

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Tese de Doutorado

EFEITO DA PERCOLAÇÃO DE BIODIESEL NA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE GEOCOMPOSTO
BENTONÍTICO

Julia Favretto

Passo Fundo

2023



CIP – Catalogação na Publicação

F277e Favretto, Julia
Efeito da percolação de biodiesel na condutividade
hidráulica de geocomposto bentonítico [recurso eletrônico] /
Julia Favretto. – 2023.
3 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto.
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Felipe Floss.
Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de
Passo Fundo, 2023.

1. Solos - Poluição. 2. Biocombustível. 3. Geossintéticos.
4. Solos - Permeabilidade. 5. Solos - Percolação. I. Prietto,
Pedro Domingos Marques, orientador. II. Floss, Márcio
Felipe, coorientador. III. Título.

CDU: 631.4

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

Efeito da percolação de biodiesel na condutividade hidráulica de geocomposto bentonítico

Julia Favretto

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Felipe Floss

Comissão Examinadora

Prof.^a Dr.^a Maria Claudia Barbosa -
Universidade Federal do Rio de Janeiro
(COPPE-UFRJ)
Prof.^a Dr.^a Maria Eugenia Gimenez Boscov -
Universidade de São Paulo (POLI-USP)
Prof. Dr. Cleomar Reginato - Universidade de
Passo Fundo (PPGEng-UPF)
Prof. Dr. Maciel Donato - Universidade de
Passo Fundo (ITec-UPF)

Passo Fundo, abril de 2023

*Two roads diverged in a yellow wood,
And sorry I could not travel both
And be one traveler, long I stood
And looked down one as far as I could
To where it bent in the undergrowth;*

*Then took the other, as just as fair,
And having perhaps the better claim,
Because it was grassy and wanted wear;
Though as for that the passing there
Had worn them really about the same,*

*And both that morning equally lay
In leaves no step had trodden black.
Oh, I kept the first for another day!
Yet knowing how way leads on to way,
I doubted if I should ever come back.*

*I shall be telling this with a sigh
Somewhere ages and ages hence:
Two roads diverged in a wood, and I—
I took the one less traveled by,
And that has made all the difference.*

THE ROAD NOT TAKEN

— Robert Frost

AGRADECIMENTOS

À Ele. Obrigada Deus por Sua companhia constante.

Aos meus amados pais, Itamir Favretto e Marlize Beatriz Bonora Favretto, que me acompanharam fielmente desde o meu primeiro suspiro e sempre foram sábios em amparar, prover e, acima de tudo, amar, agradeço imensamente por tudo.

Ao meu noivo, Gustavo P. Guazzelli, que compreendeu minha ausência e me estendeu a mão, muito obrigada por todo amor e cuidado.

Aos meus preciosos Ollie e Luke, pets confidentes e fiéis escudeiros, agradeço por serem uma presença incansável e reconfortante em minha vida.

Ao meu grande mestre, amigo e orientador, Dr. Márcio F. Floss, a quem admiro e respeito muito, agradeço por sua orientação e pelo seu apoio durante todo o processo.

Ao excelente professor e orientador, Dr. Pedro D. M. Prietto, sou muito grata pela oportunidade de trabalhar contigo, pelos ensinamentos e ajuda recebidos.

À minha estimada terapeuta, a psicóloga Simone R. Lazouwnik, que encarou junto comigo os altos e baixos deste processo, agradeço por sua dedicação e suporte.

Ao meu querido amigo, engenheiro mecânico Me. Reginaldo de Freitas, pela paciência, troca de ideias e colaboração em diversas etapas, muito obrigada.

À minha colega e amiga, Dra. Adeli B. Braun, por me ajudar na elaboração de artigos, agradeço por embarcar junto comigo nesta jornada.

Ao meu amigo e companheiro de laboratório, engenheiro civil Leunir L. Freitas, pela parceria durante todo esse período, muito obrigada.

A todos os membros do PPGEng, direção, administração e corpo docente, agradeço pela oportunidade de fazer parte desta comunidade acadêmica tão rica e pelo aprendizado e crescimento que isso proporcionou.

À CAPES e ao CNPq pelo fomento à pesquisa.

Aos demais familiares, amigos e colegas que integram esta rede de apoio tão importante.

Muito obrigada a todos.

