



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Ciência e Tecnologia

Câmpus de Sorocaba

PAMELLA KERCHES DE BRITO BORGES

PRESENÇA DE ETANOL NO MEIO AMBIENTE:

**UMA ANÁLISE DE ESTUDOS E PERSPECTIVAS REFERENTE AOS IMPACTOS
AMBIENTAIS E CONDIÇÕES DE CONTENÇÃO PARA O ARMAZENAMENTO**

SOROCABA

2024

PAMELLA KERCHES DE BRITO BORGES

PRESENÇA DE ETANOL NO MEIO AMBIENTE:

UMA ANÁLISE DE ESTUDOS E PERSPECTIVAS REFERENTE AOS IMPACTOS
AMBIENTAIS E CONDIÇÕES DE CONTENÇÃO PARA O ARMAZENAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Ciência e
Tecnologia de Sorocaba, Universidade
Estadual Paulista (UNESP), como parte
dos requisitos para obtenção do grau de
Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Navarro
Manfredini

Coorientador: Prof. Dr. Sandro Donnini
Mancini

SOROCABA

2024

B732p	Borges, Pamella Kerches de Brito Presença de etanol no meio ambiente : uma análise de estudos e perspectivas referente aos impactos ambientais e condições de contenção para o armazenamento / Pamella Kerches de Brito Borges. -- Sorocaba, 2024 43 p. : il., tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Fabio Navarro Manfredini Coorientador: Sandro Donnini Mancini 1. Etanol. 2. Armazenamento. 3. Permeabilidade. 4. Impacto Ambiental. 5. Diques (Engenharia). I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

PAMELLA KERCHES DE BRITO BORGES

PRESENÇA DE ETANOL NO MEIO AMBIENTE:
UMA ANÁLISE DE ESTUDOS E PERSPECTIVAS REFERENTE AOS IMPACTOS
AMBIENTAIS E CONDIÇÕES DE CONTENÇÃO PARA O ARMAZENAMENTO

Sorocaba, 08 de agosto de 2024

Prof. Dr. Fabio Navarro Manfredini
Orientador

Professor Dr. Sandro Donnini Mancini
Coorientador

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 07 de agosto de 2024.

Sorocaba
2024

Dedico este trabalho aos meus amigos e colaboradores da Unesp Sorocaba que não pouparam esforços em me apoiar e suportar até conclusão do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe que batalhou muito para que eu pudesse ter independência para conquistar os meus sonhos. Ao programada de Permanência Estudantil do qual fui beneficiada durante a maior parte do ciclo universitário com especial agradecimento ao colaborador Danilo Claudio de Godoy que sempre orientou e esteve disponível acerca do processo de aquisição da bolsa – sem este benefício não teria sido possível me manter em Sorocaba e realizar o curso. Aos meus amigos que foram suma importância para que eu pudesse vivenciar e concluir esse período – sem o apoio deles, momentos de estudos em conjunto, conselhos, descontração, apoio e incentivo na compra dos brigadeiros que eu vendia (fonte de renda complementar a bolsa de permanência), não seria possível conquistar esse título. Aos excelentes professores do curso de graduação Engenharia Ambiental do campus de Sorocaba que, além de alta qualidade profissional, sempre estiveram próximos e disponíveis ao corpo discente, especialmente aos professores orientadores Fábio e Sandro. Por fim, e de suma importância ao meu namorado Marcos Luiz da Silva, por sempre me apoiar, incentivar a não me deixar desistir.

“Você pode sonhar, criar, projetar e construir o lugar mais maravilhoso do mundo [...] mas são necessárias pessoas para fazer do sonho uma realidade.” (Walt Disney)

RESUMO

No Brasil, devido à expansão das usinas sucroalcooleiras impulsionada pelo incentivo à produção e uso de álcool desde 1975 com o programa Proálcool, foram construídos parques de tanques para armazenamento de etanol. Estes tanques, predominantemente cercados por diques de contenção de solo compactado, são essenciais para a operação segura de armazenamento e distribuição do etanol, mas também apresentam riscos ambientais e para as pessoas. Apesar de o etanol ser geralmente considerado um produto biodegradável e de baixo impacto ambiental, os impactos associados a vazamentos são frequentemente subestimados. Este estudo analisa a eficiência da permeabilidade das bacias de contenção de tanques verticais, conforme definido pela norma "ABNT NBR 17505 Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Parte 2: Armazenamento em tanques, vasos e recipientes portáteis/2022", avaliando a utilização de solo compactado com argila como técnica de impermeabilização da contenção. A pesquisa baseia-se em uma revisão comparativa da literatura acadêmica publicada a partir de 2004, explorando a complementaridade dos temas abordados e identificando pontos de conexão relevantes. As descobertas principais e as tendências observadas na literatura são sintetizadas, abordando características físico-químicas do etanol, seus impactos ambientais, estratégias de mitigação e na legislação vigente acerca do armazenamento. A legislação existente carece de maior riqueza de informações e exigências, sendo necessário seu aprimoramento não apenas fortalecer o cumprimento legal, mas também contribuir para soluções efetivas para a contenção de um produto derramado. Além de ampliar o conhecimento acerca do potencial de dano ambiental do etanol, os estudos mostraram que o coeficiente de permeabilidade de $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$ encontrado em um cenário de derrame de etanol hidratado em uma camada de 30cm de solo argiloso compactado são eficientes para evitar a contaminação ambiental (JACINTO, 2021) mas que só foi possível ser avaliada devido a uma análise do produto armazenado, do solo que compõe a bacia e como ambos interagem entre si (AMORIM JÚNIOR, 2007). Sendo insuficiente a definição de permeabilidade de $1 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$ independente da avaliação do solo e referenciado a água, que se comporta de maneira diferente do etanol e aos demais produtos.

Palavras-chave: etanol; armazenamento; permeabilidade; impacto ambiental; bacia de contenção.

ABSTRACT

In Brazil, due to the expansion of sugar-alcohol plants driven by the incentive to produce and use alcohol since 1975 with the Proálcool program, tank farms have been built to store ethanol. These tanks, predominantly surrounded by compacted soil containment dykes, are essential for the safe operation of ethanol storage and distribution, but they also pose risks to the environment and to people. Although ethanol is generally considered to be a biodegradable product with a low environmental impact, the impacts associated with leaks are often underestimated. This study analyzes the efficiency of the permeability of vertical tank containment basins, as defined by the standard "ABNT NBR 17505 Storage of flammable and combustible liquids - Part 2: Storage in tanks, vessels and portable containers/2022", evaluating the use of soil compacted with clay as a containment waterproofing technique. The research is based on a comparative review of the academic literature published since 2004, exploring the complementarity of the topics covered and identifying relevant points of connection. The main findings and trends observed in the literature are synthesized, addressing the physical-chemical characteristics of ethanol, its environmental impacts, mitigation strategies and current legislation on storage. The existing legislation lacks a wealth of information and requirements, and it is necessary to improve it not only to strengthen legal compliance, but also to contribute to effective solutions for containing a spilled product. In addition to expanding knowledge about ethanol's potential for environmental damage, studies have shown that the permeability coefficient of $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$ found in a hydrated ethanol spill scenario in a 30cm layer of compacted clay soil is effective in preventing environmental contamination (JACINTO, 2021), but which could only be assessed by analyzing the stored product, the soil that makes up the basin and how both interact with each other. (AMORIM JÚNIOR, 2007). The definition of permeability of $1 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$ is insufficient, regardless of the evaluation of the soil and in reference to water, which behaves differently to ethanol and other products.

Keywords: ethanol; storage; permeability; environmental impact; containment basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de Hommel para Álcool Etílico.....	20
Figura 2 - Bacia de contenção concretada.....	27
Figura 3 - Bacia de contenção com impermeabilização por PEAD	27
Figura 4 - Bacia de contenção com solo compactado.....	29
Figura 5 - Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados aos produtos	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do etanol	18
Tabela 2 - Classificação ONU dos Riscos dos Produtos Perigosos.....	19
Tabela 3 - Requisitos aplicáveis a prevenção de contaminação ambiental por derramamento de combustíveis	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Autorização de Construção
ANM	Atenuação Natural Monitorada
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
AO	Autorização de Operação
BAN	Bioestimulação Ativa com Nitrato
BAS	Bioestimulação Ativa com Sulfato
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFR	Federal Regulation Code
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Environmental Protection Agency
EUA	Estados Unidos da América
IAA	Instituto do Açúcar e do Alcool
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
NBR	Norma Brasileira
NFPA	National Fire Protection Association
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PECEGE	Pesquisa e Educação Continuada em Economia e Gestão
PL	Projeto de Lei
RSL	Regional Screening
SPCC	Spill Prevention, Control, and Countermeasur
UNESP	Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CRESCIMENTO DA PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL.....	13
1.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA.....	14
1.3	AUMENTO PRODUTIVO E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	15
1.4	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	16
1.4.1	Objetivos Específicos.....	16
1.5	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	CARACTERÍSTICAS DO ETANOL.....	18
2.2	COMPORTAMENTO DO ETANOL NO MEIO AMBIENTE	20
2.3	LEGISLAÇÃO APLICÁVEL.....	23
2.4	IMPERMEABILIZAÇÃO DAS BACIAS DE CONTENÇÃO	26
3	METODOLOGIA.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

