

QUERINO, L. A. L. **Percepção Ambiental Acerca dos Resíduos Sólidos Domiciliares**: um estudo com os moradores de São Sebastião de Lagoa de Roça – PB (Dissertação de Mestrado em Recursos Naturais). Campina Grande: UFCG, 2015.

RABÊLO, O. S. "Proposta Estratégica para o Acondicionamento dos Resíduos Sólidos em Barra Do Bugres-MT: Usina de Reciclagem". **DocPlayer** [2013]. Disponível em: <www.docplayer.com.br>. Acesso em: 21/04/2020.

RICHARDSON, R. J. *et al*. **Pesquisa social**: métodos e técnicas. São Paulo: Editora Atlas, 2007.

SILVA, A. C. R. **Metodologia da pesquisa aplicada à contabilidade**: orientações de estudos, projetos, artigos, relatórios, monografias, dissertações, teses. São Paulo: Editora Atlas, 2010.

SUESS, R. C. *et al*. "Percepção Ambiental de Diferentes Atores Sociais Sobre o Lago do Abreu em Formosa – GO". **HOLOS**, vol. 6, 2013.

TROTTA, P. “A gestão de resíduos sólidos urbanos em Portugal. In: VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão”. **Anais do VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. Rio de Janeiro: CNEG, 2011.

VERAS JUNIOR. *et al*. “O Plano de Gerenciamento Municipal Integrado de Resíduos Sólidos nos Ecopontos em Fortaleza. **Anais do XXI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**. São Paulo: USP, 2019.

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; SILVA. A. “Batimetria fluvial estimada com dados orbitais: estudo de caso no alto curso do rio Paraguai com sensor ASTER”. **Revista Geociências**, vol. 27, n. 4, 2008.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. “Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos”. *In*: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (coord.) **Resíduos sólidos urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES/RiMa, 2003.

CAPÍTULO 9

Geração de Biogás a partir da Disposição de Resíduos Sólidos Urbano na Região Metropolitana de Recife (PE)

GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO NA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE (PE)

Ana Maria Cardoso de Freitas Gama

Alessandra Barbosa Lee Firmo

José Fernando Thomé Jucá

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) compreende o conjunto das decisões estratégicas e das ações voltadas à busca de soluções, envolvendo políticas públicas, instrumentos e aspectos institucionais e financeiros (GAMA, 2020), com vista ao desenvolvimento sustentável e a questão requer o envolvimento de toda a sociedade.

O crescimento demográfico, a intensidade das atividades humanas e a melhoria do nível de vida são responsáveis pelo aumento exponencial da quantidade de resíduos gerados, bem como pelas alterações das características, constituindo um grande problema para a administração pública (SÃO PAULO, 2013). Fato que se agrava pelo manejo inadequado desde a sua geração até a destinação final, muitas vezes ocorrendo a disposição em vazadouro a céu aberto, os conhecidos lixões, nas galerias de águas pluviais ou mesmo diretamente nos corpos hídricos que resulta em impactos ambientais, danos sociais e econômicos e em risco à saúde pública.

A disposição adequada de RSU em aterros sanitários, gera biogás e o subproduto chorume, que com a umidade dos resíduos, ou por infiltração, resulta na produção de lixiviado, que carreia os materiais dissolvidos e suspensos presentes nos resíduos (SÁ *et al.*, 2012).

O biogás proveniente do processo de decomposição dos RSU encaminhados aos aterros sanitários, tem como principal componente o metano, que segundo o IPCC, (2006) é um gás de efeito estufa que tem fator de equivalência em carbono na métrica do Potencial de Aquecimento Global - GWP 28 vezes mais potente do que CO_2, porém com um potencial de mitigação com o aproveitamento energético na para geração de energia elétrica e térmica.

OBJETIVO DO CAPÍTULO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os estudos realizados sobre a disposição no solo dos resíduos sólidos urbano na Região Metropolitana do Recife, no Estado de Pernambuco, com ênfase na estimativa na geração do gás metano, no período de 2005 a 2018.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo foi realizado por meio de uma pesquisa exploratória, iniciando-se com a revisão literária e do arcabouço legal acerca das temáticas envolvidas, bem como levantamento de dados junto aos órgãos oficiais, aos municípios e nas centrais de tratamento de resíduos da RMR.

Seguida da estimativa de geração do gás metano nos locais de disposição, utilizando o método do IPCC (2006), classificado como Tier2, que considera o decaimento de primeira ordem (FOD) para a estimativa de GEE, utiliza dados de atividades específicas da RMR e fatores padrão (default).

No modelo Tier2 a determinação das emissões de gases é baseada na equação (IPCC, 2006).

$$Q_{(t)} = \sum * \{[(A * K * MSW_{t(x)} * MSW_{f(x)} * Lo_{(x)} * e^{-k(t-x)}) - R * (1 - OX)]\} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Onde:

Q (t) - CH_4 emitido

A – Fator de normalização da soma (adimensional)

$$A = \frac{1-e^{-k}}{k} \quad \text{(Eq. 2)}$$

K - Constante de geração/decaimento de CH_4(ano $^{-1}$) 1/ano

X - Categoria do material (disposição)

t - Ano do inventário

$MSW_{(t)}$ - Quantidade total de resíduos gerados no ano em estudo (t/ano)

$MSW_{(f)}$ - Fração de resíduos destinado ao aterro no ano (adimensional)

$Lo_{(x,t)}$ - Potencial de geração de CH_4 ($tCH_4/tMSW$)

R - CH_4 recuperado ($tCH_4.^{-ano}$)

OX - Fator de Oxidação (Adimensional)

Segundo o IPCC (2006), o potencial CH_4 (Lo) que é gerado ao longo do ano pode ser estimado com base nos valores de decomposição dos resíduos dispostos no solo e as práticas de gerenciamento de resíduos nos locais de disposição. Considerando a conversão de Quantidade de Carbono Orgânico Degradável Passível de Decomposição (DDOCm) no potencial de geração de metano (Lo), que assume a Equação 3.

$$LO = DDOC_M * F * 16/12 \quad \text{(Eq. 3)}$$

Na qual:

L0 - Potencial de Geração de Metano ($tCH_4/tMSW$)

DDOCm – Quantidade de Carbono Orgânico Degradável Passível de Decomposição

F – Fração de Metano no Biogás (Adimensional)

16/12 – Razão estequiométrica de conversão entre Metano (CH_4) e

Carbono (C), (adimensional)

Por sua vez o DDOCm é calculado pela seguinte expressão:

$$DDOC_M = MSW_T * DOC * DOC_f * MCF \quad \text{(Eq. 4)}$$

Onde:

MSW_T - Quantidade total dispostos no ano em aterramento tipo "x" [t]

DOC – Carbono orgânico degradável (tC/tMSW)

DOCf – Parcela de DOC convertida em gás no aterro (adimensional)

MCF – Fator de correção do metano referente ao gerenciamento dos locais de disposições (adimensional)

A partir das equações 1, 2 e 3 a quantidade de metano emitido (Q_T) será determinada pela equação seguinte:

$$Q_T = \{LO - (R) * (1 - OX)\} \quad \text{(Eq. 5)}$$

A partir das Equações 1 e 4 a quantidade de emissões de CH_4 será calculada pela equação 6, a seguir:

$$Q_T = \{\sum MSW_T * MCF * DOC * DOC_f * F * \frac{16}{12} - (R) * (1 * OX) \quad \text{(Eq. 6)}$$

Portanto, a estimativa das emissões de metano (CH_4) pelos resíduos sólidos urbanos dispostos no solo na RMR foi realizada por município, e a emissão total, corresponde à soma das emissões de todos os 15 municípios, para os anos de 2005 – 2018. Desta forma a Equação 7, adaptada para RMR, por ano, é:

$$Emissão\ da\ RMR = \sum_{J\text{- 15 municípios}} Q_{T\,(ano)} \quad \text{(Eq. 7)}$$

$$Q_{T(ano_{(n)})} = \sum_{\text{J- 15 municípios}} \{[1 - e^{-k} * \left(MSW_{T_{(ano_{(n)})}} * MCF * DOC * DOC_f * e^{-k*(t=1)} * F * \frac{16}{12} \right) - R * (1 - OX)]\} \quad \text{(Eq. 8)}$$

O DOC é calculado pela equação:

$$DOC = (0{,}40 * A) + (0{,}24 * B) + (0{,}15 * C) + (0{,}43 * D) + (0{,}20 * E) \quad \text{(Eq.9)}$$

Onde:

A, B, C, D e E corresponde à fração do carbono degradável dos resíduos dispostos, obtido da composição gravimétrica.

