



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

CÁSSIA LILIANE ALVES CAVALCANTE

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS GASES DE ATERRO SANITÁRIO SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE BOMBEAMENTO**

FORTALEZA
2021

CÁSSIA LILIANE ALVES CAVALCANTE

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS GASES DE ATERRO SANITÁRIO SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE BOMBEAMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Instrumentos de Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C376e CAVALCANTE, Cássia Liliane Alves.
ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS GASES DE ATERRO SANITÁRIO SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES DE BOMBEAMENTO / Cássia Liliane Alves Cavalcante. - 2021.
101 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Aperfeiçoamento de Professores para a Educação
Inclusiva, Campus Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.
1. Resíduos Sólidos. 2. Aterro sanitário. 3. Gases. I. Título.

CDD 371.9



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.012645/2020-41

Interessado: Coordenadoria do Curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental
(PGTGA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

CÁSSIA LILIANE ALVES CAVALCANTE

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS GASES DE ATERRO SANITÁRIO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE BOMBEAMENTO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 27/01/2021



Documento assinado eletronicamente por **Gemmelle Oliveira Santos, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 27/01/2021, às 19:59, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Humberto de Carvalho Junior, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 28/01/2021, às 10:52, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João José Hiluy Filho, Usuário Externo**, em 28/01/2021, às 19:48, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Berto Neto, Usuário Externo**, em 28/01/2021, às 23:48, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site

[https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **2330303** e o código CRC **3E356B7B**.

A Deus.

Aos meus pais, Carlos Henrique Miranda
Cavalcante e Eliane Alves Vieira Cavalcante.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora, por toda proteção e bênçãos concedidas, e por sempre me guiarem e iluminarem ao longo da minha trajetória.

À toda a minha família, pelo apoio e motivação, em especial aos meus pais, Carlos Henrique e Eliane Alves.

Ao meu marido, Lucas Sousa Lima, pelo companheirismo e motivação.

Ao professor e orientador, Dr. Gemmelle Oliveira Santos, pelos ensinamentos, oportunidades e por toda dedicação na orientação desta pesquisa.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do IFCE, pelos ensinamentos.

Aos alunos do IFCE e Grupo de Pesquisa em Aterros Sanitário, Samara Freire, Carlos Henrique, Eliana Dantas e Gabriela Nobre pelo apoio nos trabalhos de campo.

Ao IFCE pela disponibilização de transporte para visitas de campo.

À administração e equipe do ASMOC por autorizar e dar suporte técnico a realização desta pesquisa, em especial ao Hédio Siebra e Romário.

À banca por sua disponibilidade e contribuições.

À FUNCAP, pelo suporte financeiro concedido.

RESUMO

O objetivo desse estudo foi avaliar a influência das alterações na pressão de bombeamento (sucção) sobre a qualidade e a vazão (m^3/h) dos gases do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-CE. Foram monitorados 06 poços entre os meses de maio de 2019 e março de 2020, totalizando 12 campanhas. Para leitura das concentrações de metano, oxigênio, dióxido de carbono, outros gases, temperatura, pressão e fluxo foi utilizado o equipamento Landtec GEM5000. Em cada poço foram realizados ajustes e testes na pressão de sucção sob 04 diferentes situações: com a válvula do cabeçote 25% aberta, 50, 75 e 100%. Nos poços monitorados, a concentração média de CH_4 variou entre 56,45 e 58,66%, a concentração de CO_2 variou entre 37,36% e 39,86%, a concentração de Outros Gases/Contaminantes variou entre 2,15% e 4,79% e a concentração de O_2 variou entre 0,26 e 0,91%. Em linhas gerais, observou-se que o crescimento da pressão de bombeamento reduz a presença do CH_4 e aumenta a concentração de contaminantes, mesmo ocorrendo aumento do fluxo. A melhor condição de operação dos poços ocorreu com as válvulas 25% abertas, ou seja, sob pressão de bombeamento entre -1,39 e -2,18mb. Também foi verificada a influência da ausência de chuvas sobre a diminuição do CH_4 e aumento da temperatura dos resíduos e dos gases captados em todos os poços.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Aterro sanitário. Gases.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the influence of changes in pumping pressure (suction) on the quality and flow (m^3 / h) of gases from the Landfill West Metropolitan of Caucaia-CE. 06 wells were monitored between May 2019 and March 2020, totaling 12 campaigns. For reading the rules of methane, oxygen, carbon dioxide, other gases, temperature, pressure and flow, the Landtec GEM5000 equipment was used. In each well, adjustments and tests on the suction pressure were carried out under four different criteria: with the head valve 25% open, 50, 75 and 100%. In the monitored wells, the average concentration of CH_4 varied between 56,45 and 58,66%, the concentration of CO_2 varied between 37,36% and 39,86%, the concentration of Other Gases/Contaminants varied between 2,15% and 4,79% and the O_2 concentration varied between 0,26 and 0,91%. In general, it was observed that the increase in pumping pressure reduces the presence of CH_4 and increases the concentration of contaminants, even though there is an increase in flow. The best operating condition of the wells occurred with the valves 25% open, that is, under pumping pressure between -1,39 and -2,18mb. The influence of the absence of rain on the decrease in CH_4 and an increase in the temperature of the residues and gases captured in all wells was also verified.

Keywords: Solid waste. Landfill. Gases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-CE	43
Figura 2 - Identificação da Lateral E, área de estudo da pesquisa.....	44
Figura 3 - Poços analisados na pesquisa de campo.....	45
Figura 4 - Distribuição dos poços na lateral E do ASMOC	46
Figura 5 - Leitor de gás GEM5000	46
Figura 6 - Cabeçote do poço em diferentes situações (25%, 50%, 75% e 100%).....	47
Figura 7 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH ₄ no PP1	50
Figura 8 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO ₂ no PP1	51
Figura 9 - Comportamento da Pressão e Concentração de outros gases no PP1	51
Figura 10 - Comportamento da Pressão e Concentração de O ₂ no PP1.....	52
Figura 11 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH ₄ no PP2	55
Figura 12 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO ₂ no PP2	56
Figura 13 - Comportamento da Pressão e Concentração de outros gases no PP2	56
Figura 14 - Comportamento da Pressão e Concentração de O ₂ no PP2.....	57
Figura 15 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH ₄ no PV1	60
Figura 16 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO ₂ no PV1	61
Figura 17 - Comportamento da Pressão e Concentração de outros gases no PV1	61
Figura 18 - Comportamento da Pressão e Concentração de O ₂ no PV1.....	62
Figura 19 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH ₄ no PV2	65
Figura 20 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO ₂ no PV2	66
Figura 21 - Comportamento da Pressão e Concentração de outros gases no PV2	66
Figura 22 - Comportamento da Pressão e Concentração de O ₂ no PV2.....	67
Figura 23 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH ₄ no PH1	70
Figura 24 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO ₂ no PH1.....	71
Figura 25 - Comportamento da Pressão e Concentração de outros gases no PH1	71
Figura 26 - Comportamento da Pressão e Concentração de O ₂ no PH1	72
Figura 27 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH ₄ no PH2	75
Figura 28 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO ₂ no PH2.....	76
Figura 29 - Comportamento da Pressão e Concentração de outros gases no PH2	76
Figura 30 - Comportamento da Pressão e Concentração de O ₂ no PH2	77
Figura 31 - Comportamento da pluviometria ao longo do período estudado	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PP1.....	50
Tabela 2 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PP1.....	53
Tabela 3 – Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PP2.....	55
Tabela 4 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PP2.....	58
Tabela 5 – Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PV1.....	60
Tabela 6 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PV1.....	63
Tabela 7 – Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PV2.....	65
Tabela 8 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PV2.....	68
Tabela 9 – Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PH1.....	70
Tabela 10 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PH1.....	73
Tabela 11 – Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PH2.....	75
Tabela 12 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PH2.....	78

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASMOC – Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia

ATDRX - Agency or Toxic Substances & Disease Registry

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

EEA - European Environment Agency

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

EPA - Environmental Protection Agency

GNR – Gás Natural Renovável

IFCE - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISWA - International Solid Waste Association

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RECESA - Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

RIMA - Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

USACE - United States Army Corps of Engineers

USEPA - United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações gerais	14
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Geral	17
1.3.2 Específicos.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Os Aterros Sanitários.....	18
2.1.1 Considerações gerais	18
2.1.2 A Seleção da Área	19
2.1.3 O Projeto	21
2.1.4 A Instalação	23
2.1.5 A Operação	25
2.1.6 O Monitoramento	28
2.2 A Geração de Gases nos Aterros Sanitários	31
2.2.1 Digestão Aeróbia e Anaeróbia dos Resíduos Sólidos	31
2.2.2 Processos Físicos, Químicos e Biológicos.....	33
2.2.3 Fatores Influentes na Quanti-Qualidade dos Gases de Aterro	35
2.3 Sistemas de Captação e Aproveitamento dos Gases de Aterro Sanitário	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 A área estudada.....	43
3.2 Etapas da pesquisa	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Apresentação	49
4.1.1 Poço Perfurado 1	49
4.1.2 Poço Perfurado 2.....	54
4.1.3 Poço Vertical 1.....	59
4.1.4 Poço Vertical 2.....	64
4.1.5 Poço Horizontal 1	69
4.1.6 Poço Horizontal 2	74
4.2 Discussão	79

5 CONCLUSÃO.....	88
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O envio de resíduos sólidos urbanos para os aterros sanitários vem aumentando no Brasil e os diversos processos que ocorrem no interior de um aterro sanitário, sob influência também das condições externas, resultam na degradação desses resíduos e na geração de lixiviados e gases.

A extração dos gases e a drenagem dos líquidos são formas de reduzir a pressão interna no maciço de resíduos, permitir a acomodação das camadas (STACHOWITZ, 2001), aumentar a estabilidade do aterro sanitário e viabilizar o tratamento e/ou aproveitamento desses dois subprodutos.

A captação ativa dos gases de aterro está geralmente associada com algum projeto de aproveitamento do gás metano, que demanda a escolha de bons materiais para compor o sistema de drenagem, precisão na profundidade e distanciamento dos poços verticais e na inclinação dos poços horizontais, além de proteção mecânica e adequada pressão de sucção.

Conforme Stachowitz (2001), a pressão necessária para extrair os gases do interior do aterro sanitário depende de muitos fatores: distância entre o aterro e a planta de aproveitamento (que influencia na perda de carga e em alterações na qualidade dos gases), espaçamento entre os poços, tipo de drenagem, sistema de impermeabilização do aterro, concentração e volume dos gases. Uma pressão inadequada pode gerar explosões em qualquer ponto do sistema (TERRAZA; WILLUMSEN, 2009), captar maiores teores de contaminantes ou mesmo subutilizar a planta de aproveitamento energético (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA, 2009).

No Brasil existem 621 aterros sanitários, sendo que 57 (9,18%) possuem sistema de aproveitamento dos gases (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS, 2019). No Estado do Ceará existem 05 aterros sanitários (SNIS, 2019), sendo que o maior deles está na Região Metropolitana de Fortaleza: o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), com 123 hectares.

O ASMOC começou a operar em 1991 com os resíduos do município de Caucaia-CE e, em 1998, passou a receber os resíduos coletados em Fortaleza-CE. Em 2015, o ASMOC recebeu as primeiras melhorias para instalação de um projeto de aproveitamento comercial e energético do metano. Em 2017, a planta entrou em operação em caráter experimental. Em 2019, eram comercializados, aproximadamente, 6.000 m³/hora de metano purificado; extraído através de um conjunto de poços verticais e horizontais interligados ao sistema de bombeamento/sucção. Esse metano é injetado diretamente na rede da Companhia de Gás do Ceará - CEGÁS e é consumido por várias indústrias.

1.2 Justificativa

No final de 2018, após realizar algumas visitas técnicas ao ASMOC, foi possível observar que a abertura das válvulas dos cabeçotes dos poços ocorria de forma empírica, apesar da larga experiência dos técnicos responsáveis pela planta em operação, o que aumentava a entrada de contaminantes no sistema (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono e outros) e prejudicava financeiramente o aproveitamento do metano.

Diante dessa constatação, o Grupo de Estudos, Projetos e Pesquisas em Resíduos Sólidos do IFCE (Campus Fortaleza) propôs à GNR Fortaleza – Gás Natural Renovável (empresa que opera a planta de aproveitamento) um projeto de pesquisa voltado à determinação das condições ideais de operação de alguns poços do ASMOC para otimização da extração do metano, minimização da entrada de contaminantes e da migração de gases pela camada de cobertura.

O experimento piloto envolveu o monitoramento da composição dos gases emitidos por 03 poços horizontais de PEAD¹ (de 60 metros de comprimento cada) inseridos na Lateral “F” do ASMOC. As válvulas dos cabeçotes desses poços foram reguladas sob diferentes posições de abertura (25%, 50, 75 e 100% aberta) e as concentrações dos gases foram identificadas com o Leitor de Gás GEM5000. Foram monitorados durante 09 campanhas de campo (entre dezembro de 2018 e janeiro de 2019) o metano (%), oxigênio (%), dióxido de carbono (%), outros gases (%), temperatura (°C), pressão (mb) e o fluxo de gases (m³/h).

¹PEAD: Poli Etileno de Alta Densidade

Os resultados dessa experiência foram apresentados em uma reunião com as partes interessadas e serviram para (1º) gerar um banco de dados primários e útil para pesquisas futuras, (2º) identificar as semelhanças e diferenças na composição dos gases entre os poços monitorados e (3º) despertar na GNR Fortaleza a necessidade de aprofundamento desse tipo de investigação.

Como desdobramento da referida iniciativa, ficou definido que a pesquisa deveria ser ampliada com o propósito de melhor compreender o comportamento dos gases do ASMOC sob diferentes condições de bombeamento/pressão de sucção. Para tanto, foram escolhidos seis (06) poços, sendo 02 verticais de PEAD, 02 verticais de concreto e 02 horizontais de PEAD, inseridos na Lateral “E” do ASMOC em função dos constantes problemas de vazão e qualidade.

Como destacou Marques Júnior (2020), estudar as questões que envolvem a pressão de bombeamento em aterros sanitários é importante para contribuir com novos projetos de implantação, operação e monitoramento desses empreendimentos, principalmente, com aqueles que visam eficiência energética, para diversificar a matriz energética do país, e o aproveitamento de novas áreas. Além disso, há outros aspectos a considerar: uma pressão inadequada pode ocasionalmente puxar o gás que iria para um poço vizinho, desequilibrando a rede de captação (MATSUTO *et al.*, 2015) e o monitoramento de um poço de gás permite avaliar sua eficácia e decidir sobre a instalação (ou não) de um poço adicional (LEONE, 2007).

O ASMOC encerra suas atividades este ano (2020), mas seus resíduos passarão por um longo período de transformação física, química e biológica de forte influência sobre a quantidade e qualidade dos gases, sendo importante verificar se há configurações ou melhorias operacionais que possam aumentar a eficiência da coleta do metano.

A realização dessa pesquisa consolida uma base de dados sobre a temática da emissão e aproveitamento de gases de aterros sanitários, contribui para a criação de novas linhas de investigação para a engenharia no Estado do Ceará e serve para auxiliar no desenvolvimento de projetos de créditos de carbono mais seguros e econômicos. Além disso, o estudo da influência da pressão de bombeamento sobre a qualidade dos gases do ASMOC, além de localmente inédito, pode servir de base para o desenvolvimento de projetos de aproveitamento energético em outras áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos do Ceará e do país.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar a influência das alterações na pressão de bombeamento (sucção) sobre a qualidade e a vazão (m³/h) dos gases do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-CE.

1.3.2 Específicos

Identificar e comparar a composição dos gases captados em poços horizontais e verticais.

Determinar a condição ótima de funcionamento dos poços quanto à potencialização da captação do metano e redução de contaminantes.

Contribuir para a otimização dos procedimentos de rotina relacionados com a extração ativa do gás metano.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Os Aterros Sanitários

2.1.1 Considerações gerais

Os aterros sanitários são a única alternativa de disposição final de resíduos sólidos urbanos permitida pela Lei Federal 12.305/2010² e são projetados para a distribuição ordenada dos resíduos com redução de danos ou riscos à saúde pública, à segurança e ao meio ambiente.

A Norma Brasileira - NBR 8.419 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1992) define o aterro sanitário como uma técnica de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no solo que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível.

Para Van Elk (2007) o aterro sanitário, quase sempre, apresenta a melhor relação custo-benefício quando comparado com outras tecnologias [...] além de possuir grande capacidade de absorção diária de resíduos e condições que garantem a decomposição biológica da matéria orgânica (LIMA, 1991).

Para Goes (2016) o aterro sanitário é a melhor forma de tratamento dos RSU quando operacionalizado dentro das normas e legislações estabelecidas, mas embora seja considerado uma prática legal de gerenciamento, o aterro sanitário não deve ser uma iniciativa isolada, uma vez que a destinação final³ é apenas uma etapa do ciclo de vida⁴ dos resíduos (SUZUKI; GOMES, 2009).

Do ponto de vista estrutural, os aterros sanitários possuem sistemas de impermeabilização inferior, camadas de cobertura⁵, coleta e tratamento de líquidos e

²Lei que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS

³Conforme a PNRS a destinação final inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes [...]

⁴Conforme a PNRS o ciclo de vida de um produto é a série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final.

⁵A aplicação regular do solo ou materiais artificiais como cobertura dos resíduos é talvez o controle mais fundamental sobre os efeitos diretos decorrentes de um aterro sanitário. Locais com más práticas diárias de cobertura estão frequentemente sujeitos a problemas com aves, odores, doenças, resíduos expostos e acúmulo de água superficial (International Solid Waste Association - ISWA, 2010).

gases⁶ (SCHMIDT, 2016) e, antes da sua implantação, vários aspectos precisam ser considerados: a seleção da área, o licenciamento ambiental, a qualidade do projeto, o método futuro de operação, as formas de monitoramento geotécnico e ambiental bem como sua viabilidade técnica-financeira. Alguns desses assuntos serão explorados nas seções seguintes.

2.1.2 A Seleção da Área

No contexto urbano, a instalação de um aterro sanitário é um grande desafio, começando pela escolha do local. Conforme a Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental - RECESA (2008) a seleção de áreas para aterros sanitários é uma das principais dificuldades enfrentadas pelos municípios porque demanda um grande volume de dados e informações, geralmente indisponíveis⁷. Por isso, a escolha do local - em regra - é um processo demorado e dispendioso (PFEIFFER; CARVALHO, 2002).

Para Monteiro *et al.*, (2001) encontrar uma área com as dimensões requeridas para implantação de um aterro sanitário e próxima aos locais de geração de resíduos é cada vez mais difícil, em função da elevada taxa de urbanização e ocupação dos solos das cidades, ainda mais considerando os parâmetros técnicos das normas e legislações. Para Lupatini (2002) o local escolhido para um aterro sanitário deve minimizar a possibilidade de existência de impactos ambientais negativos aos meios físico, biótico e antrópico, minimizar os custos envolvidos, minimizar a complexidade técnica para viabilização do aterro e maximizar a aceitação pública⁸.

⁶Conforme a ISWA (2010), o gás de aterro é gerado em todos os aterros onde resíduos orgânicos são descartados. É um subproduto natural da decomposição biológica anaeróbia da porção orgânica de resíduos sólidos. O gás de aterro consiste principalmente de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), mas pode conter muitos outros constituintes em pequenas quantidades, incluindo nitrogênio, oxigênio, sulfetos, mercaptanas, compostos orgânicos voláteis, amônia, hidrogênio, monóxido de carbono, vapor de água, e muitos outros gases orgânicos.

⁷A dificuldade para definição de novos locais para aterros sanitários tem contribuído para a adoção de medidas de ampliação da vida útil dos empreendimentos em operação e para a reutilização/alteamento de aterros encerrados (FREIRE *et al.*, 2019). A expansão vertical de aterros sanitários exige avaliação detalhada do local com relação à estabilidade das encostas, capacidade de carga da fundação e qualidade dos sistemas de drenagem de lixiviados (LAW *et al.*, 2013).

⁸A cobertura diária dos resíduos, sozinha, não é uma medida eficaz de controle do odor na maioria dos locais, mas combinada com um sistema de extração positiva de gases se torna vital e eficaz (ISWA, 2010).

Para Mota (2003) o local a ser escolhido para instalação do aterro sanitário deve conter: afastamento adequado de áreas urbanas, distância satisfatória de recursos hídricos superficiais, afastamento do lençol freático, disponibilidade de material de cobertura, distância não muito grande das áreas de coleta e facilidades de acesso.

Na NBR 8.419/1992, os critérios para seleção da área estão relacionados com o zoneamento ambiental e urbano, acessos, vizinhança, titulação da área, economia de transporte, economia operacional (jazida), infraestrutura urbana, bacia e sub-bacia hidrográfica. Já na NBR 13.896/1997, a adequabilidade do local deve ser justificada sob considerações técnicas a respeito do(a): topografia, geologia e tipos de solos existentes, recursos hídricos, vegetação, acessos, tamanho disponível e vida útil, custos e distância mínima a núcleos populacionais.

Lino (2007) cita algumas importantes características do meio físico da área escolhida: baixo fluxo de água subterrânea nos arredores, baixa permeabilidade, grande espessura e homogeneidade do material geológico, alta capacidade de retenção de compostos, baixa solubilidade química e baixa erodibilidade do substrato.

Conforme Van Elk (2007) a escolha correta do local é um grande passo para o sucesso do empreendimento [...] por isso deve considerar questões ambientais, econômicas, políticas, sociais e [...] estabelecer notas e pesos para cada uma. Como a escolha segue um processo de hierarquização entre áreas favoráveis [...] é necessário que se faça uso de uma boa metodologia para otimizar os recursos disponíveis (MELO, 2001).

Para Castilhos Junior *et al.* (2003), em princípio, adota-se uma metodologia para a pré-seleção de áreas, cujos dados a serem analisados se originam da etapa de levantamento de dados gerais e da coleta de informações já existentes sobre o meio físico e o biótico. Depois, realiza-se um estudo mais abrangente das áreas pré-selecionadas para fazer a escolha. Embora contemplem o mesmo objetivo, as metodologias se diferem em relação ao tipo de abordagem, critérios e atributos, e, por conseguinte, apresentam resultados peculiares (LINO, 2007).

Vale salientar que a área escolhida deve possuir critérios que convençam todas as partes interessadas e nas perspectivas sociocultural, econômico e ambiental (ESKANDARI; HOMAEI; MAHMODI, 2012). A adequada escolha também promove a proteção da saúde pública (LINO, 2007).

Para Alves (2012), quando uma área não é bem selecionada pode-se comprometer seriamente a presença de espécies de animais e vegetais daquela região ou encarecer os custos de operação do aterro, como por exemplo, estar longe de jazidas, as quais forneceriam materiais para a impermeabilização e cobertura.

2.1.3 O Projeto

A elaboração de um projeto de um aterro sanitário requer o acesso prévio a diversos dados da população (número de habitantes, previsão de crescimento, poder aquisitivo, índice de escolaridade), das atividades socioeconômicas e da infraestrutura dos serviços de saneamento básico do(s) município(s), como explicou Gomes e Martins (2003).

Pela Norma NBR 8.419/1992 devem ser fornecidas aos projetistas dos aterros sanitários, as seguintes informações: origem, qualidade e a quantidade diária e mensal dos resíduos sólidos, além das características dos equipamentos de transporte e da massa específica dos resíduos. Ainda segundo essa NBR, o projeto de um aterro sanitário deve ser constituído pelas seguintes partes:

- a) memorial descritivo, contendo informações cadastrais, informações sobre os resíduos a serem dispostos no aterro sanitário, caracterização do local destinado ao aterro sanitário, concepção e justificativa do projeto, descrição e especificações dos elementos do projeto, operação do aterro sanitário, uso futuro da área do aterro;
- b) memorial técnico, contendo cálculo dos elementos do projeto, vida útil do aterro sanitário, sistema de drenagem superficial, sistema de drenagem e remoção de percolato, sistema de drenagem de gás, sistema de tratamento de percolato, cálculo de estabilidade dos maciços de terra e dos resíduos sólidos dispostos;
- c) cronograma de execução e estimativa de custos, contendo estimativa detalhada dos custos dos equipamentos utilizados, mão de obra empregada, materiais utilizados, instalações e serviços de apoio; e cronograma físico-financeiro;
- d) desenhos com a concepção geral, indicação das áreas de disposição dos resíduos sólidos, sistema de drenagem superficial e subsuperficial, sistema de drenagem de gases, sistema de tratamento do percolato, representação do aterro concluído, cortes, detalhes importantes (ABNT, 1992).

Alguns dos aspectos citados pela NBR 8.419/1992 são esclarecidos por Gomes e Martins (2003), a saber:

a) sistema de drenagem superficial: tem a função de evitar a entrada de água de escoamento superficial⁹. Os dados para a definição do local e dimensionamento desse sistema partem do levantamento topográfico e climatológico;

b) sistema de drenagem de lixiviados: os lixiviados gerados com a degradação dos resíduos devem ser canalizados para fora do aterro sanitário a fim de receberem o tratamento adequado¹⁰;

c) sistema de tratamento de lixiviados: a qualidade do lixiviado gerado corresponde a um efluente altamente poluidor e que não poderá ser descartado no meio ambiente;

d) impermeabilização de fundo e de laterais: deverá ser projetado sistema de impermeabilização de laterais e fundos. Após a caracterização do solo local, pode-se adotar impermeabilização com o próprio solo compactado, desde que as características de permeabilidade sejam adequadas;

e) sistema de drenagem de gases: como os gases encontram-se misturados à massa de resíduos, a drenagem deve ser tanto horizontal quanto vertical, contudo, dependendo do tamanho das trincheiras a drenagem vertical é suficiente;

f) sistema de cobertura: é formado pela cobertura diária, intermediária e final, e tem a função de eliminar a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de lixiviados, reduzir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do gás de aterro (GOMES; MARTINS, 2003, p.63-65).

Conforme Alberte, Carneiro e Kan (2005), em um projeto de aterro sanitário deve estar previsto também o plano de reaproveitamento da área após o encerramento de suas atividades ou o final de sua vida útil, bem como as atividades de monitoramento das águas do subsolo e superficiais, de gás de aterro e de efluentes líquidos até que as emissões atinjam padrões aceitáveis. Isso deve evitar a geração de passivos ambientais (LINO, 2007).

Stuermer, Brocanelli e Vieira (2011) ressaltam que o uso pós-fechamento de um aterro é bastante restrito, não sendo recomendado construir edificações sobre estas áreas em função da instabilidade do maciço e da formação de gases que podem explodir mas as áreas podem sofrer recuperação, através do processo de

⁹O mau controle das águas pluviais pode ter impactos muito significativos não apenas no recebimento das águas a jusante do local, mas também na rotina e custos das operações do aterro [...] por isso o sistema de drenagem deve garantir que as operações de aterro não sejam comprometidas pela má drenagem superficial, evitando também a contaminação da água superficial por resíduos ou lixiviados, e minimizando a perda de solo e a erosão (ISWA, 2010).

¹⁰O lixiviado deriva da precipitação, das águas de superfície, dos líquidos descartados pela massa de resíduos e da decomposição do material orgânico e à medida que se forma e passa pelos resíduos dissolve e arrasta compostos orgânicos e inorgânicos, aumentando seu potencial de contaminação (ISWA, 2010).

revegetação, e serem destinadas a outros usos: recreação e lazer, campos de jogos e jardins públicos.

Lanza *et al.*, (2009) relatam que a escolha do uso futuro do aterro encerrado deve ser definida com base em estudos realizados e na aptidão da área, levando-se em consideração a proteção da saúde humana e do meio ambiente, além de que o uso futuro da área deverá ser aprovado pelo órgão ambiental competente.

2.1.4 A Instalação

O aterro sanitário é um empreendimento de alto potencial de poluição e degradação, por isso sua instalação só pode ocorrer após elaboração e aprovação de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA), como previu a Resolução 01/86 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 1986)¹¹.

Do ponto de vista prático, a instalação da obra deve considerar a distância da base do aterro para o nível do lençol freático, definição sobre os sistemas de impermeabilização e drenagem, isolamento físico do aterro em relação à vizinhança, delimitação da cerca viva, escolha do local para a construção da portaria e do prédio da administração, instalação da balança rodoviária, localização dos poços de monitoramento, conforme a literatura: ABNT (1992), ABNT (1997), FUNASA (2003), RECESA (2008). Uma publicação do CREA-PR (2009) cita ainda a importância do estacionamento para veículos leves e pesados, almoxarifado, depósito de equipamentos e ferramentas.

No que diz respeito à distância da base do aterro para o nível do lençol freático, a NBR 13.896/1997 prevê que esse nível seja medido durante a época de maior precipitação pluviométrica da região e entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático haja uma camada natural de espessura mínima de 1,50 m de solo insaturado. Ainda segundo essa NBR, o aterro deve ser executado em áreas onde haja predominância no subsolo de material com coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s e não deve ser executado em áreas sujeitas a inundações. Em geral, um aterro não deve ser localizado em áreas úmidas (existentes ou antigas), áreas de infiltração e locais com águas rasas (ISWA, 2010).

¹¹Conforme a Resolução 01/86, o EIA e o respectivo Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente (RIMA) deverá ser realizado por uma equipe multidisciplinar habilitada.

Para que o sistema de impermeabilização funcione corretamente e realize suas funções, são necessárias algumas características, tais como: estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries e compatibilidade físico-químico-biológica com os resíduos a serem aterrados (RECESA, 2008; LODI; ZORNBERG; BUENO, 2009). Estes sistemas são utilizados para evitar que contaminantes produzidos se espalhem e atinjam o subsolo e águas subterrâneas (LOCASTRO; ANGELIS, 2016).

De acordo com Gomes e Martins (2003), o conhecimento das características do solo local (teor de umidade, granulometria, textura, consistência, espessura, cor, classificação, peso específico, índice de vazios, condutividade hidráulica, parâmetros de compactação, capacidade de campo, estimativa da capacidade de carga, da compressibilidade e da resistência) pode-se escolher o sistema ideal de impermeabilização de laterais e fundos das trincheiras.

De acordo com Lodi, Zornberg e Bueno (2009); USACE (2008), dentre os tipos de sistemas, destacam-se os naturais, argila compactada, geomembranas e, ainda, uma mistura de todos esses elementos. Conforme Carvalho (1999), a escolha do tipo é influenciada pelo uso a que se destina, ou seja, pelo ambiente físico, pela química do percolado e pela taxa de infiltração.