1.1 CRESCIMENTO DA PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL

O incentivo para produção de etanol com fins comerciais iniciou-se com a primeira crise do petróleo na década de 1970. Tendo em vista o baixo preço do açúcar e sua consequente vantagem econômica frente aos altos preços do petróleo, foi impulsionado o desenvolvimento de políticas para a expansão das indústrias sucroalcooleiras nos Estados Unidos e no Brasil em 1974. Como resultado, em 1975 surgiu o Programa Nacional do Álcool, conhecida popularmente como “Proálcool” que, por sua vez, foi o responsável pelo crescimento significativo do segmento no mercado no Brasil. (NUNES, 2017)

O programa, por sua vez, apresentava benefícios bastante vantajosos aos produtores, tais como, financiamentos agrícolas e industriais, aquisição de produtos garantida pelo Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA) e incentivos aos consumidores através da garantia de um preço vantajoso à gasolina e diminuição dos impostos que afetavam os consumidores. Após esse primeiro período de expansão ocasionado pelo programa, um segundo momento em que a produção foi bastante incentivada, foi com o surgimento dos veículos *flex fuel* a partir 2003, permitindo que os carros trabalhassem com misturas de etanol de 0 a 100% e incentivando os consumidores a adquirirem esse tipo de automóvel dado o custo-benefício de mantê-lo abastecido com etanol em detrimento da gasolina, que é mais cara e também devido a redução do Imposto sobre Produtos Industrializados para veículos (IPI) *flex fuel*. (TONIN; TONIN, 2014).

Ainda sobre as políticas de incentivo à produção de etanol, vale mencionar também a desenvolvida em 2017 no Brasil. Instituída pela Lei 13.576, apresenta sobre a Política Nacional de Bicombustíveis (RenovaBio), responsável por desenvolver um sistema de créditos de carbono que podem ser comercializados para aqueles que cumprirem com as metas nacionais de descarbonização por ano no setor de biocombustíveis, alinhado com as metas estabelecidas no Acordo de Paris de 2015 e incentivando de forma bastante relevante para a produção e o uso de bicombustíveis no país. (VIDAL, 2022)

Por fim, seguindo com o objetivo de reduzir a dependência do petróleo e seus derivados, o etanol anidro é misturado em toda a gasolina comercializada no país e

deve seguir a proporção de 27% em volume, conforme estabelecido pela Lei nº 9.478/19971. Além disso, há um projeto de lei (PL 4.516/2023) conhecido como “Combustível do Futuro” que prevê o aumento desse percentual obrigatório de etanol anidro para 30%. (CAMPOS JÚNIOR, 2024) Mundialmente, as políticas acerca das misturas obrigatórias aos combustíveis, são as maiores responsáveis por guinar a demanda, além de um sistema de tributação diferenciada e subsídios importantes. (VIDAL,2022).

Como consequência de todo esse processo de aceleração e incentivo à produção de etanol, o Brasil se tornou o segundo maior produtor mundial de etanol com a matéria-prima sendo a cana de açúcar (com mais de 400 usinas de cana-de-açúcar com produção de etanol) ficando atrás apenas dos Estados Unidos que é o maior produtor de etanol do mundo com a matéria prima sendo o milho. (NOVA CANA, 2023; VIDAL, 2022)

Com o desenvolvimento da tecnologia, também foi possível desenvolver o etanol celulósico, também conhecido como etanol de segunda geração, que é produzido partir do bagaço da cana. Deste modo, aumentando assim a produção de etanol com a mesma área cultivada de cana-de-açúcar. Resultando na construção de duas plantas de Etanol de Segunda Geração (E2G): a Raízen, com a unidade Costa Pinto, localizada em Piracicaba (SP) e a GranBio, com a Bioflex, que fica em São Miguel dos Campos (AL), ambas com objetivos de expansão (NOVA CANA, 2023).

1.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA

Em novembro de 2023 o Brasil registrou oito ondas de calor consecutivas, atingindo recordes de temperaturas de julho a novembro. Da mesma forma, o ano de 2023 foi considerado globalmente como o ano mais quente em 174 anos, superando (até o mês de outubro) os anos de 2016, com 1,29 °C acima da média e 2020, com 1,27°C acima da média. Eventos extremos de calor, como o que o Brasil passou em 2023, são reflexos causados pelo fenômeno El Niño, entretanto, além da elevação da temperatura dos oceanos em determinado período do ano, o aumento desenfreado de emissões de gases do efeito estufa também corrobora para o aumento da temperatura da superfície global terrestre (BRASIL, 2023).

Dado que a principal fonte de emissões de gases do efeito estufa é a queima de combustíveis fósseis, a produção e o desenvolvimento de biocombustíveis têm ganhado espaço no mercado como protagonista contra o aquecimento global e na construção do setor de mobilidade mais sustentável, uma vez que o processo de combustão do etanol é completo, emitindo dióxido de carbono (CO₂) que é absorvido pelas plantas durante seu crescimento, sem causar novas emissões e, desta forma, reduzindo impacto ao meio ambiente e sendo o biocombustível com menor pegada de carbono. (FERREIRA, 2009)

1.3 AUMENTO PRODUTIVO E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

A etapa final do processo produtivo de uma indústria sucroalcooleira é o armazenamento e a distribuição. Deste modo incentivo à produção também requer espaços para armazenamento, sem contar que a capacidade para armazenar também pode influenciar em vantagens competitivas no mercado, uma vez que, plantas que possuem espaços suficientes para armazenamento adquirem o benefício de estocar e aguardar período de alta no mercado para venda. O Instituto de Pesquisa e Educação Continuada em Economia e Gestão (Pecege) brasileiras evidenciou que as usinas brasileiras possuem um potencial de armazenamento de 17,2 bilhões de litros. (NOVA CANA, 2020)

O armazenamento do etanol produzido em tanques, pode levar a ocorrência de acidentes envolvendo o derramamento de etanol, ocasionando impactos ambientais. Levando-se em consideração que as usinas no Brasil são estrategicamente construídas próximas a cursos naturais de água (devido a necessidade de consumo para o abastecimento de processos industriais) e que seus diques de contenção são predominantemente de terra compactada (devido ao custo financeiro), ascende a preocupação em relação a contaminação de águas superficiais que estão próximas, do solo e consequentemente de águas subterrâneas.

Deste modo, torna-se relevante o desenvolvimento de estudos acerca do comportamento dos biocombustíveis no meio ambiente viabilizando, não só o desenvolvimento de técnicas de controle e remediação ambiental, mas também para trazer relevância ao tema e incentivar o desenvolvimento de ações de prevenção para as condições de armazenamento e operação deste produto.

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo dessa pesquisa é elucidar o processo de contaminação por etanol e seus impactos ambientais, com base na literatura existente e propor alternativas para o armazenamento de forma a prevenir o impacto ambiental causado em um cenário de derrame de biocombustível em um parque de tanques.

1.4.1 Objetivos Específicos

Compilar dados existentes que tratam do armazenamento de combustíveis e avaliar o cenário especificamente para o armazenamento de etanol, avaliar as condições adequadas para o seu armazenamento e fornecer referencial acerca desse biocombustível, seguindo a sequência:

- a) Estudos de avaliação de impacto do etanol no meio ambiente;
- b) Estudos de metodologias para identificação de etanol no solo;
- c) Estudos para remediação de áreas contaminadas por etanol;
- d) Avaliação da legislação existente acerca do armazenamento de etanol.

1.5 JUSTIFICATIVA.

Bacias de contenção de tanques aéreos verticais são, em sua maioria, construídas em solo concretado com cimento. Além de ser um investimento alto, também exige recorrentes manutenções devido à instabilidade do material frente a variações da temperatura, patologias quando entra em contato com o produto armazenado (prejudicando sua impermeabilidade) e ser uma técnica pouco sustentável.

A base legal existente no Brasil, está concentrada nos itens 5.9.1.2.6 e 5.9.2.17 da ABNT NBR 17505-2:2022 que diz que

A bacia de contenção, para qualquer classe de produto, deve ser projetada e construída de forma que o fundo, as paredes internas e a seção plana do dique atendam aos requisitos de permeabilidade estabelecidos pelos órgãos ambientais. Na ausência de parâmetro para o coeficiente de permeabilidade máximo deve ser adotado 10^{-6} cm/s, referenciado à água a 20 °C. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p. 38)

Sem delimitar qual técnica é melhor aplicável ao tipo de produto armazenado levando a uma generalização do uso do concreto como forma de viabilizar a obtenção ou renovação de licenças.