Por fim, a quantidade de metano emitido durante o período de 2005 a 2018 é calculada pela equação 10.

$$Q_{CH_4(t=1)}^{2030} = Q_{CH_4(t=25)}^{2005} + Q_{CH_4(t=24)}^{2006} + Q_{CH_4(t=23)}^{2007} + (\ldots) + Q_{CH_4(t=1)}^{2018} \quad \text{(Eq. 10)}$$

Entradas no modelo do IPCC 2006

Os valores de entrada no modelo do IPPCC para o fator de correção do metano e as constantes por componentes gravimétricos encontram-se nas Tabelas 1 e 2 a seguir:

Tabela 1 - Valores recomendados para o fator de correção do metano (MCF)

IPCC, (2006)	PNRS (2010)	Fator – MCF (adimensional)
Com gerenciamento	Aterro sanitário	1,0
Profundo> 5 m	Aterro Controlado	0,8
Raso< 5m, sem gerenciamento	Lixão	0,4
Não categorizado	Destino não informado	0,6

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: IPCC (2006); PNRS (2010).

Tabela 2 - Classificação das constantes por componentes gravimétricos

Composição fração de gás metano	DOC	DOCf	t1/2	K	F
Matéria Orgânica	0,20	0,79	2,00	1,40	0,50
papel/papelão	0,45	0,79	2,00	0,10	0,50
madeira	0,46	0,79	2,00	0,05	0,50
Sanitários	0,32	0,79	2,00	0,20	0,50
Têxtil	0,40	0,79	2,00	0,085	0,50
Outros	0,00	0,79	2,00	0,00	0,50

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: IPCC (2006); FIRMO (2013).

Caracterização das seções do artigo

Este artigo é composto desta introdução que contém os temas abordados, o objetivo do artigo, os procedimentos metodológicos e as seções a seguir caracterizadas: revisão literária e legal sobre a gestão integrada de resíduos sólidos e os resultados contendo a estimativa de geração de gás pelos municípios, por componentes gravimétricos dos RSU, pelos locais de disposição e pôr fim a conclusão e referências bibliográficas.

REVISÃO LITERÁRIA

Gestão integrada de resíduos sólidos

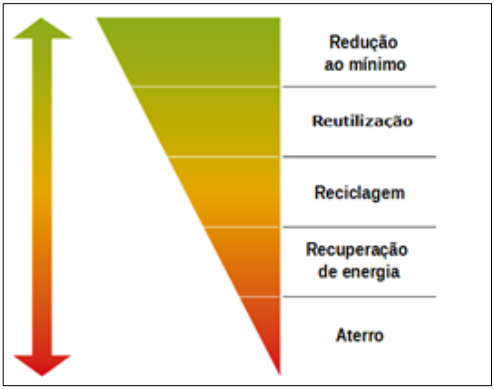
Priorizar e envidar esforços para o planejamento das ações para uma gestão integrada dos resíduos sólidos é urgente em função da problemática de saúde ambiental dos municípios. Esta última está relacionada com a deficiência ou com a ausência de serviços públicos de saneamento ambiental e do enfretamento das mudanças climáticas.

A Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007) instituiu a Política Nacional de Saneamento (PNS), trazendo uma mudança de paradigma, quando instituiu que a abrangência da questão do saneamento ambiental vai além do tratamento de esgoto, abastecimento de água e drenagem de águas pluviais, incluindo a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos. Destaca, ainda, como limpeza urbana um conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final dos resíduos sólidos urbano (RSU) (BRASIL, 2007). Por sua vez, a Lei 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) traz a concepção de gestão integrada de resíduos sólidos, definindo-a como: “um conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos

sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável" (BRASIL, 2010).

Aspecto relevante na gestão integrada de resíduos sólidos definida na PNRS é a hierarquização das ações, que minimizam impactos socioambientais, cuja ordem de priorização é: a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e disposição final e que está apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Hierarquização da gestão integrada de RSU



Fonte: GIZ (2017).

Classificação e caracterização dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos podem ser classificados e caracterizados quanto à periculosidade, à origem e às propriedades físicas, químicas e biológicas.

As características físicas e químicas dos resíduos são fundamentais para projetar, dimensionar as unidades de tratamento, planejar as etapas do sistema de gerenciamento e estimar os gases de efeito estufa (GEE) (Quadro 1).

Quadro 1 - Características físico-químicas dos resíduos e sua importância

Características	Descrição	Importância
Geração per capita (kg/hab./dia)	Quantidade diária de resíduos gerados por habitante.	✓ Projeção da quantidade de resíduos; ✓ Dimensionamento das unidades do sistema de manejo.
Teor de umidade (%)	Percentual (em massa) de água em uma amostra de RSU.	✓ Influencia na velocidade de degradação aeróbia ou anaeróbia e no processo de incineração.
Composição gravimétrica (%)	Percentual de cada componente em relação à massa total de resíduos.	✓ Definição das frações dos materiais recicláveis e do potencial para a compostagem. ✓ Estimativas das emissões de gases de efeito estufa.
Massa específica aparente (kg/m^3)	Relação entre a massa do resíduo, não compactado, em relação ao volume que ocupa.	✓ Dimensionamento de projetos de aterro sanitário, de equipamentos e veículos de coleta.
Compressividade	Grau de compactação ou redução de volume que uma massa de resíduo sofre sob pressão.	✓ Definição da vida útil do aterro sanitário ✓ Dimensionamento de equipamentos, veículos de coleta.
Relação Carbono /Nitrogênio (C/N)	Grau de decomposição da massa de RSU.	✓ Estabelecimento da qualidade do composto produzido. (continua)
Poder Calorífico (kcal/kg)	Energia (calor) que uma massa de RSU desprender ao ser submetida a um processo térmico.	✓ Dimensionamento das instalações dos processos de tratamento térmico (incineração, pirólise, outros).
pH	Teor de acidez, neutralidade ou alcalinidade do ambiente da massa de resíduos.	✓ Desenvolvimento dos microrganismos. ✓ Definição da tecnologia de tratamento.
Composição química	Teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral e gorduras.	✓ Definição da tecnologia a ser utilizada para tratamento. ✓ Influencia principalmente os processos biológicos.

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: MERSONI (2015).

ETAPAS DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos envolve, além da não geração, a redução na geração, reutilização e reciclagem, as seguintes etapas (BRASIL, 2008):

a) Acondicionamento;
b) coleta e Transporte;
c) limpeza dos logradouros;
d) tratamento final ambientalmente adequado dos resíduos;
e) disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Segundo Gama (2020) a redução na geração dos resíduos em geral, a reutilização e a reciclagem, proporciona a modificação dos padrões de consumo e contribui, significativamente, para reduzir o consumo de energia, o uso de matérias-primas e dos recursos naturais, do envio apenas de rejeito para os aterros, como preconiza a legislação pertinente, além de mitigar as emissões de GEE pela redução da geração de gás metano.

O sistema de coleta, seja convencional e/ou diferenciado, é fundamental para a meta de disposição final de rejeitos e redução da geração dos gases de efeito estufa, que tem como antecessor o acondicionamento dos resíduos.

Segundo o Manual " Elementos para a organização da coleta seletiva e projetos de galpões" (BRASIL, 2008), para que um sistema de coleta seletiva seja eficiente, alguns passos importantes e básicos deverão ser considerados: setorização do município/cidade

para definição da coleta seletiva; planejamento da logística de coleta; mobilização social e educação ambiental; inclusão dos catadores de materiais recicláveis; instalação de unidades de triagem, pontos de entrega voluntária; estruturação gerencial de apoio às cooperativas/associações de catadores de materiais reciclados.

Sistemas de tratamentos

O tratamento de resíduos sólidos urbanos pode ser compreendido como um conjunto de procedimentos físicos, químicos e biológicos, que têm como objetivo diminuir a carga poluidora ao meio ambiente e reduzir os impactos sanitários, além de visar o beneficiamento econômico dos resíduos (JUCÁ *et al.,* 2014). No Quadro 2 apresentam-se formas de tratamento de RSU.