Os sistemas que são compostos apenas por solo compactado apresentam um baixo custo devido a possibilidade de utilização de solos encontrados nas proximidades dos aterros (LOCASTRO; ANGELIS, 2016), mas a utilização de geossintéticos sobre esses solos como barreira impermeabilizante tem crescido nas últimas décadas devido à facilidade de construção e durabilidade (BUENO; BENVENUTO; VILAR, 2004), já que possuem alta resistência aos meios agressivos e são de fácil instalação e soldagem (FELDKIRCHER, 2008).

Segundo Lodi, Zornberg e Bueno (2009), as geomembranas não são utilizadas isoladamente devido a problemas de funcionamento, rasgos, imperfeições e/ou defeitos que possam apresentar, o que resulta em aumento de fluxo e diminuição da eficiência do liner. Ainda segundo os autores, as barreiras compostas são mais efetivas contra o processo de migração da lixívia e são formadas por uma camada de argila compactada, geomembrana e camada de proteção.

Segundo a literatura (NBR 13.896/1997; FONSECA 2018), esse procedimento consiste na instalação de uma cerca circundando completamente a área em operação

com objetivo de impedir o acesso de pessoas estranhas e animais ao interior do aterro sanitário. A ausência de tela de proteção pode causar descargas de resíduos não autorizados (LIMA *et al.*, 2017).

A instalação da cerca viva, por sua vez, tem a finalidade de utilizar a vegetação como barreira para dificultar a fácil visualização do aterro e suas instalações, bem como diminuir a propagação de ruídos, poeira e maus odores (MANSOR *et al.*, 2010).

Sobre os poços de monitoramento, a NBR 13.896/1997 afirma que o sistema deve ser constituído de no mínimo quatro poços e estes devem ter diâmetro mínimo de 100 mm e ser revestidos e tampados na parte superior para evitar contaminação das amostras.

2.1.5 A Operação

Conforme Santos (2012) a operação de um aterro sanitário exige total controle sobre a quantidade¹² e tipologia dos resíduos sólidos recebidos, sobre o processo de espalhamento e compactação, número de passadas do veículo compactador, altura e inclinação das camadas de resíduos e das células do aterro e do tipo de material empregado nas camadas intermediárias e finais. A operação de um aterro sanitário exige controle também sobre as despesas mensais com funcionários e constantes manutenções das instalações (SCHMIDT, 2016).

Conforme Alves (2012) a fase de operação corresponde ao período compreendido entre o aterramento da primeira carga de resíduos e o aterramento da última carga anos mais tarde, sendo caracterizada pela maior intensidade de tráfego, pelos trabalhos nas frentes¹³ de aterramento e operação das instalações de controle ambiental.

¹²O controle sobre os resíduos sólidos envolve tanto os resíduos enviados ao aterro como os resíduos já aterrados e consiste na implantação de balança localizada na entrada do aterro sanitário onde os veículos que entram e saem da área são pesados (VIEIRA DOS SANTOS, 2004). Segundo a ISWA (2010), o controle de resíduos requer também a utilização de protocolos para triagem rotineira e/ou critérios para avaliar a admissibilidade dos resíduos e esses critérios visam determinar se determinados resíduos devem ser aceitos ou rejeitados. O objetivo fundamental desses métodos de controle é garantir o adequado controle da poluição, segurança operacional e pública, gestão da informação, otimização da capacidade das instalações.

¹³A frente de operação é o foco da atividade em um aterro sanitário. É uma área onde os resíduos são depositados por caminhões, nivelados e compactados, e onde a cobertura diária é aplicada. Envolve a movimentação de veículos que transportam resíduos, máquinas pesadas e trabalhadores em uma área potencialmente congestionada. Uma boa gestão da frente de trabalho é fundamental para alcançar um bom padrão global de operação do aterro sanitário, minimizar o impacto a longo prazo, reduzir o contato dos resíduos com a atmosfera, os acidentes e o uso ineficiente do espaço (ISWA, 2010).

Para Catapreta (2008), a compactação dos resíduos sólidos é um dos principais aspectos a ser considerado durante a operação de um aterro sanitário, tanto pela otimização da disposição, quanto da melhoria de propriedades geomecânicas dos resíduos. Ainda segundo o autor, uma boa compactação aumenta a vida útil do aterro, reduz a migração descontrolada de gases e líquidos lixiviados, aumenta a estabilidade do maciço de resíduos e possibilita o tráfego imediato de veículos sobre o maciço. Os resíduos compactados dificultam a atuação de aves e roedores que buscam cavar a massa em busca de alimentos, reduzem o risco de incêndio e deslocam o ar, antecipando as condições anaeróbias (ISWA, 2010).

Para que ocorra uma boa compactação, o trator de esteiras deve passar sobre a pilha de resíduos pelo menos três vezes, para que seja garantido um elevado índice de compactação (LANZA; CARVALHO, 2006). Conforme a ISWA (2010), a compactação ideal é alcançada utilizando uma escavadeira ou um compactador de resíduos especializado e os compactadores de resíduos mais modernos podem alcançar altas densidades (0,85 toneladas/m³). Quanto maior a densidade alcançada, maior será a geração de gás de aterro por unidade de volume (OLIVEIRA, 2011).

Conforme Melo (2001), o método de operação do aterro sanitário depende das características do local, grau de periculosidade dos resíduos e condições hidrogeológicas. Os resíduos podem ser dispostos em trincheira, rampa ou área (BIDONE; POVINELLI, 1999) de forma conjunta ou separada (RECESA, 2008).

Conforme a RECESA (2008), o método da área consiste em acomodar o resíduo sobre a superfície do terreno topograficamente adequado, formando camadas de massa compactadas, que serão cobertas por um solo específico de acordo com as especificações do projeto¹⁴. A técnica da trincheira consiste em escavações de valas de dimensões variadas em terrenos planos nas quais os resíduos serão depositados e posteriormente aterrados. Na metodologia da rampa, o resíduo é compactado contra um talude. Cada método de compactação cria uma via preferencial para o escoamento dos gases e lixiviados que por sua vez devem ser direcionados para sistemas de drenagem adequados, evitando fluxos para fora do aterro (ISWA, 2010).

Conforme Lanza e Carvalho (2006), os procedimentos de operação do aterro sanitário, embora simples, devem ser sistematizados para que sua eficiência seja

¹⁴Cada tipo de solo tem vantagens e desvantagens e a realidade é que a maioria dos aterros tendem a usar o que está disponível no local da forma mais eficaz possível (ISWA, 2010).

maximizada, assegurando seu funcionamento ao longo de toda a sua vida útil. Tais procedimentos devem ser registrados em relatórios diários, relatórios mensais de consolidação de dados, formulários e planilhas apropriadas.

Para Leite (2008), a correta operação do aterro é essencial para alcançar os objetivos planejados no projeto e ainda deve ser suficientemente flexível para corrigir e modificar as ações planejadas, de modo a fazer frente a novas situações mantendo as orientações gerais do projeto.

Monteiro *et al.* (2001) listam regras básicas para a operação de um aterro sanitário, a saber:

- a) o espalhamento e a compactação deverão ser efetuados, sempre que possível, de baixo para cima¹⁵;
- b) o espalhamento do lixo deverá ser feito em camadas não muito espessas de cada vez (máximo de 50cm), com o trator dando de três a seis passadas sobre a massa de resíduos;
- c) a altura da célula deve ser de quatro a seis metros para que a decomposição do lixo aterrado ocorra em melhores condições;
- d) a inclinação dos taludes operacionais mais utilizada é de um metro de base para cada metro de altura nas células em atividade;
- e) a camada de solo de cobertura ideal é de 20 a 30cm para os recobrimentos diários de lixo;
- f) uma nova célula será instalada no dia seguinte em continuidade à que foi concluída no dia anterior;
- g) a execução de uma célula em sobreposição à outra ou o recobrimento final do lixo só deverá acontecer após um período de cerca de 60 dias;
- h) a camada final de material de cobertura deverá ter a espessura mínima de 50cm;
- i) a largura da célula deverá ser a menor possível (em geral, suficiente para descarga de três a cinco caminhões coletores) (MONTEIRO *et al.*, 2001, p. 172-173).

Conforme Marques Junior (2020), é importante monitorar todas as ações da operação do aterro sanitário para que se possa entender as consequências de cada ação no desenvolvimento da biodegradação na massa de resíduos, e como estas podem influenciar a geração de gases.

¹⁵Essa forma de operação maximiza o esforço da máquina (ISWA, 2010).

2.1.6 O Monitoramento

Uma vez em operação, os aterros sanitários devem ser continuamente monitorados mesmo depois de encerradas¹⁶ suas atividades [...] por serem ambientes normalmente caracterizados pela matéria em decomposição, possuir mau cheiro, elementos tóxicos, presença de animais transmissores das mais variadas doenças e geração de chorume (LIMA, 1995; RECESA, 2008). Esse monitoramento deve evitar acidentes e danos ambientais (SANTOS *et al.*, 2019) e deve ser composto de monitoramento geotécnico, ambiental e operacional (VIEIRA DOS SANTOS, 2004).

Conforme a USEPA (2017), os aterros sanitários devem ser continuamente monitorados até 30 anos após o encerramento das suas atividades.

Para Alcântara (2007), o monitoramento em aterros sanitários consiste em uma verificação regular e contínua para observar diferentes parâmetros físicos, químicos e biológicos, determinando os possíveis impactos ambientais decorrentes da sua operação e assegurando a execução do aterro conforme o projeto.

De acordo com Jorge, Baptisti e Gonçalves (2004) as atividades do monitoramento ambiental de um aterro sanitário devem ser sistematizadas em um Plano de Monitoramento da Qualidade Ambiental onde devem constar a locação dos pontos de amostragem, frequência e parâmetros a serem analisados, e os procedimentos de coleta de amostras de água e solos.

O monitoramento de um aterro sanitário visa avaliar a sua influência sobre o meio ambiente e definir ações permanentes para sua conservação (MENDONÇA, 2000). Para diversos autores revisados por Melo (2001), os aterros sanitários devem ser monitorados no que se refere aos seguintes aspectos:

- a) Meteorológicos: controle do índice pluviométrico, velocidade e direção do vento, período de insolação, evaporação e temperatura ambiente;
- b) Geotécnicos: zona aerada, movimentos horizontais e verticais em diferentes pontos do aterro e piezometria;
- c) Hidrológicos: quantidade e características do chorume produzido e, características da água do lençol freático a jusante e a montante do aterro;

¹⁶Segundo a USEPA (2017), os requisitos de monitoramento devem ser atendidos nos aterros não apenas durante sua operação, mas também por 30 anos após o seu fechamento.

d) Físico-químicos: pressão de gás e temperatura¹⁷ no interior do aterro;

e) Controle de recebimento do resíduo: análise do resíduo quanto a quantidade e composição (MELO, 2001, p.29).

Dentro do programa de monitoramento do aterro sanitário, conforme publicação do CREA-PR (2009), também entram as estradas de acesso (que deverão ser mantidas em boas condições pela Prefeitura local, ou em casos contratuais, pela empresa operadora) e as estradas internas (que devem suportar o trânsito de veículos mesmo durante os períodos de chuva, e por isso, devem ser mantidas nas melhores condições de operação). É imperativo que as estradas forneçam acesso seguro e sem obstáculos até a área de operação do aterro sanitário [...] e que não gerem danos aos veículos e facilitem seu rápido retorno ao local de coleta (ISWA, 2010).

Conforme Marques Junior (2020), o monitoramento meteorológico se faz importante visto que, altos valores de precipitação, podem ocasionar infiltração de água nas camadas de cobertura, aumentando a umidade no interior das células, favorecendo a abertura de caminhos para a entrada de oxigênio, prejudicando o processo biodegradativo e na geração de gás de aterro.

Sempre que a umidade excede a capacidade de campo do solo, a água infiltra no interior do aterro e os principais fatores que governam a taxa de percolação de umidade do aterro sanitário são precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e armazenamento de umidade no solo (IWAI, 2005).

Para Vieira dos Santos (2004), o monitoramento geotécnico deve verificar o controle de deslocamentos horizontais e verticais; controle do nível de chorume e pressões de gases no corpo do aterro; controle da descarga de chorume através de poços; e verificação de estradas e acessos.

O monitoramento de líquidos envolve a água drenada da superfície do aterro e o lixiviado. A análise físico-química e microbiológica das águas drenadas da superfície do aterro permite verificar se está ocorrendo mistura do percolado com a água pluvial e se há necessidade de tratamento, antes do lançamento na rede de drenagem (ALCÂNTARA, 2007).

Segundo Alcantara (2007), o monitoramento das emissões de gases serve para analisar a evolução do processo de decomposição da matéria orgânica, avaliar a

¹⁷ Conforme a ISWA (2010), o monitoramento da temperatura interna do aterro é útil até para estabelecer o risco ou extensão de um incêndio, mas somente se a temperatura for medida em profundidade.

possibilidade de aproveitamento do gás de aterro para geração de energia, estimar a emissão de gases liberados para atmosfera e verificar os riscos de migração do gás de aterro por meio do solo.

Conforme a ISWA (2010), o monitoramento de emissões de superfície é uma verificação fundamental sobre a eficácia da cobertura do aterro e do sistema de extração que, juntos, formam o principal componente de controle e gerenciamento do gás de aterro. Um acúmulo de emissões superficiais pode fornecer um aviso prévio da necessidade de mudanças ou melhorias na implementação da camada de cobertura.

O monitoramento do aterro sanitário permite conhecer o modelo de comportamento e o funcionamento do maciço, bem como levantar os parâmetros para idealização de projetos mais econômicos e seguros (CARVALHO, 1999).

No que diz respeito ao aspecto geotécnico, Ribeiro (2019) afirma que é fundamental avaliar a estabilidade da massa de resíduos e o comportamento geomecânico do aterro sanitário. Conforme vasta literatura citada pela autora, observa-se que o monitoramento geotécnico envolve a verificação dos deslocamentos verticais e horizontais; observação de trincas e deformações; e análise do nível de lixiviado e poro-pressão no interior do aterro.

Para Suzuki (2012), a estabilidade do maciço, do solo ou do resíduo sólido pode ser estimada por meio da análise das tensões e deformações durante a construção e/ou operação do aterro sanitário, geralmente calculadas por programas computacionais que utilizam métodos numéricos.

Conforme Catapreta (2008), para a avaliação das condições de estabilidade do aterro sanitário é importante também utilizar o método da verificação visual da ocorrência de trincas na cobertura das bermas e taludes.

Para Kölsch e Bauer (2009) assegurar a estabilidade é questão geotécnica central durante a operação e encerramento dos aterros sanitários e essa estabilidade é função de vários parâmetros: compactação e composição dos resíduos, condições climáticas, geometria do aterro, poropressão no interior do maciço. Segundo Ribeiro (2019), a geração de percolados e gases, e a recirculação de lixiviados também influenciam na estabilidade dos aterros sanitários (RIBEIRO, 2019).

2.2 A Geração de Gases nos Aterros Sanitários

2.2.1 Digestão Aeróbia e Anaeróbia dos Resíduos Sólidos

De acordo com Fernandes (2009), a biodegradação que ocorre nos aterros sanitários é, predominantemente anaeróbia, sem a presença de oxigênio, porém ocorre também a digestão aeróbia, com presença de oxigênio, logo após o aterramento¹⁸.

Conforme Santos (2012), a digestão aeróbia se dá quando há influência da atmosfera sobre os resíduos sólidos, pois a camada de cobertura ainda não foi iniciada, e os componentes orgânicos passam por reações bioquímicas que resultam em dióxido de carbono e vapor de água. Essa fase vai do momento em que os resíduos estão sendo depositados até que a cobertura total do maciço seja feita.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (2000) a digestão aeróbia é um processo breve, durando de alguns dias a aproximadamente um mês, mas a ISWA (2010) defende que a decomposição aeróbia pode durar seis ou mais meses, dependendo da proximidade dos resíduos com o ar da superfície do aterro.

A digestão anaeróbia¹⁹ nos aterros sanitários, por sua vez, é iniciada quando não há mais oxigênio no interior da célula. As descrições da literatura (PESSIN *et al.*, 2002; CASTILHOS JÚNIOR *et al.*, 2003) permitem entender a ocorrência de hidrólise da matéria orgânica complexa em moléculas solúveis, conversão dessas moléculas em ácidos orgânicos mais simples, dióxido de carbono e hidrogênio, e a formação do metano a partir da quebra dos ácidos ou redução de dióxido de carbono com o hidrogênio.

Conforme Amaral (2004), na digestão anaeróbia, as bactérias são basicamente as responsáveis pelo processo, mas outros organismos como protozoários, fungos imperfeitos e leveduras podem também estar presentes. Entende-se do autor que

¹⁸Conforme a ISWA (2010), a presença de oxigênio em concentrações acima de 1% indica que as barreiras de cobertura não são eficazes para isolar o aterro do ambiente externo. Por outro lado, o acúmulo de metano acima de 40% é um indicador positivo de que o oxigênio está sendo excluído com sucesso e o regime biológico está reverenciando condições anaeróbicas mais frias.

¹⁹Entender as relações entre os parâmetros que influenciam no processo de degradação anaeróbia, sob condições reais de operação de um aterro sanitário, auxilia na estimativa segura da taxa de geração de gás de aterro (CASTRO *et al.*, 2017).

cinco grupos microbianos participam da digestão anaeróbia: bactérias fermentativas, acetogênicas, metanogênicas, bactérias redutoras de sulfato e as redutoras de nitrato.

A velocidade de degradação anaeróbia é baixa, podendo produzir gases por mais de 30 anos, e ao longo desse período as formações e as quantidades gasosas são diferenciadas, dependendo das fases da degradação dos resíduos (VAN ELK, 2007). Pelo fato de a digestão anaeróbia perdurar por vários anos é que se indica a instalação de poços drenantes para a recuperação do gás de aterro existente (MENDES, 2005).

Conforme vasta literatura citada por Santos (2016), algumas publicações descrevem a geração de gases em aterros sanitários por meio de 5 fases, a saber:

Fase I (Ajuste inicial) - os resíduos são depositados no aterro e sua fração biodegradável sofre decomposição biológica aeróbia. A fonte principal de microorganismos é o solo ou lodo de estações de tratamento ou a recirculação do chorume.

Fase II (Transição) - decrescem os níveis de oxigênio e começa a fase anaeróbia. O nitrato e o sulfato podem servir como receptores de elétrons em reações de conversão biológica e os microorganismos iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Há elevação das concentrações de CO₂ dentro do aterro.

Fase III (Ácida) - há conversão microbiológica dos compostos da etapa anterior em compostos com baixa massa molecular, como o ácido acético. O CO₂ é o principal gás gerado e também serão produzidas quantidades menores de hidrogênio.

Fase IV (Metanogênica) - predominam microrganismos estritamente anaeróbios que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH₄ e CO₂. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida.

Fase V (Maturação) - a umidade continua migrando pela massa de lixo e porções de material biodegradável até então não disponíveis acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas. Em função dessas etapas, a velocidade e o volume da produção de gases, bem como sua composição, são específicos de cada aterro e ao mesmo tempo diferentes em cada ponto do aterro.

Para a literatura (GUEDES, 2018; CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003), embora essa divisão em fases facilite bastante o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos, elas não seguem sempre essa sequência e não estão bem definidas. Isto se deve ao contínuo aterramento, o que resulta na grande variabilidade na idade dos resíduos e estágios de biodegradação, podendo ocorrer

diferentes fases de biodegradação simultâneas, em uma mesma célula de resíduo. Dito de outra forma, os aterros geralmente recebem resíduos por um período de 20 a 30 anos e isso significa que os resíduos mais antigos em uma área podem estar em uma fase diferente de decomposição que os resíduos enterrados mais recentemente em outra área (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES & DISEASE REGISTRY - ATDRX, 2001).

Para Moreira (2018), a duração de cada fase depende da distribuição dos componentes orgânicos no aterro, dimensão da célula de resíduos, disponibilidade de nutrientes, teor de umidade dos resíduos, passagem de umidade através dos resíduos e grau de compactação inicial. Os principais fatores que influenciam o tempo decorrido para cada fase, segundo Johannessen (1999), são as condições climáticas e fatores operacionais.

2.2.2 Processos Físicos, Químicos e Biológicos

No aterro sanitário, a biodegradação dos resíduos sólidos ocorre por processos físicos, químicos e biológicos, produzindo lixiviados e gases (SILVA, FREITAS e CANDIANI, 2013). Nesse sentido, o aterro sanitário comporta-se como um reator dinâmico porque produz, por meio de reações químicas e biológicas, gases, lixiviados e resíduos mineralizados a partir da decomposição da matéria orgânica (VAN ELK, 2007).

Para Oliveira (2011), as substâncias presentes nos resíduos sólidos são capazes de influenciar o potencial de produção de gás de duas maneiras: estimulando-o pela presença de uma fase orgânica contínua ou inibindo esta produção pela presença de substâncias tóxicas para o metabolismo microbiano.

Na visão de Fernandes (2009), os aterros sanitários constituem ecossistemas únicos, nos quais várias espécies de microrganismos estão presentes, principalmente bactérias e, em menor escala, fungos e protozoários.

Conforme Santos e Matos (2017) a degradação da fração orgânica existente nos resíduos sólidos exige forte atividade microbiana, condições ideais de temperatura, presença de umidade e envolve conversão de substratos, reações cinéticas, desnaturação de enzimas e proteínas, concentração ou diluição de contaminantes.

De acordo com literatura revisada por Firmo (2003), dentro de um aterro sanitário ocorre, isolada e/ou simultaneamente, (1) a decomposição de compostos orgânicos, (2) a dissolução e arraste de materiais e de produtos de conversão biológica por líquidos que se infiltram e percolam pelos resíduos, (3) a evaporação de compostos químicos e de água no gás do aterro, (4) a absorção de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis no material aterrado, (5) reações de oxidação-redução que afetam metais e a complexação desses.

Os resíduos aterrados também passam por mudanças na sua forma e volume (MONTEIRO, 2003) e isso gera dissipação das poro-pressões dos líquidos e gases bem como recalques. Conforme Van Elk, Corrêa e Ritter (2019), os primeiros estudos sobre recalques em aterros sanitários e lixões datam de 1940, entretanto somente em 1973 os mecanismos de recalque foram definidos por Sowers (1973).

Conforme Alcântara (2007), são os sistemas de impermeabilização de base e de cobertura que suportam a modificação nas pressões no interior da massa de resíduos. Ainda conforme o autor, como os resíduos sólidos são formados por materiais naturais ou artificiais de diversas categorias, formas e tamanhos, podendo apresentar enormes variações nas suas propriedades de deformação, degradabilidade e tenacidade.

Autores revisados por Leite (2008) exemplificam que a magnitude dos recalques em aterros sanitários é influenciada por diversos fatores, a saber: a) composição dos resíduos e porcentagem de material degradável; b) massa específica e índice de vazios dos resíduos; c) dimensões do aterro; d) técnicas de compactação; e) história de tensões; f) pré-tratamento dos resíduos; g) nível e flutuação dos líquidos percolados no interior da massa; h) existência de sistemas de extração de gases; i) teor de umidade, temperatura e gases, presentes ou gerados no interior da massa.

Conforme Van Elk, Corrêa e Ritter (2019), o acompanhamento dos recalques dos aterros sanitários, bem como a velocidade associada a tais recalques, é importante para a estimativa da vida útil do aterro sanitário, reaproveitamento das áreas após o encerramento da disposição, projeto e implantação dos sistemas de drenagem superficial e de efluentes, estabilidade do aterro sanitário e desempenho do sistema de cobertura final.

2.2.3 Fatores Influentes na Quanti-Qualidade dos Gases de Aterro

Diversos autores citados por Santos (2016) apontam os principais fatores que afetam a geração de gás nos aterros sanitários: composição dos resíduos, tamanho das partículas, temperatura, umidade, pH, geometria/operação/cobertura do aterro e idade dos resíduos sólidos.

Conforme Alcântara (2007), a composição dos resíduos sólidos é muito variável e depende de diferentes fatores: situação econômica da população, estações do ano, clima, hábitos da população, legislação ambiental vigente etc.

Para Marques Junior (2020), com o conhecimento do percentual de cada componente dos resíduos sólidos presente no aterro sanitário, pode-se analisar as condições de geração de gases. Quanto mais facilmente é decomposta a fração orgânica do resíduo, mais acelerada será a taxa de produção de gases no aterro (BRITO FILHO, 2005). A quantidade de material orgânico nos resíduos é um fator importante na duração da produção de gás (ATDRX, 2001).

A redução do tamanho das partículas contribui para o acréscimo da produção de gás em função do aumento da superfície do substrato disponível para a atividade enzimática (OLIVEIRA, 2011).

A temperatura no aterro possui uma elevada variação, sendo considerado um fator incontrolável nas células e que influencia bastante nos processos metabólicos de biodegradação (PALMISANO; BARLAZ, 1996).

Conforme relatado por Matheri *et al.* (2018), a geração de gás de aterro pode ocorrer em três faixas distintas de temperatura: faixa psicrófila (10 a 20°C), mesófila (20 a 40°C) e termófila (50 e 65°C). À medida que a temperatura do aterro e a atividade bacteriana aumentam, há um aumento da produção de gás. Além disso, esse aumento também pode ocasionar elevadas taxas de volatilização e de reações químicas (ATDRX, 2001).

Segundo a United States Army Corps of Engineers - USACE (2008), as reações químicas entre os materiais presentes nos resíduos podem liberar gases, mas a maioria dessas reações é tamponada pela presença de água, no entanto, reações imprevisíveis são possíveis com os compostos presentes.

No que diz respeito a umidade, está intimamente associada com a dispersão de nutrientes, enzimas e microrganismos no interior da célula de resíduos, facilitando

o ataque microbiológico aos compostos biologicamente degradáveis, o que proporciona uma maior geração de gás de aterro (MOREIRA, 2018).

Conforme Alcântara (2007) e Oliveira (2011), a umidade no interior do aterro sanitário pode variar em função das seguintes características: composição inicial, condições climáticas, procedimentos operacionais de coleta, manejo de impermeabilização do solo de cobertura e evolução do processo de decomposição química e microbiológica.

De acordo com Maciel (2003), a umidade de atividade máxima de microorganismos na geração do gás de aterro está entre 50 e 60%. Entretanto, Palmisano e Barlaz (1996) sugerem que o teor de umidade ótimo fica em torno de 20 a 40% para uma degradação eficiente dos resíduos sólidos aterrados.

Conforme a USACE (2008), o teor de umidade pode variar bastante em diferentes zonas do aterro. O teor de umidade muito baixo pode impedir a decomposição dos resíduos e, assim, limitar a produção de gás. Ainda segundo essa fonte, a precipitação afeta drasticamente o processo de geração de gás, fornecendo água ao processo e carregando oxigênio para o resíduo. Altas taxas de precipitação também podem inundar seções do aterro, o que obstruirá o fluxo de gás.

A maioria dos microrganismos absorvem mais alimentos com um pH próximo da neutralidade (MELO, 2001). As bactérias metanogênicas desenvolvem-se preferencialmente em um pH igual a 7,0 (KURBANOVA *et al.*, 2015). Abaixo de um pH 6,0 e acima de um pH 8,0 a atividade metanogênica é, na maioria dos casos, severamente afetada (GARDNER; PROBERT, 1993). Conforme USACE (2008), o melhor pH para a formação de metano está geralmente na faixa de 6,5 a 8,0²⁰.

Conforme Oliveira (2011) as características mais importantes da geometria do aterro para geração de gás de aterro são a altura da massa de lixo e o processo de impermeabilização da célula.

Quanto a idade dos resíduos sólidos, a geração de gás no aterro possui duas variáveis, sendo elas: a) tempo de atraso (retardo), que é o período que vai da disposição dos resíduos até o início da geração do metano; b) tempo de conversão, que é o período que vai da disposição dos resíduos até o final da geração do metano (BRITO FILHO, 2005, p.84).

Conforme a ATDRX (2001), os resíduos recentemente aterrados produzem uma maior quantidade de gás através de decomposição bacteriana, volatilização e

²⁰Um pH ácido pode mobilizar metais que são tóxicos para as bactérias que geram gás (USACE, 2008).

reações químicas que resíduos mais antigos, e o pico de produção de gás geralmente ocorre entre 5 e 7 anos após o aterramento.

Maciel (2003) classificou os fatores influentes em quatro categorias: a) geometria e operação do aterro, b) características iniciais dos resíduos, c) ambiente interno e d) ambiente externo ao aterro. Também influenciam o manejo aplicado sobre os resíduos, o tipo de drenagem interna e do topo, o material usado na cobertura e nas camadas intercaladas, o sistema de drenagem e tratamento de gás (MONTEIRO, 2016).

Além dos fatores mencionados, Cunha (2009) destaca outros que também influenciam na taxa de geração de gás de aterro: nutrientes, bactérias, densidade do resíduo, compactação dos resíduos e processamento de resíduos variáveis.

2.3 Sistemas de Captação e Aproveitamento dos Gases de Aterro Sanitário

A recuperação dos gases de aterros é uma das principais políticas e medidas para redução dos gases do efeito estufa (European Environment Agency - EEA, 2004), mas a correta projeção do volume dos gases só é possível a partir do monitoramento contínuo das variáveis que envolvem a construção e operação dos aterros sanitários.

O sistema de captação de gases mais comum é formado por poços verticais que evoluem em altura com o preenchimento do aterro sanitário. Nesse sistema, um tubo perfurado de PVC reforçado ou manilhas de concreto são envolvidas por britas nº4 contidas por tela metálica (SANTOS, 2012). Há a opção de se instalar poços de forma horizontal, sendo mais apropriados para aterros profundos e quando é preciso recuperar rapidamente seu gás (ATDRX, 2001). A instalação de poços horizontais tende a ser mais cara (JOHANNESSEN, 1999).

Conforme Lee; Han; Wang (2017), poços horizontais são geralmente instalados e usados para coletar gases nos estágios iniciais do desenvolvimento da célula, mesmo enquanto ainda aceitam resíduos. Os poços verticais geralmente são instalados e operados após a instalação das camadas de cobertura finais. A eficiência da coleta dos poços verticais é normalmente mais alta em comparação aos horizontais. Ainda segundo os autores, a eficiência da coleta também pode ser influenciada pela velocidade de decomposição dos resíduos. Se a decomposição for muito rápida, as emissões de CH₄ podem ocorrer antes da instalação e operação dos

poços. Se a velocidade da decomposição dos resíduos for muito lenta, haverá um grande atraso no aproveitamento.