Com base no referencial teórico existente, a presente pesquisa busca evidenciar que para bacias de contenção dedicadas ao armazenamento de Etanol, existem outras técnicas ambientalmente e economicamente mais viáveis que o concreto para garantir a impermeabilização e, com base no exemplo do armazenamento desse biocombustível, destacar a necessidade de avaliação da contenção de acordo com o produto armazenado e seu comportamento com o meio, para a construção de contenções mais eficientes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARACTERÍSTICAS DO ETANOL

O etanol, também conhecido como álcool etílico, é um composto orgânico que possui a fórmula química C_2H_5OH . As propriedades do etanol encontram-se na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do etanol

Propriedades	Etanol
Peso molecular (g/mol)	46,07
Densidade relativa ao vapor	1,59
Viscosidade (cP)	1,07 a 20°C
Solubilidade na água	Miscível
Ponto de ebulição (°C)	78,3
Densidade relativa do líquido ou sólido	0,790 a 20 °C
Potencial de ionização (eV)	10,47
Coefficiente de partição octanol/água – logKow	-0,31
Ponto de fusão (°C)	-112
Pressão do vapor	59,3 mmHg a 25°C
pH	7
Temperatura de armazenamento (°C)	Ambiente
Ponto de Fulgor (°C)	17,0
Temperatura de ignição (° C)	365
Limite Inferior	3,3
Limite Superior	19

Fonte: Adaptado de CETESB ([202-?])

Trata-se de um líquido incolor, volátil e com um odor característico. O etanol é miscível em água em todas as proporções o que significa que ele se dissolve completamente na água. Essa solubilidade é devido ser um solvente polar, o que

significa que é capaz de formar ligações de hidrogênio com a água, tornando-o um excelente solvente para uma ampla variedade de substâncias polares, como açúcares, ácidos e sais. A sua densidade de vapor de 1,59 indica que é mais pesado que o ar e que, devido a isso, tenderá a se localizar o mais próximo ao solo (SHAW, 2011).

O álcool etílico também é definido como um produto perigoso, conforme estabelecido pelas Nações Unidas (ONU) que definiram um sistema universal com 9 tipos de classes para o transporte de produtos perigosos. Este sistema constitui a base da maioria das regulamentações nacionais e internacionais e detalha como essas mercadorias devem ser embaladas, marcadas e etiquetadas para um transporte seguro. Para determinar o seu grau de perigo, cada substância é testada e lhe é atribuído um número ONU, um nome de transporte apropriado e, por vezes, um grupo de embalagem que representa um certo nível de perigo. Todas estas informações são obrigatórias e devem constar da documentação para transporte de mercadorias perigosas. Deste modo, sendo o álcool etílico é classificado conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 - Classificação ONU dos Riscos dos Produtos Perigosos

Nº ONU	Classe do Risco	Características
1170	3 – Líquidos Inflamáveis	Líquidos inflamáveis: são líquidos, misturas de líquidos ou líquidos que contenham sólidos em solução ou suspensão, que produzam vapor inflamável a temperaturas de até 60,5°C.

Fonte: Adaptado de CETESB ([202-?])

Por último, de acordo com diagrama de Hommel ou diamante do Perigo, proposto pela NFPA 704-11 para esclarecer os riscos envolvidos na manipulação de produtos químicos, o álcool etílico é definido como (Figura 1):

- Azul (Saúde): 2 – Pode causar incapacidade temporária ou sequelas
- Vermelho (Inflamabilidade): 3 – Igniza na temperatura ambiente
- Amarelo (Reatividade): 0 – Normalmente estável, mesmo se exposto ao fogo

Figura 1 - Diagrama de Hommel para Álcool Etílico



Fonte: Adaptado de CETESB ([202-?])

2.2 COMPORTAMENTO DO ETANOL NO MEIO AMBIENTE

Em virtude de suas características físico-químicas apresentadas (Tabela 1), o etanol apresenta um rápido processo de biodegradação, fazendo com que apresente baixa permanência no meio e não seja considerado tóxico. Deste modo, não há padrão de regulamentação no Brasil que oriente acerca da sua presença no meio ambiente. Deste modo, na ausência de referências brasileiras para a determinação dessa substância, são utilizados valores americanos do documento Regional Screening Leve (RSL) Summary Table – May 2020 (ESDAT, 2020), que são utilizados como referência nos diagnósticos ambientais e em projetos de remediação de áreas contaminadas e reconhecidos pelos órgãos ambientais brasileiros (BRASIL, 2009).

Apesar de ser considerado biodegradável, o etanol pode causar danos significativos ao meio ambiente quando liberado em grandes quantidades. O etanol pode contaminar o solo através de derramamentos acidentais ou descargas diretas. Embora tenha uma meia-vida curta no solo (variação de 0,1 a 2,1 dias), o etanol pode persistir por vários meses em condições desfavoráveis de biodegradação. A liberação de etanol no solo pode resultar em volatilização parcial na atmosfera e infiltração nas águas subterrâneas, onde pode se dissolver completamente e se mover com o fluxo das águas subterrâneas (SHAW, 2011).

Em regiões com elevados índices pluviométricos e variações significativas no nível d'água, o etanol pode ser drenado para a água subterrânea e atingir regiões afastadas da fonte, por meio do transporte advectivo e dispersivo (FONSECA *et al.*, 2016). O experimento de campo realizado na Fazenda Experimental da Ressacada

em Florianópolis a partir da liberação 200 litros de uma mistura contendo 85% de etanol (v/v) e 15% de gasolina (E85) em na zona não saturada, a 1,60 metros acima do nível freático, apresentou significativa transferência de massa dissolvida de etanol para a água subterrânea com um alcance de até 18m da fonte após 3 anos de monitoramento do experimento (FONSECA *et al.*, 2016).

Alcançando as águas subterrâneas, o etanol pode causar uma pluma de contaminação que se dispersa rapidamente. A rápida biodegradação do etanol esgota o conteúdo de oxigênio e sequencialmente inicia biodegradação anaeróbica do etanol que pode resultar na produção de metano, o que pode representar um risco de explosão. Além disso, o etanol pode facilitar a redução do ferro e do sulfato, afetando a qualidade das águas subterrâneas e potencialmente contaminando poços de água (SHAW, 2011).

Quando liberado em águas superficiais, podem ser observados impactos imediatos e graves, incluindo a morte de peixes devido ao esgotamento do oxigênio dissolvido, como observado no caso no caso do derramamento de bourbon Wild Turkey no rio Kentucky no ano 2000. A biodegradação do etanol nas águas superficiais é rápida, mas pode persistir por vários meses em condições desfavoráveis (SHAW, 2011).

O impacto ambiental causado pelo derramamento de etanol no meio ambiente torna-se evidente. Ainda que de forma escassa, estudos geofísicos em escala laboratorial têm sido realizados para compreender o comportamento do etanol em ambientes geológicos e os impactos resultantes da contaminação. A biodegradação do etanol sob condições aeróbicas e anaeróbicas pode causar mudanças consideráveis nas condições biogeoquímicas do aquífero, resultando em quedas drásticas na resistividade elétrica (CASTELLO; MOREIRA; BRAGA, 2011).

Um experimento laboratorial realizado por alunos da Pós-Graduação do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (UNESP) demonstrou por meio de uma simulação de vazamentos controlados em amostras de solo, utilizando sondas com eletrodos para medir a resistividade elétrica em diferentes profundidades, que é possível mapear a distribuição espacial das plumas de contaminação por etanol e avaliar a eficácia das medidas de remediação. Os resultados mostraram um aumento inicial seguido por uma queda acentuada e um crescimento gradual da resistividade, indicando a influência do etanol no ambiente geológico. As análises sugerem que a resistividade retornaria aos valores anteriores

ao vazamento após um determinado período, estimando o tempo necessário para a completa oxidação do álcool e sua conversão em água e gás carbônico (CASTELLO; MOREIRA; BRAGA, 2011).

O etanol, além de ser utilizado na sua forma pura, é também empregado como combustível adicionado à gasolina. Nos Estados Unidos, a proporção volumétrica de etanol na gasolina pode chegar a 85% (UNITED STATES, 2015), enquanto no Brasil, é utilizada uma mistura 27% (VIDAL, 2022).

Devido à sua estrutura geofísica favorável, o etanol é facilmente degradado por microrganismos, o que pode aumentar o impacto ambiental em situações de derramamento de mistura de etanol e gasolina. Isso ocorre porque o etanol, sendo o composto preferencial para a ação dos microrganismos, pode abrir caminho para o aumento da pluma de contaminação por gasolina até atingir as águas subterrâneas. A gasolina, por sua vez, faz parte dos BTEX, um grupo de hidrocarbonetos altamente tóxicos e de complexa remediação, cuja expansão é altamente prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana (RAMOS, 2010).

Em seu estudo acerca da influência do etanol em misturas de gasolina, Ramos (2010) avaliou seu comportamento em derramamentos subsuperficiais, considerando três processos de remediação: Atenuação Natural Monitorada (ANM), bioestimulação ativa com nitrato (BAN) e bioestimulação ativa com sulfato (BAS). Os experimentos foram monitorados ao longo de um período de 12 meses após a liberação dos combustíveis, e os resultados foram avaliados em termos de decaimento do etanol, indicadores de biodegradação, estatísticas de diferenças entre os processos de remediação e tendências de contaminação. Um dos principais resultados mostraram que a presença de etanol influenciou diretamente a disponibilidade de receptores de elétrons para a biodegradação dos compostos BTEX, afetando o potencial de oxidação-redução no meio.