RESUMO

A utilização de *Geosynthetic Clay Liners* (GCLs) como barreira de contenção de contaminantes é uma alternativa eficiente para proteger o solo natural e as águas subterrâneas e superficiais. O GCL é capaz de conter vazamentos de combustíveis em centros de distribuição, reservatórios e durante o transporte, graças à baixa condutividade hidráulica da bentonita presente no geocomposto, quando hidratada. É importante, no entanto, avaliar o comportamento do GCL diante da interação com contaminantes para garantir que suas propriedades hidráulicas não sejam comprometidas e que sua capacidade de retenção seja mantida. Tendo em vista a crescente inserção dos biocombustíveis na matriz energética brasileira e mundial, o presente trabalho buscou avaliar o comportamento hidráulico de um GCL permeado com biodiesel. Para tanto, inicialmente, realizou-se um estudo bibliométrico relacionados ao comportamento hidráulico de GCLs em contato com combustíveis. O programa experimental avaliou os efeitos sobre a condutividade hidráulica do GCL da pré-hidratação e saturação do material, tanto com água quanto com o contaminante de estudo, bem como de ciclos de hidratação e desidratação. Adicionalmente, foram realizados ensaios complementares de expansão da bentonita em contato com os dois líquidos. Os testes de condutividade hidráulica foram conduzidos em laboratório, utilizando um permeâmetro de parede flexível, cuja construção e validação fizeram parte desta pesquisa. Os valores de referência de condutividade hidráulica do GCL para a percolação com água foram atendidos, validando o permeâmetro e tornando-o apto para a realização de ensaios previstos. A condutividade hidráulica média do geocomposto, quando hidratado e permeado com água, foi de $4,9 \times 10^{-11}$ m/s. Já para as amostras hidratadas com água e permeadas com biodiesel, o valor foi de $9,9 \times 10^{-11}$ m/s, indicando um aumento de aproximadamente 2 vezes para o fluxo com contaminante. Também foi observado que a prévia hidratação e saturação do GCL com água antes da percolação com biodiesel é essencial devido ao comportamento não expansivo da bentonita em contato com o composto orgânico. O valor médio de condutividade hidráulica do GCL pré-hidratado com biodiesel foi cerca de 30 vezes maior do que quando pré-hidratado com água. Com relação aos ensaios com amostras submetidas a ciclos prévios de umedecimento e secagem, verificou-se um aumento aproximado de 3,5 vezes na condutividade hidráulica para as amostras expostas a 40 ciclos com relação àquelas expostas a 10 ciclos. Os resultados evidenciam a eficiência do GCL como barreira de contenção do biodiesel e destacam a necessidade de uma hidratação adequada do material antes de sua exposição ao contaminante, assim como a importância de considerar as variações de umidade às quais ele pode ser submetido durante a operação.

Palavras-chave: Contaminação do solo; Geossintéticos; Biocombustíveis; Ensaio de permeabilidade; Permeâmetros de parede flexível.

ABSTRACT

The use of Geosynthetic Clay Liners (GCLs) as a barrier to contain contaminants is an efficient alternative to protect natural soil and groundwater and surface water. The GCL can contain fuel leaks in distribution centers, reservoirs, and during transportation, thanks to the low hydraulic conductivity of the bentonite present in the geocomposite when hydrated. However, it is important to evaluate the behavior of GCL when interacting with contaminants to ensure that its hydraulic properties are not compromised, and its retention capacity is maintained. In view of the increasing use of biofuels in the Brazilian and global energy matrix, this study aimed to evaluate the hydraulic behavior of a GCL permeated with biodiesel. Initially, a bibliometric study related to the hydraulic behavior of GCLs in contact with fuels was carried out. The experimental program evaluated the effects on the hydraulic conductivity of GCL of pre-hydration and saturation of the material, both with water and with the contaminant of study, as well as cycles of hydration and dehydration. Additionally, complementary tests of bentonite expansion in contact with the two liquids were performed. Hydraulic conductivity tests were conducted in the laboratory using a flexible wall permeameter, whose construction and validation were part of this research. The reference values of GCL hydraulic conductivity for percolation with water were met, validating the permeameter and making it suitable for the planned tests. The average hydraulic conductivity of the geocomposite when hydrated and permeated with water was 4.9×10^{-11} m/s. For samples hydrated with water and permeated with biodiesel, the value was 9.9×10^{-11} m/s, indicating an increase of approximately 2 times for the flow with the contaminant. It was also observed that prior hydration and saturation of GCL with water before percolation with biodiesel are essential due to the non-expansive behavior of bentonite in contact with the organic compound. The average value of hydraulic conductivity of GCL pre-hydrated with biodiesel was about 30 times higher than when pre-hydrated with water. Regarding the tests with samples subjected to previous cycles of wetting and drying, an approximate increase of 3.5 times in hydraulic conductivity was observed for samples exposed to 40 cycles compared to those exposed to 10 cycles. The results demonstrate the efficiency of GCL as a barrier to contain biodiesel and highlight the need for adequate hydration of the material before its exposure to the contaminant, as well as the importance of considering the moisture variations to which it may be subjected during operation.