A United States Environmental Protection Agency - USEPA (2017) descreve as vantagens e desvantagens de cada tipo de poço:

Poço Vertical: vantagens (interrupção mínima nas operações de aterro, *design* mais comum, confiável e acessível para inspeção e bombeamento), desvantagens (maior necessidade de manutenção, exige máquinas adequadas para instalação, coleta atrasada de gás se instalado após o fechamento do local).

Poço Horizontal: vantagens (facilita a coleta antecipada do gás do aterro, não necessita de equipamentos de construção específicos, permite a extração de gás por baixo de uma área ativa), desvantagens: (probabilidade maior de intrusão de ar até estar suficientemente coberto, maiores chances de falhas por causa de inundações ou recalques).

Os poços verticais são frequentemente recomendados para aterros ou partes de aterros que excedem 12m de profundidade (USACE, 2008). Conforme Chen; Chen; Wu (2003), a profundidade de um poço vertical geralmente varia de 50 a 90% da profundidade do aterro. Já os poços horizontais devem ser implantados por meio de valas escavadas na camada de cobertura (ATDRX, 2001).

Hu *et al.* (2020) ressaltam que os papéis dos poços horizontais e verticais são complementares, e o uso das duas alternativas é muito mais eficaz em um aterro sanitário.

O sistema de drenagem instalado no interior da massa de lixo tem como finalidade aliviar as pressões internas do aterro, além de coletar o gás para sua posterior queima²¹ ou aproveitamento como combustível (OLIVEIRA, 2011) ou geração de eletricidade (USEPA, 2005).

Segundo a USACE (2008) e a ISWA (2010), os sistemas de coleta de gases instalados em aterros sanitários são projetados para serem passivos ou ativos. No sistema passivo²² o gás é coletado sem assistência mecânica enquanto o sistema ativo²³ usa “sopradores” para extrair os gases, ou seja, uma espécie de “ventilador de

²¹Obladen, Obladen e Barros (2009) recomendam a instalação de poços a cada 50 a 100 metros e, nas extremidades desses poços, devem ser instalados queimadores de gases, com a finalidade de evitar maus odores.

²²No sistema passivo é o gradiente de pressão criado pela geração de gás dentro do aterro que “move” o gás em direção a um poço [...] mas esse sistema pode ser mais adequado para controlar a migração de gases em aterros menores ou mais antigos (ISWA, 2010).

extração” que cria vácuo dentro do aterro para retirar o gás através de uma rede de poços e tubulações.

Qualquer que seja o método utilizado, o projetista deve garantir a coleta de gás em toda a área do aterro, impedir a migração para fora do local (USACE, 2008) e o quantitativo e espaçamento dos poços dependem das características de cada aterro: volume, densidade, profundidade e área dos resíduos (ATDRX, 2001). Depende também dos gradientes de pressão criados pelos “sopradores” e do teor de umidade do gás (Environmental Protection Agency - EPA, 1991).

De acordo com Ensinas (2003), o sistema passivo tem como finalidade maior drenar os gases para a atmosfera, controlando o risco de explosão, enquanto o sistema ativo é usado para projetos de aproveitamento energético do gás de aterro, e o aterro tem que ser coberto com um material impermeável para evitar que o gás saia na superfície e que o oxigênio entre no sistema. Segundo o autor, a área de influência dos dois tipos de drenagem se difere, sendo que o sistema ativo consegue influenciar uma área maior, pois funciona sob pressão.

A capacidade do poço em extrair o gás de aterro no sistema passivo está limitada a uma pequena área ao redor do poço e sua capacidade de coleta decai rapidamente com o aumento da distância entre poços. Quando a distância é maior que 20m a pressão horizontal fica constante e isso sugere uma alta proporção de gás que poderá fugir pela camada de cobertura (CHEN; CHEN; WU, 2003).

Conforme Silva (2006), na drenagem passiva a eficiência de captação do gás de aterro produzido em todo o aterro varia de 5 a 20% devido a área de influência do poço ser menor. Já na drenagem ativa a eficiência pode chegar a 99%.

Conforme Silva, Freitas e Candiani (2013), devido às infraestruturas, recursos financeiros e as condições operacionais dos aterros sanitários brasileiros, as menores taxas de eficiência em relação à captação dos gases ocorrem nas fases iniciais, em virtude de muitos aterros começarem as operações sem a instalação adequada do sistema de captação do gás de aterro.

²³Conforme a United States Environmental Protection Agency - USEPA (2017), na modalidade ativa, cada poço é conectado a uma tubulação secundária que transporta o gás para uma rede principal, onde um cabeçote, adequadamente projetado, permite que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás, se necessário. Além disso, esses sistemas são projetados para garantir a operação contínua da planta de aproveitamento, podendo incluir poços extras de coleta de gás em caso de falhas (ATDRX, 2001).

Para Santos *et al.* (2019), a pressão necessária para extrair os gases do interior do aterro sanitário depende de muitos fatores: distância entre o aterro e a planta de aproveitamento (que influencia na perda de carga e em alterações na qualidade dos gases), espaçamento entre os poços, tipo de drenagem (vertical ou horizontal), qualidade do sistema de impermeabilização do aterro, concentração e volume dos gases.

Nos sistemas ativos, uma pressão inadequada pode gerar explosões em qualquer ponto do sistema (TERRAZA; WILLUMSEN, 2009), aumentar custos com energia elétrica, captar maiores teores de contaminantes (oxigênio, nitrogênio, umidade) ou mesmo subutilizar a planta de aproveitamento energético. Alterações na pressão influenciam diretamente o fluxo de oxigênio na superfície e dentro do aterro sanitário, portanto, alteram o desempenho do sistema (RANNAUD; CABRAL; ALLAIRE, 2009).

Conforme Santos *et al.* (2019), para compor o sistema de captação do metano em aterros são necessários materiais resistentes, impermeáveis e flexíveis. É importante, ainda, determinar com precisão a profundidade de instalação, inclinação e proteção mecânica de cada poço, além da escolha precisa da pressão de sucção.

Os principais desafios da exploração do gás metano de aterros sanitários estão relacionados à capacidade de produção e recuperação, à impossibilidade de um real controle dos parâmetros, como: pH, potencial redox, umidade, temperatura e teor de sólidos voláteis e à presença de substâncias inibidoras do processo biológico na massa de lixo (MELO, 2001, p.27-28).

Para Marques Junior (2020), a eficiência de um sistema de coleta e recuperação de gás de aterro depende de quantificar com precisão a taxa e o volume de metano gerado nos aterros sanitários. A quantificação dessas emissões é uma tarefa desafiadora, devido às variações de emissões espaciais e temporais (SCHEUTZ; KJELDSEN, 2019). Cabe destacar que uma considerável parte dos gases produzidos escapa para a atmosfera através da camada de solo que cobre os resíduos (MARTINES, 2015). Enquanto o gás de aterro passa pela camada de cobertura do aterro, uma porção de CH₄ não coletado oxida em CO₂ (LEE; HAN; WANG, 2017).

Conforme a ATDRX (2001), em um aterro sanitário, os gases tendem a migrar pelos poros do maciço e da cobertura do aterro, sendo que o movimento ascendente do gás pode ser inibido por resíduos densamente compactados ou material de

cobertura adequado. Quando isto ocorre, o gás tende a migrar horizontalmente para outras áreas dentro do aterro ou para áreas fora do aterro buscando retomar seu caminho ascendente.

Conforme a USACE (2008), o transporte de gás dentro do aterro ocorre por dois mecanismos principais: difusão (uma diferença de concentração entre dois locais) e advecção (gradiente de pressão). Afetam esses mecanismos: a permeabilidade dos resíduos, as condições geológicas (estratos permeáveis), profundidade da água subterrânea, recursos artificiais, sistemas de revestimento e pressão barométrica (USACE, 2008).

A direção, velocidade e distância da migração do gás no aterro dependem de vários fatores: tipo de cobertura do aterro, caminhos naturais e artificiais, velocidade e direção do vento, umidade, temperatura (ATDRX, 2001).

O controle sobre o gás de aterro evita a poluição do ar, cumpre os critérios regulatórios, reduz os riscos advindos da migração para fora do local, evita danos à estabilidade da cobertura do aterro, reduz o odor, recupera a energia e evita problemas com a vegetação (USACE, 2008).

O potencial de aquecimento global dos gases de aterro, justifica a importância de se prevenir emissões descontroladas para atmosfera e, embora a maior parte da concentração de CH₄ e CO₂ seja gerada durante 20 anos após a conclusão do aterro, as emissões podem continuar por mais de 50 anos (POPOV, 2005).

Conforme Majdinasab; Yuan (2017), o período de persistência do gás CH₄ na atmosfera é de aproximadamente 12 anos em comparação ao CO₂ (172 anos), no entanto, a capacidade que o CH₄ tem de reter radiação é muito maior. Por isso, as normas americanas exigem que os sistemas de coleta de gás sejam instalados nos aterros sanitários nos primeiros anos após a instalação da cobertura final sobre as células de resíduos ou em até 5 anos após a última descarga.

Os aterros sanitários representam não apenas uma fonte de gás de aterro, mas também uma grande fonte de energia térmica em função do calor gerado por processos físicos, químicos e microbiológicos (FAITLI *et al.*, 2014).

É importante que seu gás seja extraído para reduzir a pressão dentro do aterro e seja queimado (alternativa mais simples) ou usado de forma econômica (POPOV, 2005).

Cada tecnologia de utilização, conforme Niskanen *et al.* (2013) define seus próprios requisitos para a quantidade e qualidade do gás de aterro. Além disso, a tecnologia de utilização deve ser adaptável à infraestrutura existente (exemplo: a geração de calor requer uma rede urbana ou industrial próxima ao aterro, pois o transporte de longa distância do gás coletado não é viável).

Cabe lembrar que nem todos os poços em um aterro possuem teor suficientemente alto de CH₄ para serem utilizados para fins energéticos (DESIDERI *et al.*, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 A área estudada

Esta pesquisa foi realizada no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), Região Metropolitana de Fortaleza, que dista 30 Km, pelas BR-222 ou BR-020, de Fortaleza-CE. A Figura 1 mostra o município de Caucaia e a localização da área do aterro.

Figura 1 - Localização do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-CE.



Fonte: Google Maps, adaptado pela autora (2020).

O aterro recebe cerca de 5 (cinco) mil toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por dia e encontra-se em fase final de operação. A área total do ASMOC equivale a 123,20 hectares e a célula estudada, chamada de Lateral E (Figura 2), possui uma área de 9,3 hectares e altura média de 60m.

Os poços horizontais monitorados alcançam resíduos mais novos (≤ 05 anos, provavelmente) enquanto os poços verticais perfuram resíduos de diferentes camadas e idades. O ASMOC começou a operar em 1991 com os resíduos de Caucaia e em 1998 recebendo os resíduos de Fortaleza.

Figura 2 - Identificação da Lateral E, área de estudo da pesquisa.



Fonte: Google Maps, adaptado pela autora (2020)

No aterro sanitário há um conjunto de poços (verticais e horizontais) interligados a um sistema de bombeamento/sucção que extrai e envia para purificação do metano (aproximadamente 6.000 m³/hora). Conforme a equipe da GNR Fortaleza (empresa responsável pela planta de aproveitamento do metano) os poços horizontais possuem 60 metros de comprimento e são de PEAD de 160mm de diâmetro. Já os poços verticais possuem altura variável (entre 28 e 32m).

3.2 Etapas da pesquisa

A pesquisa foi dividida em três etapas, conforme mostra o Quadro a seguir.

Quadro 1 - Etapas da metodologia aplicada na pesquisa.

Etapas	Descrição
1^a	Buscas e leituras de arquivos nacionais e internacionais
2^a	Visitas técnicas ao ASMOC e campanhas de campo
3^a	Tratamento, interpretação e discussão dos dados

Fonte: autora (2020).

A primeira etapa correspondeu a uma vasta busca e leitura de arquivos (artigos, monografias, dissertações, teses, relatórios, leis, decretos, normas etc.) nacionais e internacionais sobre gases em aterros sanitários com o intuito de obter um melhor embasamento sobre o tema da pesquisa.

A segunda etapa compreendeu as visitas técnicas e campanhas de campo. Em reunião inicial, realizada em abril de 2019, foram selecionados para a pesquisa, pelos próprios técnicos que operam a planta de aproveitamento de gás, 06 poços pertencentes a Lateral “E” do ASMOC em função dos recentes problemas que apresentaram na vazão e qualidade dos gases. Foram escolhidos 02 poços verticais de PEAD, 02 poços verticais de concreto e 02 poços horizontais de PEAD (Figura 3).

O monitoramento iniciou em maio de 2019 e se encerrou em março de 2020, sempre no turno da manhã, totalizando 12 campanhas de campo com intervalo de tempo mínimo de 15 dias.

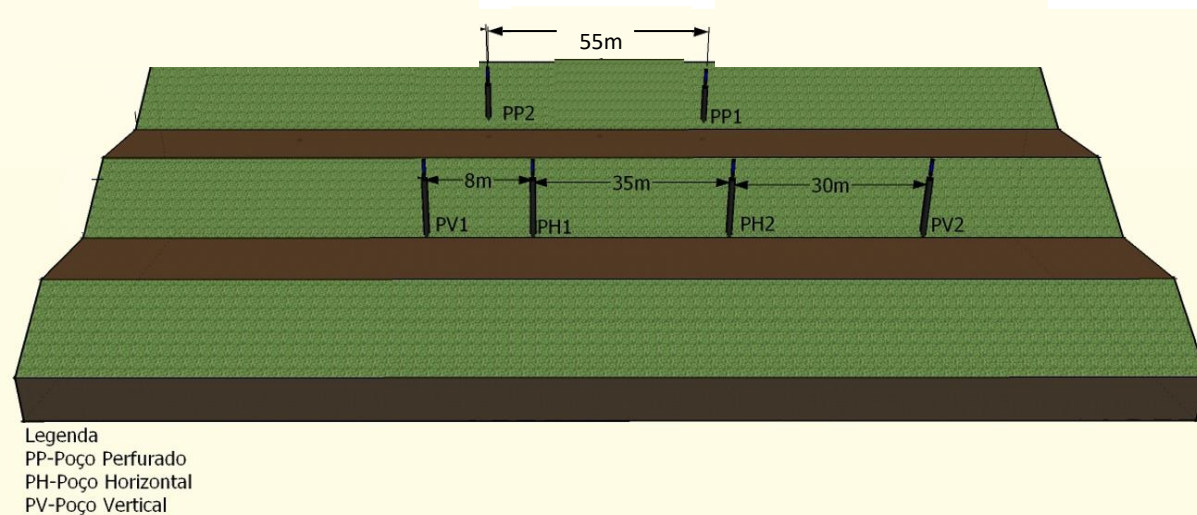
Figura 3 - Poços analisados na pesquisa de campo.



Fonte: autora (2020).

Na Figura 4 observa-se a distribuição dos poços monitorados, onde a distância entre os Poços Perfurados (PP's) foi de 55m, entre os Poços Verticais (PV's) foi de 73m e os entre Poços Horizontais (PH's) foi de 35m.

Figura 4 - Distribuição dos Pocos na Lateral E do ASMOC.



Fonte: autora (2020).

Cada poço possui um cabeçote com 3 saídas do tipo “engate rápido”, que foram interligadas ao Leitor de Gás GEM5000 (Figura 5). Para leitura das concentrações de metano (%), oxigênio (%), dióxido de carbono (%), outros gases (%), temperatura (°C), pressão (mb) e o fluxo de gases (m³/h) foi realizado inicialmente a calibração do GEM5000 e conexão do equipamento ao cabeçote do poço.

Figura 5 - Leitor de gás GEM5000.

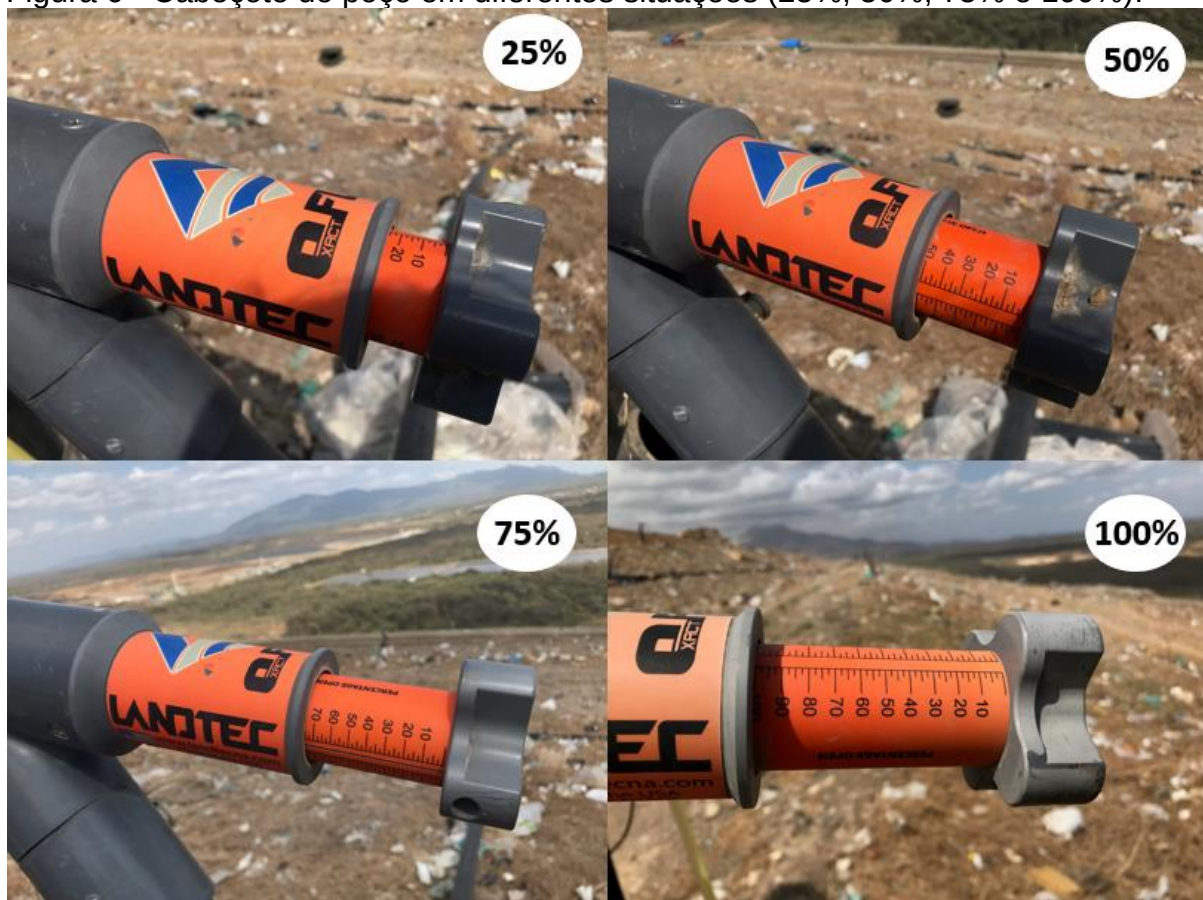


Fonte: autora (2020).

O princípio de detecção do metano e do gás carbônico é baseado na capacidade que esses gases têm de absorver radiação eletromagnética na faixa do infravermelho. Já a detecção do oxigênio é feita mediante célula eletroquímica interna. O equipamento é capaz de realizar medições de 0 a 100% (% em volume) de CH₄ e CO₂, com precisão típica de $\pm 0,3\%$ para concentrações até 5%, de $\pm 1\%$ para concentrações entre 5 e 15% e de $\pm 3\%$ para concentrações maiores que 15%. Para o oxigênio, a faixa de leitura varia entre 0 e 25% com uma precisão de $\pm 1\%$.

Em cada poço, foram realizados ajustes e testes na pressão de sucção para determinar as melhores condições de captação de metano (m³/h) sob 04 diferentes situações: com a válvula do cabeçote 25% aberta, 50, 75 e 100% (Figura 6). A leitura da concentração ocorreu durante 120 segundos em cada uma das 4 posições da válvula e, entre as leituras, foi realizado uma “purga” de 15 segundos no equipamento para limpeza, conforme metodologia aplicada em Santos *et al.* (2019).

Figura 6 - Cabeçote do poço em diferentes situações (25%, 50%, 75% e 100%).



Fonte: autora (2020).

Na terceira etapa, foram realizadas as tabulações dos dados obtidos nas campanhas de campo em planilhas de Excel. Os dados foram transformados em gráficos e tabelas para melhor compreensão dos resultados. A análise dos dados foi feita considerando o comportamento da pressão *versus* composição dos gases, com novo debate na literatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Apresentação

4.1.1 Poço Perfurado 1

No PP1, a pressão média variou entre -2,06 e -4,94mb. As maiores variações na pressão ocorreram com a válvula 100% aberta (desvio padrão: 1,77). Os gases captados por esse poço apresentaram entre 56,45 e 57,64% de CH₄, 39,01 e 39,86% de CO₂, 3,08 e 3,39% de Outros Gases (OG) e entre 0,26 e 0,31% de O₂.

As maiores variações na concentração de CH₄, OG e O₂ ocorreram com a válvula 100% aberta (desvio padrão: 1,93/1,77/0,10, respectivamente). Para o CO₂, as maiores variações ocorreram com a válvula 50% aberta (desvio padrão: 1,21). A temperatura média variou entre 47,94 e 50,92°C.

A Tabela 1 apresenta a porcentagem de alteração (aumento ou redução) da composição dos gases e da pressão para cada mudança na abertura da válvula realizada durante as campanhas de campo: 1ª mudança (de 25 para 50%), 2ª (de 50 para 75%) e a 3ª (75 para 100%).

A concentração de CH₄ diminuiu com maior intensidade no terceiro ajuste (ou seja, passagem da válvula de 75 para 100%), quando a diferença nas médias alcançou 1,22%. Foi também no terceiro ajuste que as concentrações de CO₂ e OG mais cresceram (1,30 e 5,51%). Já a concentração de O₂ aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (25 → 50): diferença nas médias de 6,01%. Em linhas gerais, cada gás teve um comportamento particular conforme a pressão no sistema.

A pressão de bombeamento e a concentração dos quatro componentes principais do gás variaram ao longo do monitoramento (ou seja, da 1ª para a 12ª campanha) bem como de acordo com os sucessivos ajustes na abertura da válvula do cabeçote, como mostra a Tabela 2.

Os dados da Tabela 2 indicam que a pressão aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (ou seja, passagem da abertura da válvula de 25 para 50%), quando a diferença nas médias alcançou 58,76%.

A concentração de três componentes (CO₂, OG e O₂) aumentou com o crescimento da pressão de bombeamento, enquanto a concentração de CH₄ diminuiu (ou seja, houve uma piora na qualidade).

Tabela 1 - Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PP1.

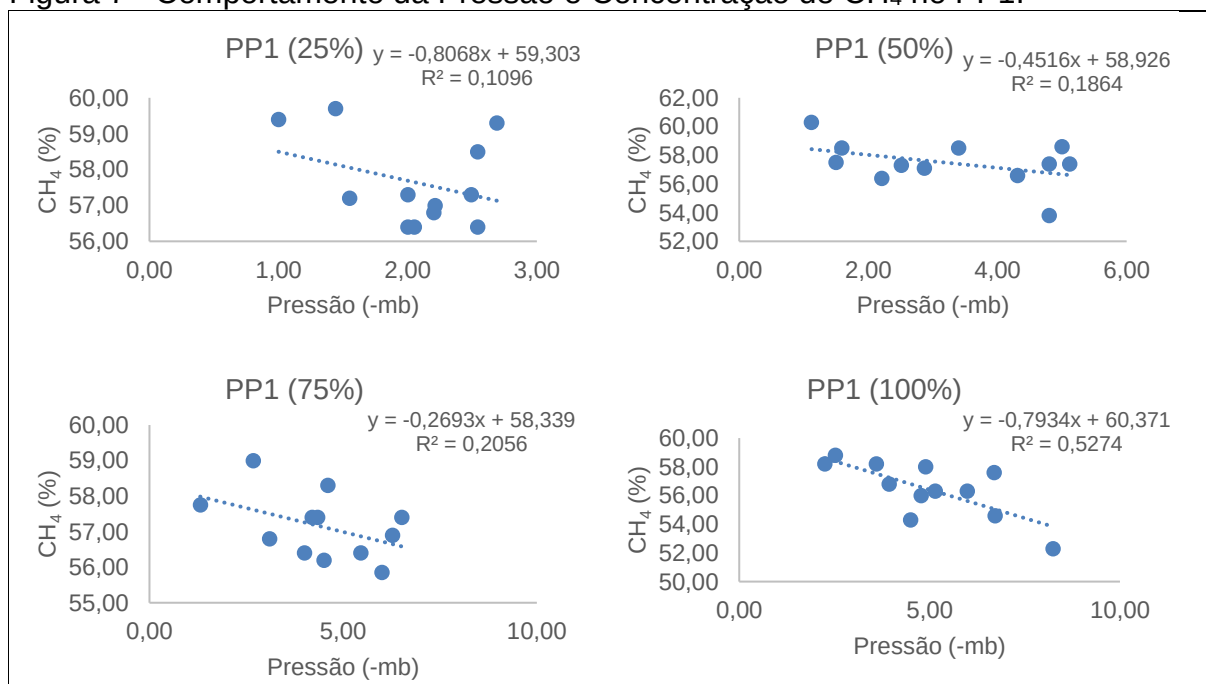
Poço	Variável	1º ajuste (25 para 50%)	2º ajuste (50 para 75%)	3º ajuste (75 para 100%)
PP1	P	58,76%	35,00%	11,97%
	M	-0,33%	-0,52%	-1,22%
	D	0,34%	0,52%	1,30%
	OG	1,44%	2,58%	5,51%
	O	6,01%	5,07%	3,98%

Legenda: P (Pressão), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio).

Fonte: autora (2020).

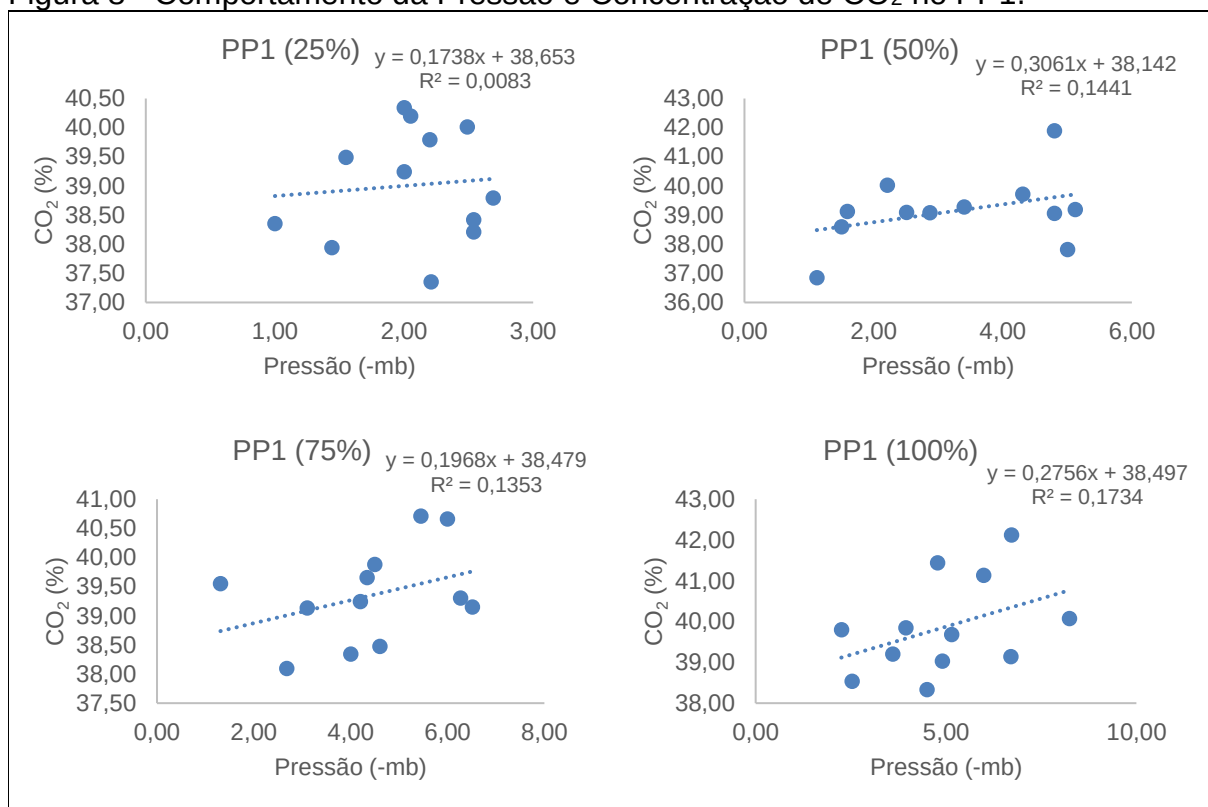
A Figura 7 mostra o comportamento da pressão de bombeamento e da concentração de CH₄ no PP1 ao longo das 12 campanhas. Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%) as equações das linhas de regressão e os coeficientes de correlação mostraram uma relação inversa entre esses dois parâmetros, ou seja, quanto maior a pressão, menor a concentração de CH₄. Já as Figuras 8 a 10 mostram o comportamento dos demais componentes (CO₂, OG e O₂) e sua relação direta com a pressão (↑ pressão, ↑ concentração).

Figura 7 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH₄ no PP1.