Da mesma forma, também apresentou que no experimento da BAS, a concentração de etanol aumentou ao longo do tempo, enquanto na BAN – que estimula o processo de desnitrificação – o etanol foi biodegradado mais rapidamente, tornando-se um método de remediação mais eficiente. O processo de desnitrificação é dado pela utilização de nitrato como receptor de elétrons durante a biodegradação de matéria orgânica gerando nitrogênio molecular como subproduto. Durante o processo, a fonte de carbono (o etanol) é oxidada pelas bactérias desnitrificantes (RAMOS, 2010).

2.3 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL

A contaminação do meio ambiente por etanol pode ocorrer por diversas formas e uma das principais que, por sua vez, é o foco deste estudo, está relacionado as condições de armazenamento para combustíveis líquidos. Dentro deste escopo, pode haver contaminação ambiental por situações operacionais, condições de integridade do tanque de armazenamento e da contenção. Dessa forma, se faz necessária a existência de um órgão regulador das atividades relacionadas a combustíveis para que haja determinação de ações de prevenção de acordo com os cenários citados anteriormente. Ao passo que no Brasil esse papel é exercido pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis), no Estados Unidos é regulado pela EPA (Environmental Protection Agency).

Ambas as Agências possuem publicações acerca de ações de prevenção a contaminação ambiental oriunda do armazenamento de combustíveis. A Resolução ANP nº 30/2006 estabelece a adoção da Norma NBR 17505 para concessão da Autorização de Construção (AC) e Autorização de Operação (AO), assim como quando da ampliação ou regularização das instalações destinadas ao armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis. Da mesma forma, o regulamento SPCC (Spill Prevention, Control, and Countermeasures) Guidance for Regional Inspectors atualizado em agosto de 2013 e disponível eletronicamente no portal da USEPA, dispõe acerca do estabelecimento de procedimentos, métodos e requisitos de equipamentos para evitar que o petróleo chegue as águas navegáveis e às costas adjacentes, e conter as descargas de petróleo com base no código de regulamento federal dos Estados Unidos 40 parte 112.

Nos EUA, como o a utilização de etanol é predominantemente em sua forma desnaturada, isto é, com adição de compostos oleosos como a gasolina, instalações que manuseiam ou armazenam etanol desnaturado podem estar sujeitas às exigências do SPCC. Já no Brasil, como o etanol é classificado como um líquido inflamável, sua operação deve atender aos requisitos disponíveis nas sete partes da norma ABNT NBR 17505. Deste modo, na Tabela 3 são descritos os principais requisitos atuantes na prevenção de derramamento e contaminação do meio ambiente por combustíveis no Brasil e nos Estados Unidos.

Tabela 3 - Requisitos aplicáveis a prevenção de contaminação ambiental por derramamento de combustíveis

Condições favoráveis a contaminação ambiental	Resolução ANP nº 30/2006 Adoção a NBR 17505	Orientação SPCC para Inspectores Regionais Adoção a 40 CFR Parte 112
Integridade do Tanque de Armazenamento	4.2.5.1 Proteção contra corrosão interna para tanques de armazenamento metálicos que sugere o cumprimento das seguintes normas, com destaques: ABNT NBR 7821: 6.2.1 Dimensões das chapas/6.3.2 Dimensionamento das chapas do costão/6.4.7 Recomendação sobre soldas. ABNT NBR 15461: 11. Pinturas.	Acerca de proteção contra corrosão não há recomendações acerca de tanques metálicos aéreos cilíndricos e verticais, somente para tanques subterrâneos, sugerindo proteção catódica: §§112.8(c)(4), 112.12(c)(4).
	5.3.2.2 As fundações devem ser projetadas para minimizar a possibilidade de um recalque irregular e para minimizar a corrosão em qualquer parte do tanque apoiada sobre as fundações.	
	5.15 Inspeção e manutenção de tanques de superfície	§ 112.7 (e) Inspeções, testes e registros.
Condições Operacionais	4.5 Operações de tanques de armazenamento	§ 112.8 Requisitos do plano de prevenção, controle e contramedidas para instalações em terra (excluindo instalações de produção). § 112.12 Requisitos do Plano de Prevenção, Controle e Contramedidas de Derramamentos.
Integridade das contenções	5.9.2 Contenção por diques de topo aberto em torno de tanques	112.7 (c) "Fornecer estruturas ou equipamentos de contenção apropriados para evitar uma descarga".

Fonte: Autoria própria.

Em resumo, em ambos os casos, são apresentados requisitos que ressaltam a importância de se manter a periodicidade correta de manutenções e inspeções dos tanques e seus acessórios, viabilizando a identificação e manutenção preventiva. Assim como, condições mínimas operacionais delimitando controles operacionais essenciais (como nível de produto nos espaços de armazenamento evitando um derramamento) e a elaboração de um plano de resposta a emergências, que também é fundamental em termos de redução de danos em eventos acidentais.

No Brasil, ainda não foi estabelecida uma legislação federal acerca do tema como nos EUA. O estado da Bahia se destaca no país por possuir um decreto que trata especificamente da eficiência dos sistemas de contenção no DECRETO Nº 14.024 DE 06 DE JUNHO DE 2012.

Para o caso de ocorrência de descargas (derrames) acidentais o artigo 71 descreve sobre estruturas necessárias para atuação na de prevenção no contato do fluído com o meio ambiente:

Art. 71 - Toda área de estocagem de produtos tóxicos, inflamáveis ou corrosivos deverá possuir sistemas de contenção capazes de impedir o escoamento decorrente de vazamentos ou transbordamentos acidentais, observada a melhor tecnologia disponível e economicamente viável.

Parágrafo único - Os tanques de estocagem de produtos tóxicos, inflamáveis ou corrosivos deverão ser providos de dispositivos para prevenção de vazamentos (BAHIA, 2012, p. 22).

Ainda que sem definir parâmetros quantitativos, o artigo 74 elucida sobre o que é considerado poluição no solo, importante para definir situações de contaminação ambiental (principalmente em casos de derrame de etanol em que não há parâmetros definidos, como de concentração, para identificar uma contaminação):

Art. 74 - Considera-se poluição do solo e do subsolo a deposição, a descarga, a infiltração, a acumulação, a injeção ou o enterramento no solo ou no subsolo de substâncias ou materiais poluentes, em estado sólido, líquido ou gasoso, capazes de alterar sua qualidade ambiental e que não atendam às especificações da respectiva licença.

[..] Parágrafo único - Não será permitida a acumulação, mesmo que temporária, diretamente sobre o solo ou no subsolo, de substâncias, produtos ou resíduos de qualquer natureza, que possam oferecer risco de poluição ambiental, ressalvado os casos em que houver autorização prévia do órgão ambiental licenciador. (BAHIA, 2012, p. 22)

Mesmo que o Estado da Bahia seja um dos únicos estados Brasileiros que tratam mais detalhadamente da temática, o Decreto de 2012 retrocede ao que foi descrito no Decreto Estadual Nº 11.235 de 2008 que ressaltava a necessidade de os diques de contenção serem “devidamente impermeabilizado” que indicava a necessidade de se atestar a eficiência da técnica de impermeabilização utilizada.

Tratando-se de contenção especificamente, a norma brasileira ABNT 17505-2:2022 define que a construção de diques de topo aberto em torno de tanques deve,

entre diversos requisitos, principalmente respeitar a capacidade volumétrica igual a no mínimo o volume do maior tanque cheio, assim como, seus diques internos não podem ultrapassar a uma altura de 3m, além de exigir um coeficiente mínimo de permeabilidade do fundo e das paredes internas da bacia de contenção de 10^{-6} cm/s referenciado a água (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022).

Ao passo que o código americano 40, parte 112.7.c define que

Todo o sistema de contenção, incluindo paredes e piso, deve ser capaz de conter óleo e deve ser construído de modo que qualquer descarga de um sistema de contenção primário, como um tanque, não escape do sistema de contenção antes de ocorrer a limpeza (UNITED STATES, 2018, p. 40, tradução própria)

sem delimitar um coeficiente de permeabilidade.

Entretanto, apesar de não evidenciar um coeficiente de permeabilidade, o guia de orientações para inspetores regionais (SPCC Guidance for Regional Inspectors) salienta em seu 4º capítulo que para adequação das bacias de contenção com objetivo de garantir sua estanqueidade pode depender das propriedades do produto armazenado e do próprio solo em questão e, para deixar claro, cita o exemplo de um solo compactado que pode ser o suficiente para conter um produto viscoso, como cimento asfáltico líquido, mas pode não ser adequado para conter gasolina (UNITED STATES, 2013).