Quadro 2 - Formas de tratamento, processo, evolução e inovação

Sistema Básico	Processos	Evolução	Produtos	Inovação
Triagem	Físico	Coleta seletiva, Tratamento mecânico biológico (TBM)	Matéria-Prima para Reciclagem, Energia	Recuperação dos resíduos, Energia derivada dos resíduos
Tratamento Biológico	Biológico	Biodigestores anaeróbios, Compostagem	Composto orgânico, Energia	Agricultura, Energia derivada dos resíduos
Tratamento Térmico	Físico-químicos	Incineração, Gaseificação, Pirólise	Energia elétrica, Vapor	Energia derivada dos resíduos
Aterros Sanitários	Físico, Químicos e Biológicos	Reator anaeróbico, Tratamento da matéria orgânica	Biogás, Lixiviado	Energia derivada dos resíduos, Fertilizantes

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: JUCÁ *et al*. (2014).

A compostagem é um processo microbiológico aeróbio e controlado de transformação de resíduos orgânicos em matéria estabilizada (BIDONE, 1999). A matéria estabilizada, como produto final do processo, compõe-se de compostos orgânicos e pode ser utilizada como adubo ou fertilizante.

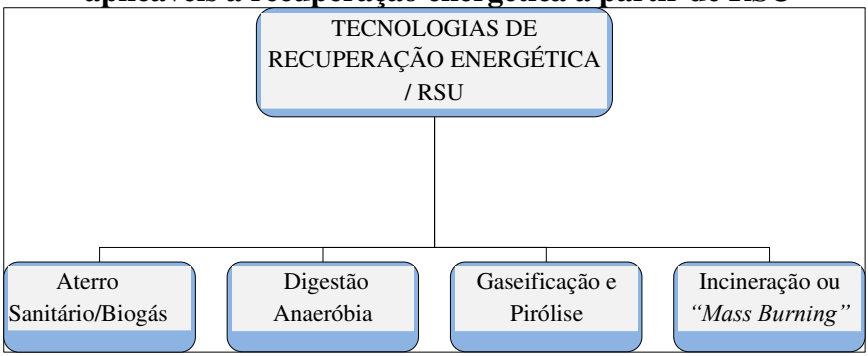
A recuperação ou valorização energética é utilizado para denominar os métodos e processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos RSU. Consiste em alternativas técnicas que utilizam o processo de aproveitamento do poder calorífico, contido nos resíduos, para gerar energia elétrica e térmica utilizada como combustível. Podem ser considerados processos eficazes no que diz respeito aos benefícios ambientais decorrentes do menor volume de resíduos disposto em aterros sanitários e diminuição de gases do efeito estufa. (PERNAMBUCO, 2014).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos considera a recuperação e o aproveitamento energético como destinação final dos resíduos sólidos urbanos, conforme disposto no Art. 3º:

> Destinação Final Ambientalmente Adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (inciso VII) (BRASIL, 2010).

As principais alternativas tecnológicas para recuperação energética dos RSU são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Alternativas tecnológicas aplicáveis à recuperação energética a partir de RSU



Fonte: GAMA (2020).

Aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, com a finalidade de disposição Mariano (2008), que consiste na compactação dos resíduos no solo, dispondo-os em camadas, que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, formando células, de modo a se ter uma alternância entre os resíduos e o material de cobertura.

Os aterros sanitários, além de ser o local da disposição final dos resíduos sólidos urbanos, pode ser considerado uma tecnologia de tratamento de digestão anaeróbia, em função dos processos físicos, químicos e microbiológicos que ocorrem no interior dos mesmos, com a geração de biógas (JUCÁ *et al.*, 2013).

A disposição de RSU em aterros sanitários, além da geração do biogás, resulta no subproduto chorume, que com a umidade dos resíduos, ou por infiltração, resulta na produção de lixiviado, que carreia os materiais dissolvidos e suspensos presentes nos resíduos (SÁ *et al.*, 2012). O lixiviado deve ser drenado e tratado.

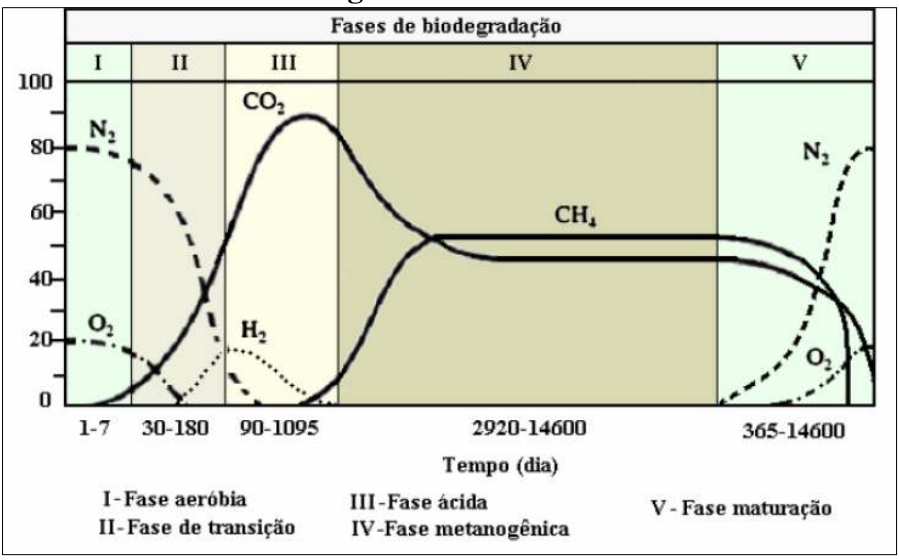
A drenagem do biogás tem a principal função de conduzir os gases gerados pela decomposição dos resíduos sólidos para drenos,

evitando migrações para o subsolo e atmosfera, que pode causar possíveis incêndios e explosões. Os gases coletados podem ser queimados ou transformados em biogás.

O período entre a deposição de resíduos sólidos e a produção completa dos gases, e em espacial do CH_4, principal gás, é quimicamente complexo e envolve sucessivas reações microbianas.

O Gráfico 1 representa as fases de biodigestão a partir da degradação da matéria orgânica em um aterro sanitário.

Gráfico 1 - Fases de biodegradação da matéria orgânica em aterro sanitário



Fonte: TCHOBONOGLOUS *et al*. (1993).

O sistema de coleta e extração do biogás em aterros deve possuir infraestrutura adequada, onde o biogás é captado através de

drenos verticais e/ou horizontais e conduzido a um sistema gerador utilizado para a conversão energética (MACIEL, 2009).

A energia gerada pode ser utilizada pelo próprio aterro como iluminação do local, e dependendo da quantidade, a energia pode ser até comercializada e introduzida no sistema de distribuição.

No Quadro 3 estão apresentadas as principais vantagens do reaproveitamento energético a partir da captação do biogás de aterros sanitários.

Quadro 3 - Vantagem do aproveitamento energético a partir da captação do Biogás

Econômica	Ambiental	Social
Comercialização da energia captada/venda de energia elétrica à rede ou energia térmica	Redução das emissões de gás metano para a atmosfera	Geração de empregos e redução de subempregos
Colaboração para a viabilidade econômica do tratamento do RSU	Redução do consumo de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo aumento do efeito estufa	Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável
Melhor gerenciamento das instalações de saneamento	Redução na geração de odor nas vizinhanças, de chorume e de contaminação do lençol freático	Colaboração para a viabilidade econômica do saneamento básico. Menor rejeição social
Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária	Melhoria nas condições dos locais de disposição dos resíduos	Redução dos custos da energia

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: CENBIO (2008).

Por outro lado, a digestão anaeróbia é um processo biológico que decompõe o resíduo orgânico, produzindo biogás.

Segundo Ferreira (2015) o tratamento biológico é realizado via a metanização, que consiste em um sistema integrado com conversão de biomassa residual em bioenergia, com a valorização dos subprodutos gerados o biogás e o biossólidos.

Santos *et al*. (2020) acrescenta que a digestão anaeróbia é uma alternativa, visto que parte dos resíduos pode ser utilizado para geração de energia renovável, e parte para produção de biofertilizantes.

Segundo Oliveira (2018), a digestão anaeróbia, como tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos e semissólidos e produção de metano, é uma tecnologia utilizada em todo o mundo.