Keywords: Soil contamination; Geosynthetics; Biofuels; Permeability tests; Flexible-wall permeameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da produção de biodiesel (B100) na última década.	18
Figura 2: Reação de transesterificação de triglicerídeo para obtenção de biodiesel.	20
Figura 3: Estrutura molecular dos principais ácidos graxos do óleo de soja.....	20
Figura 4: Seções típicas de GCLs disponíveis no mercado.....	23
Figura 5: Estrutura cristalina da montmorilonita.....	27
Figura 6: Fluxograma da pesquisa.....	36
Figura 7: Sequência de montagem de um corpo de prova no permeâmetro.....	43
Figura 8: Execução de um ensaio de condutividade hidráulica.....	44
Figura 9: Layout do ensaio de condutividade hidráulica.....	73
Figura 10: Membranas flexíveis para ensaio.....	75
Figura 11: Conjunto de peças principais do permeâmetro a) base do permeâmetro e face inferior do base cap; b) base cap fixado; c) disco poroso; d) top cap e) conjunto de câmaras.	76
Figura 12: Ensaio de expansão da bentonita presente no GCL em água (bases de cor azul) e em biodiesel (bases de cor vermelha).....	78
Figura 13: Condutividade hidráulica do GCL com percolação de água.....	80
Figura 14: Condutividade hidráulica do GCL com percolação de biodiesel a longo prazo.	82
Figura 15: Condutividade hidráulica do GCL com pré-hidratação e percolação de biodiesel.	84
Figura 16: Condutividade hidráulica do GCL após 10 ciclos de umedecimento e secagem com percolação de biodiesel.....	86
Figura 17: Fissuras em amostras de GCL expostas aos ciclos de umedecimento e secagem. .	86
Figura 18: Condutividade hidráulica do GCL após 40 ciclos de umedecimento e secagem com percolação de biodiesel.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de um óleo de soja.....	21
Tabela 2: Vantagens e desvantagens dos GCLs.....	24
Tabela 3: Programa de experimentos da pesquisa.....	37
Tabela 4: Propriedades físicas do GCL.....	38
Tabela 5: Caracterização do biodiesel (B100).....	39
Tabela 6: Resultados de condutividade hidráulica do GCL com percolação de água e biodiesel.....	79

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Contextualização, problema e justificativa da pesquisa	10
1.2. Objetivos da pesquisa	12
1.3. Contribuição original da tese	13
1.4. Organização da tese	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1. Contaminação ambiental.....	15
2.2. Biodiesel	16
2.3. Barreiras de impermeabilização com GCL.....	21
2.3.1. Características.....	21
2.3.2. Bentonita.....	25
2.3.3. Condutividade hidráulica.....	28
2.4. Ensaio de permeabilidade.....	33
3. MÉTODO DA PESQUISA	36
3.1. Estudo bibliométrico.....	36
3.2. Visão geral e etapas do programa experimental	36
3.3. Planejamento experimental.....	37
3.4. Materiais utilizados na pesquisa	38
3.4.1. Geocomposto bentonítico	38
3.4.2. Biodiesel	39
3.4.3. Água	40
3.5. Ensaio de expansão da bentonita.....	40
3.6. Ensaio de permeabilidade.....	40
3.6.1. Considerações iniciais	40
3.6.2. Preparação dos corpos de prova	42
3.6.3. Procedimentos de montagem para teste	43
3.6.4. Saturação dos corpos de prova	44
3.6.5. Percolação e cálculo do índice de fluxo	45
3.6.6. Determinação da condutividade hidráulica	46
3.6.7. Ensaio de percolação com água e validação do equipamento	47
3.6.8. Ensaio de percolação com biodiesel	48
3.6.8.1. Ensaio de longa duração.....	48