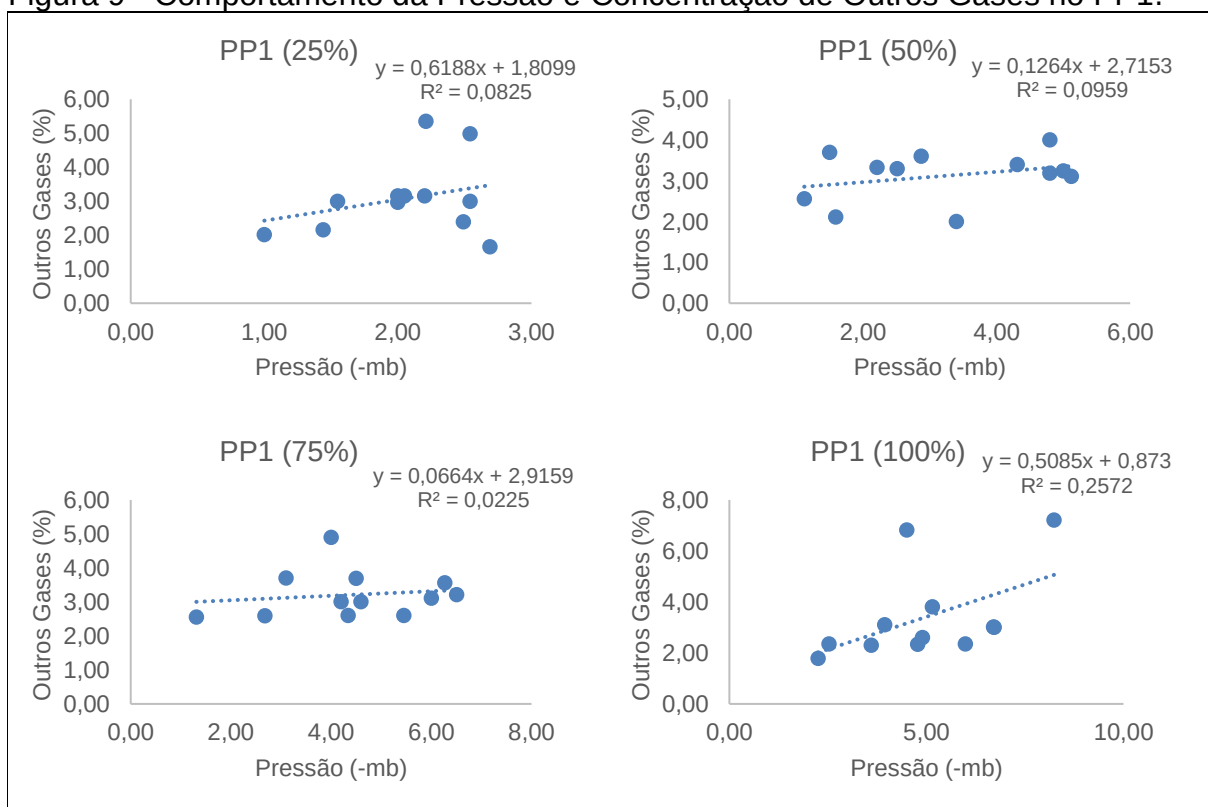
Fonte: autora (2020).

Figura 8 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO₂ no PP1.



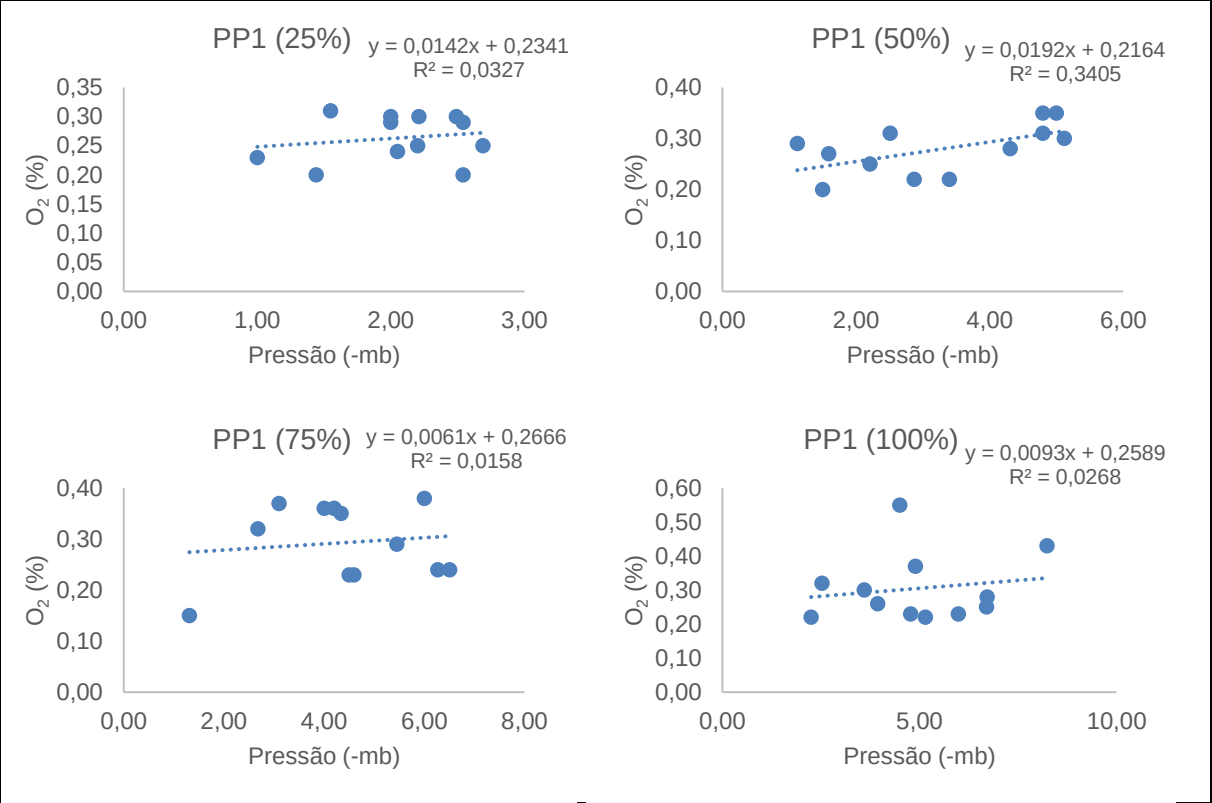
Fonte: autora (2020).

Figura 9 - Comportamento da Pressão e Concentração de Outros Gases no PP1.



Fonte: autora (2020).

Figura 10 - Comportamento da Pressão e Concentração de O₂ no PP1.



Fonte: autora (2020).

Tabela 2 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PP1.

C	Válvula 25% Aberta						Válvula 50% Aberta						Válvula 75% Aberta						Válvula 100% Aberta					
	P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)			
			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O
1	1,00	46,40	59,40	38,35	2,02	0,23	1,59	47,80	58,50	39,12	2,11	0,27	1,31	47,00	57,75	39,55	2,55	0,15	2,25	48,00	58,20	39,80	1,78	0,22
2	1,44	48,50	59,70	37,94	2,16	0,20	1,12	47,90	60,30	36,85	2,56	0,29	2,68	48,90	59,00	38,09	2,59	0,32	2,53	48,90	58,80	38,53	2,35	0,32
3	2,00	49,80	56,40	40,34	2,97	0,29	2,21	50,10	56,40	40,02	3,33	0,25	4,50	50,10	56,20	39,88	3,69	0,23	4,78	49,00	56,00	41,44	2,33	0,23
4	1,55	43,69	57,20	39,49	3,00	0,31	1,50	51,00	57,50	38,60	3,70	0,20	4,20	51,00	57,40	39,24	3,00	0,36	3,60	51,00	58,20	39,20	2,30	0,30
5	2,00	45,12	57,30	39,24	3,16	0,30	2,87	50,30	57,10	39,08	3,60	0,22	3,10	50,40	56,80	39,13	3,70	0,37	3,94	50,30	56,80	39,84	3,10	0,26
6	2,49	41,11	57,30	40,01	2,39	0,30	2,51	50,30	57,30	39,09	3,30	0,31	6,27	50,40	56,90	39,30	3,56	0,24	6,70	50,40	57,60	39,14	3,01	0,25
7	2,69	49,10	59,30	38,79	1,66	0,25	3,40	49,70	58,50	39,28	2,00	0,22	4,60	49,80	58,30	38,47	3,00	0,23	4,90	49,80	58,00	39,03	2,60	0,37
8	2,20	51,40	56,80	39,79	3,16	0,25	4,31	51,60	56,60	39,72	3,40	0,28	5,45	51,60	56,40	40,71	2,60	0,29	5,99	51,70	56,30	41,13	2,34	0,23
9	2,54	50,00	56,40	38,42	4,98	0,20	4,80	51,70	53,80	41,89	4,00	0,31	6,00	51,70	55,85	40,66	3,11	0,38	6,72	51,70	54,60	42,12	3,00	0,28
10	2,21	51,30	57,00	37,35	5,35	0,30	5,12	60,30	57,40	39,19	3,11	0,30	6,51	52,10	57,40	39,15	3,21	0,24	5,15	52,20	56,30	39,68	3,80	0,22
11	2,05	50,80	56,40	40,20	3,16	0,24	4,80	51,40	57,40	39,06	3,19	0,35	4,34	50,60	57,40	39,65	2,60	0,35	8,24	51,70	52,30	40,07	7,20	0,43
12	2,54	48,10	58,50	38,21	3,00	0,29	5,00	48,90	58,60	37,81	3,24	0,35	4,00	50,30	56,40	38,34	4,90	0,36	4,50	49,40	54,30	38,33	6,82	0,55
Média	2,06	47,94	57,64	39,01	3,08	0,26	3,27	50,92	57,45	39,14	3,13	0,28	4,41	50,33	57,15	39,35	3,21	0,29	4,94	50,34	56,45	39,86	3,39	0,31
DP	0,51	3,25	1,24	0,97	1,10	0,04	1,50	3,24	1,57	1,21	0,61	0,05	1,54	1,37	0,91	0,82	0,68	0,07	1,77	1,35	1,93	1,17	1,77	0,10

Legenda: C (Campanha), P (Pressão -mb), T (Temperatura °C), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão).

Valores arredondados pelo Excel

Fonte: autora (2020).

4.1.2 Poço Perfurado 2

No PP2, a pressão média variou entre -2,18 e -5,06mb. As maiores variações na pressão ocorreram com a válvula 100% aberta (desvio padrão: 1,47).

Os gases captados por esse poço, apresentaram entre 58,27 e 58,66% de CH₄, 38,88 e 38,93% de CO₂, 2,15 e 2,56% de OG e entre 0,27 e 0,30% de O₂.

As maiores variações na concentração dos quatro componentes principais do gás ocorreram com a válvula 100% aberta (desvio padrão: 0,85/CH₄, 1,25/CO₂, 1,23/OG e 0,12/O₂). A temperatura média variou entre 42,77 e 43,90°C.

A Tabela 3 apresenta a porcentagem de alteração (aumento ou redução) da composição dos gases e da pressão para cada mudança da abertura da válvula realizadas durante as campanhas de campo, 1ª (25 para 50%), 2ª (50 para 75%) e a 3ª (75 para 100%).

A concentração de CH₄ diminuiu com maior intensidade no segundo ajuste (50 → 75) quando a diferença nas médias alcançou 0,27%. Para o CO₂ esse comportamento ocorreu no terceiro ajuste (75 → 100): diferença entre as médias 0,09%.

Foi também no terceiro ajuste que a concentração de O₂ mais cresceu (9,39%). Para OG esse comportamento ocorreu no primeiro ajuste (25 → 50): diferença entre as médias de 6,55%.

Da mesma forma que no PP1, a pressão de bombeamento e a concentração dos quatro gases variaram ao longo do monitoramento (ou seja, da 1ª para a 12ª campanha) bem como de acordo com os sucessivos ajustes na abertura da válvula do cabeçote, como mostra a Tabela 4.

Os dados da Tabela 4 indicam ainda que a pressão aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (25 → 50), quando a diferença nas médias alcançou 78,02%.

A concentração de dois componentes (OG e O₂) aumentou com o crescimento da pressão de bombeamento, enquanto a concentração de CH₄ e CO₂ diminuiu.

Tabela 3 - Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PP2.

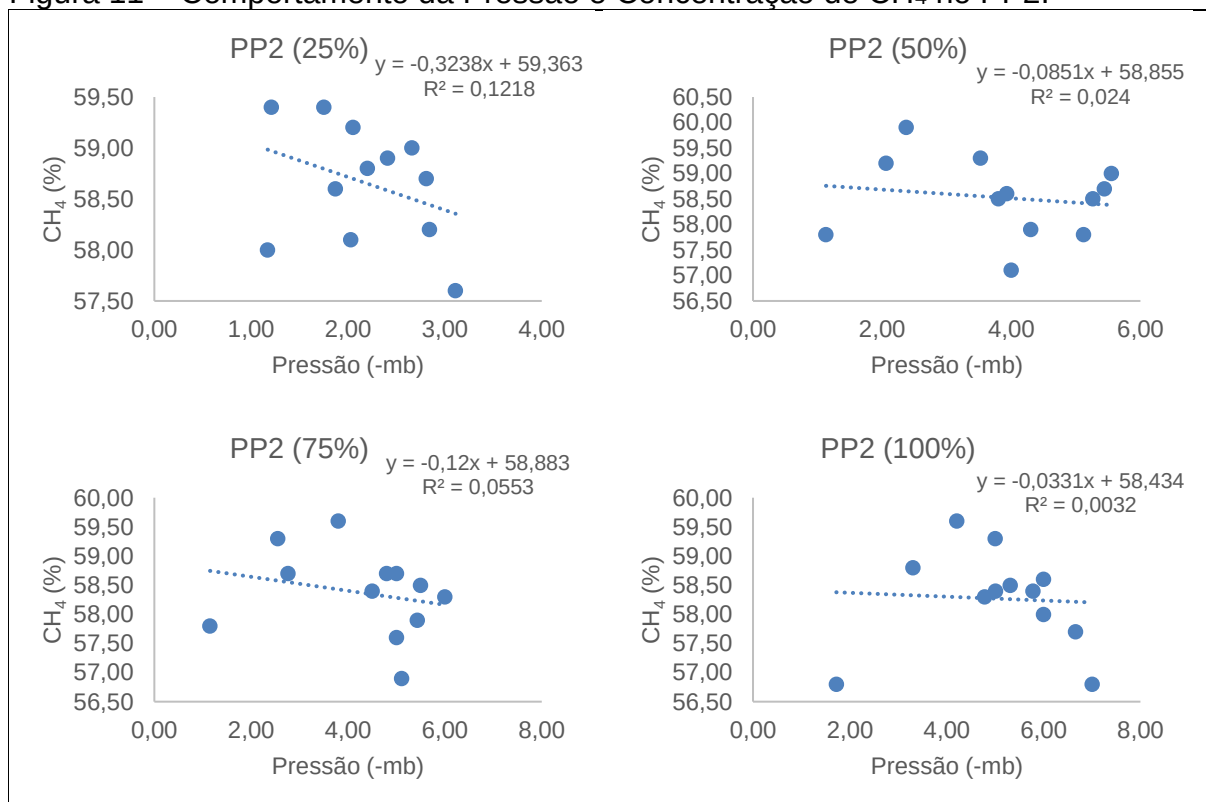
Poço	Variável	1º ajuste (25 para 50%)	2º ajuste (50 para 75%)	3º ajuste (75 para 100%)
PP2	P	78,02%	11,02%	17,77%
	M	-0,23%	-0,27%	-0,17%
	D	-0,02%	-0,01%	-0,09%
	OG	6,55%	6,76%	4,52%
	O	0,31%	3,45%	9,39%

Legenda: P (Pressão), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio).

Fonte: autora (2020).

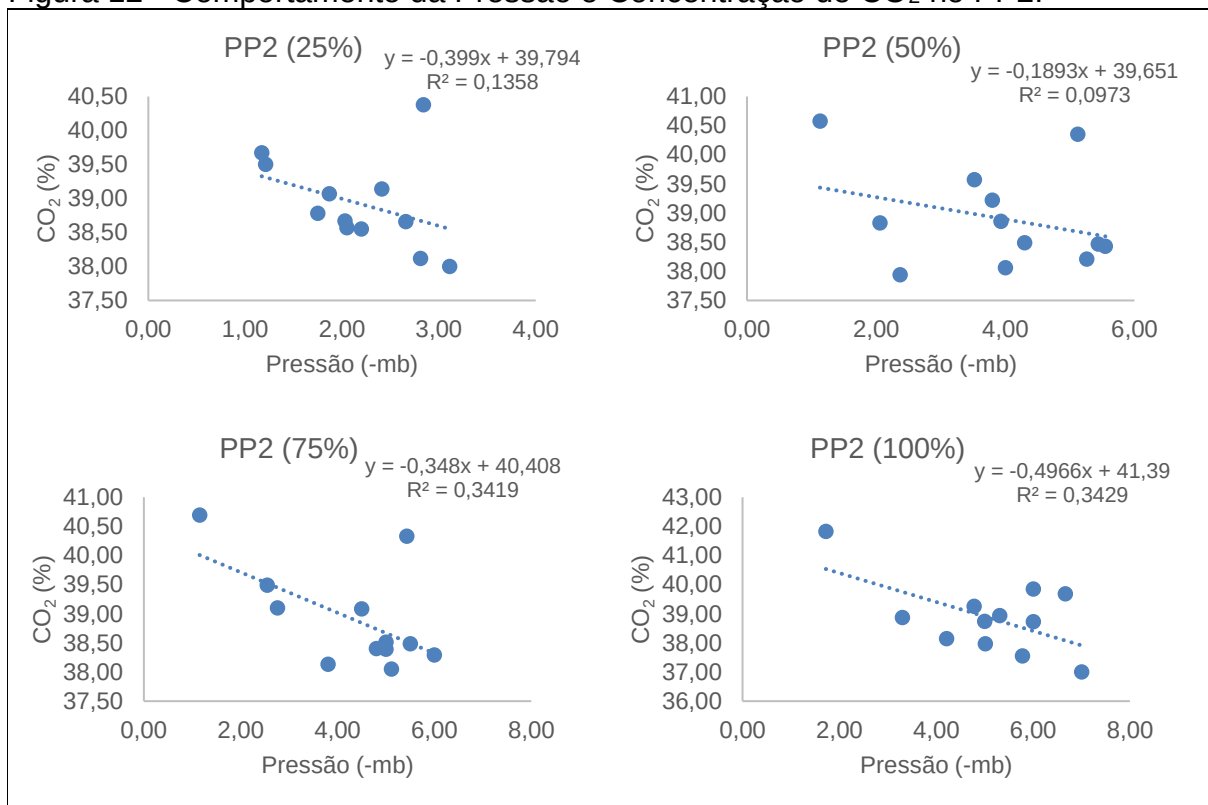
As Figuras 11 e 12 mostram o comportamento da pressão de bombeamento e da concentração de CH₄ e CO₂ (no PP2) conforme a abertura da válvula do cabeçote ao longo das 12 campanhas. Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%), as equações das linhas de regressão e os coeficientes de correlação mostraram uma relação inversa entre esses parâmetros, ou seja, quanto maior a pressão, menor a concentração de CH₄ (semelhante ao PP1) e de CO₂. Já as Figuras 13 e 14 mostram o comportamento dos demais componentes (OG e O₂) e sua relação direta com a pressão (↑ pressão, ↑ concentração).

Figura 11 – Comportamento da Pressão e Concentração de CH₄ no PP2.



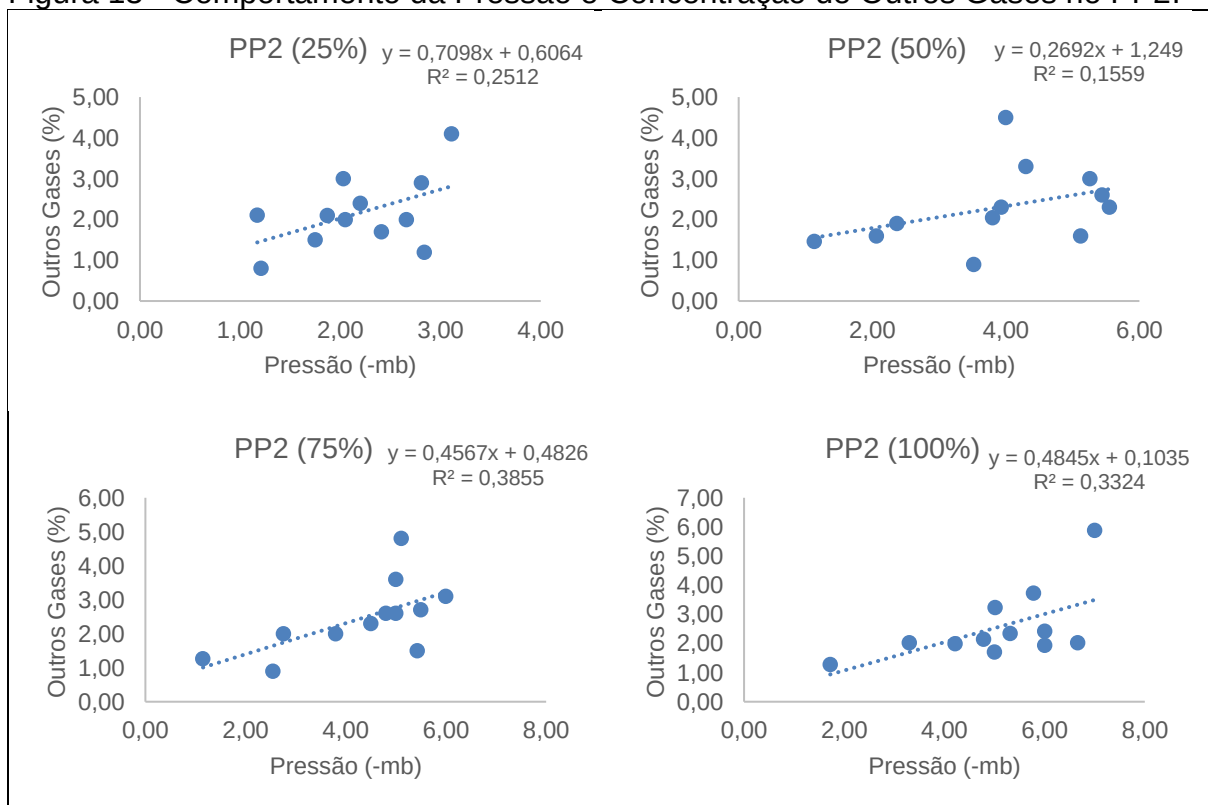
Fonte: autora (2020).

Figura 12 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO₂ no PP2.



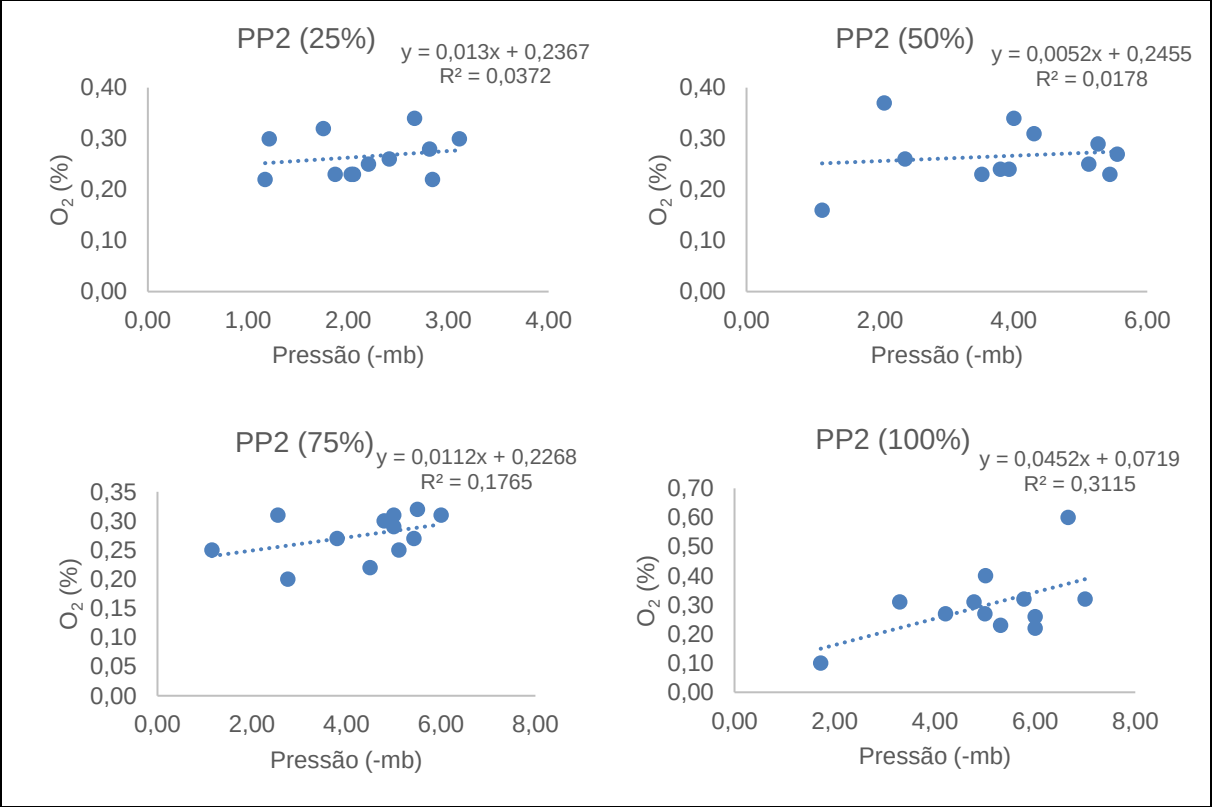
Fonte: autora (2020).

Figura 13 - Comportamento da Pressão e Concentração de Outros Gases no PP2.



Fonte: autora (2020).

Figura 14 - Comportamento da Pressão e Concentração de O₂ no PP2.



Fonte: autora (2020).

Tabela 4 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PP2.

C	Válvula 25% Aberta						Válvula 50% Aberta						Válvula 75% Aberta						Válvula 100% Aberta					
	P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)			
			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O
1	1,17	43,50	58,00	39,67	2,11	0,22	1,13	40,80	57,80	40,58	1,46	0,16	1,15	40,90	57,80	40,69	1,26	0,25	1,72	38,00	56,80	41,82	1,28	0,10
2	1,75	43,70	59,40	38,78	1,50	0,32	2,06	48,40	59,20	38,83	1,60	0,37	2,76	47,40	58,70	39,10	2,00	0,20	3,30	46,30	58,80	38,87	2,02	0,31
3	1,87	38,10	58,60	39,07	2,10	0,23	3,80	42,50	58,50	39,22	2,04	0,24	4,50	42,60	58,40	39,08	2,30	0,22	4,78	42,90	58,30	39,25	2,14	0,31
4	1,21	40,70	59,40	39,50	0,80	0,30	3,52	41,60	59,30	39,57	0,90	0,23	2,55	41,80	59,30	39,49	0,90	0,31	5,00	42,10	59,30	38,73	1,70	0,27
5	2,41	40,20	58,90	39,14	1,70	0,26	2,37	41,60	59,90	37,94	1,90	0,26	3,80	41,70	59,60	38,13	2,00	0,27	4,21	41,90	59,60	38,14	1,99	0,27
6	2,20	42,60	58,80	38,55	2,40	0,25	5,44	43,60	58,70	38,47	2,60	0,23	4,80	43,70	58,70	38,40	2,60	0,30	6,00	43,80	58,00	39,84	1,94	0,22
7	2,66	43,02	59,00	38,66	2,00	0,34	3,93	43,70	58,60	38,86	2,30	0,24	5,50	43,70	58,50	38,48	2,70	0,32	5,31	43,80	58,50	38,93	2,34	0,23
8	2,05	43,40	59,20	38,57	2,00	0,23	5,55	44,40	59,00	38,43	2,30	0,27	5,00	44,60	58,70	38,39	2,60	0,31	6,00	46,90	58,60	38,72	2,42	0,26
9	2,81	44,90	58,70	38,12	2,90	0,28	5,26	44,80	58,50	38,21	3,00	0,29	6,00	45,10	58,30	38,29	3,10	0,31	5,01	45,40	58,40	37,97	3,23	0,40
10	2,84	48,20	58,20	40,38	1,20	0,22	5,12	44,30	57,80	40,35	1,60	0,25	5,43	44,70	57,90	40,33	1,50	0,27	6,66	46,90	57,70	39,68	2,02	0,60
11	2,03	43,10	58,10	38,67	3,00	0,23	4,30	39,30	57,90	38,49	3,30	0,31	5,00	40,30	57,60	38,51	3,60	0,29	5,78	37,40	58,40	37,55	3,73	0,32
12	3,11	41,80	57,60	38,00	4,10	0,30	4,00	48,40	57,10	38,06	4,50	0,34	5,11	48,50	56,90	38,05	4,80	0,25	7,00	51,40	56,80	37,00	5,88	0,32
Média	2,18	42,77	58,66	38,93	2,15	0,27	3,87	43,62	58,53	38,92	2,29	0,27	4,30	43,75	58,37	38,91	2,45	0,28	5,06	43,90	58,27	38,88	2,56	0,30
DP	0,62	2,52	0,58	0,67	0,88	0,04	1,42	2,77	0,78	0,86	0,97	0,06	1,45	2,50	0,74	0,86	1,07	0,04	1,47	3,90	0,85	1,25	1,23	0,12

Legenda: C (Campanha), P (Pressão -mb), T (Temperatura °C), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão).

Valores arredondados pelo Excel

Fonte: autora (2020).

4.1.3 Poço Vertical 1

No PV1, a pressão média variou entre -1,60 e -4,51mb. As maiores variações na pressão ocorreram com a válvula 100% aberta (desvio padrão: 2,06).

Os gases captados por esse poço, apresentaram entre 56,90 e 57,12% de CH₄, 38,38 e 39,37% de CO₂, 3,42 e 4,08% de OG e entre 0,32 e 0,42% de O₂.

As maiores variações na concentração dos quatro componentes principais do gás ocorreram com a válvula 100% aberta (semelhante ao PP2), desvio padrão (2,44/CH₄, 3,42/CO₂, 1,85/OG e 0,26/O₂). A temperatura média variou entre 47,43 e 48,30°C.

A Tabela 5 apresenta a porcentagem de alteração (aumento ou redução) da composição dos gases e da pressão para cada mudança da abertura da válvula realizadas durante as campanhas de campo, 1ª (25 para 50%), 2ª (50 para 75%) e a 3ª (75 para 100%).

A concentração de CH₄ e OG aumentou com maior intensidade no segundo ajuste (50 → 75) quando a diferença nas médias alcançou 0,30 e 9,10%, respectivamente. Para o O₂, esse comportamento ocorreu no primeiro ajuste (25 → 50): diferença entre as médias 17,11%. Para o CO₂, a maior redução ocorreu no segundo ajuste (50 → 75): diferença entre as médias de 1,31%.

Da mesma forma que no PP1 e PP2, a pressão de bombeamento e a concentração dos quatro componentes do gás variaram ao longo do monitoramento (ou seja, da 1ª para a 12ª campanha) bem como de acordo com os sucessivos ajustes na abertura da válvula do cabeçote, como mostra a Tabela 6.

Os dados da Tabela 6 indicam ainda que a pressão aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (25 → 50), quando a diferença nas médias alcançou 94,33%.

A concentração de três componentes (CH₄, OG e O₂) aumentou com o crescimento da pressão de bombeamento, enquanto a concentração de CO₂ diminuiu.

Tabela 5 - Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PV1.