O biogás, produto do processo de digestão anaeróbica, é uma mistura de gases, principalmente o metano (CH_4), o gás carbônico (CO_2), o hidrogênio (H_2) e o gás sulfídrico (H_2S). O CH_4 representa em média 50-90% do volume total dessa mistura, enquanto o CO_2 corresponde a 5-10% e é o principal responsável pelo GEE (SEEG, 2017; BANCO MUDIAL, 2010).

A gaseificação é a conversão do combustível sólido, através de processos termoquímicos, para obtenção de gás de síntese e posterior aproveitamento energético. A transformação térmica dos resíduos sólidos é determinada sob uma quantidade limitada de oxigênio (GIZ, 2017a).

A pirólise também utiliza processo termoquímico para degradar os materiais sólidos, porém praticamente sem a presença de oxigênio, que evita a combustão e resulta em gás, óleo combustível e resíduos sólidos carbonizados (GIZ, 2017a).

Para ambos os processos não existem, no Brasil, plantas em operação para resíduos sólidos urbanos, ocorrendo em processos industriais específicos.

A Incineração, tecnologia conhecida como “Mass Burning”, é um tratamento térmico a partir da queima em temperaturas acima de 800 ºC dos RSU, que gera energia elétrica ou vapor d’água. Todo o processo de incineração deve atender às normas estabelecidas pela legislação ambiental, principalmente no que se refere aos limites de emissões atmosféricas. Esse processo tem a capacidade de redução acentuado do peso (até 70%) e do volume (até 90%) dos resíduos através de combustão controlada, com monitoramento permanente, visando à disposição final do rejeito remanescente em aterro sanitário (GIZ, 2017a; JUCÁ *et al.*, 2013).

MODELOS DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

Modelos para a estimativas da geração do biogás têm sido estudados, tendo em vista ser o biogás uma fonte de energia renovável que, se aproveitado e/ou tratado adequadamente, pode oferecer diversos incentivos econômicos, ambientais e tecnológicos.

Existem vários modelos matemáticos para estimar a geração de biogás em aterros sanitários, que são classificados em biocinéticos e globais. Podendo ser citados, entre os diversos, o método LandGEM da EPA/USA e do IPCC 2006.

Nesta pesquisa adotou-se o modelo do IPCC (2006), tendo em vista ser o utilizado para inventários Nacionais do UNCCC.

FORMAS INADEQUADAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS

Basicamente, existem duas formas de disposição inadequada de resíduos: os aterros controlados no qual os resíduos são dispostos sem todos os requisitos dos aterros sanitários e os lixões que recebem

os resíduos a céu aberto sem nenhum controle e medida de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: ODS E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável constituem uma agenda universal, composta de 17 ODS, com 169 metas para 2015 a 2030. Aplicáveis a todos os países e refletem as dimensões econômica, social, ambiental e institucional, de maneira integrada, indivisível e transversal. Na Figura 3 encontram-se os 17 ODS.

Figura 3 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: ONU (2015).

No Quadro 4 demonstra-se que a redução de emissões de gases de efeito estufa pelo setor de resíduos sólidos, decorrente de uma gestão sustentável de resíduos, é relevante tanto para a mitigação, como também para adaptação às mudanças climáticas, e contribui para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

Quadro 4 - Contribuição do setor de resíduos sólidos para atingir os ODS

Objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)		Contribuição do setor de resíduos sólidos
1.	Erradicação da pobreza	Geração de emprego e renda por meio da coleta, tratamento e disposição e do incentivo da cadeia produtivas dos materiais recicláveis.
2.	Fim da fome	Redução do desperdício de alimentos, valorização da fração orgânica dos RSU através da digestão anaeróbica, da compostagem, promovendo uma agricultura sustentável e geração de energia.
3.	Boa saúde e bem-estar	Redução dos vetores que impactam a saúde da população com a eliminação da queima a céu aberto e da disposição inadequada em lixões.
4.	Educação de qualidade	Promoção da educação para os familiares e dos trabalhadores da área de limpeza urbana, tratamento e disposição. Não permissão do trabalho infantil na cadeia produtiva dos RSU.
5.	Igualdade de gênero	Melhoraria das condições de trabalho das mulheres no setor de resíduos, em especial na coleta seletiva.
6.	Água limpa e saneamento	Eliminação de RSU nos corpos hídricos com a universalização da coleta.
7.	Energia limpa e acessível	Aproveitamento do potencial energético dos RSU.
8.	Trabalho digno e crescimento econômico	Incremento de empregos formais no setor de RSU. Potencialização do mercado da cadeia produtiva dos materiais recicláveis.
9.	Infraestrutura, indústria e inovação	Inovações tecnológicas no manejo dos resíduos sólidos.
10.	Redução das desigualdades	Eliminar ambiente que propicie o crescimento da pobreza, com a gestão adequada dos resíduos.
11.	Cidades e assentamentos seguros e sustentável	Acesso aos serviços básicos, inclusive aos serviços de limpeza urbana e manejo dos RSU.
12.	Consumo e produção sustentável	Eliminar desperdício e adoção de produção e consumo com princípios da circularidade.
13.	Combate às mudanças climáticas	Queima e/ou aproveitamento energético do gás metano pela disposição em aterros e lixões.
14.	Conservação e uso sustentável dos oceanos	Não lançamento de RSU no solo e corpos hídricos para que os mesmos não cheguem ao mar. Prevenção do lixo marinho.
15.	Proteção e conservação dos ecossistemas terrestres	Não lançamento de resíduos no solo e corpos hídricos.
16.	Instituição forte, sociedade pacífica e inclusiva	A boa governança municipal, como indicadores de sustentabilidade.
17.	Parceria para atingir as metas	Envolvimento de todos os setores da sociedade, do setor público e privado.

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: UNEP (2016).

A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pela Lei Federal 12.305/2010 (BRASIL, 2010) é o marco regulatório, definindo diretrizes para reduzir a geração de resíduos sólidos, combate à poluição e a inclusão social dos catadores de materiais reciclados. A PNRS no art. 11, inciso I reza que incumbe aos Estados promover a integração da organização, do planejamento e da execução das funções públicas de interesse comum, relacionadas à gestão dos resíduos sólidos urbanos nas regiões metropolitanas, aglomerações urbanas e microrregiões, isso nos termos do § 3° do art.25 da Constituição Federal de 1988, permitindo a perspectiva da prestação regionalizada dos serviços de saneamento, na forma prevista no art. 14 da Lei Federal 11.445/2007 (BRASIL, 2007).

Com relação à gestão de resíduos sólidos de RSU em 2020, no Brasil a geração de 82.477.300 ton./ano e per capita de 1,07 kg/hab./dia (ABRELPE, 2021). Vale salientar em que em 2020 houve um aumento expressivo que se deu com função da pandemia do SARS Covid 19, uma vez que houve mudanças nas práticas sociais e todos os resíduos foram gerados nas residências.

A taxa de coleta convencional é de 92%, enquanto a coleta seletiva ainda se apresenta incipiente, embora o número de municípios que apresentaram alguma iniciativa de coleta seletiva foi de 4.145, representando 74,4% do total de municípios do país (ABRELPE, 2021).

A maior parte dos resíduos gerados e coletados são dispostos em aterro sanitários correspondendo a 60,2% e os demais 39,8%, ainda, com destinação inadequada são encaminhados para lixões.

A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM PERNAMBUCO

No Estado de Pernambuco, de acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos - PERS (SEMAS, 2012), cerca de 80% dos municípios destinavam seus RSU em lixões, ao passo que os demais, 20%, efetuam a destinação em aterros sanitários e aterros controlados.

Comparando-se os dados obtidos em 2012 no PERS, com os publicados em 2021 pelo Tribunal de Contas do Estado (Tabela 3), verifica-se que houve um acréscimo na quantidade total de resíduos dispostos no período de 2012 a 2018, correspondente a um aumento de 3.905 para 9.615 toneladas/ano e, em relação a 2021, uma redução para 6.423,3 tonelada/ano equivalente a 66,80%.