2.4 IMPERMEABILIZAÇÃO DAS BACIAS DE CONTENÇÃO

As bacias de contenção são a última barreira que irá garantir a segurança do meio ambiente e das pessoas no caso de um evento, como no caso de derramamento de um tanque de armazenamento. Deste modo, é muito importante garantir a estanqueidade dessas bacias e para isso, existem alguns tipos de impermeabilização definidas na ABNT NBR 9575 de 2010 que discute exigências e recomendações de projetos de impermeabilização que devem impedir a passagem dos fluidos, são elas: cimentício, asfáltico e polimérico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Nas figuras 2 e 3, é possível observar exemplos de bacias de contenção para tanques aéreos verticais em concreto e polimérica com manta PEAD, respectivamente.

Figura 2 - Bacia de contenção concretada



Fonte: Passafaro ([201-?])

Figura 3 - Bacia de contenção com impermeabilização por PEAD



Fonte: B&B ([201-?])

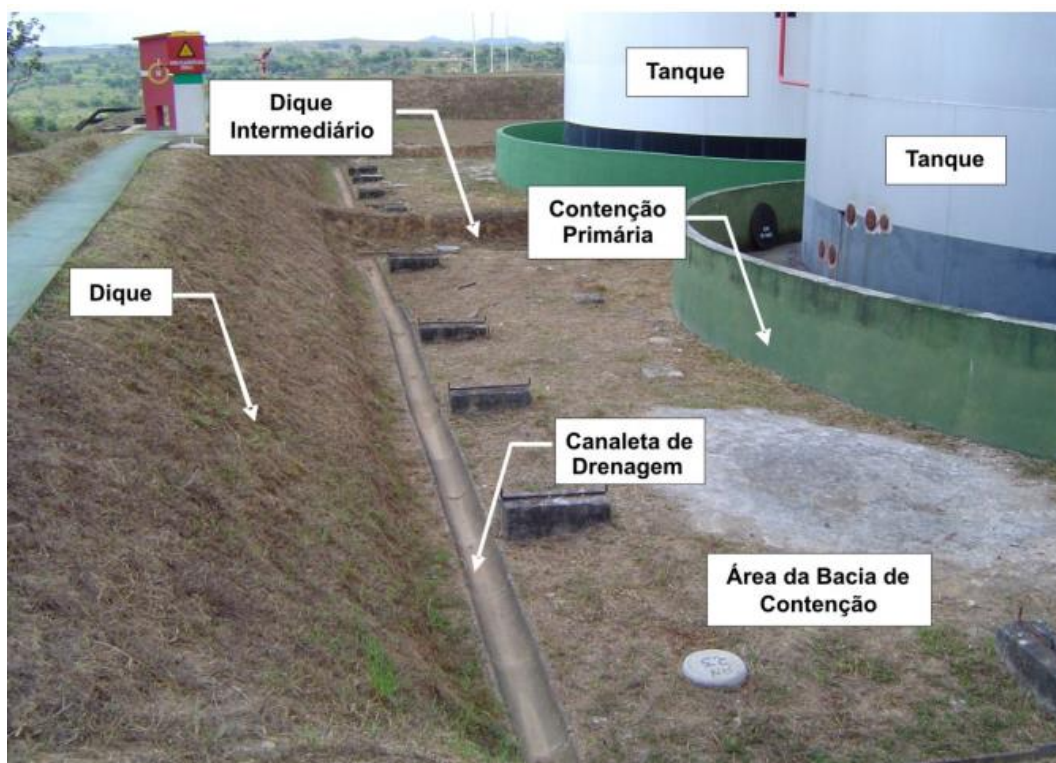
Ambos os exemplos apresentados são técnicas com um valor considerável no mercado considerando tanto o material quando a mão de obra e, principalmente a área de aplicação. No entanto, caso a questão se manifeste como forma de condicionante em uma licença, a empresa deverá tomar medidas para que a

condicionante de coeficiente de permeabilidade para bacias de contenção da norma NBR 17505-2 seja atendida. Como não há especificações acerca do tipo de impermeabilização ou critérios de avaliação da bacia para melhor escolha, bem como é referenciado somente a água e não ao tipo de produto armazenado abre-se brechas para gastos desnecessários com uso impermeabilização ineficiente para o produto armazenado.

Sabe-se que a técnica mais comum e amplamente aplicada em bacias de contenção de tanques aéreos verticais é a impermeabilização com cimento (Figura 2). Em seu projeto de pesquisa Silveira (2022) identifica fragilidades em bacias de contenção concretadas que armazenam biodiesel devido as propriedades químicas do produto. Em suma, esse tipo de impermeabilização está sujeito a apresentação de fissuras, juntas de dilatação e trincas quando expostos a resíduos ou a um grande volume do produto, que em um cenário de derrame não garantem que o produto derramado não irá atingir o lençol freático e que, ao mesmo tempo, teoricamente se enquadra perfeitamente no coeficiente de permeabilidade exigido pela norma. Deste modo, a autora avalia produtos mais eficientes para impermeabilização com foco na vida útil da bacia já construída; reforça a importância de maior rigor nos projetos de construção das bacias, avaliando o solo em contraposição aos produtos mais adequados disponíveis no mercado de acordo com o produto armazenado e suas possíveis reações patológicas.

Uma alternativa mais barata e até mesmo sustentável é a técnica de compactação do solo (Figura 4). Muito utilizada em aterros sanitários, são utilizados solos argilosos para compor uma camada impermeabilizante (CARVALHO *et al.*, 2015) e que pode ser feita em bacias de contenção de tanques de armazenamento com a mesma finalidade de conter fluidos para que não cheguem ao lençol freático.

Figura 4 - Bacia de contenção com solo compactado



Fonte: Amorim Júnior (2007)

Diversas são as formas de se impermeabilizar uma bacia de contenção, Amorim Júnior. (2007) orienta também avaliar a eficiência desses sistemas em contraposição ao que é requerido na norma em sua dissertação de mestrado, avaliando minuciosamente a bacia de contenção de 5 terminais de distribuição (totalizando 51 bacias) com diferentes produtos e capacidades de armazenamento, a fim de entender se os parâmetros de permeabilidade estabelecidos pela norma condizem com a realidade. Para realização deste estudo o autor considera avaliação de caracterização do solo de cada uma das bacias (análises granulométricas, raio-x, cálculo do coeficiente de permeabilidade pela Lei de Darcy), a avaliação de mobilidade de cada um dos produtos armazenado considerando suas propriedades físico-químicas e os coeficientes de permeabilidade estabelecidos pela norma.

No estudo Amorim Júnior (2007) também considera os resultados para um coeficiente menos restritivo de 10^{-4} cm/s considerado para bacias que possuam sistema de drenagem em concreto armado, no entanto, este parâmetro não é mais presente na versão mais atualizada da norma (2022), sendo adotado um único critério

de 10^{-6} cm/s referenciado a água a 20°C. Isso posto, dentre os principais resultados apresentados pelo autor, vale mencionar:

- 3 das 44 bacias de contenção apresentaram coeficiente de permeabilidade abaixo ou igual a 10^{-6} cm/s, ou seja, apenas 6,8% das bacias em estudo atenderiam a norma vigente, referenciado a água;
- 16 das 51 bacias de contenção apresentaram coeficiente de permeabilidade referente ao produto armazenado menor ou igual a 10^{-6} cm/s, ou seja, apenas 31,4% das bacias em estudo atenderiam a norma vigente, referenciado ao produto armazenado;
- 23 de 44 bacias de contenção apresentaram o coeficiente de permeabilidade aos produtos armazenados maior que o coeficiente determinado para água, ou seja, em 52% dos casos o produto apresentou maior coeficiente de permeabilidade que a água;
- Em nenhum dos casos as bacias de contenção apresentaram um coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-6} cm/s referente a água e ao produto concomitantemente;
- Referente a bacia que armazenava Etanol (Terminal 1): maior coeficiente de permeabilidade referenciado ao produto encontrado foi de $6,6 \cdot 10^{-5}$ cm/s e o maior referenciado a água foi de $6,6 \cdot 10^{-6}$ cm/s;
- Tempo necessário para que o produto derramado infiltre em um metro de profundidade das bacias (Terminal 1): 1,3 horas para o diesel e 17,4 horas para o etanol.

Com uma pesquisa de campo muito bem detalhada em 2 anos de estudo (2004-2006) o autor demonstra a importância de se avaliar o solo, o tipo de produto armazenado e sugere medidas mais eficazes e de menor custo, para aumentar a eficiência de permeabilidade de uma bacia de contenção, tais como: reduzir a permeabilidade do solo com base em análises específicas do local; investir em planos contingência para reduzir o tempo de exposição e perda do produto no solo e, também, em alterar o tipo de produto armazenado para que se armazene um de menor mobilidade. Exceto a última recomendação de escolha do produto armazenado, o qual é pouco viável dado que os produtos armazenados são definidos por uma questão

mercadológica e não apenas por sua característica físico-química, as demais são de grande relevância e baixo custo podendo ser uma alternativa para que os locais estejam de acordo com a norma e verdadeiramente protegendo o meio ambiente.