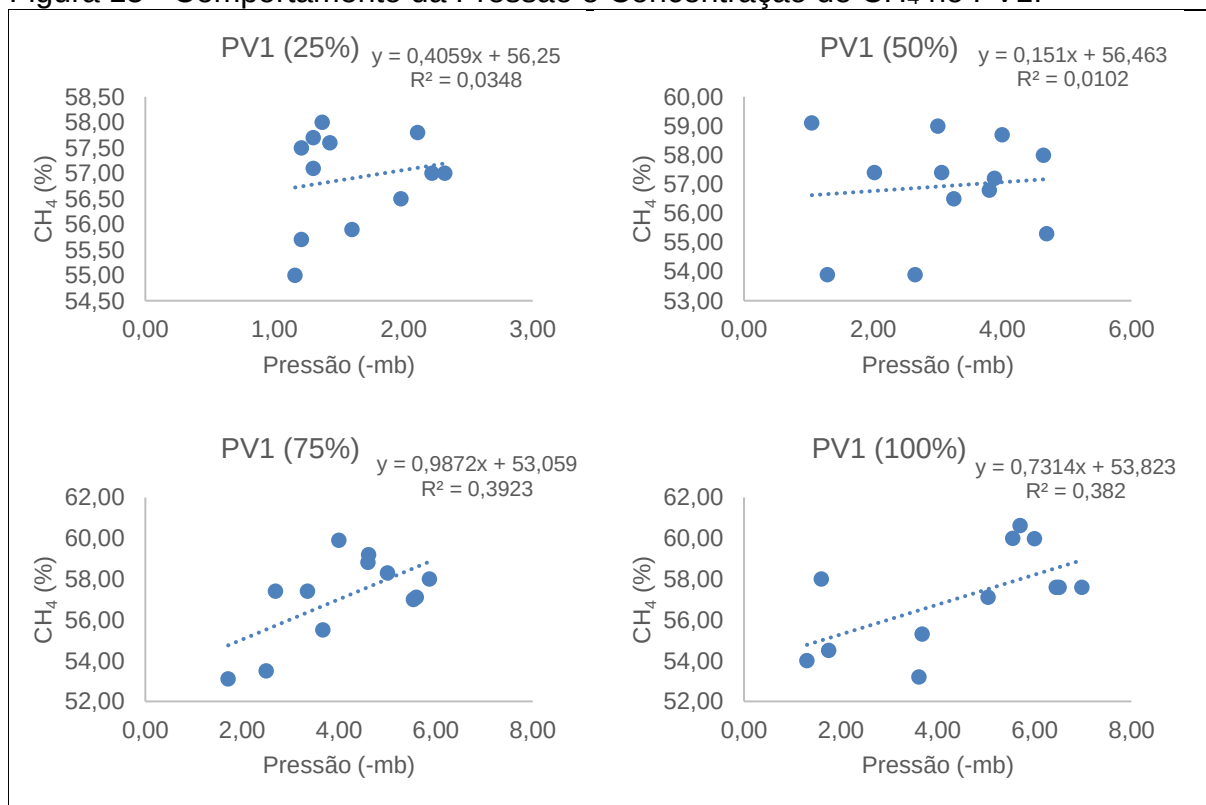
Poço	Variável	1º ajuste (25 para 50%)	2º ajuste (50 para 75%)	3º ajuste (75 para 100%)
PV1	P	94,33%	31,64%	10,24%
	M	0,06%	0,30%	0,04%
	D	-0,26%	-1,31%	-0,95%
	OG	0,49%	9,10%	8,85%
	O	17,11%	8,54%	3,93%

Legenda: P (Pressão), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio).

Fonte: autora (2020).

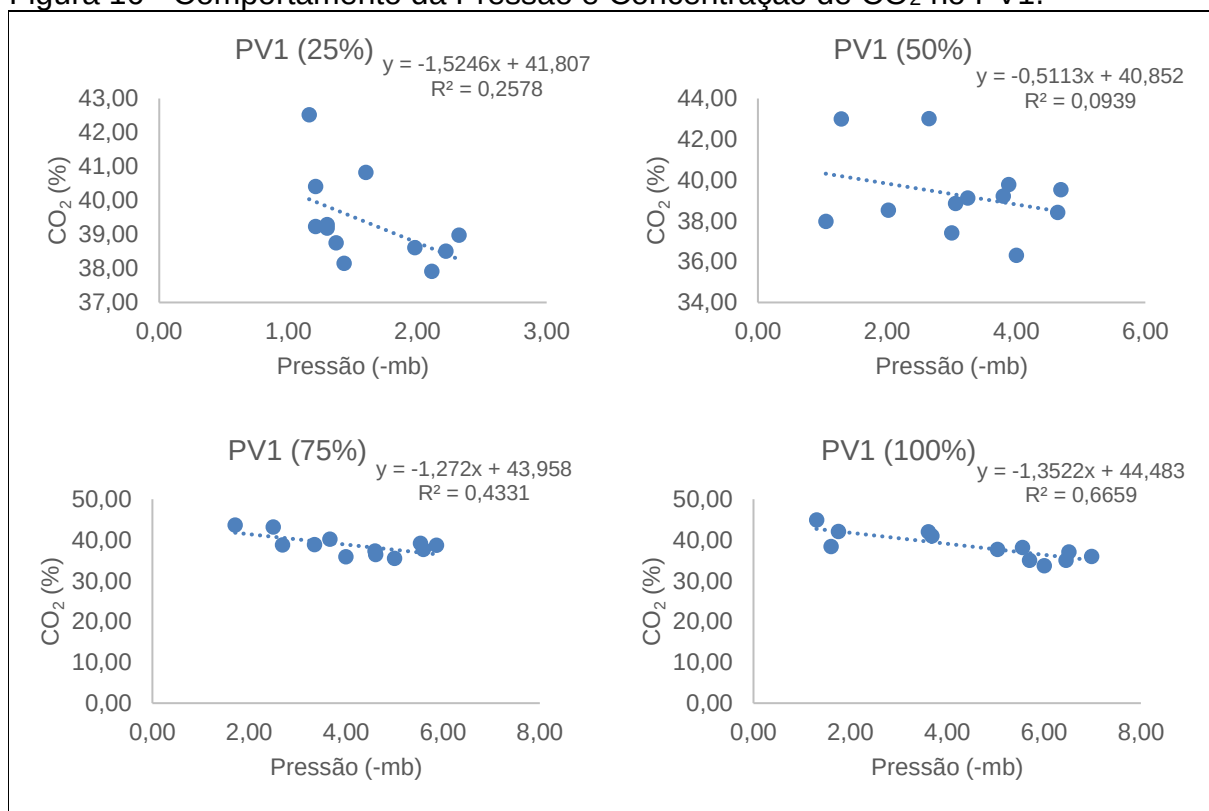
As Figuras 15 a 18 mostram o comportamento da pressão de bombeamento e da concentração dos gases captados no PV1, conforme a abertura da válvula do cabeçote ao longo das 12 campanhas. Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%), as equações das linhas de regressão e os coeficientes de correlação mostraram uma relação inversa entre a pressão e a concentração de CO₂, ou seja, quanto maior a pressão, menor a concentração desse gás. Para os outros três componentes do gás, a relação com a pressão foi direta (↑ pressão, ↑ concentração).

Figura 15 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH₄ no PV1.



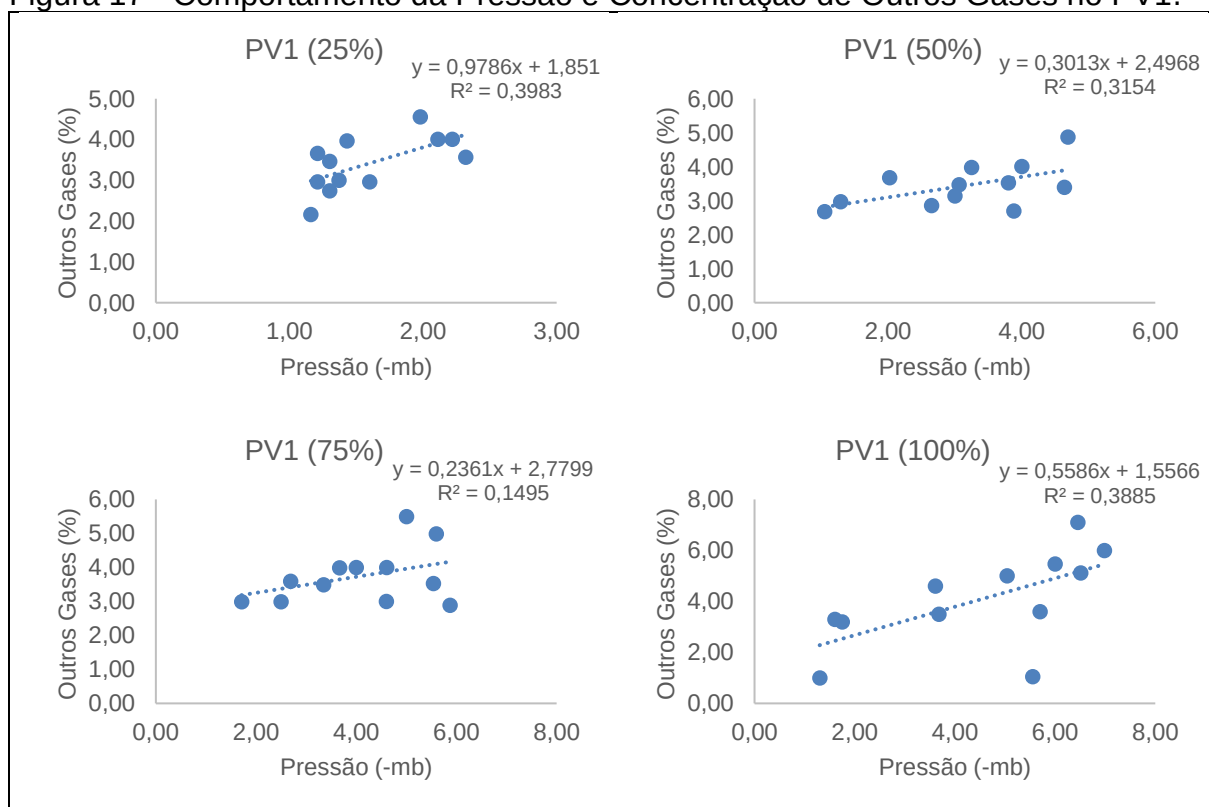
Fonte: autora (2020).

Figura 16 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO₂ no PV1.



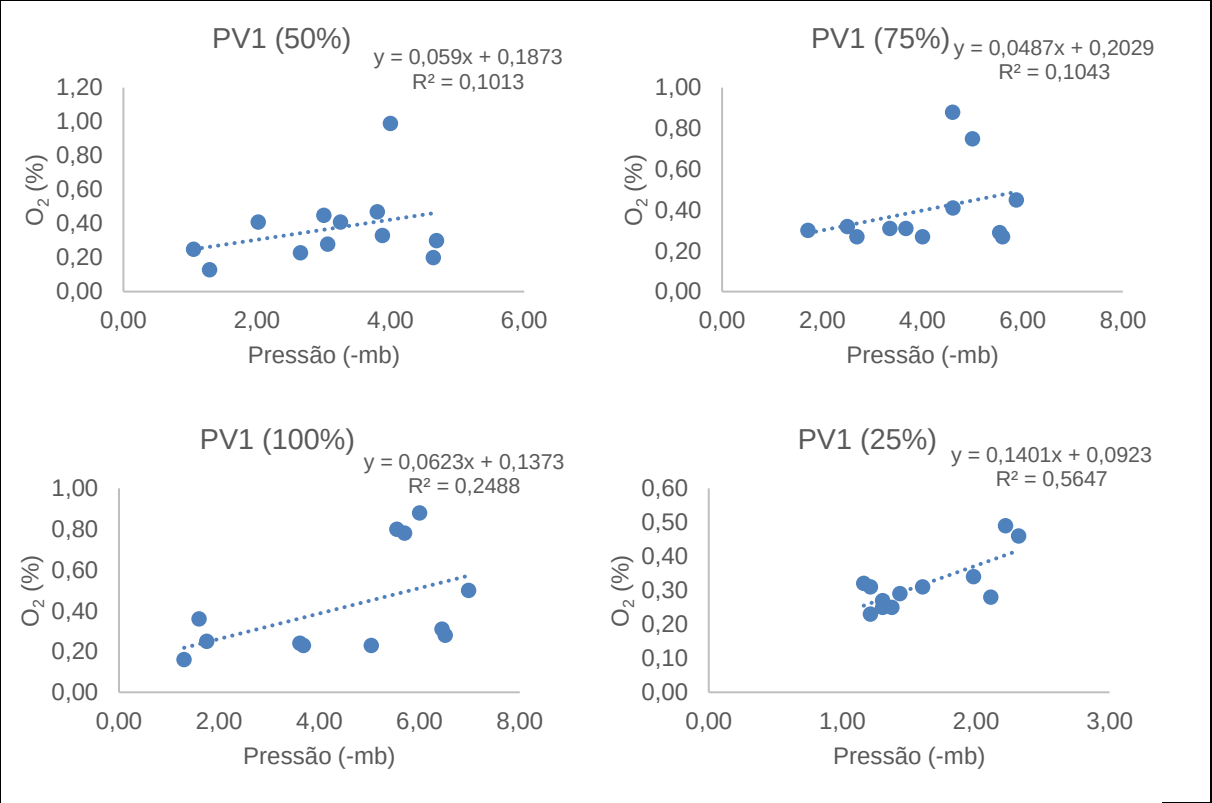
Fonte: autora (2020).

Figura 17 - Comportamento da Pressão e Concentração de Outros Gases no PV1.



Fonte: autora (2020).

Figura 18 - Comportamento da Pressão e Concentração de O₂ no PV1.



Fonte: autora (2020).

Tabela 6 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PV1.

C	Válvula 25% Aberta						Válvula 50% Aberta						Válvula 75% Aberta						Válvula 100% Aberta					
	P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)			
			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O
1	1,16	46,20	55,00	42,52	2,16	0,32	1,05	46,60	59,10	37,98	2,67	0,25	1,71	45,60	53,10	43,61	2,99	0,30	1,30	41,80	54,00	44,84	1,00	0,16
2	1,21	46,60	57,50	39,23	2,96	0,31	1,29	46,80	53,90	43,00	2,97	0,13	2,50	46,90	53,50	43,19	2,99	0,32	1,75	46,90	54,50	42,05	3,20	0,25
3	1,60	45,20	55,90	40,83	2,96	0,31	2,65	45,50	53,90	43,02	2,85	0,23	3,67	45,50	55,50	40,20	3,99	0,31	3,61	45,50	53,20	41,96	4,60	0,24
4	1,30	44,50	57,70	39,29	2,74	0,27	3,06	44,80	57,40	38,85	3,47	0,28	3,35	44,90	57,40	38,80	3,49	0,31	3,68	44,90	55,30	40,97	3,50	0,23
5	1,43	48,20	57,60	38,15	3,96	0,29	2,02	48,90	57,40	38,52	3,67	0,41	2,69	49,10	57,40	38,74	3,59	0,27	1,60	49,10	58,00	38,34	3,30	0,36
6	1,30	49,50	57,10	39,19	3,46	0,25	3,88	49,80	57,20	39,78	2,69	0,33	5,60	49,80	57,10	37,64	4,99	0,27	5,04	49,90	57,10	37,67	5,00	0,23
7	1,37	50,50	58,00	38,75	3,00	0,25	4,64	51,70	58,00	38,41	3,39	0,20	4,00	51,80	59,90	35,83	4,00	0,27	6,98	51,90	57,60	35,90	6,00	0,50
8	1,98	47,80	56,50	38,61	4,55	0,34	4,00	48,70	58,70	36,31	4,00	0,99	5,54	48,90	57,00	39,18	3,53	0,29	6,51	49,10	57,60	37,00	5,12	0,28
9	1,21	49,00	55,70	40,41	3,66	0,23	4,69	49,60	55,30	39,53	4,87	0,30	5,00	49,70	58,30	35,45	5,50	0,75	6,45	49,80	57,59	35,00	7,10	0,31
10	2,11	49,10	57,80	37,92	4,00	0,28	3,80	50,50	56,80	39,21	3,52	0,47	5,87	52,80	58,00	38,66	2,89	0,45	5,70	51,10	60,62	35,00	3,60	0,78
11	2,32	46,30	57,00	38,98	3,56	0,46	3,25	47,80	56,50	39,12	3,97	0,41	4,60	48,10	58,82	37,30	3,00	0,88	6,00	49,30	59,98	33,67	5,47	0,88
12	2,22	46,20	57,00	38,51	4,00	0,49	3,00	47,10	59,00	37,41	3,14	0,45	4,61	46,50	59,20	36,39	4,00	0,41	5,55	46,60	60,00	38,15	1,05	0,80
Média	1,60	47,43	56,90	39,37	3,42	0,32	3,11	48,15	56,93	39,26	3,43	0,37	4,10	48,30	57,10	38,75	3,75	0,40	4,51	47,99	57,12	38,38	4,08	0,42
DP	0,43	1,86	0,94	1,30	0,67	0,08	1,19	2,08	1,78	1,99	0,64	0,22	1,34	2,52	2,11	2,59	0,82	0,20	2,06	2,91	2,44	3,42	1,85	0,26

Legenda: C (Campanha), P (Pressão -mb), T (Temperatura °C), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão).
Valores arredondados pelo Excel

Fonte: autora (2020).

4.1.4 Poço Vertical 2

No PV2, a pressão média variou entre -1,80 e -4,49mb. As maiores variações na pressão ocorreram com a válvula 75% aberta (desvio padrão: 1,63).

Os gases captados por esse poço, apresentaram entre 57,44 e 57,85% de CH₄, 37,36 e 38,08% de CO₂, 4,19 e 4,53% de OG e entre 0,29 e 0,33% de O₂.

As maiores variações na concentração de CH₄ e CO₂ ocorreram com a válvula 25% aberta (desvio padrão: 2,46 e 2,44, respectivamente). Para OG, as maiores variações ocorreram com a válvula 75% aberta (desvio padrão: 1,38) enquanto para o O₂ (25% aberta, desvio padrão de 0,18). A temperatura média variou entre 46,06 e 46,45°C.

A Tabela 7 apresenta a porcentagem de alteração (aumento ou redução) da composição dos gases e da pressão para cada mudança da abertura da válvula realizadas durante as campanhas de campo, 1ª (25 para 50%), 2ª (50 para 75%) e a 3ª (75 para 100%).

A concentração de CH₄ aumentou com maior intensidade no terceiro ajuste (75 → 100) quando a diferença nas médias alcançou 0,55. Para OG, esse comportamento ocorreu no segundo ajuste (50 → 75): diferença entre as médias 7,79%. Para o O₂, o maior acréscimo ocorreu no primeiro ajuste (25 → 50): diferença entre as médias de 9,04%. Para o CO₂, a maior redução ocorreu no segundo ajuste (50 → 75): diferença entre as médias de 0,90%.

Da mesma forma que nos três poços anteriores, a pressão de bombeamento e a concentração dos quatro componentes do gás variaram ao longo do monitoramento (ou seja, da 1ª para a 12ª campanha) bem como de acordo com os sucessivos ajustes na abertura da válvula do cabeçote, como mostra a Tabela 8.

Os dados da Tabela 8 indicam ainda que a pressão aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (25 → 50), quando a diferença nas médias alcançou 78,84%.

A concentração de três componentes (CH₄, OG e O₂) aumentou com o crescimento da pressão de bombeamento, enquanto a concentração de CO₂ diminuiu (esse comportamento geral foi semelhante ao PV1).

Tabela 7 - Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PV2.

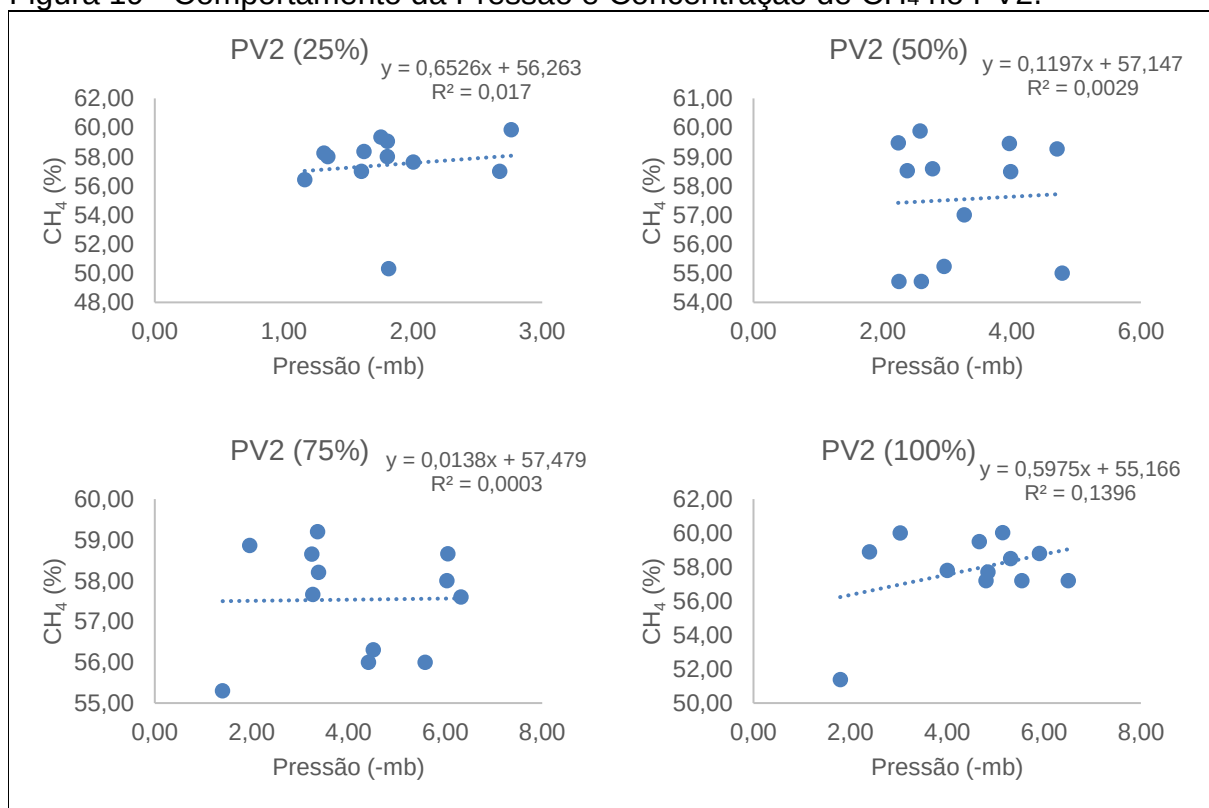
Poço	Variável	1º ajuste (25 para 50%)	2º ajuste (50 para 75%)	3º ajuste (75 para 100%)
PV2	P	77,84%	28,74%	8,89%
	M	0,16%	0,01%	0,55%
	D	-0,32%	-0,90%	-0,69%
	OG	0,06%	7,79%	0,24%
	O	9,04%	3,21%	2,85%

Legenda: P (Pressão), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio).

Fonte: autora (2020).

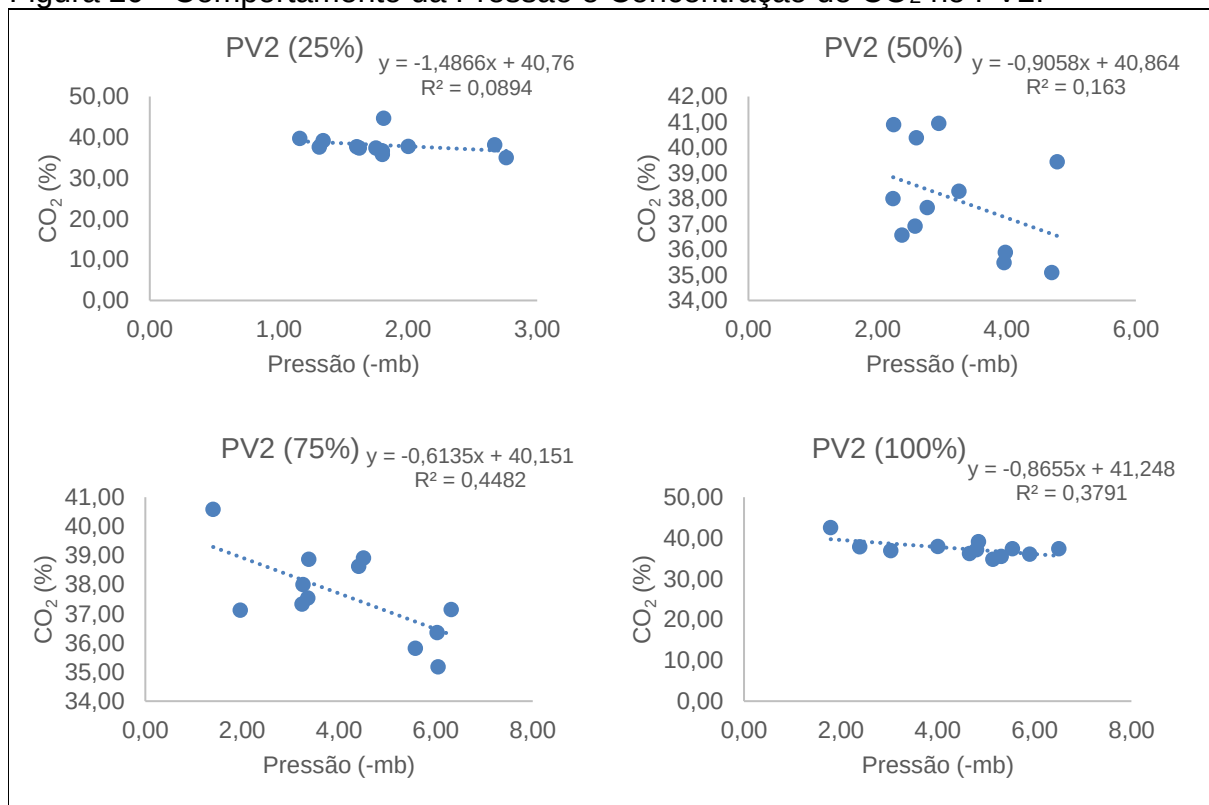
As Figuras 19 a 22 mostram o comportamento da pressão de bombeamento e da concentração dos gases captados no PV2, conforme a abertura da válvula do cabeçote ao longo das 12 campanhas. Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%), as equações das linhas de regressão e os coeficientes de correlação mostraram uma relação inversa entre a pressão e a concentração de CO₂, ou seja, quanto maior a pressão, menor a concentração desse gás. Para os outros três componentes do gás, a relação com a pressão foi direta (↑ pressão, ↑ concentração).

Figura 19 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH₄ no PV2.



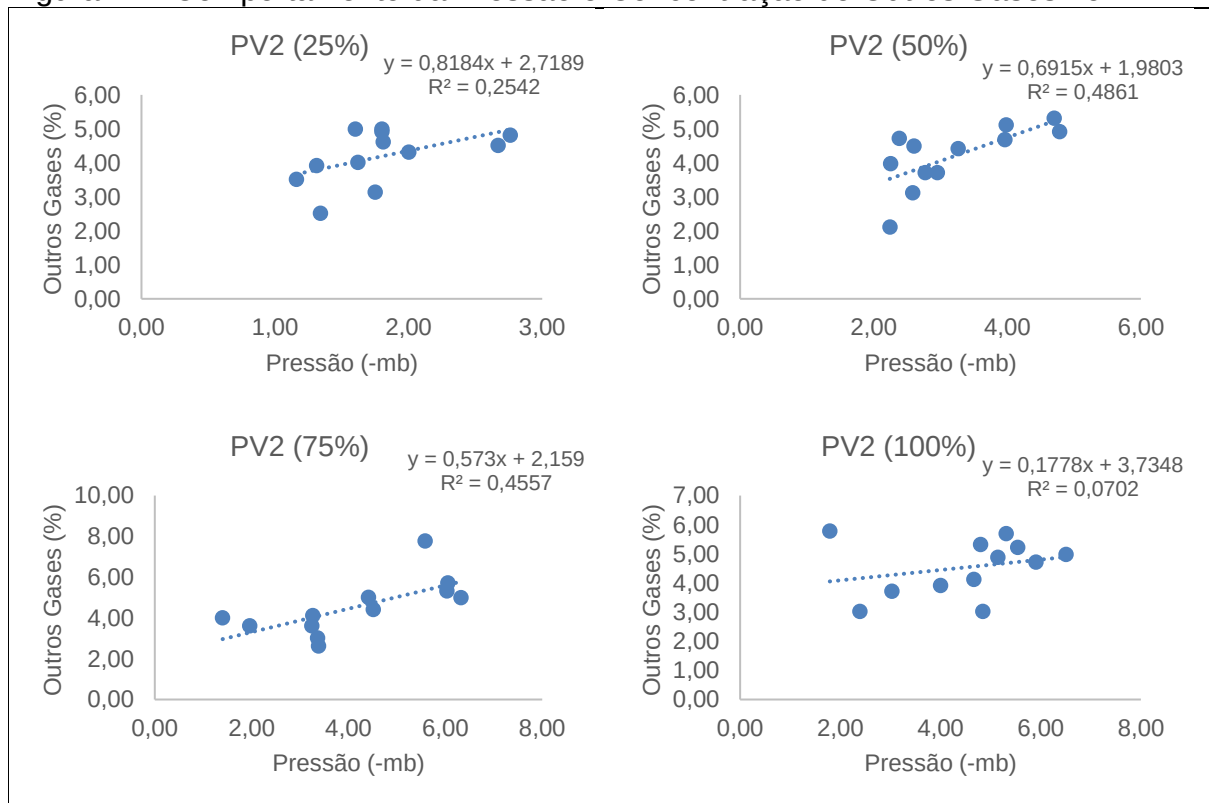
Fonte: autora (2020).

Figura 20 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO₂ no PV2.