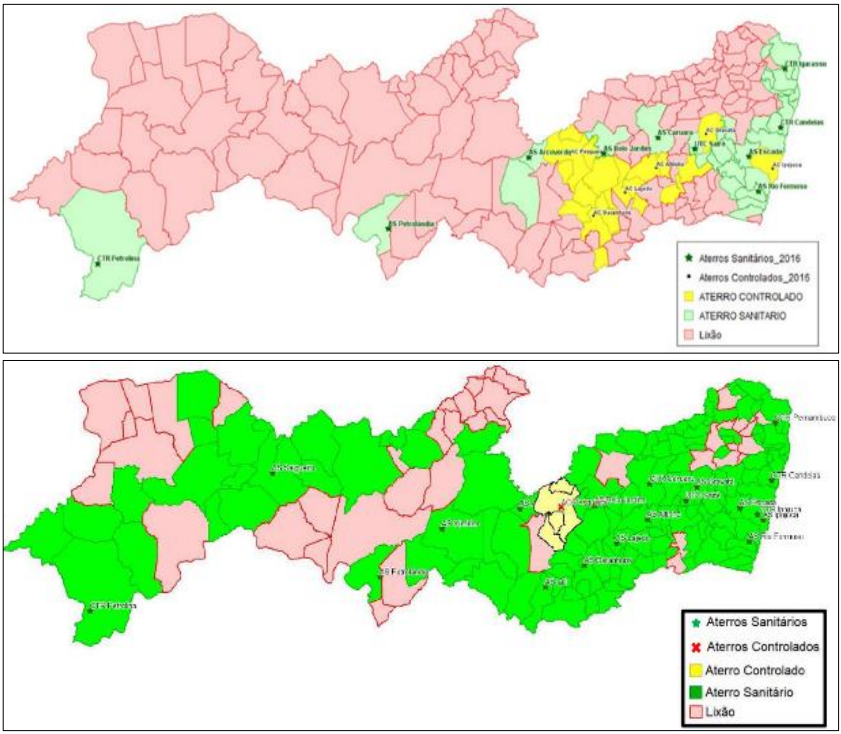
Tabela 3 - Comparação dos resíduos dispostos nos anos de 2012, 2018 e 2021, no estado de Pernambuco

Tipo de disposição	Município			Resíduos dispostos –t/ano		
	2012	2018	2021	2012	2018	2021
Aterro Sanitário	35	78	138	2.272	6.057	5.522,3
Aterro Controlado	02	02	04	111	194	856,5
Lixões	148	104	42	1.522	3.364	44,5
Total	**184**	**184**	**184**	**3.905**	**9.615**	**6.423,3**

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: Pernambuco (2012); TCE (2020; 2022).

A destinação final dos resíduos sólidos do Estado de Pernambuco mapeada pelo Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE/PE) em 2016 e 2021, conforme pode ser visto na Mapa 1.

Mapa 1 - Destino final dos resíduos sólidos no Estado de Pernambuco (2016 e 2021)



Fonte: TCE/PE (2017; 2021).

RESULTADOS

Objeto de estudo – Região Metropolitana do Recife/RMR

A Região Metropolitana do Recife - RMR, contemplava na ocasião do estudo 15 municípios e o Distrito Estadual de Fernando de Noronha.

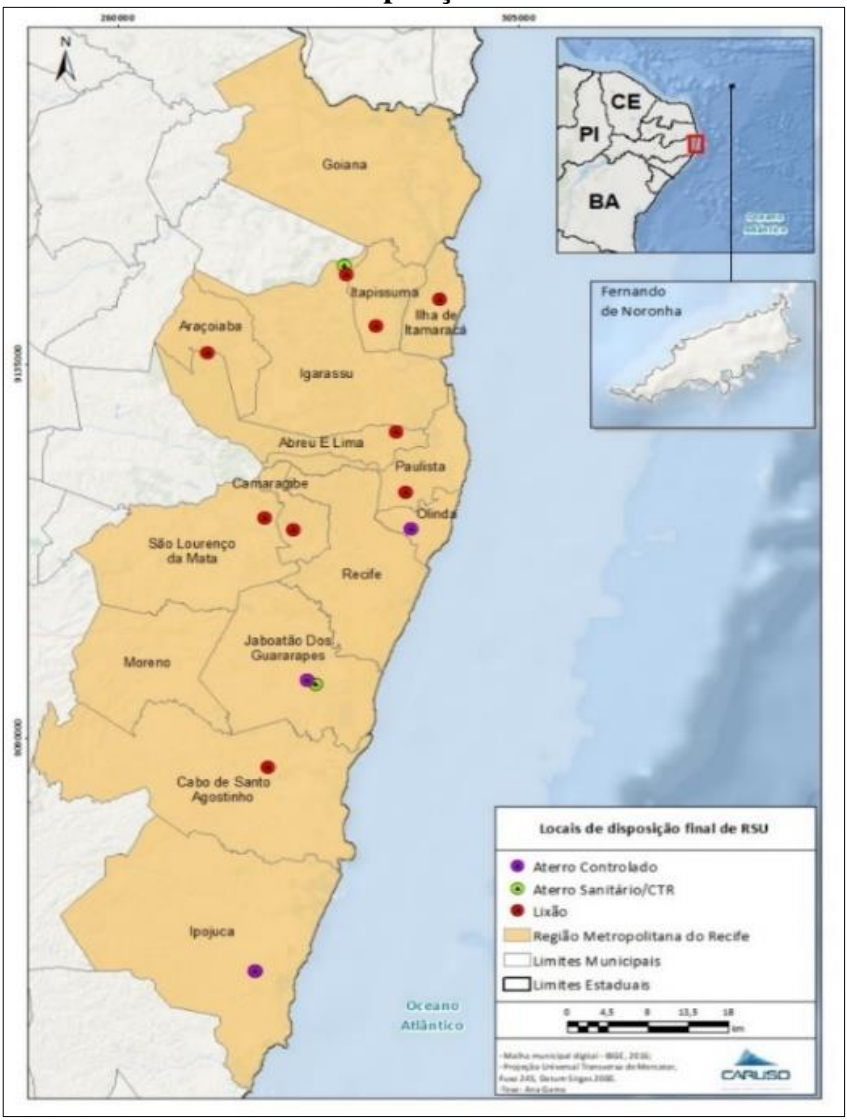
A Região Metropolitana do Recife (RMR) constitui o maior e principal aglomerado urbano da Região Nordeste e a sexta maior do país, com uma população de 4.054.866 milhões de habitantes, concentrando 42,70% da população do estado de Pernambuco (IBGE, 2018). Tem uma área de 3.216.262 km² e densidade demográfica é de 1.249,7 hab./km² e o IDH médio de 0,729 (IBGE, 2010). A geração de resíduos em 2018 foi de aproximadamente $1{,}4x10^6$ toneladas/ano.

Locais de disposição de RSU da RMR estudados

A disposição dos RSU ocorreu inicialmente em 03 aterros controlados, (Muribeca, Aguazinha e Ipojuca) e em 09 lixões existentes nos diversos municípios da RMR. E, a partir de 2007, foram a instaladas duas Centrais de Tratamento privadas: a CTR Candeias com um aterro com queima centralizada dos gases, e a CTR Pernambuco, cujo aterro não fazia a queima dos gases.

A espacialização dos locais de disposição dos resíduos sólidos urbanos estudados pelas tipologias aterros sanitários, aterros controlados e lixões na RMR, estão representadas no Mapa 2. Por sua vez, a caracterização dos locais de disposição dos RSU está ilustrada na Tabela 4.

Mapa 2 - Espacialização dos locais de disposição estudados



Fonte: GAMA (2020).

Tabela 4 - Caracterização dos locais de disposição estudados

Locais de disposição Município	Área ha.	Operação	Coordenadas UTM		
			Zona	X (E)	Y (N)
Central de Tratamento Candeias /Jaboatão dos Guararapes	170.00	Ativo desde: 2007 Vida útil: 2033	25L	282199.00	9096611.00
Central de Tratamento Pernambuco /Iguarassu	106.00	Ativo desde: 2008 Vida útil: 2035	25M	285454.29	9147005.17
Aterro controlado de Aguazinha /Olinda	19.00	Início: 1998 Desativação: 2010	25M	292943.48	9115324.24
Aterro controlado de Muribeca/Jaboatão dos Guararapes	60.00	Início: 1985 Desativação: 1990	25L	281270.54	9097035.83
Aterro Controlado de Ipojuca	40.00	Início AC: 2012 Desativação: 2020	25L	275466.15	9062088.78
Lixão de Ipojuca	5.0	Início: 2002 Desativado: 2012			
02 Lixão em Abreu e Lima	4.75	Desativação: 2020 Desativação: 2011	25M	291413.00	9127116.00
Lixão de Araçoiaba	9.35	Início: 2004 Desativação: 2013	25M	270076.73	9136571.78
Lixão de Pista Preta/Cabo de Sto. Agostinho	1.83	Início: 2003 Desativação: 2007	25L	276847.81	9086541.82
Lixão de Igarassu	4.63	Início: 2003 Desativação: 2007	25M	285667.63	9145892.15
Lixão de Itamaracá	3.54	Início: 1990 Desativação: 2010	25M	296120.76	9142966.62
Lixão de Itapissuma	4.20	Início: 1988 Desativação: 2013	25M	289037.91	9139703.41
Lixão da Mirueira/Paulista	14.00	Início:1978 Desativação: 2008	25M	292311.78	9119677.45

Fonte: GAMA (2020).