Complementar e com base ao estudo desenvolvido por Amorim Júnior (2007), Jacinto (2021) desenvolveu um estudo de caso especificamente para o caso de uma bacia de contenção que armazena etanol e melado com intuito de evidenciar a eficiência de estanqueidade de uma contenção impermeabilizada com solo argiloso compactado. Seu estudo conteve ensaios de granulometria, limite de liquidez e plasticidade, compactação, compressibilidade e permeabilidade.

O estudo de caso desenvolvido por Jacinto (2021) tratava-se de uma bacia de contenção de solo característico a 57% de argila e 62% de silte, isto é, solos mais finos. Em sua pesquisa ele encontrou um coeficiente de permeabilidade de Etanol (hidratado combustível) no solo de $5,5 \times 10^{-7}$, com uma estimativa de profundidade de contaminação do solo em até 19 cm, considerando um tempo de resposta de 24h. Além disso, também determinou qual camada mínima de solo impermeabilizado para conter a contaminação por etanol, de 30 cm.

Por fim, o autor traz uma visão interessante também acerca da manutenção de bacias de contenção formadas por solos argilosos. Um dos aspectos importantes ao se analisar os solos das bacias de contenção e avaliação para melhor aplicação de camada impermeabilizante é avaliação da expansividade do solo. O autor demonstra que o uso de cal é uma importante ferramenta para diminuir a expansividade dos solos, diminuindo as chances de formação de fissuras que poderiam prejudicar a função de contenção e tornar as bacias inoperantes.

3 METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada nessa pesquisa consiste em uma Revisão Bibliográfica, utilizando o método indutivo, que parte de observações particulares para chegar a conclusões gerais (PANASIEWICZ; BAPTISTA, 2013). A revisão bibliográfica é uma técnica valiosa para a análise sistemática e a interpretação de estudos pré-existentes, fornecendo uma base sólida para a construção do conhecimento em diversas áreas de pesquisa.

Deste modo, foi analisado os aspectos ambientais relacionados ao armazenamento de etanol, confrontando diferentes dados da literatura existente e permitindo uma síntese crítica das informações disponíveis.

As etapas da pesquisa foram divididas em:

1. Identificação da Literatura: buscas sistemáticas em bases de dados acadêmicas, bibliotecas digitais e periódicos especializados datado com estudos a partir de 2004 (base de 20 anos);
2. Seleção de estudos: estudos que abordassem os quatro tópicos descritos abaixo como forma de fomentar um referencial teórico e dar subsídio a análise crítica
 - I. Características físico-químicas do etanol;
 - II. Impactos ambientais e formas de mitigação;
 - III. Legislação vigente em termos de armazenamento e proteção ambiental;
 - IV. Metodologias de impermeabilização em diques de contenção
3. Análise Comparativa: comparação entre as referências bibliográficas utilizadas e complementariedade dos assuntos abordados quando observado pontos de conexão.
4. Síntese e Discussão: A partir da análise dos estudos revisados, foram sintetizadas as principais descobertas e tendências observadas na literatura. Foram discutidos os diferentes enfoques adotados pelos pesquisadores e as conclusões gerais alcançadas.

O estudo direcionou-se especificamente para a operação com etanol, investigando seu comportamento específico e as melhores práticas de prevenção apropriadas para este fluido. Este enfoque não apenas contribui para a segurança

operacional, mas também serve como referência crítica para processos de licenciamento e renovação de áreas destinadas ao armazenamento de etanol.

É importante ressaltar que a escolha de se concentrar no álcool etílico, diferenciando-o de outros combustíveis, se justifica pelo seu crescente uso global devido ao seu caráter renovável e menor impacto ambiental. Esta análise específica permite insights mais precisos e aplicáveis às realidades de produção e armazenamento de etanol, contextualizando os desafios e as oportunidades enfrentadas no setor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A literatura é bastante difundida quando se trata do armazenamento de petróleo e seus derivados, dado ao maior número de eventos e do potencial poluidor agregado a estes produtos. No entanto, ainda que com menor potencial e menores registros de incidentes, o armazenamento de etanol também precisa ser avaliado, haja vista que existem parques de tanques e operações dedicados somente a este produto.

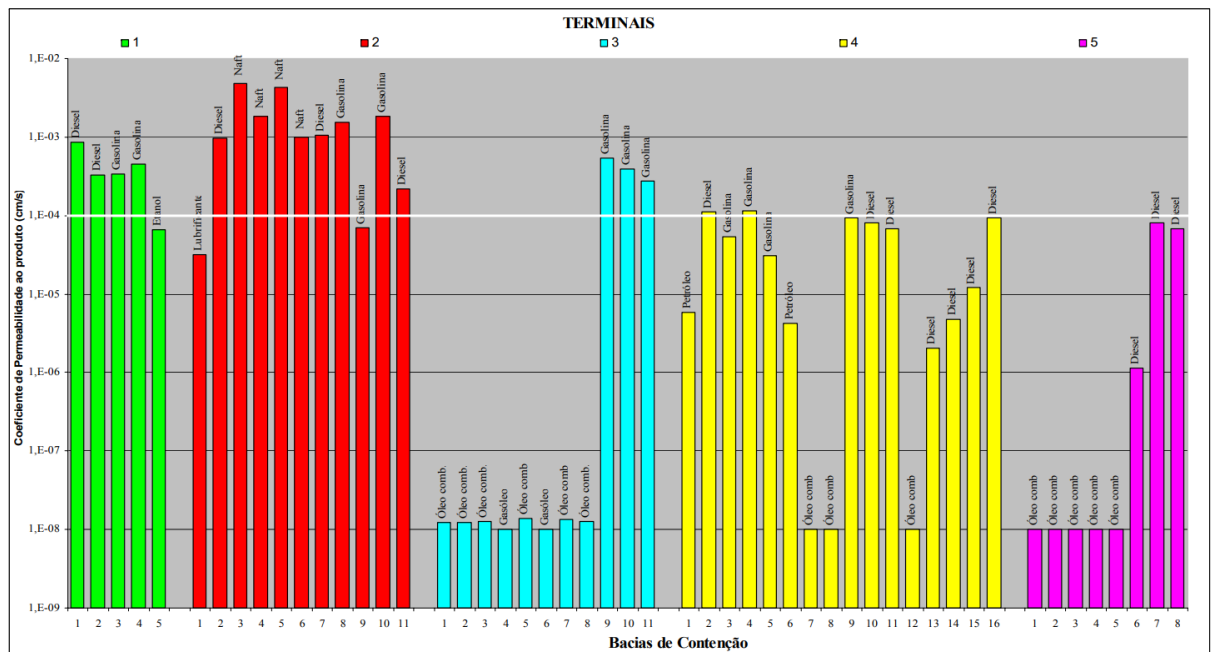
A partir das análises feitas neste artigo, é evidenciado que a prerrogativa do etanol ser altamente volátil em temperatura ambiente viabilizar com que o produto não percole a nível de atingir o lençol freático é desmistificado quando é apresentado o experimento feito em escala laboratorial considerando-se um vazamento controlado de etanol em solo arenoso que através do monitoramento de resistividade elétrica, estima-se que em uma profundidade de 19 cm são necessárias 2.769 h (~ 115 dias) para que todo etanol derramado seja biodegradado (CASTELLO; MOREIRA; BRAGA, 2011).

A permeabilidade de um solo se refere à sua capacidade de permitir que substâncias o atravessem. Solos com menor permeabilidade são mais eficazes porque limitam a movimentação desses produtos para além de níveis superficiais. Dito isto, os resultados apresentados por Amorim Júnior (2007) mostram que na maioria dos casos, o produto armazenado irá percolar no solo mais rápido que a água, demonstrando um ponto de fragilidade da norma em ser referenciada apenas pela água. Além disso, percebe-se que com a norma vigente que é mais restritiva, apenas 6,8% atenderiam o que é estabelecido. Influenciando diretamente na tomada de decisão dos empreendimentos para adequação a norma, haja vista que, por ser um recurso mais barato, a adequação por meio de canaletas é mais usual. Da mesma forma, que seu estudo apresentou que um solo predominantemente formado por argila e silte, com um coeficiente de permeabilidade de 10^{-6} cm/s , não seria o suficiente para conter a percolação do etanol, haja vista que neste cenário seu coeficiente de percolação é de $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$.

A dificuldade de movimentação e permeação no solo está diretamente relacionada à viscosidade dos produtos. Quanto maior a viscosidade, maior a resistência ao movimento e à permeação no solo. Observando a figura 5, que apresenta os valores máximos de coeficientes de permeabilidade dos produtos nos

solos das bacias de contenção obtidos no estudo de Amorim Júnior (2007), percebe-se essa afirmativa:

Figura 5 - Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados aos produtos



Fonte: Amorim Júnior (2007)

Com os resultados obtidos, pode-se observar que o óleo combustível apresenta viscosidade significativamente maior em comparação com outros produtos como diesel, gasolina e nafta, o que significa que terá mais dificuldade de se mover no solo e o que explica o seu coeficiente de permeabilidade encontrado ser inferior a $1 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$. O petróleo também possui uma viscosidade considerável, especialmente em temperaturas mais baixas, o que pode dificultar sua movimentação no solo. O lubrificante, dependendo do tipo e da aplicação específica, pode ter viscosidade variável, mas geralmente é mais viscoso do que diesel, gasolina e etanol. Por fim, o diesel, gasolina, etanol e nafta são os produtos menos viscosos quando comparados com óleo combustível e petróleo, o que significa que têm menos resistência ao movimento no solo e por isso, apresentaram o coeficiente máximo de permeabilidade superior a $1 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$ referenciado pela norma.