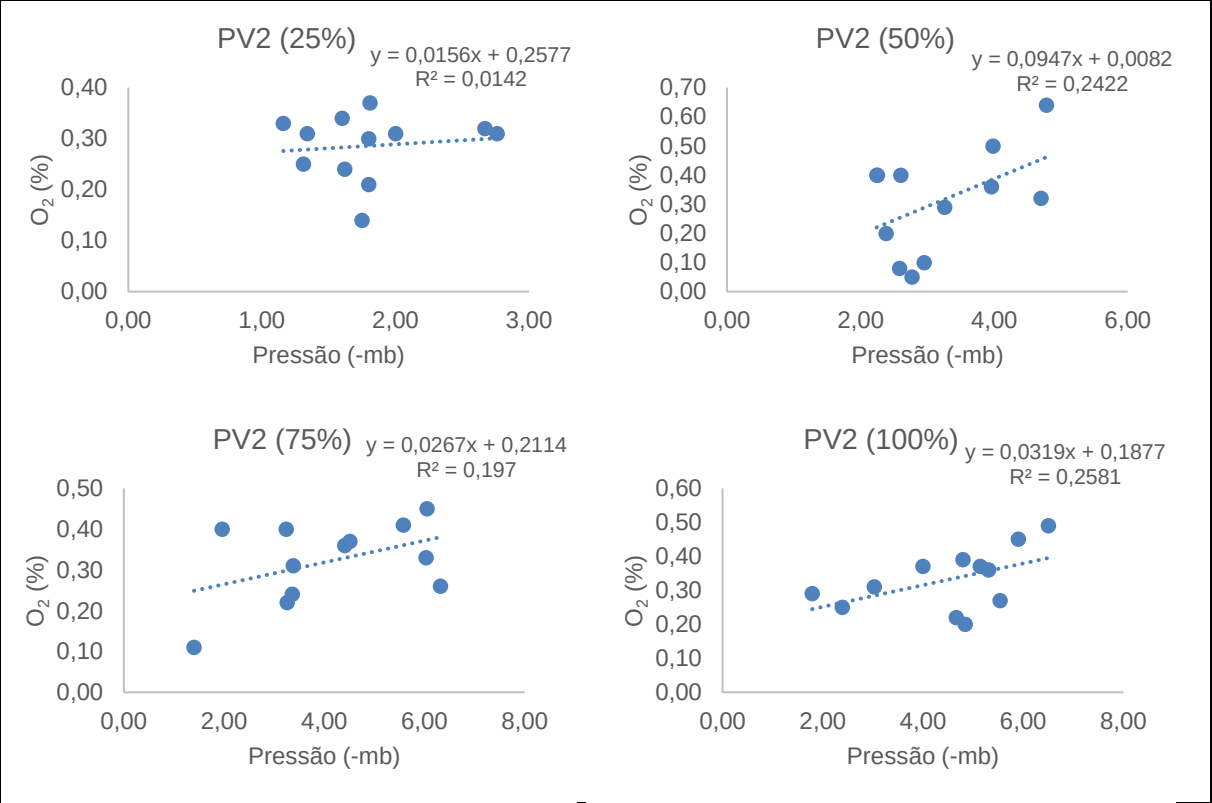
Fonte: autora (2020).

Figura 21 - Comportamento da Pressão e Concentração de Outros Gases no PV2.



Fonte: autora (2020).

Figura 22 - Comportamento da Pressão e Concentração de O₂ no PV2.



Fonte: autora (2020)

Tabela 8 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PV2.

C	Válvula 25% Aberta						Válvula 50% Aberta						Válvula 75% Aberta						Válvula 100% Aberta					
	P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)			
			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O
1	1,75	43,10	59,35	37,37	3,14	0,14	2,24	43,70	59,48	38,00	2,12	0,40	1,40	43,80	55,30	40,58	4,01	0,11	1,79	43,90	51,38	42,55	5,78	0,29
2	1,31	44,10	58,25	37,58	3,92	0,25	2,58	44,40	59,88	36,92	3,12	0,08	3,36	44,40	59,20	37,54	3,02	0,24	2,39	44,50	58,90	37,83	3,02	0,25
3	1,34	45,80	58,00	39,17	2,52	0,31	2,38	46,10	58,52	36,56	4,72	0,20	3,38	46,10	58,20	38,87	2,62	0,31	4,84	46,20	57,70	39,08	3,02	0,20
4	1,60	46,90	57,00	37,66	5,00	0,34	2,95	45,10	55,24	40,94	3,72	0,10	4,41	47,30	56,00	38,62	5,02	0,36	4,66	41,30	59,50	36,16	4,12	0,22
5	1,16	45,00	56,42	39,73	3,52	0,33	2,77	47,30	58,59	37,64	3,72	0,05	1,96	45,40	58,86	37,12	3,62	0,40	3,03	47,40	60,00	36,87	3,72	0,31
6	1,81	47,70	50,32	44,69	4,62	0,37	3,26	47,90	57,00	38,29	4,42	0,29	4,51	47,90	56,30	38,91	4,42	0,37	5,90	48,00	58,80	36,03	4,72	0,45
7	1,62	47,90	58,37	37,37	4,02	0,24	3,98	48,00	58,49	35,89	5,12	0,50	6,32	48,20	57,60	37,14	5,00	0,26	4,00	48,10	57,80	37,91	3,92	0,37
8	1,80	48,70	59,06	35,81	4,92	0,21	4,78	48,90	55,00	39,44	4,92	0,64	6,05	48,90	58,66	35,17	5,72	0,45	5,31	48,90	58,50	35,44	5,70	0,36
9	1,80	49,00	58,00	36,70	5,00	0,30	4,70	49,30	59,27	35,09	5,32	0,32	6,03	49,00	58,00	36,35	5,32	0,33	5,54	50,40	57,20	37,31	5,22	0,27
10	2,67	48,40	57,00	38,16	4,52	0,32	3,96	49,30	59,46	35,49	4,69	0,36	5,58	51,40	56,00	35,81	7,78	0,41	6,50	49,50	57,20	37,33	4,98	0,49
11	2,00	43,70	57,64	37,73	4,32	0,31	2,25	42,50	54,72	40,90	3,98	0,40	3,24	42,90	58,65	37,33	3,62	0,40	5,14	43,70	60,02	34,73	4,88	0,37
12	2,76	42,40	59,86	35,01	4,82	0,31	2,60	43,80	54,72	40,38	4,50	0,40	3,26	42,10	57,66	38,00	4,12	0,22	4,80	42,30	57,20	37,09	5,32	0,39
Média	1,80	46,06	57,44	38,08	4,19	0,29	3,20	46,36	57,53	37,96	4,20	0,31	4,13	46,45	57,54	37,62	4,52	0,32	4,49	46,18	57,85	37,36	4,53	0,33
DP	0,49	2,35	2,46	2,44	0,80	0,06	0,93	2,41	2,06	2,08	0,92	0,18	1,63	2,81	1,31	1,50	1,38	0,10	1,43	2,98	2,29	2,01	0,96	0,09

Legenda: C (Campanha), P (Pressão -mb), T (Temperatura °C), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão).
Valores arredondados pelo Excel

Fonte: autora (2020).

4.1.5 Poço Horizontal 1

No PH1, a pressão média variou entre -1,45 e -3,74mb. As maiores variações na pressão ocorreram com a válvula 50% aberta (desvio padrão: 1,46).

Os gases captados por esse poço, apresentaram entre 56,82 e 57,26% de CH₄, 37,89 e 38,07% de CO₂, 4,29 e 4,47% de OG e entre 0,56 e 0,65% de O₂.

As maiores variações na concentração dos quatro componentes principais do gás ocorreram com a válvula 100% aberta (semelhante ao PP2 e PV1), desvio padrão (1,56/CH₄, 1,86/CO₂, 1,05/OG e 0,20/O₂). A temperatura média variou entre 53,20 e 53,85°C.

A Tabela 9 apresenta a porcentagem de alteração (aumento ou redução) da composição dos gases e da pressão para cada mudança da abertura da válvula realizadas durante as campanhas de campo, 1ª (25 para 50%), 2ª (50 para 75%) e a 3ª (75 para 100%).

A concentração de CH₄ diminuiu com maior intensidade no segundo ajuste (50 → 75), quando a diferença nas médias alcançou 0,33%. Foi também no segundo ajuste que a concentração de OG mais cresceu (3,72%).

Já a concentração de O₂ aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (25 → 50: 8,98%) enquanto o crescimento do CO₂ ocorreu no terceiro ajuste (75 → 100: 0,27%).

Em linhas gerais, tanto a pressão de bombeamento quanto a concentração dos quatro componentes principais do gás variaram ao longo do monitoramento (ou seja, da 1ª para a 12ª campanha) bem como de acordo com os sucessivos ajustes na abertura da válvula do cabeçote, como mostra a Tabela 10.

Os dados da Tabela 10 indicam ainda que a pressão aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (25 → 50), quando a diferença nas médias alcançou 102,25%.

A concentração de três componentes (CO₂, OG e O₂) aumentou com o crescimento da pressão de bombeamento, enquanto a concentração de CH₄ diminuiu.

Tabela 9 - Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PH1.

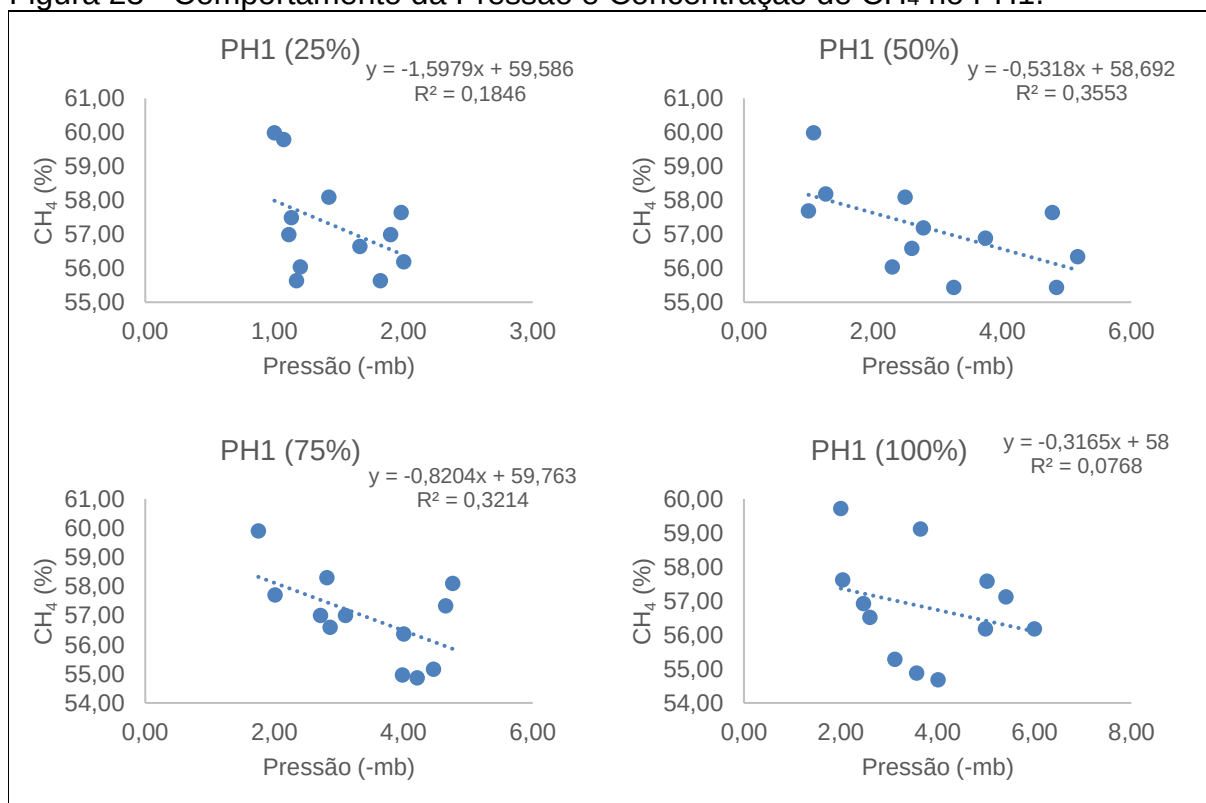
Poço	Variável	1º ajuste (25 para 50%)	2º ajuste (50 para 75%)	3º ajuste (75 para 100%)
PH1	P	102,25%	16,96%	8,67%
	M	-0,23%	-0,33%	-0,22%
	D	0,18%	0,01%	0,27%
	OG	0,35%	3,72%	0,09%
	O	8,98%	3,98%	2,51%

Legenda: P (Pressão), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio).

Fonte: autora (2020).

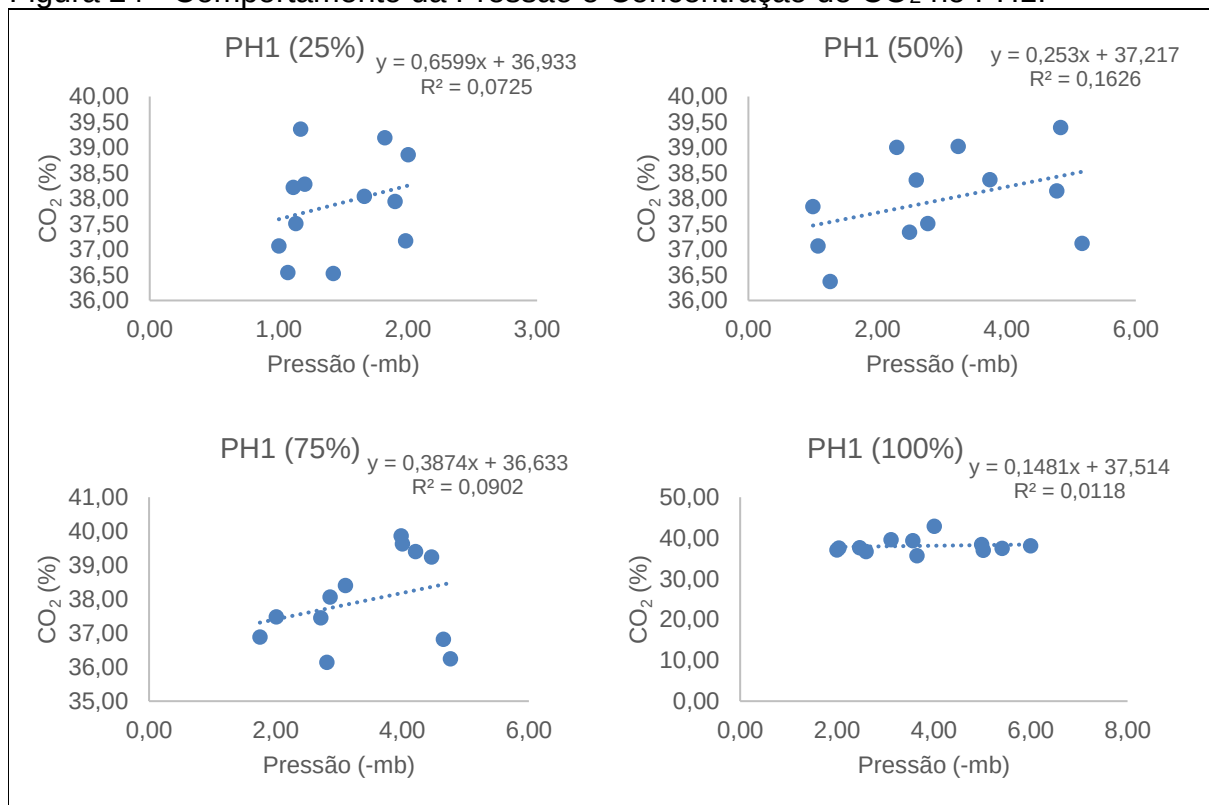
A Figura 23 mostra o comportamento da pressão de bombeamento e da concentração de CH₄ no PH1 conforme a abertura da válvula do cabeçote ao longo das 12 campanhas. Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%), as equações das linhas de regressão e os coeficientes de correlação mostraram uma relação inversa entre esses parâmetros, ou seja, quanto maior a pressão, menor a concentração de CH₄. Já as Figuras 24 a 26 mostram o comportamento dos demais componentes (CO₂, OG e O₂) e sua relação direta com a pressão (↑ pressão, ↑ concentração).

Figura 23 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH₄ no PH1.



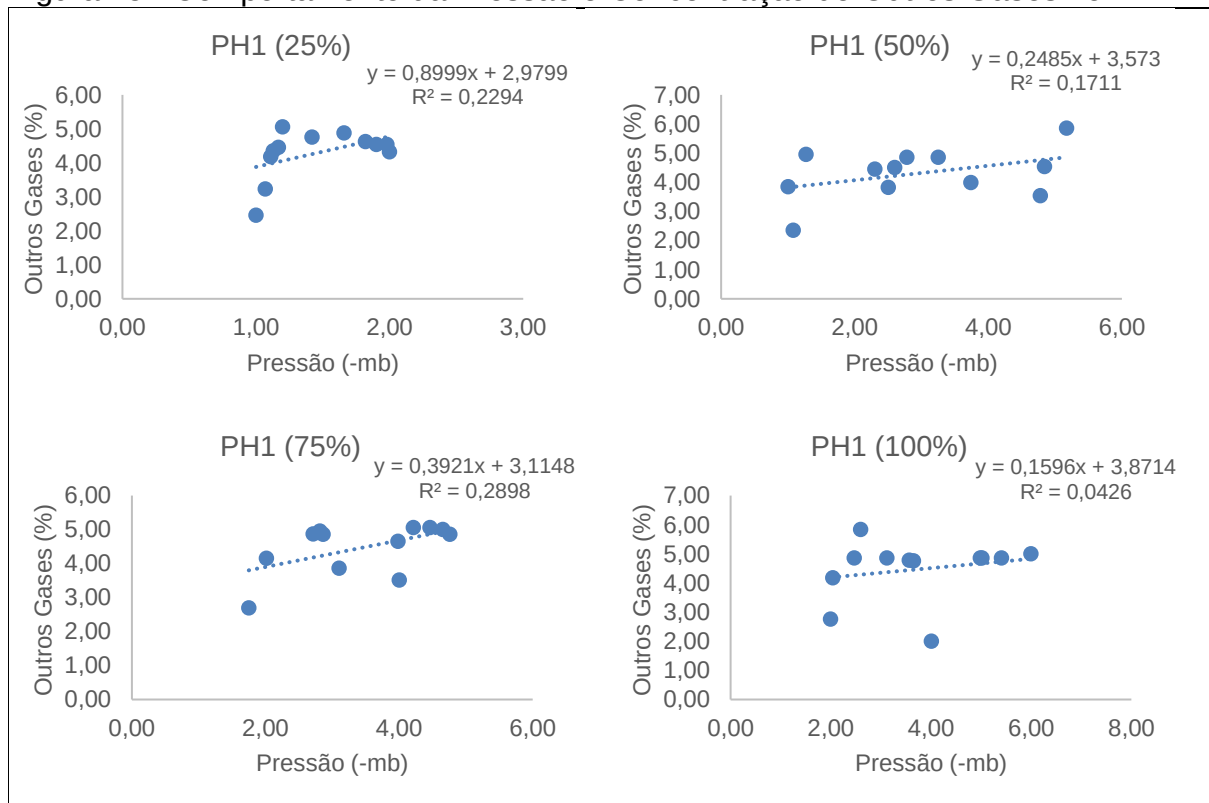
Fonte: autora (2020).

Figura 24 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO₂ no PH1.



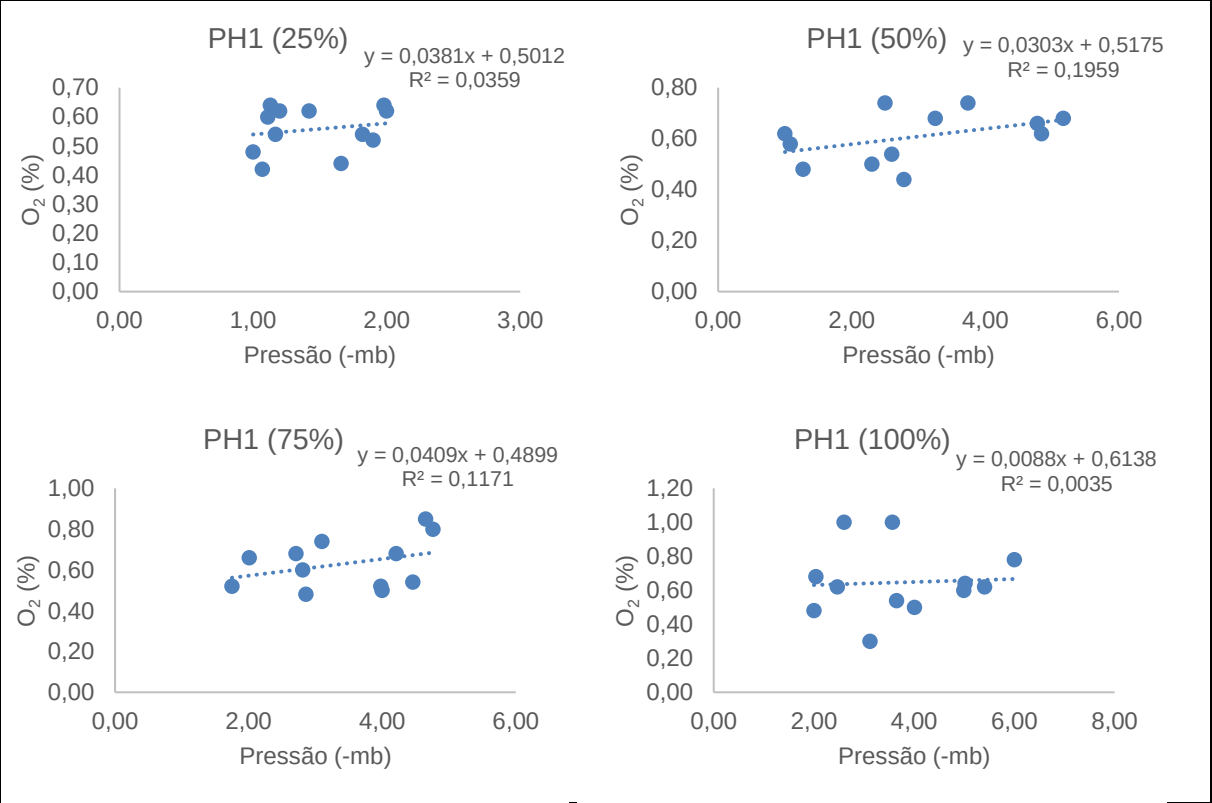
Fonte: autora (2020).

Figura 25 - Comportamento da Pressão e Concentração de Outros Gases no PH1.



Fonte: autora (2020).

Figura 26 - Comportamento da Pressão e Concentração de O₂ no PH1.



Fonte: autora (2020).

Tabela 10 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PH1.

C	Válvula 25% Aberta						Válvula 50% Aberta						Válvula 75% Aberta						Válvula 100% Aberta					
	P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)			
			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O
1	1,00	48,10	59,99	37,07	2,46	0,48	1,08	50,40	59,99	37,07	2,36	0,58	1,75	47,70	59,90	36,88	2,70	0,52	2,00	50,90	59,72	37,04	2,76	0,48
2	1,07	49,70	59,79	36,55	3,24	0,42	1,00	50,30	57,69	37,84	3,85	0,62	2,01	50,50	57,70	37,48	4,16	0,66	2,04	50,60	57,62	37,52	4,18	0,68
3	1,11	51,70	56,99	38,22	4,19	0,60	2,60	51,90	56,59	38,36	4,51	0,54	2,86	52,00	56,60	38,06	4,86	0,48	2,60	52,00	56,52	36,64	5,84	1,00
4	1,13	53,10	57,49	37,51	4,36	0,64	2,78	50,20	57,19	37,51	4,86	0,44	2,71	53,20	57,00	37,45	4,87	0,68	2,47	53,20	56,92	37,60	4,86	0,62
5	1,42	53,20	58,09	36,53	4,76	0,62	1,27	53,60	58,19	36,37	4,96	0,48	2,81	53,60	58,30	36,14	4,96	0,60	3,65	54,00	59,12	35,58	4,76	0,54
6	1,20	53,70	56,04	38,28	5,06	0,62	3,25	53,90	55,44	39,02	4,86	0,68	4,46	55,00	55,16	39,24	5,06	0,54	3,57	55,10	54,88	39,34	4,78	1,00
7	1,17	53,80	55,64	39,36	4,46	0,54	2,30	55,00	56,04	39,00	4,46	0,50	3,98	54,10	54,96	39,86	4,66	0,52	3,12	54,20	55,28	39,56	4,86	0,30
8	1,82	54,90	55,64	39,19	4,63	0,54	4,84	55,20	55,44	39,39	4,55	0,62	4,21	55,20	54,86	39,40	5,06	0,68	4,01	56,20	54,68	42,82	2,00	0,50
9	1,66	54,90	56,64	38,04	4,88	0,44	5,17	55,30	56,34	37,12	5,86	0,68	4,00	53,00	56,36	39,62	3,52	0,50	4,99	54,40	56,18	38,36	4,86	0,60
10	1,98	53,20	57,64	37,17	4,55	0,64	4,78	55,40	57,64	38,15	3,55	0,66	4,65	55,80	57,33	36,82	5,00	0,85	5,02	53,00	57,58	36,92	4,86	0,64
11	1,90	55,10	56,99	37,94	4,55	0,52	3,74	54,70	56,89	38,37	4,00	0,74	3,10	55,90	57,00	38,40	3,86	0,74	5,41	55,00	57,12	37,40	4,86	0,62
12	2,00	57,00	56,19	38,86	4,33	0,62	2,50	55,40	58,09	37,34	3,83	0,74	4,76	56,10	58,10	36,24	4,86	0,80	6,00	57,60	56,18	38,04	5,00	0,78
Média	1,45	53,20	57,26	37,89	4,29	0,56	2,94	53,44	57,13	37,96	4,30	0,61	3,44	53,51	56,94	37,97	4,46	0,63	3,74	53,85	56,82	38,07	4,47	0,65
DP	0,39	2,43	1,45	0,96	0,73	0,08	1,46	2,14	1,30	0,92	0,88	0,10	1,03	2,50	1,49	1,33	0,75	0,12	1,36	2,06	1,56	1,86	1,05	0,20

Legenda: C (Campanha), P (Pressão -mb), T (Temperatura °C), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão).
Valores arredondados pelo Excel

Fonte: autora (2020).

4.1.6 Poço Horizontal 2

No PH2, a pressão média variou entre -1,39 e -3,71mb. As maiores variações na pressão ocorreram com a válvula 100% aberta (desvio padrão: 1,39).

Os gases captados por esse poço, apresentaram entre 56,45 e 57,05% de CH₄, 37,58 e 37,85% de CO₂, 4,72 e 4,79% de OG e entre 0,65 e 0,91% de O₂.

As maiores variações na concentração de CH₄ e CO₂ ocorreram com a válvula 100% aberta (desvio padrão: 1,59 e 1,18, respectivamente). Para OG, as maiores variações ocorreram com a válvula 50% aberta (desvio padrão: 1,21) enquanto para o O₂ (25% aberta, desvio padrão de 0,19). A temperatura média variou entre 54,96 e 55,36°C.

A Tabela 11 apresenta a porcentagem de alteração (aumento ou redução) da composição dos gases e da pressão para cada mudança da abertura da válvula realizadas durante as campanhas de campo, 1ª (25 para 50%), 2ª (50 para 75%) e a 3ª (75 para 100%).

A concentração de CH₄ diminuiu com maior intensidade no terceiro ajuste (75 → 100), quando a diferença nas médias alcançou 0,48%. Foi também no terceiro ajuste que a concentração de CO₂ e OG mais cresceu (0,36 e 1,37%, respectivamente).

Já a concentração de O₂ aumentou com maior intensidade no segundo ajuste (50 → 75: 18,02%).

Em linhas gerais, tanto a pressão de bombeamento quanto a concentração dos quatro componentes principais do gás variaram ao longo do monitoramento (ou seja, da 1ª para a 12ª campanha) bem como de acordo com os sucessivos ajustes na abertura da válvula do cabeçote, como mostra a Tabela 12.

Os dados da Tabela 12 indicam ainda que a pressão aumentou com maior intensidade no primeiro ajuste (25 → 50), quando a diferença nas médias alcançou 114,53%.

A concentração de três componentes (CO₂, OG e O₂) aumentou com o crescimento da pressão de bombeamento, enquanto a concentração de CH₄ diminuiu.

Tabela 11 - Porcentagem de redução ou aumento na composição dos gases em cada alteração da abertura da válvula no PH2.

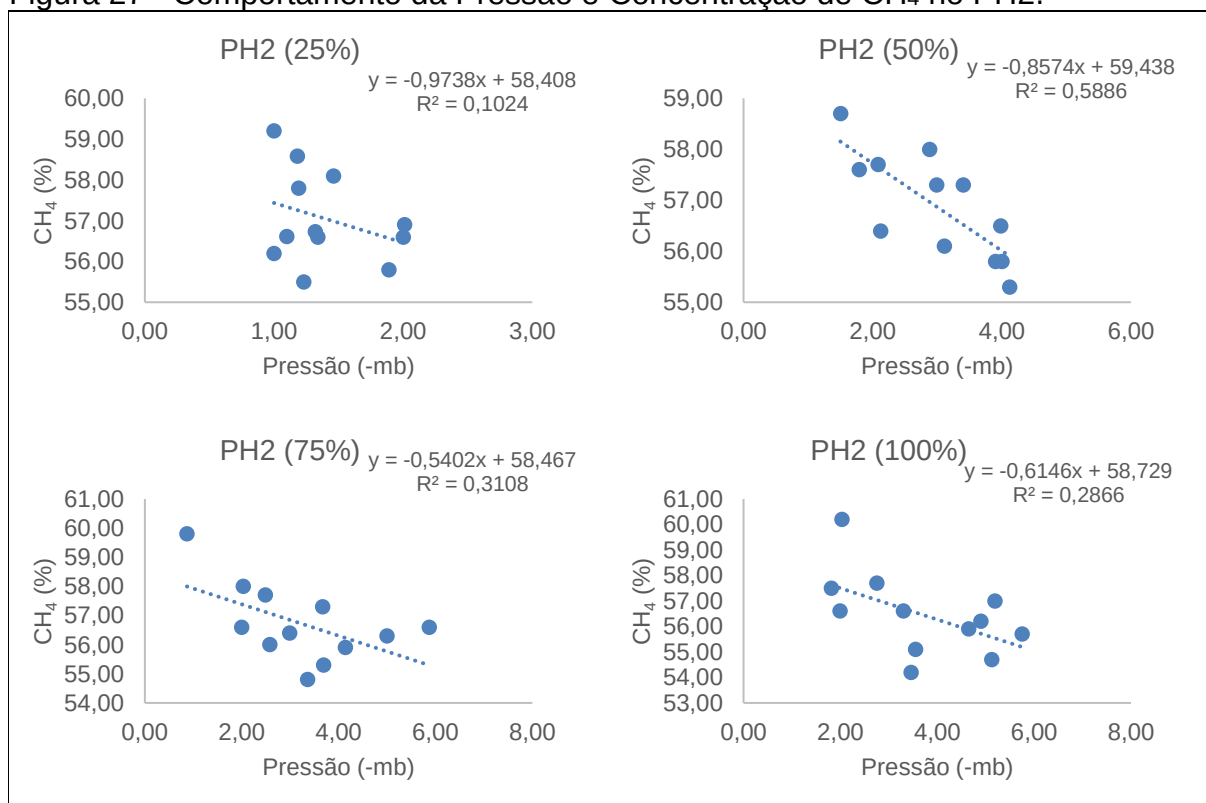
Poço	Variável	1º ajuste (25 para 50%)	2º ajuste (50 para 75%)	3º ajuste (75 para 100%)
PH2	P	114,53%	7,86%	15,02%
	M	-0,31%	-0,26%	-0,48%
	D	0,29%	0,05%	0,36%
	OG	0,11%	0,09%	1,37%
	O	9,55%	18,02%	8,98%

Legenda: P (Pressão), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio).