Geração e disposição de Resíduos na RMR

A estimativa de geração de resíduos sólidos urbanos pressupõe a utilização de índices de geração *per capita* compatíveis à realidade de cada município. Na Tabela 5, são encontramos dados de população, resíduos domiciliares coletados e geração per capita dos resíduos em 2018.

Tabela 5 - População, RSU coletado e geração per capita (2018)

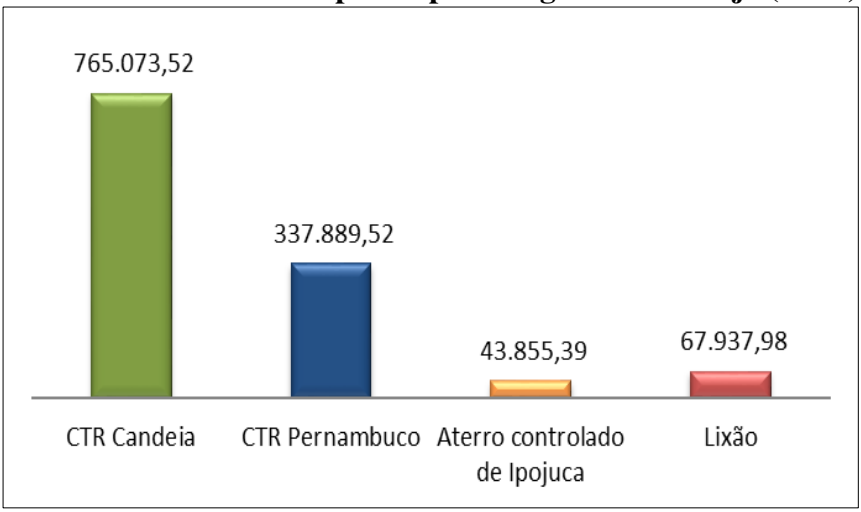
Municípios	População estimada - hab.	RSU coletado (t/ano)	Ger. per capita (Kg/hab/dia)
Abreu e Lima	99.622	33.089,44	0,91
Araçoiaba	20.312	6.524.21	0,88
Cabo de Santo Agostinho	205.112	65.133.32	0,87
Camaragibe	156.736	49.771.52	0,87
Goiana	79.455	26.370.97	0,91
Igarassu	115.640	36.721.48	0,87
Ilha de Itamaracá	25.836	8.298.52	0,88
Ipojuca	94.709	31.457.94	0,88
Itapissuma	26.390	8.478.72	0,88
Jaboatão dos Guararapes	697.636	231.719.79	0,91
Moreno	62.253	20.680.66	0,91
Olinda	391.835	132.147.95	0,91
Paulista	329.117	109.316.21	0,91
Recife	1.637.834	627.699,88	1,05
São Lourenço da Mata	112.362	35.680.55	0,87
RMR	4.054.866	1.423.091,16	0.91

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de: IBGE (2018); SNIS (2018).

Por outro lado, segundo as informações disponibilizadas pelas centrais de tratamentos e os municípios, a quantidade de

resíduos dispostos no solo, no ano de 2018, foi de aproximadamente 1.2 x10^6 t/ano, conforme Gráfico 2.

Gráfico 2 – Resíduos dispostos por categoria de manejo (t/ano)



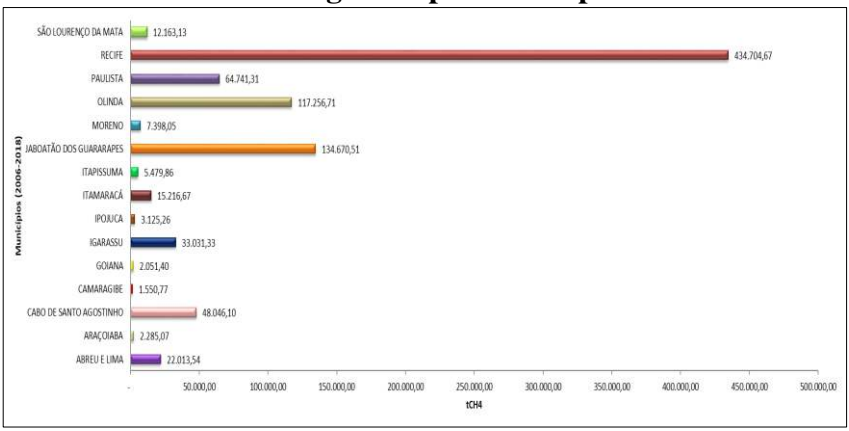
Fonte: GAMA (2020).

Estimativa da geração de biogás por componente gravimétrico

Na sua totalidade os municípios da RMR geraram, no período de 2006 a 2018, 903.734,40 toneladas de CH_4, correspondente a 25.304.563,14 tCO_2e, tomando como base a métrica do potencial de aquecimento global (PWG) 28.

A quantidade de metano gerado, distribuído por município, está representada no Gráfico 3, onde demonstra-se que município de Recife, contribuiu com 434.704,65 toneladas, aproximadamente 4 vezes mais que Jaboatão dos Guararapes, o segundo colocado.

Gráfico 3 - CH_4 gerado por município da RMR



Fonte: GAMA (2020).

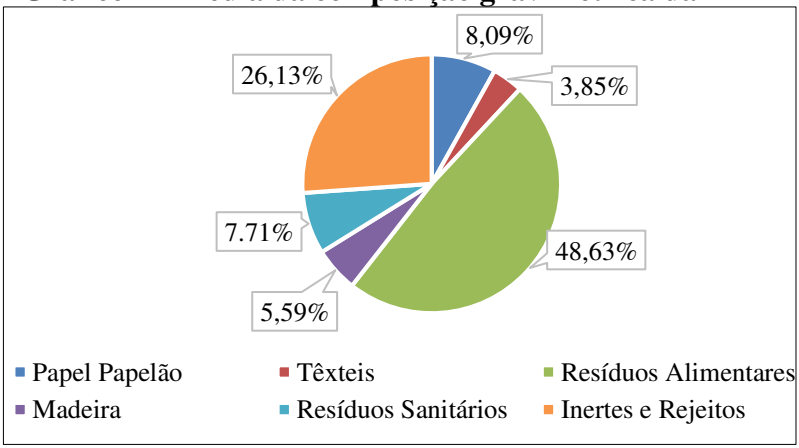
Estimativa da geração de gás por componente gravimétrico

Para o cálculo da geração do gás metano, como dito anteriormente, foram utilizados padrões e coeficientes definidos no IPCC (2006), dados específicos dos locais de disposição dos resíduos e os componentes gravimétricos atribuídos pelo IPCC (2006).

O percentual da média da composição gravimétrica foi determinado para RMR, pelo método de quarteamento da NBR 2007 (ABNT, 2004).

No Gráfico 4, disposta na página seguinte, está representada a média da composição gravimétrica dos resíduos na RMR:

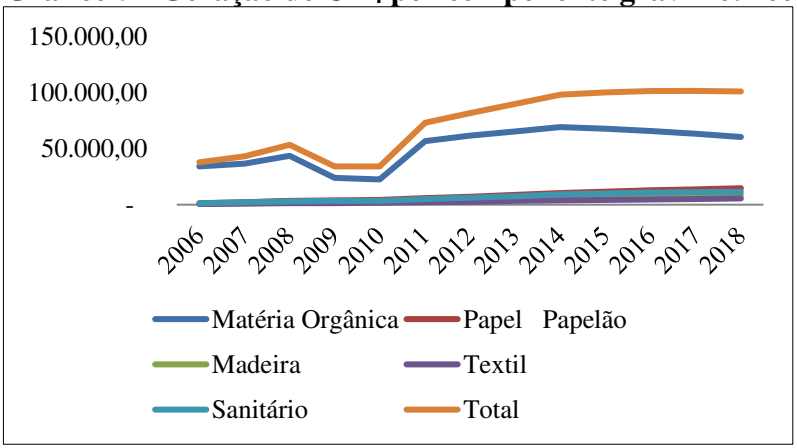
Gráfico 4 - Média da composição gravimétrica da RMR



Fonte: GAMA (2020).