Em paralelo, Jacinto (2021) apresenta em seu estudo de caso que o coeficiente de permeabilidade do etanol no solo compactado pode resultar em de $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$,

demonstrando a eficiência de um solo com baixa permeabilidade para um produto que possui baixa viscosidade, ou seja, um produto de fácil movimentação e permeação no solo.

Com base nos resultados, pode-se observar que solos com baixa permeabilidade, podem ser eficazes também na contenção de produtos viscosos. No entanto, é crucial realizar uma análise detalhada das condições legais, específicas do local e dos produtos envolvidos para determinar a estratégia mais apropriada de contenção e mitigação de impactos ambientais. Fica claro então, a necessidade de se retomar que a permeabilidade da bacia também deve considerar o produto armazenado, conforme também é orientado pela SPCC Guidance for Regional Inspectors.

Além da caracterização do solo da bacia de contenção e caracterização físico-química do produto armazenado para avaliar sua mobilidade, também é necessário incluir na equação o regime pluviométrico do local, tendo em vista, que é um dos fatores predominantes para o aumento da concentração em zona saturada do solo, isto é, o local mais próximo do corpo hídrico (FONSECA *et al.*, 2016).

Independente da tecnologia empregada para garantir a estanqueidade das bacias de contenção, é necessário analisar os efeitos que o produto armazenado, as condições climáticas e a qualidade da instalação/aplicação podem impactar na eficiência do sistema. Silveira (2022), por exemplo, evidência em sua pesquisa que a alternativa de concretagem de bacias de contenção pode apresentar efeitos patológicos do contato do biodiesel com o concreto, ocasionando fissuras ou rachaduras, assim como, uma má construção pode expor juntas de dilatação. Do mesmo modo, Jacinto (2022) propõem a utilização de cal para diminuir o caráter expansivo de solo, que a depender das condições climáticas, também pode ocasionar fissuras ou rachaduras no solo compactado. Por último, Amorim Júnior (2007) também apresenta fragilidades do sistema de geomembranas que pode ser aplicado de forma inadequada, pode deixar o solo exposto em pontos que são instalados outros tipos de estruturas (como suportes de tubulação) e a depreciação do material frente a exposição aos raios solares.

Acerca da legislação existente, conforme elucidado no tópico 2.2, no Brasil ainda não existe uma lei federal que trate acerca da temática de armazenamento de líquidos infamáveis e combustíveis. A ABNT NR 17505 tem caráter obrigatório dado a regulamentação que é realizada pelo Órgão competente que, neste caso, é a ANP

sendo responsável por regular e fiscalizar as atividades relacionadas ao setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis no Brasil. No entanto, as leis federais são de cumprimento obrigatório em todo o território nacional e têm hierarquia superior às normas técnicas.

Além disso, o requisito 5.9.2.16 abrange de maneira generalista sobre o nível de permeabilidade das bacias de contenção. Existe a oportunidade de melhoria na recomendação ao elucidar a importância de garantir impermeabilidade do solo para que o líquido derramado não percole no solo e haja contaminação ambiental, retomando conceitos acerca de poluição e prevenção do solo e das águas subterrâneas. Também ampliar a recomendação, considerando aspectos do produto armazenado e do solo que compõem a bacia, para então aplicar uma técnica de impermeabilização eficiente.

A versão mais atualizada da parte 2 da norma (2022, versão corrigida em janeiro de 2024) não contempla mais a redução da concentração de permeabilidade em virtude da instalação de canaletas. De fato, a existência de canaletas, não altera o nível de permeabilidade do produto e do solo para ter um valor reduzido, essas características são inerentes a aspectos físico-químicos, no entanto, o uso de canaletas, considerando o declive do terreno direcionando para elas, pode ser bastante eficiente no que tange ao tempo em que produto irá permanecer no local e a facilidade em removê-lo, conforme orienta Amorim Júnior (2007) que, para o cálculo de migração vertical do produto no solo, considera as propriedades do solo, o tipo de produto armazenado, geometria dos diques, nível do lençol freático, corpos hídricos superficiais próximos e o tempo de resposta do plano de contingência do terminal – em que a existência de canaletas, se torna um facilitador para redução do tempo de resposta.

Portanto, se existisse uma lei federal que abrangesse o mesmo tema e estabelecesse requisitos específicos, haveria a oportunidade de aprimorar as recomendações da norma de acordo com as especificidades necessárias, e as empresas e entidades envolvidas teriam que seguir esses requisitos legais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os aspectos ambientais e riscos associados quanto ao armazenamento e a operação de etanol são de grande relevância para a preservação do meio ambiente, ainda que a temática seja tratada e discutida como um tópico mínimo dentro do arcabouço do armazenamento e distribuição dos combustíveis fósseis.

Fica claro que o álcool tem potencial de degradação do meio ambiente e riscos à saúde humana e que por isso, deve ser estudado também de forma isolada, a fim de compreender seu comportamento e desenvolver ações mitigadoras específicas ao seu comportamento no meio. Ainda que não existam parâmetros específicos e já determinados quanto a concentração mínima de álcool no solo para ser considerada tóxica ao meio ambiente e considerando que existem grandes áreas dedicadas ao seu armazenamento e distribuição.

Embora produtos como etanol apresentem menor viscosidade e, teoricamente, menor potencial de contaminação profunda do solo, sua rápida movimentação horizontal pode exigir estratégias de contenção igualmente robustas às utilizadas para produtos mais viscosos. Bacias de contenção são fundamentais para atuar na prevenção de áreas contaminadas e a compactação desse sistema com solo argiloso é uma ótima alternativa e que deve continuar sendo aplicada como solução, principalmente em parques de tanques de etanol, que armazenam um único tipo de produto, tornando mais simples o processo de avaliação e instalação. A análise detalhada das condições locais, normativas, características dos produtos armazenados e o também a avaliação dos cenários de risco são fundamentais para garantir a eficácia e a segurança das medidas de contenção adotadas.

Como a própria norma ABNT 17505-2:2022 no item 5.9.2.16 preconiza: “a bacia de contenção deve ser utilizada exclusivamente para conter líquidos em casos de vazamentos, não podendo ser usada para o armazenamento, provisório ou permanente, de qualquer produto ou material” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p. 41). Deste modo, entende-se que a avaliação de permeabilidade das bacias de contenção deve ser analisada do ponto de vista de uma situação emergencial, em que o tempo de permanência do produto naquele local seja o menor possível e que o volume presente é considerável, uma vez que o objetivo dessa estrutura não é armazenar e sim conter em casos de acidente. Essa visão colabora para aplicação de métodos eficientes e que, não necessariamente são os

mais complexos e custosos. No caso do etanol, a solução de solo compactado é extremamente aplicável e uma solução barata e até mesmo sustentável.

Ainda que a última atualização da norma orientadora acerca da permeabilidade das bacias de contenção esteja mais rígida acerca do coeficiente de permeabilidade, desconsiderando o emprego de canaletas concretadas, ainda é bastante generalista, com oportunidades para expandir as orientações implementando conceitos de avaliação do solo e do produto armazenado. Ademais, a presença de canaletas, considerando declive no terreno, pode colaborar para a baixa permanência do produto no local, conforme comentado no parágrafo anterior.

Além disso, no Brasil ainda não existe uma legislação federal que trate da temática e o único Estado que havia um decreto que abrangia de maneira mais significativa a questão de permeabilidade das bacias, foi atualizado e hoje não possui mais essa ênfase. Um melhor detalhamento das exigências acerca da norma não irá enrijecer o processo de licenciamento e atendimento a legislação, mas tem potencial de resultar em bacias de contenção mais eficientes ao passo que orienta de maneira mais clara e efetiva, facilitando na verdade o processo.

Por fim, com o incentivo ao desenvolvimento de pesquisas acerca deste tema e da divulgação de acidentes ocorridos pelas companhias de meio ambiente, permite avaliar o comportamento de cada produto armazenado e resultar em uma base de dados que pode ser norteadora a parâmetros ambientais e definições mais claras e eficientes acerca desse requisito presente na norma – garantindo não somente o cumprimento dele, mas o real compromisso com o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17505-2:** Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis: Parte 2: Armazenamento em tanques, vasos e recipientes portáteis. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9575:** Impermeabilização: Seleção e Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

AMORIM JÚNIOR, C. J. D. Avaliação dos critérios de impermeabilização de **bacias de contenção da norma ABNT NBR 17505-2/2006 para terminais de armazenamento de petróleo e derivados**. Florianópolis: Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/90622>. Acesso em: 31 maio 2024.