Fonte: autora (2020).

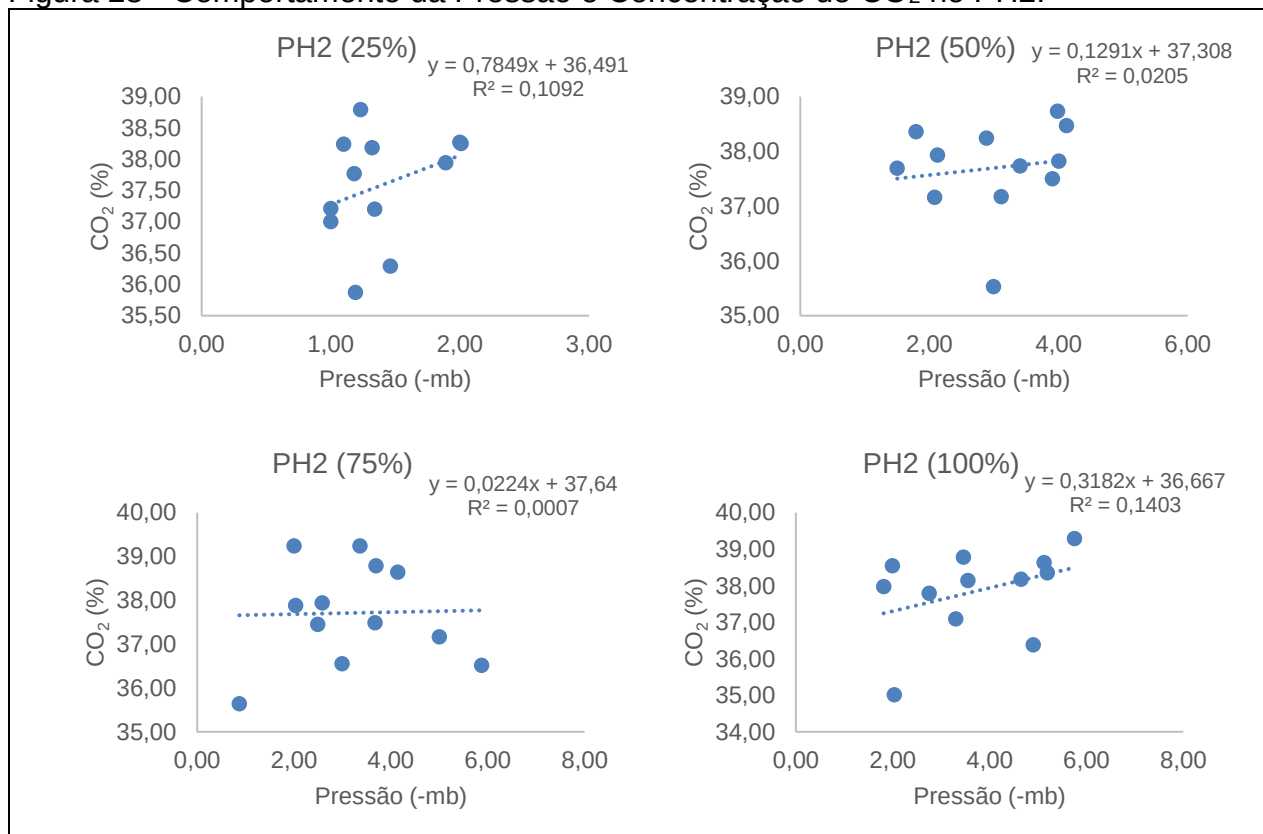
A Figura 27 mostra o comportamento da pressão de bombeamento e da concentração de CH₄ no PH2 conforme a abertura da válvula do cabeçote ao longo das 12 campanhas. Em todas as posições da válvula (25, 50, 75 e 100%), as equações das linhas de regressão e os coeficientes de correlação mostraram uma relação inversa entre esses parâmetros, ou seja, quanto maior a pressão, menor a concentração de CH₄. Já as Figuras 28 a 30 mostram o comportamento dos demais componentes (CO₂, OG e O₂) e sua relação direta com a pressão (↑ pressão, ↑ concentração).

Figura 27 - Comportamento da Pressão e Concentração de CH₄ no PH2.



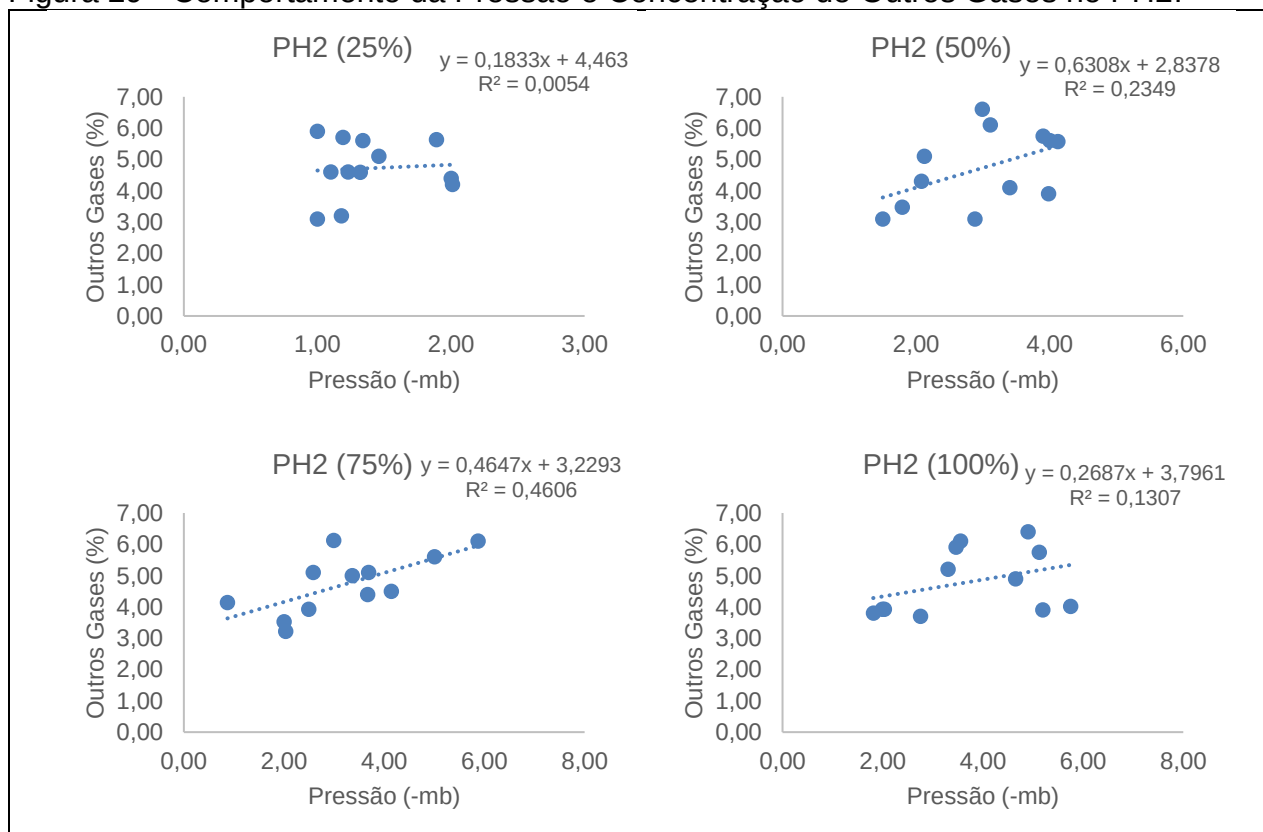
Fonte: autora (2020).

Figura 28 - Comportamento da Pressão e Concentração de CO₂ no PH2.



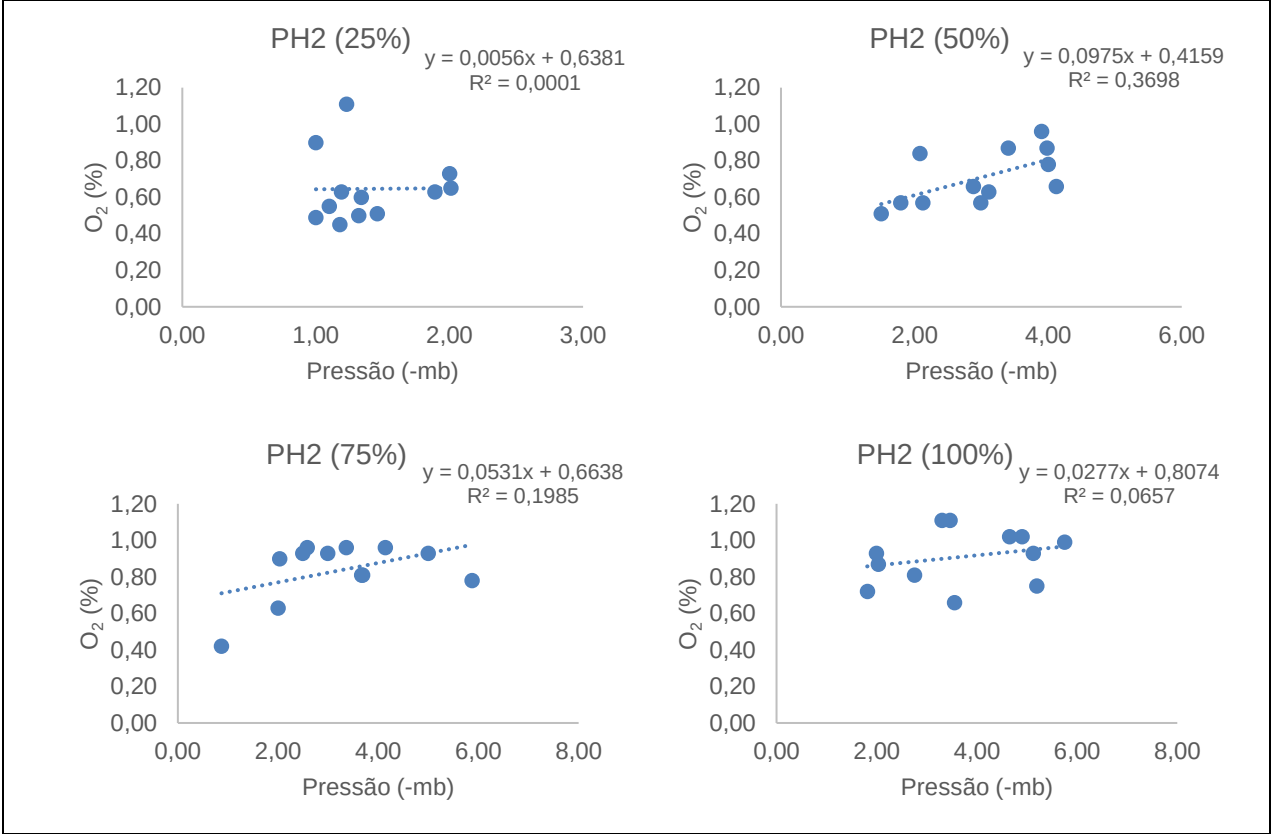
Fonte: autora (2020).

Figura 29 - Comportamento da Pressão e Concentração de Outros Gases no PH2.



Fonte: autora (2020).

Figura 30 - Comportamento da Pressão e Concentração de O₂ no PH2.



Fonte: autora (2020).

Tabela 12 - Comportamento da Pressão e da Composição dos Gases no PH2.

C	Válvula 25% Aberta						Válvula 50% Aberta						Válvula 75% Aberta						Válvula 100% Aberta					
	P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)				P	T	Concentração (%)			
			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O			M	D	OG	O
1	1,00	53,50	59,20	37,21	3,10	0,49	1,50	53,60	58,70	37,69	3,10	0,51	0,87	51,00	59,80	35,64	4,14	0,42	2,03	53,70	60,20	35,01	3,92	0,87
2	1,32	52,30	56,73	38,18	4,59	0,50	1,79	53,40	57,60	38,36	3,47	0,57	2,00	54,50	56,60	39,24	3,53	0,63	1,99	52,50	56,60	38,55	3,92	0,93
3	1,18	53,60	58,58	37,77	3,20	0,45	2,88	53,80	58,00	38,24	3,10	0,66	2,03	54,80	58,00	37,88	3,22	0,90	2,75	54,90	57,70	37,79	3,70	0,81
4	1,46	55,00	58,10	36,29	5,10	0,51	2,99	51,30	57,30	35,53	6,60	0,57	2,58	55,40	56,00	37,94	5,10	0,96	3,55	55,40	55,10	38,14	6,10	0,66
5	1,10	54,90	56,61	38,24	4,60	0,55	2,08	55,20	57,70	37,16	4,30	0,84	2,49	55,30	57,70	37,45	3,92	0,93	1,81	55,20	57,50	37,98	3,80	0,72
6	1,34	55,10	56,60	37,20	5,60	0,60	2,12	55,40	56,40	37,93	5,10	0,57	2,99	54,50	56,40	36,55	6,12	0,93	4,90	55,50	56,20	36,38	6,40	1,02
7	1,19	55,60	57,80	35,87	5,70	0,63	3,40	55,80	57,30	37,73	4,10	0,87	3,67	55,90	57,30	37,49	4,40	0,81	5,19	57,90	57,00	38,35	3,90	0,75
8	1,00	56,60	56,20	37,00	5,90	0,90	3,11	55,90	56,10	37,17	6,10	0,63	3,69	53,90	55,30	38,79	5,10	0,81	5,12	55,90	54,70	38,63	5,74	0,93
9	1,23	55,50	55,50	38,79	4,60	1,11	4,00	55,70	55,80	37,82	5,60	0,78	4,14	55,80	55,90	38,64	4,50	0,96	4,65	55,80	55,90	38,18	4,90	1,02
10	1,89	54,20	55,80	37,94	5,63	0,63	4,12	57,30	55,30	38,47	5,57	0,66	3,36	56,40	54,80	39,24	5,00	0,96	5,75	56,30	55,70	39,29	4,02	0,99
11	2,01	57,70	56,90	38,25	4,20	0,65	3,90	56,20	55,80	37,50	5,74	0,96	5,87	56,10	56,60	36,52	6,10	0,78	3,30	55,20	56,60	37,09	5,20	1,11
12	2,00	57,00	56,60	38,27	4,40	0,73	3,98	56,80	56,50	38,73	3,90	0,87	5,00	55,90	56,30	37,17	5,60	0,93	3,46	56,00	54,20	38,78	5,91	1,11
Média	1,39	55,08	57,05	37,58	4,72	0,65	2,99	55,03	56,88	37,69	4,72	0,71	3,22	54,96	56,73	37,71	4,73	0,84	3,71	55,36	56,45	37,85	4,79	0,91
DP	0,37	1,55	1,13	0,88	0,93	0,19	0,93	1,70	1,04	0,84	1,21	0,15	1,38	1,46	1,34	1,14	0,94	0,16	1,39	1,33	1,59	1,18	1,03	0,15

Legenda: C (Campanha), P (Pressão -mb), T (Temperatura °C), M (Metano), D (Dióxido de Carbono), OG (Outros Gases), O (Oxigênio), DP (Desvio Padrão).

Valores arredondados pelo Excel

Fonte: autora (2020).

4.2 Discussão

Nesta pesquisa, a predominância da concentração do CH₄ sobre os demais gases (em todos os poços monitorados) indicou a presença da fase metanogênica na área estudada, conforme a literatura (FISCHER; MAURICE; LAGERKVIST, 1999; KIM, 2003; AYDI *et al.*, 2015; GIOANNIS *et al.*, 2009).

De acordo com Kashyapa; Chughb; Nandakumarc (2016), a decomposição de resíduos em países tropicais é muito mais rápida em comparação com os países de clima temperado e, assim, os aterros atingem um estágio metanogênico estável muito rapidamente, com uma elevada produção de CH₄ dentro dos 03 primeiros anos (praticamente a idade dos resíduos estudados nesta pesquisa).

Para Sun *et al.* (2019), o tipo de resíduo existente no local exerce mais influência sobre a geração de CH₄ que a própria taxa de biodegradação (que tem maior influência sobre a velocidade de geração). De acordo com Xu; Qin; Hac (2019), a produção ou inibição de CH₄ depende da tolerância dos microrganismos metanogênicos às concentrações de ácidos graxos.

Para Desideri *et al.* (2003), as características dos resíduos, a idade do aterro e as condições ambientais podem elevar em mais de 50,00% (em volume) a concentração de CH₄ (que nesta pesquisa variou entre 56,45 e 58,66%²⁴).

Alguns fatores devem ter contribuído para resultados parecidos entre os poços monitorados: a possível semelhança na composição dos resíduos e no tempo de aterramento, já que os poços monitorados, estavam em uma mesma lateral do aterro sanitário e seus resíduos, provavelmente, passaram pela mesma sequência de degradação. Se as condições de campo, os teores de umidade, o nível de compactação e a temperatura forem parecidas, os gases também podem ser (GONZÁLEZ *et al.*, 2011). Além disso, a proximidade entre os poços limitou a heterogeneidade nos resultados de alguma forma, concordando com Brandstätter; Prantl; Fellnera (2020).

Alguns indicadores têm um efeito positivo na produção de CH₄: o pH (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015), a compactação dos resíduos (XU; QIN; HAC, 2019).

²⁴Certamente, a concentração de CH₄ varia conforme o aterro estudado, limitando comparações: 47,10% (LEE; HAN; WANG, 2017), 47,68% (SILVA; CAMPOS, 2008), 50,00% (CZEPIEL *et al.*, 2003), 53,00% (BEHERA *et al.*, 2011), 55,00% (JUNG *et al.*, 2011), 57,00% (VILLANUEVA-ESTRADA *et al.*, 2019), 62,00% (KJELDSEN; FISCHER, 1995).

Outros indicadores, como a pressão atmosférica, afetam a emissão, como destacaram Czepiel *et al.* (2003), Aghdam; Scheutz; Kjeldsen (2019). Segundo estas duas publicações, quando a pressão atmosférica está alta, mais ar entra no aterro, o que resulta em uma maior taxa de fluxo de gás de aterro, porém com menor % de CH₄ em função da diluição (algo que foi comprovado nesta pesquisa).

Em 04 poços monitorados (PP1, PP2, PH1, PH2), a concentração de CH₄ diminuiu com o aumento da pressão de bombeamento; já no PV1 e PV2 ocorreu uma relação direta entre a concentração de CH₄ e a pressão. Estudo realizado por Behera *et al.* (2011) encontrou o mesmo comportamento: aumento da pressão, diminuição do % de CH₄.

A compressão do aterro sanitário também afeta o fluxo de gás e gera um gradiente vertical de pressão que aumenta com a profundidade (TINET; OXARANGO, 2010), por isso, a permeabilidade horizontal é maior que a permeabilidade vertical (YU *et al.*, 2009). A diminuição dos vazios em resíduos mais profundos pode provocar a formação de bolsões de chorume²⁵ que impedem a passagem do gás (ZHAN *et al.*, 2017; XU; QIN; HAC, 2019), reduzindo a eficiência da recuperação (HU *et al.*, 2020). Quando o chorume preenche parte de um poço, o fluxo de gás também é prejudicado (MA *et al.*, 2019), exigindo maior pressão de bombeamento. O conteúdo de gás tende a aumentar com o rebaixamento do nível de lixiviado²⁶ (ZHAN *et al.*, 2017).

O fluxo de gás também sofre influência das alterações temporais na permeabilidade do meio resultantes da variação no teor de precipitação e umidade (AGHDAM; SCHEUTZ; KJELDSSEN, 2019). Resíduo altamente compactado ou com alto nível de umidade resulta em menor eficiência de captura de CH₄ (JUNG *et al.*, 2011). A difusão dos gases também reduz em espessas camadas de resíduos (ZHANG; MATSUTO, 2013). A diferença entre a temperatura do resíduo e a temperatura ambiente também influencia o movimento do gás (MATSUTO *et al.*, 2015).

Nesta pesquisa, o fluxo de gás variou entre 27,05 e 74,60 m³/h (média global: 52,94 m³/h), aumentando em todos os poços com o aumento da pressão de

²⁵Blight (2005) lembra que à medida que o resíduo se comprime, sua permeabilidade também tenderá a reduzir, ajudando assim na redução, a longo prazo, do fluxo de lixiviados.

²⁶Zhan *et al.*, (2017) observaram que o volume de gás saltou de 2000 m³/h para 9500 m³/h após o rebaixamento do nível de lixiviado, provando que uma quantidade significativa de gás estava aprisionada sob os bolsões de lixiviado.

bombeamento (como esperado para poços em perfeito funcionamento e conforme Yu *et al.*, 2009). Verificou-se também que a eficiência da coleta dos gases variou ao longo do monitoramento, como também destacaram Lee; Han; Wang (2017) e Sun *et al.* (2019). A extração do gás é bastante irregular durante os primeiros anos após o fechamento do aterro (FABBRICINO, 2007), justificando as variações nas vazões encontradas.

No PP1 o fluxo de gás variou entre 33,1 e 65,7 m³/h, e no PP2 variou de 36,5 a 53,2 m³/h. No Poço Vertical PV1 o fluxo variou entre 37,2 e 68,9 m³/h, e no PV2 variou de 34,1 a 59,3 m³/h. Já nos Poços Horizontais, o PH1 teve a sua vazão variada entre 35,3 e 63,8 m³/h e o PH2 entre 20,5 e 38,8 m³/h.

Para os maiores valores encontrados nesta pesquisa, Hu *et al.* (2020) explicam que grandes quantidades de gás são geralmente bombeadas em zonas nominalmente saturadas do aterro, onde há degradação contínua de resíduos na área de influência do poço.

Como o fluido que está sendo recuperado é um gás e não um líquido, essa zona deve ser cuidadosamente estimada para ser eficiente já que há distribuição heterogênea nas propriedades de transferência e, talvez, na sucção imposta pelo poço (TINET; OXARANGO, 2010).

A zona de influência de um poço de gás pode ser limitada quando o resíduo é altamente compactado (JUNG *et al.*, 2011).

Quando há uma grande distância entre dois poços, é melhor aumentar a espessura da camada de cobertura e/ou diminuir sua permeabilidade que aumentar o vácuo (YU *et al.*, 2009) para manter o ritmo de extração.

A eficiência da coleta do gás de aterro varia de acordo com a estratégia de coleta, a operação do sistema, tipo e idade da cobertura empregada (LEE; HAN; WANG, 2017).

A coleta pode diminuir cerca de 15% quando são constatados resíduos em contato com a atmosfera em função da baixa espessura da camada de cobertura diária, presença de erosão, rachaduras e escoamento de lixiviados pelas laterais do talude (AYDI *et al.*, 2015).

A direção do fluxo muda com o assentamento mecânico dos resíduos aterrados (TINET; OXARANGO, 2010) e com a recirculação de lixiviados ou infiltração de águas de chuva (JUNG *et al.*, 2011).

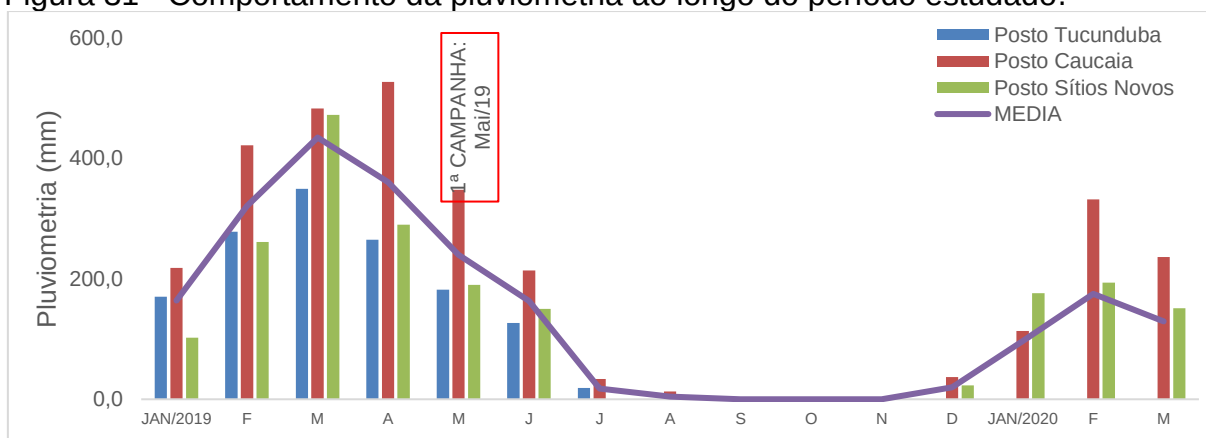
Há também uma relação entre a precipitação e a emissão dos gases (SUTTHASIL *et al.*, 2019) pelo crescimento das taxas de umidade e decomposição (SUN *et al.*, 2019). Brandstätter; Prantl; Fellnera (2020) observaram que as concentrações de CO₂ e CH₄ aumentaram após um evento de inundação.

A umidade ideal permite o transporte de nutrientes, microrganismos e produtos intermediários para uma maior biodegradação dos resíduos e produção do metano e tem o papel de diluir inibidores de biodegradação, como os metais pesados (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015).

Cabe lembrar que a distribuição da umidade nos aterros sanitários não é uniforme e uma entrada extra de água geralmente requer um longo período de transição para que a metanogênese comece em aterros sanitários secos (BEHERA *et al.*, 2011), o que justifica a ocorrência frequente de fenômenos isolados (ZHAN *et al.*, 2017).

Os valores da pluviometria observados nos três postos de monitoramento da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME (mais próximos do aterro estudado) são apresentados na Figura 31. Em 04 poços (PP1, PP2, PH1, PH2), a concentração média geral de CH₄ diminuiu com o fim das chuvas (redução: 2,30/0,77/1,61/1,53%, respectivamente). Nos outros dois poços (PV1, PV2) as concentrações de CH₄ aumentaram (3,55/1,77%, respectivamente). Como bem explica a literatura (GIOANNIS *et al.*, 2009; SCHROTH *et al.*, 2012; SUTTHASIL *et al.*, 2019), as emissões de CH₄ são maiores em condições molhadas, mas quando os resíduos estiverem bem estabilizados, o impacto da precipitação diminuirá.

Figura 31 - Comportamento da pluviometria ao longo do período estudado.



Fonte: elaborado pela autora, com os dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME (2020).

A redução da pluviometria em alguns meses do período monitorado contribuiu para o aumento da temperatura dos resíduos e dos gases captados em todos os poços (e mais intensamente no PH1 e PH2; pela proximidade com a camada de cobertura final e trocas com a atmosfera). Conforme Faitli *et al.* (2014), a diminuição da fração volumétrica da água pode ocasionar altos valores de condutividade térmica dos resíduos.

A literatura (DESIDERI *et al.*, 2003; MATSUTO *et al.*, 2015; JAFARI; STARK; THALHAMER, 2017; TUPSAKHARE *et al.*, 2020) sugere uma relação diretamente proporcional entre a temperatura e a concentração do CH₄. Nesta pesquisa, essa relação ocorreu em 04 poços (PP1, PP2, PH1, PH2), ou seja, onde houve menor concentração do gás CH₄, houve menor temperatura.

Como os demais gases de efeito estufa, o metano absorve radiações provenientes da superfície terrestre e emite radiações nas mais baixas temperaturas (VIEIRA *et al.*, 2008). De acordo com a World Meteorological Organization – WMO (1999), o CH₄ na atmosfera é aproximadamente 24 vezes mais efetivo na absorção de radiação do que o CO₂.

Estudo realizado pelo Instituto Scripps de Oceanografia e Ed Brook da Universidade de Washington, mostrou que o metano aumenta rapidamente com elevadas temperaturas, ou seja, o metano não somente afeta o clima por meio do efeito estufa, mas também é afetado por ele (SCHMIDT, 2004).

Conforme Jafari; Stark; Thalhamer (2017), a temperatura controla a qualidade e a quantidade de gás de aterro dentro de duas faixas de saturação: (1) a faixa mesófila, onde as temperaturas estão entre 20 e 45°C; e (2) a faixa termófila, com temperaturas entre 45-65°C. Nesta pesquisa, todos os poços monitorados estariam classificados como termófilos (considerando apenas a média geral da temperatura), exceto o PP2.

As temperaturas observadas nos poços horizontais foram até 11,6°C maiores que as dos poços verticais (como esperado), pela proximidade dos resíduos com o ambiente externo e como efeito da entrada de ar e oxidação, concordando com Matsuto *et al.*, (2015). Além disso, os poços verticais monitorados possuem maior chance de estarem envolvidos por maiores volumes de lixiviados, que reduzem a temperatura do maciço e dos gases. Para Fei, Zekkos e Raskin (2015), a temperatura externa parece ter maior influência sobre a temperatura dos resíduos mais próximos à superfície do aterro.

Jafari, Stark e Thalhamer (2017) lembram que as temperaturas no cabeçote de um poço são até 20°C menores que as temperaturas reais dos resíduos devido à perda de calor no percurso do gás do meio do resíduo até o cabeçote, contato com outros gases mais frios durante esse processo e vaporização da umidade.

O calor do gás de aterro pode ser aplicado para geração de eletricidade e dependendo da sua qualidade, esse gás de aterro pode ser usado como gás natural, após remoção de sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e vapor de água (NIKKHAH *et al.*, 2018); exatamente como ocorre no ASMOC.

Jafari, Stark e Thalhamer (2017) citam vários fatores que ocasionam elevadas temperaturas em aterros sanitários, dentre as quais: intrusão de ar, descarte de resíduos reativos, combustão espontânea, pirólise etc. Ainda segundo os autores, a introdução de O₂ cria condições aeróbias que podem aumentar a temperatura dos resíduos. Eventos de temperatura elevada podem impactar significativamente o comportamento e operação de um aterro sanitário, resultando em danos à infraestrutura de extração de gás (JAFARI; STARK; THALHAMER, 2017).