No Gráfico 5, encontra a geração de CH_4 por componente na RMR, no período de 2006 a 2018.

Gráfico 5 - Geração de CH_4 por componente gravimétrico



Fonte: GAMA (2020).

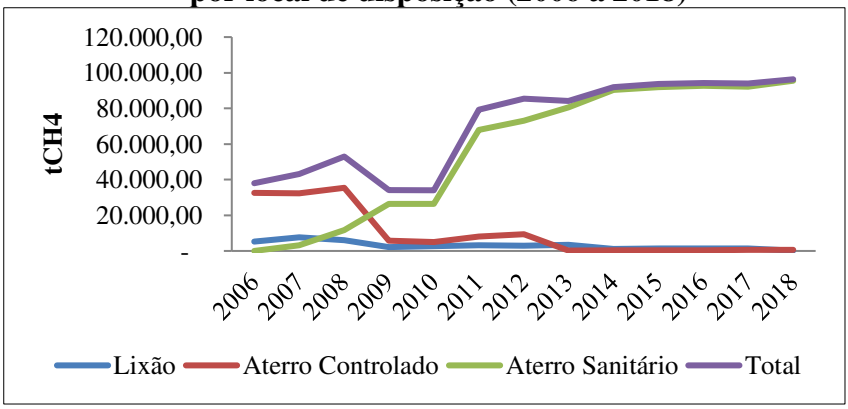
Pode-se observar, ainda, no Gráfico 5, que, dentre os componentes, a matéria orgânica se destaca pela quantidade de biogás gerada. Isso ocorre primeiro pelo alto percentual deste componente nos resíduos disposto e, segundo, pelo processo de biodegradação que se dá na medida em que a matéria orgânica contida nos RSU, quando depositada em condições de ausência de oxigênio livre (anaeróbica), sofre a ação de bactérias geradoras de metano, resultando na produção de biogás. Devido esse alto teor de gás e consequentemente das emissões de gases de efeito estufa, várias estratégias de mitigação poderiam ser utilizadas, que vai desde o aproveitamento energético a partir dos aterros sanitários, do desvio da fração orgânica dos locais de disposição para compostagem, biodigestão ou mesmo a recuperação energética dos resíduos. Observa-se, também, uma variação na quantidade dos componentes no período de transição, entre a disposição em lixões e aterro sanitário, de 2007 a 2011.

Estimativa de biogás por local de disposição dos RSU

A estimativa de geração de biogás por local de disposição no período de 2008 a 2018, ocorreu basicamente pelos aterros sanitários que passou a receber praticamente todos os resíduos, a partir de 2009, à medida que os lixões e aterros controlados foram sendo encerrados.

Os aterros controlados e lixões no período de 2008 a 2013, apresentaram decaimento gradativo na estimativa da geração do CH_4, a operação dos aterros sanitários a partir de 2007 e os municípios passaram a fazer a destinação final adequada dos resíduos, como demonstrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Geração de metano (CH_4) por local de disposição (2006 a 2018)



Fonte: GAMA (2020).

CONCLUSÃO

A aplicação do modelo matemático de decaimento de primeira ordem (FOD) do IPCC (2006), alimentado com dados locais da Região Metropolitana do Recife permitiu estimar a geração anual de metano e de dióxido de carbono proveniente da disposição dos resíduos sólidos nos locais de destinação final.

O alto percentual de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos aproximadamente 49% e consequentemente a geração do gás metano, demonstra o potencial de mitigação desse gás de efeito estufa se houver aproveitamento energético de biogás.

A utilização do biogás gerado para fins energéticos constitui uma opção promissora para os municípios da RMR, no sentido de definir alternativas conjuntas de tratamento e de precificação dos serviços públicos relacionados a gestão dos resíduos sólidos.

O uso energético do CH_4 constitui um mecanismo para reduzir o impacto do metano que é 28 vezes mais prejudicial do que o dióxido de carbono enquanto gás de efeito estufa e, contribui para a mitigação da ação do setor aquecimento global e das mudanças climáticas.

Além de possibilitar o atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio nas mudanças climáticas no setor de resíduos com o aproveito energético - ODS13 e nos demais, desde o 1º ODS da erradicação da pobreza, com a geração de emprego e renda na cadeia produtiva, ao ODS17, com valorização econômica dos resíduos, e em especial ao ODS14, da proteção dos oceanos, no processo de adequação às mudanças climáticas.

REFERÊNCIA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.0007**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021.

BIDONE, F. R. A.; PAVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: Editora da USP, 1999.

BRASIL. **Lei n. 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Brasília: Planalto, 2007. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 03/02/2021

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Brasília: Planalto, 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br>. Acesso em: 03/02/2021.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. "Nota técnica IV – geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos e rurais". **Portal Eletrônico USP** [2001]. Disponível em: <www.cenbio.iee.usp.br>. Acesso em: 13/08/2020.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás** (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Belo Horizonte: UFMG, 2015.

FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos** (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). Recife: UFPE, 2013.

FIRMO, A. L. B; GUIMARÃES, L. J. N.; MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. "Estimate of methane generation in experimental landfill located at Muribeca Landfill / Brazil - using simplified methods". **Fourth International Workshop Hydro - Physic - Mechanics of landfill**. Santander: WHPM, 2011.

GAMA. A. C. F. **Estudo das emissões e cenários de mitigação de gases de efeito estufa no setor de resíduos sólidos na Região Metropolitana do Recife** (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). Recife: UFPE, 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geográfico a Estatística. “Cidades - Panorama”. **IBGE** [2010]. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20/05/2022.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. "Global warming of 1,5C". **IPCC** [2018]. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 25/11/2020.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. "Guideline for national greenhouse gas inventories". **IPCC** [2006]. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 25/11/2020.

JUCÁ, J. F. T. *et al*. (coords.). **Análise das Diversas Tecnologias e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jaboatão dos Guararapes: UFPE, 2013.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos** (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). Recife: UFPE, 2013.

MERSONI, C. **Avaliação do ciclo de vida como técnica de apoio à decisão no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Garibaldi/RS** (Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais). Caxias do Sul: UCS, 2015.

OLIVEIRA, L. R. G.; SANTOS FILHO, D. L. A.; VASCONCELOS, K. C.; LUCENA, T. V.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. "Methanization potential of anaeróbic digestion of solid food waste". **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 22, n. 1, 2018.

PAZ, F.; FIRMO A. L. B. "Inventory of methane emission from municipal solid waste management in Pernambuco State, Brazil". **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 20 (2015).

PERNAMBUCO. **Plano estadual de resíduos sólidos** – PERS/PE. Recife: Secretaria de Meio Ambiente, 2012.

SÁ, E. V. F. L.; JUCÁ, J. F. T.; MOTTA SOBRINHO, M. A. "Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destiladores solar". **Revista Ambiente e Água**, vol.7, n. 1, 2012.

SANTOS, L. A.; VALENÇA.B. R.; SILVA, L. C. S.; HOLANDA, S. H. B.; SILVA, A. F. V.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. "Methane generation potential trough anaerobic digestion of fruit waste". **Journal of Cleaner Production**, vol. 256, 2020.

SÃO PAULO. **Caderno de Educação Ambiental**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, 2013.

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. "Estimativas de emissões de gases de efeito estufa do Brasil 1970- 2016". São Paulo: SEEG, 2017.

SNIS - Sistema Nacional de Informações de Saneamento. **Painel de Informações sobre Saneamento Básico no Brasil**: resíduos sólidos 2006 a 2017. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 06/07/2020.

TCE-PE - Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco. "Diagnóstico: Deposição de RSU em PE- 2021". **Portal TCE-PE** [2021]. Disponível em: www.tce.pe.gov.br>. Acesso em: 14/06/2022.