BAHIA. Sistema Estadual de Informações Ambientais e Recursos Hídricos. Decreto Nº 14.024 de 06 de junho de 2012. **Aprova o Regulamento da Lei nº 10.431, de 20 de dezembro de 2006, que instituiu a Política de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade do Estado da Bahia, e da Lei nº 11.612, de 08 de outubro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Bahia: SEIA, 2012. Disponível em: <http://www.seia.ba.gov.br/legislacao-ambiental/leis/lei-n-10431>. Acesso em: 31 maio 2024.

B&B. **Diques de contenção** – Brejeiro. [S. l.]: [201-?]. Disponível em: <https://bebsolucoesambientais.com.br/diques-de-contencao-brejeiro/>. Acesso em: 31 maio 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias, decorrentes de atividades antrópicas**. Brasil: CETESB, 2009. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwIU5ZWGI8KHAXXLRkGHfwrMTAQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fcetesb.sp.gov.br%2Fareas-contaminadas%2Fwp-content%2Fuploads%2Fsites%2F17%2F2017%2F09%2Fresolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acas.pdf&usg=AOvVaw3An62KAkeRIbZq8qxv7yb&opi=89978449>. Acesso em: 31 maio 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Instituto Nacional de Meteorologia. **2023 é o mais quente em 174 anos, confirma relatório da OMM**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/2023-%C3%A9-o-mais-quente-em-174-anos-confirma-relat%C3%B3rio-da-omm>. Acesso em: 31 maio 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **CNPE passa a ter competência para fixar teor de etanol anidro na gasolina**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022.

Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-passa-a-ter-competencia-parafixar-teor-de-etanol-anidro-na-gasolina>. Acesso em: 31 maio 2024.

CARVALHO, J. C; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Miguel-Angel-Soto/publication/291830050_Solos_nao_saturados_no_contexto_geotecnico_cap_9_e_10/links/56ab6a3408aed814bdea16fa/Solos-nao-saturados-no-contexto-geotecnico-cap-9-e-10.pdf Acesso em: 31 maio 2024.

CAMPOS JÚNIOR, G. **Câmara deve votar “Combustível do Futuro” ainda em fevereiro**. [S. l.]: Poder 360, 2024. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/governo/camara-deve-votar-combustivel-do-futuro-ainda-em-fevereiro/>. Acesso em: 31 maio 2024.

CASTELLO, L. Z; MOREIRA, C. A; BRAGA, A. C. O. **Estudo geofísico de vazamento controlado de álcool combustível em escala laboratorial**. Rio Claro: Revista Brasileira de Geofísica, v. 29, n. 2, p. 217-226, 2011. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjzse2pmsKHAXWTD7kGHRsxC54QFnoECBMQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.br%2Fj%2Frbg%2Fa%2FKNRpjT74pPPrbDrZ7D8Zw3v%2Fabstract%2F%3Flang%3Dpt&usg=AOvVaw3XqQ4KMqtHM78x5TznaGGI&opi=89978449>. Acesso em: 31 maio 2024.

CETESB. **Ficha de Resposta a Emergência Química**. [S. l.]: CETESB, [202-?]. Disponível em: <https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/19>. Acesso em: 31 maio 2024.

ESDAT. **Regional Screening Level (RSL) Summary Table**. [S. l.]: EsDat, 2020. Disponível em: [https://support.esdat.net/Environmental%20Standards/us/region_3_6_9/regional%20screening%20level%20\(rsl\)%20summary%20table%20\(tr=1e-06,%20hq=1\)%20may%202020%20\(corrected\).pdf](https://support.esdat.net/Environmental%20Standards/us/region_3_6_9/regional%20screening%20level%20(rsl)%20summary%20table%20(tr=1e-06,%20hq=1)%20may%202020%20(corrected).pdf). Acesso em: 31 maio 2024.

FERREIRA, A. L. **Estudo mostra que etanol de cana emite menos gás carbônico para atmosfera do que a gasolina**, Rio de Janeiro: Embrapa, 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18044516/estudo-mostra-que-etanol-de-cana-emite-menos-gas-carbonico-para-a-atmosfera-do-que-a-gasolina#:~:text=Um%20estudo%20feito%20por%20pesquisadores,usado%20em%20substitui%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20gasolina>. Acesso em: 31 maio 2024.

FONSECA, W. C; NUNES, C. C; FERNANDES, M; CORSEUIL, H. X. **Impactos de derramamentos de etanol em água subterrânea – Experimento em Campo**. Revista de Recursos Hídricos, Porto Alegre, vol. 21, no.1, p.105-117, 2016. Disponível em: scielo.br/j/rbrh/a/5GHnVcQkbqMQ6nPmXKPy95g/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 31 maio 2024.

JACINTO, E. G. O. **Bacias de contenção: impermeabilização com solo compactado**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/48720>. Acesso em: 31 maio 2024.

NOVA CANA. **Produção de E2G no Brasil: Perspectiva é de crescimento, com foco na exportação**. [S.l.]: Nova Cana, 2023. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/producao-e2g-brasil-perspectiva-crescimento-foco-exportacao-070323>. Acesso em: 31 maio 2024.

NOVA CANA. **[Ranking] as usinas que conseguem manter etanol estocado por mais e menos tempo**. [S.l.]: Nova Cana, 2020. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/ranking-usinas-conseguem-manter-etanol-estocado-mais-menos-tempo-280720>. Acesso em: 31 maio 2024.

NUNES, E.F. **Cana-de-açúcar: A produção de etanol e seus benefícios**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Agronegócios) – Instituto Federal de Educação e Ciências e Tecnologia, Barretos, 2017. Disponível em: <https://brt.ifsp.edu.br/>. Acesso em: 31 maio 2024.

PANASIEWICZ, R; BAPTISTA, P. A. N. Metodologia Científica. **A Ciência e seus Métodos**. Belo Horizonte: Fumec Virtual, 2013. Disponível em: <https://www.fumec.br/wp-content/uploads/2023/05/Ciencia-e-seus-Metodos.pdf>. Acesso em: 31 maio 2024.

PASSAFARO. **Base de Armazenamento de Combustível**. [S.l.]: Passafaro, [201-?]. Disponível em: <https://www.passafaro.com.br/combustivel/base+de+armazenamento+de+combustivel/1427>. Acesso em: 31 maio 2024.

RAMOS, S. M. **Análise comparativa da influência do etanol em diferentes processos de remediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina**. Florianópolis: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2010. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiQ34f0oMKHAXWHD7kGHSHyC1wQFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fbdtd.ibict.br%2Fvufind%2FRecord%2FUFSC_d3498715e0f7c07cbbd449188c2c1c2c&usg=AOvVaw0JfKheOJ3ROFo5zuecwxAP&opi=89978449. Acesso em: 31 maio 2024.

SHAW. **Large Volume Ethanol Spills – Environmental Impacts and Response Options**. Shaw's Environmental and Infrastructure Group: Nova Hampshire, 2011. Disponível em: <https://www.mass.gov/doc/large-volume-ethanol-spills-environmental-impacts-response-options/download>. Acesso em: 31 maio 2024.

SILVEIRA, D. **Percolação de biodiesel em fissuras e trincas do concreto: estudo de caso para impermeabilização de bacia de contenção do parque de tanques**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro

Universitário Ritter dos Reis, Canoas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/a8ab8efc-905e-4b50-aacc-d86b56961b35>. Acesso em: 31 maio 2024.

TONIN, J. M; TONIN, J. R. **Do Proálcool ao “Pró etanol”**: novos desafios na produção do etanol brasileiro. [S.l.]: Informe Gepec, 2014. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/7549>. Acesso em: 31 maio 2024.

UNITED STATES. Department of Energy. **Ethanol Fuel Basics**. Washington, 2015. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/fuels/ethanol-fuel-basics>. Acesso em: 31 maio 2024.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **SPCC Guidance for Regional Inspectors**. Washington: EPA, 2013. Disponível em: <https://www.epa.gov/oil-spills-prevention-and-preparedness-regulations/spcc-guidance-regional-inspectors>. Acesso em: 31 maio 2024.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Title 40**: Protection of Environment: Chapter 1: Environmental Protection Agency: Part 112: Oil Pollution Prevention. Washington: EPA, 2018. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2018-title40-vol24/pdf/CFR-2018-title40-vol24-part112.pdf>. Acesso em: 31 maio 2024.

VIDAL, M. F. **Agroindústria** - Etanol. [S.l.]: Banco do Nordeste do Brasil (BNB), Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE), Caderno Setorial ETENE, 2022. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi_ws3Go8KHAXeH7kGHdz4MkIQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bnb.gov.br%2Fs482-dspace%2Fbitstream%2F123456789%2F1409%2F3%2F2022_CDS_237.pdf&usg=AOvVaw05UTDywTp-LdLP5RmeM5JO&opi=89978449. Acesso em: 31 maio 2024.