Nesta pesquisa, a relação da concentração de CH₄/CO₂ variou entre 1,42 e 1,55. Conforme Jafari; Stark; Thalhamer (2017), quando essa relação está próxima ou maior que 1,00 tem-se um bom indicador sobre a normalidade da decomposição anaeróbia. Essa razão é usada como um indicador da idade e maturidade dos resíduos (AYDI *et al.*, 2015). O aumento da razão CH₄/CO₂ significa crescimento da produção de CH₄, do consumo de CO₂ ou de alguma combinação de ambos (TUPSAKHARE *et al.*, 2020). O aumento da temperatura do resíduo, por exemplo, pode provocar uma diminuição dessa relação, já que afeta a metanogênese (JAFARI; STARK; THALHAMER, 2017).

Em todos os poços, aumentou a presença de Outros Gases/Contaminantes²⁷ e O₂ com o crescimento da pressão, reduzindo a qualidade do gás de aterro captado, prejudicando o sistema de aproveitamento e denunciando a necessidade de cuidadosos ajustes²⁸ na abertura da válvula do cabeçote de cada poço. Vale salientar

²⁷Para Desideri *et al.* (2003) o termo “Outros Gases” é sinônimo de N₂. Segundo os autores, uma grande fração de N₂ indica que o ar está presente dentro do aterro e que alguns dos processos de decomposição são aeróbios.

²⁸Uma maior eficiência na coleta aumenta o volume de gás disponível para utilização e permite maior redução nas emissões de GEE (NISKANEN *et al.*, 2013). Um vácuo insuficiente gera um óbvio impacto ambiental adverso pela saída do gás pela cobertura; uma sucção muito forte puxa o ar para o aterro sanitário, dizimando a população de bactérias anaeróbias (HALVORSEN; NEC; HUCULAK, 2019).

que o CO₂ também aumentou em 03 poços (PP1, PH1, PH2) com o crescimento da pressão de bombeamento.

Conforme Popov (2005), a pressão de bombeamento direciona o ar atmosférico para dentro das camadas mais superficiais ao aterro, fazendo com que aumente a concentração de contaminantes no poço de gás. Ainda segundo o autor, o nitrogênio presente no ar, ao entrar no sistema, é o que requer o maior investimento para ser removido, sendo mais viável impedir que o ar entre²⁹.

Os efeitos negativos do nitrogênio sobre a qualidade dos gases de aterro foram estudados por Price, Barlaz e Hater (2003). No experimento realizado pelos autores, a taxa de produção de CH₄ diminuiu 15% com a adição de nitrato e essa inibição foi atribuída (i) aos elementos tóxicos intermediários do processo de desnitrificação e (ii) a redução global da decomposição da celulose. Ainda segundo os autores, os aterros sanitários têm significativa capacidade de converter nitrato em nitrogênio, justificando a preocupação com a presença desse elemento (especialmente perto da superfície do aterro, onde a coleta do gás de aterro é mais difícil)³⁰.

As concentrações de O₂ nos poços monitorados variaram entre 0,26 e 0,65%, sendo consideradas baixas e adequadas. Para a ATDRX (2001), baixos teores de O₂ indicam alta compactação dos resíduos, presença da fase anaeróbia e um bom sistema de isolamento da camada de cobertura com relação à atmosfera.

Silva e Campos (2008) consideram até 3,00% de O₂ como concentrações seguras para aterros sanitários com projetos de aproveitamento do gás de aterro (como o investigado nesta pesquisa) e valores acima disso tornam-se perigosos.

O estudo realizado por Jafari; Stark; Thalhmer (2017) encontrou níveis de O₂ no cabeçote do poço acima de 5,00%. Segundo Popov (2005), concentrações iguais ou superiores a 5,00% impedem a digestão anaeróbia e, portanto, a extração do gás para utilização energética pode ser inviável economicamente. Ainda segundo o autor, a concentração de O₂ deve ser monitorada diariamente e números acima de 10,00%

²⁹A entrada indesejada de ar no aterro sanitário e a saída descontrolada de gás de aterro são menores no período de chuvas porque a camada de cobertura fica úmida, alterando sua permeabilidade ao gás (DELKASH *et al.*, 2016).

³⁰Estima-se que os resíduos sólidos contenham cerca de 4,00% de proteína, sendo uma das fontes de nitrogênio dentro do aterro sanitário (PRICE; BARLAZ; HATER, 2003). A entrada de nitrogênio atmosférico pode afetar a decomposição nos aterros sanitários porque resfria os resíduos (JAFARI; STARK; THALHAMER, 2017). É essencial evitar o resfriamento, pois a temperatura adequada é importante para os processos de decomposição biológica e para a produção de metano (FAITLI *et al.*, 2014). O aumento significativo de NO₃ e SO₄ indiretamente mostra que os resíduos sólidos estão sendo continuamente oxigenados (BRANDSTÄTTER; PRANTL; FELLNERA, 2020).

podem indicar uma falha na rede extrativa devido à penetração do ar. Além disso, na presença de oxigênio em quantidade volumétrica de 5 a 15%, o metano é explosivo (TINET; OXARANGO, 2010).

A concentração de O_2 no poço de extração depende de vários fatores (MAJDINASAB; YUAN, 2017; LIU *et al.*, 2018): espessura da cobertura, características do gás, textura do solo e condições meteorológicas. Schroth *et al.* (2012) observaram que as concentrações de O_2 diminuem com o aumento da espessura do solo aplicado na camada de cobertura. A presença de uma cobertura de baixa permeabilidade diminui significativamente a área de entrada de ar (TINET; OXARANGO, 2010).

A presença de O_2 pode rapidamente transformar o CH_4 em CO_2 (FISCHER; MAURICE; LAGERKVIST, 1999; LEE; HAN; WANG, 2017; LIU *et al.*, 2018). As bactérias metanotróficas são responsáveis pelo processo de oxidação do CH_4 e são organismos aeróbios obrigatórios (MAJDINASAB; YUAN, 2017). Três estudos realizados pelo IPCC sugerem uma taxa de oxidação de CH_4 em torno de 10%, entretanto, é questionável se esse valor é realmente representativo (LEE; HAN; WANG, 2017).

Existem vários parâmetros ambientais que desempenham um papel chave no controle da oxidação do CH_4 dentro de solos cobertura de aterros, incluindo o conteúdo orgânico do solo, sua textura, umidade, temperatura, pH, nutrientes, penetração de O_2 e concentração de CH_4 (MAJDINASAB; YUAN, 2017).

No estudo realizado por Czepiel *et al.* (2003) observou-se uma correlação entre a temperatura do solo do aterro e a oxidação de metano. Segundo os autores, a umidade do solo tem demonstrado exercer uma forte influência sobre a oxidação de metano em uma variedade de ambientes, incluindo solos de cobertura de aterros sanitários. Eles observaram que, no período frio, a oxidação foi de 5,00%, passando para 18,00% no período quente.

Entende-se de Silva e Campos (2008), que o O_2 existente em poços com extração ativa decorre do(a): entrada de ar atmosférico pelas trincas e fissuras existentes em volta do poço sob sucção; rompimento da tubulação ou flanges mal apertados; poços localizados ao lado de drenagens de águas pluviais.

A aeração no aterro sanitário tem como efeitos colaterais negativos o aumento das emissões de CO_2 e aumento da liberação de um potente gás de efeito estufa (N_2O), conforme Brandstätter; Prantl; Fellnera (2020).

Um aterro aerado produz metade do CH₄ produzido por um aterro anaeróbico de tamanho igual (SUTTHASIL *et al.*, 2019).

Conforme Liu *et al.* (2018), o acúmulo excessivo de ar próximo a um poço aumenta acentuadamente a temperatura em função do crescimento das reações químicas enquanto a ocorrência de caminhos preferenciais tem efeito significativo sobre o fluxo e distribuição do oxigênio em aterros.

5 CONCLUSÃO

- O monitoramento realizado no aterro sanitário estudado permitiu, de certo modo, prever a melhor condição de funcionamento para cada poço, sugerindo melhorias na eficiência de coleta do metano com redução de contaminantes.
- Com base na literatura consultada, a área pesquisada apresentou características de resíduos na fase metanogênica de degradação, sendo corroborado, em termos energéticos, a decisão pela instalação da estrutura de captação e da planta de aproveitamento dos gases.
- Como já bem discutido, a geração e captação de gases nos aterros sanitários dependem de muitos fatores (internos e externos, isolados e combinados, temporários e permanentes), e isso atribuiu aos poços condições, muito particulares, em termos de vazão e concentração de metano.
- A proximidade entre os poços monitorados ajudou a limitar a heterogeneidade na composição dos resíduos e gases.
- O comportamento apresentado nas concentrações dos gases nos poços PP1, PP2, PH1 e PH2 seguiu uma mesma tendência, ou seja, com o aumento da pressão, houve a diminuição da concentração de CH_4 e aumento da concentração de CO_2 , OG e O_2 . Já os poços PV1 e PV2 tiveram comportamento inverso.
- Cada poço teve uma particular condição de operação, entretanto, considerando a maior concentração de metano e menor presença de contaminantes, foi possível concluir que a abertura de 25% (pressão entre -1,39 e -2,18mb) foi a ideal para otimização da captação.
- A abertura desproporcional das válvulas dos cabeçotes teve influência negativa sobre a qualidade dos gases captados, especialmente nos poços PV1 e PV2.

- A concentração de CH₄ nos poços monitorados variou vertical e horizontalmente em curtas distâncias.
- Houve uma relação, diretamente proporcional, entre a temperatura e a concentração do CH₄ nos poços monitorados, concordando com a literatura.
- A concentração média geral de CH₄ diminuiu com o fim das chuvas, mostrando a influência da presença ou ausência de água dentro do aterro para a geração desse gás.
- A redução da pluviometria contribuiu para o aumento da temperatura dos resíduos e dos gases captados em todos os poços.
- A temperatura dos gases captados por poços horizontais foi maior que a observada em poços verticais, corroborando o que diz a literatura sobre o comportamento aeróbio e as trocas com a atmosfera nas camadas superiores.
- O aumento da pressão de bombeamento influenciou no aumento da vazão captada, mas prejudicou a qualidade do que foi captado.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar pesquisa contemplando o monitoramento de um maior número de poços da mesma e de outra lateral do mesmo aterro sanitário.
- Avaliar a influência da aplicação de chorume na cobertura do aterro sobre a vazão e composição dos gases.
- Avaliar a influência do nível de líquidos dentro do poço sobre a qualidade dos gases.

REFERÊNCIAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES & DISEASE REGISTRY - ATDRX. **Landfill Gas Primer: An Overview for Environmental Health Professionals**. ATDRX: Division of Health Assessment and Consultation. 74p., 2001.

AGHDAM, F.; SCHEUTZ, E.; KJELDSEN, C. Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow. **Waste Management**. v. 87, p. 905-914, 2019.

ALBERTE, E. P. V.; CARNEIRO, A. P.; KAN, L. Recuperação de áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos urbanos. **Diálogos & Ciência**, ano III, n.5, jun., 2005.q

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2017.364 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALVES, F. D. S. **Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande – PB**. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

AMARAL, F. L. M. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 7 p.

_____. **NBR 13.896: Aterros de Resíduos Não Perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AYDI *et al.* Assessment of electrical generation potential and viability of gas collection from fugitive emissions in a Tunisian landfill. **Energy Strategy Reviews**. v. 8, p. 8-14, 2015.

BEHERA *et al.* Enhanced methane recovery by food waste leachate injection into a landfill in Korea. **Waste Management**. v. 31, Ed. 9–10, set-out, p. 2126-2132, 2011.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. Projeto REENGE. São Carlos: 1999. 120p.

BLIGHT, G. E. Consequences of raising the height of a landfill in a water-deficient climate. **Waste Management**. v. 25, ed. 10, p. 1021-1036, 2005.

BRANDSTÄTTER, C.; PRANTL, R.; FELLNER, J. Performance assessment of landfill in-situ aeration – A case study. **Waste Management**. v. 101, p. 231-240, 2020.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 ago. 2010. p. 23.

_____. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 fev. 1986.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros. Casos: Nova Iguaçu e Terra Brava**. 2005. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BUENO, B. S.; BENVENUTO, C.; VILAR, O. M. **Aplicações em barreiras impermeabilizantes**. In: Manual Brasileiro de Geossintéticos [S. l: s.n.], 2004.

CARTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.) **Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES/RIMA, 2003. p. 51-102.

CARTILHOS JUNIOR *et al.* Principais processos de degradação de resíduos urbanos. In: CARTILHOS JUNIOR (Coord.) **Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES/RIMA, 2003. p. 19-50.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CASTRO *et al.* Influência da recirculação de lixiviado na vazão e na composição do Biogás para resíduos com diferentes tempos de aterramento em aterro sanitário de médio. In: Congresso ABES, **Anais...** 2017.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. 2008. 316 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CHEN, Y. C.; CHEN, K. S.; WU, C. H. Numerical simulation of gas flow around a passive vent in a sanitary landfill. **Journal of Hazardous Materials**. p. 39-52, 2003.

CUNHA, E. R da. **Avaliação do processo de bioestabilização de resíduos sólidos urbanos em lisímetro de campo**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

CZEPIEL *et al.* The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions. **Waste Management**. p. 593-598, 2003.

DELKASH *et al.* Short-term landfill methane emissions dependency on wind. **Waste Management**. v. 55, p. 288-298, 2016

DESIDERI *et al.* Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. **Energy Conversion and Management**. v. 44. p. 1969-1981, 2003.

EMKES, H.; COULON, F.; WAGLAND, S. A decision support tool for landfill methane generation and gas Collection. **Waste Management**. v. 43, p. 307-318, 2015.

ENSINAS, V. A. **Estudo da Geração de Biogás no Aterro sanitário Delta em Campinas - SP**. Campinas, 2003. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2003.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Air emissions from municipal solid waste landfills**: background information for proposed standards and guidelines. U.S.: EPA, 1991.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Estimates of Methane Recovery in Landfill Gas Flaring and Utilisation**. Ireland: Fehily Timoney & Co. Ltd, 2009. 50 p.

ESKANDARI, M.; HOMAEI, M.; MAHMODI, S. An integrated multi criteria approach for landfill siting in a conflicting environmental, economical and socio-cultural area. **Waste Management**, v. 32, n. 8, p. 1528-1538, 2012.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. **Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2004**. Luxembourg: EPA 40p. 2004.

FABBRICINO, M. Operational vacuum assessment for landfill biogas extraction. **Waste Management**. v. 27, ed. 10, p. 1393-1399, 2007.

FAITLI *et al.* Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. **Waste Management**. 2014.

FEI, X; ZEKOS, D.; RASKIN, L. Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments. **Waste Management**. v. 55, p. 276-287, 2015.

FELDKIRCHER, W. **Impermeabilização de aterro sanitário com geomembrana**. 2008. 62 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de São Francisco, Itatiba, 2008.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

FISCHER, C.; MAURICE, C.; LAGERKVIST, A. **Gas Emission from Landfills - An overview of issues and research needs**. 57 p., 1999.

FONSECA, M. M. **Avaliação do gerenciamento de um aterro de resíduos industriais perigosos à partir da aplicação de um índice de qualidade**. 2018. 51 f. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

FREIRE *et al.* Medições da rigidez do solo para previsão da estabilidade da camada de cobertura de um aterro sanitário. **Revista Tecnologia Fortaleza**, v. 40, n. 2, p. 1-14, dez., 2019.

FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE - FUNASA. **Orientações técnicas para apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos**. Brasília: FUNASA, 46p., 2003.

GARDNER, N.; PROBERT, S. D. Forecasting landfill-gas yields. **Applied Energy**, v. 44, p. 131-163, 1993.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

_____. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GIOANNIS *et al.* Landfill gas generation after mechanical biological treatment of municipal solid waste. Estimation of gas generation rate constants. **Waste Management**. v. 29, ed. 3, p. 1026-1034, 2009.

GOES, D. A contribuição do aterro sanitário na gestão de resíduos sólidos: um breve estudo de caso no Aterro de Paulo Afonso, BA. **Revista Científica da Fasete**, p. 90-105, 2016.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. Projeto, implantação e operação de aterros sustentáveis de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte. In: CASTILHOS JÚNIOR *et al.* (Coord.) **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades**, Rio de Janeiro, ABES, RiMa, Projeto PROSAB, 2003. 288p.

GONZÁLEZ *et al.* Effect of solid wastes composition and confinement time on methane production in a dump. **Journal of Environmental Protection**. v.2, n.10, p.1310-1316, 2011.

GUEDES, M. J. F. **Estudo das emissões de biogás em aterro de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro**. 2018. 181 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

HALVORSEN; NEC; HUCULAK. Horizontal landfill gas wells: Geometry, physics of flow and connection with the atmosphere. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**. v. 113, p. 50-62, 2019.

HANSON, J. L.; YESILLER, N.; KENDALL, L. A. **Integrated Temperature and Gas Analysis at a Municipal Solid Waste Landfill**. In: 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Proceedings, 2005.

HU *et al.* Installation and performance of horizontal wells for dewatering at municipal solid waste landfills in China. **Waste Management**. p.159-168, 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. São Paulo: IPT, 2 ed., 370p, 2000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Manual de gerenciamento integrado do lixo municipal**. São Paulo: IPT, 278p, 1995

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION - ISWA. **Landfill operational guidelines**. Prepared by ISWA Working Group on Landfill, 2., 106p., 2010.

IWAI, C. K. **Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos**. 2005. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

JAFARI, N. H.; STARK, T. D.; THALHAMER, T. Spatial and temporal characteristics of elevated temperatures in municipal solid waste landfills. **Waste Management**. p. 286-301, 2017.

JOHANNESSEN, L. M. **Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills**. The International Bank for Reconstruction and Development/THE WORLD BANK, Working Paper Series, Washington, D.C., 23p. 1999.

JORGE, F.N.; BAPTISTI, E.; GONÇALVES, A. Monitoramento em Aterros Sanitários nas Fases de Encerramento e de Recuperação: Desempenhos Mecânico e Ambiental. 2004. In: RESID – Seminário sobre Resíduos Sólidos. 20., São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004.

JUNG *et al.* Mitigating methane emissions and air intrusion in heterogeneous landfills with a high permeability layer. **Waste Management**. v. 31, ed. 5, p. 1049-1058, 2011.

KASHYAPA, R. K.; CHUGHB, P.; NANDAKUMARC, T. Opportunities & Challenges in Capturing Landfill Gas from an Active and Un-scientificallly Managed Land Fill Site - A Case Study. **Procedia Environmental Sciences**. v.35, p.348-367, 2016.

KIM, M. **The study of landfill microbial communities using landfill gas and landfill gas condensate**. 2003. 115p. Thesis (Doctor of Philosophy). Drexel University, Philadelphia, US, 2003

KJELDSEN, P.; FISCHER, E. V. Landfill gas migration – Field investigations at skellingsted landfill, Denmark. **Waste Management & Research**. p. 467-484, 1995.

KÖLSCH, F.; BAUER, J. Static Stability of Landfills. In: International Waste Working Group - IWWG, **Proceedings**, Sardinia, 18p., 2009.

KURBANOVA, M. G.; EGUSHOVA, E. A.; POZDNAJAKOVA, O. G. The Influence of Various Factors on the Methane Fermentation Process. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, v. 91, 2015.

LANZA *et al.* **Caderno Técnico de Reabilitação de Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos Urbanos**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente/Fundação Israel Pinheiro, 2009, 28 p.

LANZA, V. C. V.; CARVALHO, A. L. **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário**. Belo Horizonte: FEAM, 2006. 36 p.

LAW *et al.* Maximizing landfill capacity by vertical expansion: a case study for an innovative waste management solution. In: ISWA WORLD CONGRESS, Vienna, 2013. **Proceedings...** Vienna: International Solid Waste Association, 2013.

LEE, U.; HAN, J.; WANG, M. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. **Journal of Cleaner Production**. v. 166, p. 335-342, 2017.

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande-PB**. 2008. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

LEONE, J. **The Effects of Atmospheric Pressure Changes on Landfill Gas Collection Efficiency and Quality**. Thesis (Master of Science in Environment, Health & Safety Management) – Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, 2007.

LIMA, L. M. Q. **Lixo - Tratamento e biorremediação**. São Paulo: 1995. 265 p.

_____. **Tratamento de Lixo**. 2. Ed. São Paulo. 1991. 249 p.

LIMA *et al.* Avaliação de um aterro sanitário por meio do índice de qualidade de resíduos sólidos. Tupã, Brasil. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**. v. 11, n. 1., p. 88-106, 2017.

LINO, I. C. **Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários**: análise comparativa de métodos. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.

LIU *et al.* The in situ aeration in an old landfill in China: Multi-wells optimization method and application. **Waste Management**. v. 76. p. 614-620, 2018.

LOCASTRO, J. K.; ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. v.20, n.1, p. 200-210, jan./abr., 2016.

LODI, P. C.; ZORNBERG, J. G.; BUENO, B. S. Uma breve visão sobre geossintéticos aplicados a aterros Sanitários. **Revista Tecnologia Fortaleza**, v. 30, n. 2, p. 188-197, dez. 2009.

LUPATINI, G. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão em escolha de áreas para aterros sanitários**. 2002. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MA *et al.* Field measurement of pore pressures and liquid-gas distribution using drilling and ERT in a high food waste content MSW landfill in Guangzhou, China. **Engineering Geology**. v. 250, p. 21-33, 2019.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MAJDINASAB, A.; YUAN, Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review. **Ecological Engineering**. v. 104, p.116-130, 2017.

MANSOR *et al.* **Resíduos Sólidos**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo: SMA, 2010.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARQUES JUNIOR, F. A. F. **Condições intervenientes na geração de biogás de resíduos recém dispostos em aterro sanitário e com um ano de aterramento**. 2020. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

MARTINES, F. C. **Influência da recirculação de lixiviado na biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e na produção de biogás**. 2015. 77 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica do Paraná, Londrina, 2015.

MATHERI *et al.* Analysis of the biogas productivity from dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 2, p. 2328-2334, 2018.

MATSUTO *et al.* Onsite survey on the mechanism of passive aeration and air flow path in a semi-aerobic landfill. **Waste Management**. v. 26, p.204-212, 2015

MATTAR, F. N. **Pesquisa de marketing**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

MELO, A. L. O. **Avaliação e seleção de áreas para implantação de aterro sanitário utilizando lógica fuzzy e análise multi-critério: uma proposta metodológica - Aplicação ao município de Cachoeiro de Itapemirim- ES**. 2001. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. 2005. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

MENDONÇA, R. **Operação de aterros sanitários. Curso básico sobre aterros sanitários**. São Paulo: ABLP, 2000. p. 82-97.

MONTEIRO, J. H. P. *et al.* **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

MONTEIRO, L. S. **Redução das emissões gasosas através da camada de cobertura de aterros sanitários utilizando diversos tipos de materiais**. 2016. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no Estudo do comportamento do aterro sanitário da Muribeca**. 2003. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MOREIRA, F. G. S. **Emissões fugitivas de biogás em célula de aterro sanitário**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. Rio de Janeiro, 3. ed., 2003.
NIKKHAH *et al.* Hybrid landfill gas emissions modeling and life cycle assessment for determining the appropriate period to install biogas system. **Journal of Cleaner Production**. v. 185, p. 772-780, 2018.

_____. Enhancing landfill gas recovery. **Journal of Cleaner Production**. v. 55, p. 67-71, 2013.

OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N. T. R.; BARROS, K. R. **Guia para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos**. Paraná: CREA. 2009. 64 p.

OLIVEIRA, C. A. A. **Análises de gases na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC)**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

PALMISANO, A. C., BARLAZ, M. A. **Microbiology of solid Waste**, CRC Press, Inc., Boca Raton, Flórida, USA, 1996.

PESSIN *et al.* Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In: CASTILHOS JÚNIOR *et al.* (Coord.) **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades** (coletânea de trabalhos técnicos), Rio de Janeiro, ABES, RiMa, Projeto PROSAB, 2002. 94p.

PFEIFFER, S. C.; CARVALHO, E. H. **Seleção de áreas para implantação de aterro sanitário no entorno do município de Ribeirão Preto (SP), utilizando-se o sistema de informações geográficas**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 6., Gramado, 2002. **Anais...** Gramado: ABES, 2002.

POPOV, V. A new landfill system for cheaper landfill gas purification. **Renewable Energy**. P. 1021–1029, 2005.

PRICE, G. A.; BARLAZ, M. A.; HATER, G. R. Nitrogen management in bioreactor landfills. **Waste Management**. p. 675–688, 2003.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RANNAUD, D.; CABRAL, A.; ALLAIRE, S. E. Allaire Modeling Methane Migration and Oxidation in Landfill Cover Materials with TOUGH2-LGM. **Water Air Soil Pollut.** p. 253–267. 2009.

REDE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL - RECESA. **Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**: Guia do profissional em treinamento. Belo Horizonte: RECESA. 112p., 2008.

RIBEIRO, E. D. **Estudo do comportamento da rigidez do solo empregado na camada de cobertura do aterro sanitário de Caucaia-CE**. 2019. 403 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2019.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

SANTOS *et al.* Otimização da captação de metano de um aterro sanitário do Nordeste brasileiro. **Revista Principia**. n. 47, 2019.

SANTOS, G. O. **Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera**. 2012. 313 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SANTOS, G. O. **Resíduos sólidos e aterros sanitários: em busca de um novo olhar**. Recife: Imprima, 1. Ed, 2016. 80 p.

SANTOS, G. O.; MATOS, B. O. Estudo do processo de degradação de resíduos sólidos orgânicos (restos de alimentos) em lisímetro de pequeno porte. Fortaleza. **Conexão. Ciência e Tecnologia**. v. 11, n. 4, p. 26 - 36, dez. 2017.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. Guidelines for landfill gas emission monitoring using the tracer gas dispersion method. **Waste Management**. v. 85, p. 351-360, 2019.

SCHMIDT, G. A. Methane: a scientific journey from obscurity to climate super-stardom NAA GISS research features. Disponível em: https://www.giss.nasa.gov/research/features/200409_methane/. Acesso em: 30 de novembro de 2020.

SCHMIDT, T. **Seleção de área e dimensionamento de aterro sanitário para o consórcio público intermunicipal para assuntos estratégicos do G8 – CIPAE G8**. 2016. 145 f. Monograma (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

SCHROTH *et al.* Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. **Waste Management**. v 32, ed 5, p. 879-889, 2011.

SELLTIZ, C.; WRIGHTSMAN, L. S.; COOK, S. W. **Métodos de pesquisa das relações sociais**. São Paulo: Herder, 1965.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 23. ed. São Paulo: Cortez, 2007.

SILVA, T. N. **Diagnóstico da produção de biogás em um aterro sanitário: estudo de caso no aterro Bandeirantes**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2006.

SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes – SP. **Eng. sanitária ambiental**. v.13, n.1, p. 88-96, jan/mar., 2008.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N.; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n.2, p.95-104, abr/jun, 2013.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA, Brasília, 2019.

SOWERS, G. F. Settlement of waste disposal fills. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., Moscou. **Anais...** Moscou. v. 2, p. 207-210, 1973.

STACHOWITZ, W. H. 15 years of experience in the field of landfill gas disposal – standards, problems, solution, and procedures. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 8., 2001. **Proceedings** [...]. Sardinia. Sardinia: DAS-IB, 2001, p.601-611.

STUERMER, M. M.; BROCANELI, P. F.; VIEIRA, M. E. Os Aterros Sanitários Desativados e o Sistema de Áreas Verdes da Cidade de São Paulo: Possibilidade de Integração. **Revista Labverde**, n.2, p.10-29, jun., 2011.

SUN *et al.* Evaluation of optimal model parameters for prediction of methane generation from selected U.S. landfills. **Waste Management**. p. 120–127, 2019.

SUTTHASIL *et al.* The effectiveness of passive gas ventilation on methane emission reduction in a semi-aerobic test cell operated in the tropics. **Waste Management**. v. 87, p. 954-964, 2019.

SUZUKI, D. K. **Verticalização de aterros sanitários por meio de reforço com geogrelhas e diques periféricos alteados pelo método de montante**. 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SUZUKI, J. A. N.; GOMES, J. Consórcios intermunicipais para a destinação de RSU em aterros, regionais: estudo prospectivo para os municípios no Estado do Paraná. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 14, n. 2, p. 155-158, 2009.

TERRAZA, H.; WILLUMSEN, H. **Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization**. Inter-American Development Bank, 2009, 68p.

TINET, A.-J; OXARANGO, L. Stationary gas flow to a vertical extraction well in MSW landfill considering the effect of mechanical settlement on hydraulic properties. **Chemical Engineering Science**. v. 65, ed. 23, p. 6065-6340, 2010.

TUPSAKHARE, *et al.* The impact of pressure, moisture and temperature on pyrolysis of municipal solid waste under simulated landfill conditions and relevance to the field data from elevated temperature landfill. **Science of The Total Environment**. v. 723, 2020.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. **Landfill off-gas collection and treatment systems**. Washington: USACE, 2008. 15p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Guidance**

for evaluating landfill gas emissions from closed or abandoned facilities. Washington: USEPA. 2005. 86p.

_____. **LFG Energy Project Development Handbook.** Washington: USEPA. 2017. 98p.

VAN ELK, A. G. H. P. **Mecanismo de Desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos:** redução de emissões na disposição final. Rio de Janeiro: IBAM, 2007, 40 p.

VAN ELK, A. G. P.; CORRÊA, L. R.; RITTER, E. Análise de recalques em longo prazo no vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária Ambiental.** v. 24, n. 3, p. 547-557, maio/jun., 2019.

VIEIRA DOS SANTOS, P. C. V. **Estudo da degradação e dos recalques em células experimentais de resíduos sólidos no aterro do Jockey Club/DF.** 2004. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

VILLANUEVA-ESTRADA *et al.* Energy production from biogas in a closed landfill: A case study of prados de la Montaña, Mexico City. **Sustainable Energy Technologies and Assessments.** p. 236-244, 2019.

XU, Q.; QIN, J.; HAC, J. Municipal solid waste landfill performance with different biogas collection practices: Biogas and leachate generations. **Journal of Cleaner Production.** p. 446-454, 2019.

YU *et al.* Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills. **Journal of Hazardous Materials.** v. 168, ed. 2-3, p 1404-1416, 2009.

ZHAN *et al.* Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Liquid-gas interactions observed from a large-scale experiment. **Waste Management.** v. 68, p. 307-318, 2017.

ZHANG, X.; MATSUTO, T. Assessment of internal condition of waste in a roofed landfill. **Waste Management.** v. 33, ed.1, p. 102-108, 2013.