UNEP - United Nations Environment Programme. "Global Waste Management Outlook". **Unep** [2015]. Disponível em: <www.unep.org>. Acesso em: 14/09/2020.

SOBRE OS AUTORES

SOBRE OS AUTORES

Alessandra Barbosa Lee Firmo é professora e pesquisadora do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE). Mestre e doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail para contato: alessandra.lee@gmail.com

Alessandro Marco Rosini é professor do Centro Educacional Anhanguera. Mestre e doutorando em Administração pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). E-mail para contato: alessandro.rossini@yahoo.com

Alfran Moura Sampaio é professor da Universidade Federal do Ceará (UFC). Graduado em Engenharia Civil. Mestre e doutor em pela Universidade de Brasília (UnB). E-mail para contato: alfransampaio@gmail.com

Ana Maria Cardoso de Freitas Gama desenvolve pesquisa de pós-doutorado no Instituto de Viana de Castelo (IPVC), Portugal. Mestre em Gestão e Políticas Ambientais e doutora em Engenharia Civil. E-mail para contato: anacfgama@gmail.com

Ana Paula Silva de Andrade é bacharel em Ciências Biológicas. Mestre em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). E-mail para contato: ana.andrade@unemat.br

SOBRE OS AUTORES

Ariel Fernandes Pretel é graduada em Direito. Especialista em Direito Empresarial. Mestranda em Agronegócios pela Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). E-mail para contato: adpretel@gmail.com

Carlos Rezende de Pádua Júnior é professor da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail para contato: carlos.junior@unemat.br

Claudio Fernando Mahler é professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Mestre e doutor em Geotecnia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E-mail para contato: cfmahler@gmail.com

Diego Matos dos Santos é bacharel em Ciências Contábeis pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Áreas de interesse de pesquisa: Contabilidade Ambiental. E-mail para contato: matosdiego987@gmail.com

Ednilson Viana é professor da Universidade de São Paulo (USP). Graduado em Ciências Biológicas. Mestre em Ciências. Doutor em Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). E-mail para contato: edn@usp.br

SOBRE OS AUTORES

Elói Martins Senhoras é economista, cientista político e geógrafo. Doutor em Ciências. *Post-doc* em Ciências Jurídicas. Professor da Universidade Federal de Roraima (UFRR). Pesquisador do *think tank* IOLEs. E-mail para contato: eloisenhoras@gmail.com

Fabricio Bau Dalmas é professor da Universidade de Guarulhos (UNG). Mestre e doutor em Geociência (Recursos Minerais e Hidrogeologia) pela Universidade de São Paulo (USP). E-mail para contato: fdalmas@prof.ung.br

Gabriel de Pinna Mendez é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFF). Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E-mail para contato: gabrielpmendez@gmail.com

Gustavo Monnerat Cahli é graduado em Educação Física. Mestre em Ciências Biológicas. Doutor em Fisiologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E-mail para contato: monnerat1988@gmail.com

Gustavo Pedroso Malavota é graduado em Administração. Mestre em Desenvolvimento Local pelo Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM). E-mail para contato: gustavo@malavota.com.br

SOBRE OS AUTORES

Helen Gonçalves Romeiro Ferreira é graduada em Ciências Biológicas. Mestre em Desenvolvimento Local pelo Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM). E-mail para contato: helen.biоromeiro@gmail.com

Joelma Telesi Pacheco Conceição é professora da Faculdade de Paulínia (FACP). na Mestre em Administração pelo Centro Universitário Campo Limpo Paulista (UNIFACAMP). E-mail para contato: joelma.telesi@gmail.com

José Fernando Thomé Jucá é professor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia pela Universidad Politécnica de Madrid (UPM). E-mail para contato: jftjucah@gmail.com

Julia Neves da Silva é estagiária na Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN). Graduanda em Geografia pela Universidade de Brasília (UnB). Bolsista do Projeto de Iniciação Científica. E-mail para contato: julianeves122@gmail.com

Leandro José de Oliveira é professor da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Mestre em Agronegócios e Desenvolvimento Regional pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). E-mail para contato: leandro.oliveira@unemat.br

SOBRE OS AUTORES

Luiza Cantuaria Costa é professora do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E-mail para contato: luizacantuaria@gmail.com

Luciano Soares da Cunha é professor da Universidade de Brasília (UnB). Mestre e doutor em Hidrogeologia pela Universidade de Brasília (UnB). E-mail para contato: luciano.soares.unb@gmail.com

Márcio Magera Conceição é Pró Reitor de Pesquisa e Extensão da Universidade de Guarulhos (UNG). Doutor em Administração pela Florida Christian University (FCU). E-mail para contato: magera1963@gmail.com

Nicole Evelyn Carvalho de Oliveira é graduada em Geofísica. Pós-graduanda em Ensino e Interpretação em Língua Brasileira de Sinais e Educação Especial pela União Brasileira de Faculdades (UniBF). E-mail para contato: nicoleevelyncarvalho@gmail.com

Paulo Sergio Vasconcelos é professor da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). Doutor em Planejamento Energético pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E-mail para contato: paulosvasconcelos@ufgd.edu.br

SOBRE OS AUTORES

Priscila Elise Alves Vasconcelos é professora da Universidade Federal de Roraima (UFRR). Mestra em Agronegócios. Doutora em Direito pela Universidade Veiga de Almeida (UVA). E-mail para contato: priscila.vasconcelos@ufrr.br

Ricardo Costa é professor da Universidade de Guarulhos (UNG). Mestre em Comunicação Social. Doutor em Ciências Sociais pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). E-mail para contato: ricardo.costa@ung.br

Roberto Antônio Cordeiro da Silva é professor da Rede de Educação Básica do Estado do Ceará. Mestre e doutor em Geologia pela Universidade Federal do Ceará (UFC). E-mail para contato: roberto@det.ufc.br

Rodrigo Gomes Alves é professor do Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM). Mestre em Desenvolvimento Local pelo Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM). E-mail para contato: galves.rodrigo@gmail.com

Sílvia Conceição Reis Pereira Mello é professora da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO). Mestre e doutora em Higiene veterinária pela Universidade Federal Fluminense (UFF). E-mail para contato: reispereiramello@gmail.com

SOBRE OS AUTORES

Sonia Aparecida Beato Ximenes de Melo é professora da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Doutora em Ciências Ambientais pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). E-mail para contato: melo.sonia@unemat.br

Sonia Maria Silva Vasconcelos é graduada em Geologia. Mestre em Engenharia Civil. Doutora em Geociências (Hidrogeologia) pela Universidade de São Paulo (USP). E-mail para contato: smaria@ufc.br

Tallita Eduarda da Veiga Reis é bacharel em Biotecnologia. Mestranda em Ambiente, Saúde de Sustentabilidade pela Universidade de São Paulo (USP). E-mail para contato: veiga.biotec@usp.br

NORMAS DE PUBLICAÇÃO

NORMAS PARA PUBLICAÇÃO

A editora IOLE recebe propostas de livros autorais ou de coletânea a serem publicados em fluxo contínuo em qualquer período do ano. O prazo de avaliação por pares dos manuscritos é de 7 dias. O prazo de publicação é de 60 dias após o envio do manuscrito.

O texto que for submetido para avaliação deverá ter uma extensão de no mínimo de 50 laudas. O texto deverá estar obrigatoriamente em espaçamento simples, letra Times New Roman e tamanho de fonte 12. Todo o texto deve seguir as normas da ABNT.

Os elementos pré-textuais como dedicatória e agradecimento não devem constar no livro. Os elementos pós-textuais como biografia do autor de até 10 linhas e referências bibliográficas são obrigatórios. As imagens e figuras deverão ser apresentadas dentro do corpo do texto.

A submissão do texto deverá ser realizada em um único arquivo por meio do envio online de arquivo documento em Word. O autor / organizador / autores /organizadores devem encaminhar o manuscrito diretamente pelo sistema da editora IOLE: http://ioles.com.br/editora

Copyright © Editora IOLE
2022

CONTATO

EDITORA IOLE

Caixa Postal 253. Praça do Centro Cívico

Boa Vista, RR - Brasil

CEP: 69.301-970

@ http://ioles.com.br/editora

+ 55 (95) 981235533

eloisenhoras@gmail.com

Copyright © Editora IOLE
2022