3.6.8.2. Ensaio com pré-hidratação de biodiesel.....	48
3.6.8.3. Ensaio após ciclos de umedecimento e secagem	49
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	50
4.1. Revisão bibliométrica (artigo publicado).....	50
4.2. Construção do permeâmetro de parede flexível.....	71
4.3. Análise dos resultados do programa experimental	76
4.3.1. Considerações iniciais	76
4.3.2. Índice de expansão da bentonita.....	77
4.3.3. Ensaio de permeabilidade	78
4.3.3.1. Condutividade hidráulica do GCL com percolação de água	79
4.3.3.2. Condutividade hidráulica do GCL com percolação de biodiesel	81
4.3.3.2.1. Ensaio de longa duração.....	81
4.3.3.2.2. Ensaio com pré-hidratação de biodiesel.....	84
4.3.3.2.3. Ensaio após 10 ciclos de umedecimento e secagem	85
4.3.3.2.4. Ensaio após 40 ciclos de umedecimento e secagem	87
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXO A – Projeto do permeâmetro.....	98

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização, problema e justificativa da pesquisa

Um dos principais problemas para o meio ambiente é a intrusão de contaminantes tóxicos no solo, bem como nas águas subterrâneas e superficiais. A proteção ambiental em obras de infraestrutura vem recebendo destaque nas últimas décadas em função da gravidade associada a episódios de contaminação por meio de combustíveis. As principais fontes deste tipo de contaminação são provenientes de pequenos vazamentos em reservatórios e de acidentes ocorridos nas operações de carga, descarga e no transporte dos materiais combustíveis.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2022), ao final de 2021, havia 292 bases de distribuição de combustíveis líquidos autorizadas no país, sendo que 59 delas estavam localizadas na região Sul. A capacidade nominal de armazenamento do país para esse tipo de infraestrutura era de 4,1 milhões de m³, com 265,6 mil m³ (6,4% do total) alocados para o biodiesel, dos quais 19,1% estavam na região Sul. Além disso, a ANP registra no período 42.401 postos revendedores de derivados de petróleo em operação em todo o país, sendo que 7,4% deles estão localizados no estado do Rio Grande do Sul.

A série de dados históricos da CETESB (2023) aponta que a atividade de revenda de combustíveis é, atualmente, a principal responsável pelas áreas contaminadas no Estado paulista, com 4.780 registros das áreas de contaminação cadastradas. Embora se trate de um registro local, o risco de contaminação proveniente das atividades que envolvam a manipulação de combustíveis pode ser estendido a todo território brasileiro. Esses dados causam alerta entre pesquisadores e entidades ambientais, e evidenciam a necessidade de desenvolver o conhecimento acerca de sistemas hidráulicos que possam efetivamente limitar a percolação da pluma de contaminantes no solo.

Por muito tempo, foram utilizados como proteção *liners* de argila compactada, ou CCL (representação da expressão em inglês *Compacted Clay Liner*), porém considera-se o uso do solo, envolvendo em muitos casos escavação de grandes volumes, como um impacto ambiental nas obras. Em vista disso, os geossintéticos têm se tornado uma alternativa eficiente frente ao solo, devido às propriedades dos materiais, custo competitivo, facilidade e rapidez na execução. Conhecido como geocomposto bentonítico ou GCL (representação da expressão

em inglês *Geosynthetic Clay Liner*), esse geossintético tem recebido atenção em virtude dos resultados favoráveis provenientes de estudos e experiências de campo bem-sucedidas.

Formada por um núcleo de bentonita envolvida por dois materiais geossintéticos, a estrutura do GCL dá origem a uma barreira de contenção hidráulica. Em razão da baixa permeabilidade, elevada plasticidade e capacidade de absorção da bentonita, o GCL apresenta uma condutividade hidráulica muito baixa, viabilizando sua utilização em diversas aplicações nos campos ambiental e geotécnico.

Para avaliação da equivalência técnica entre os diferentes tipos de barreiras de impermeabilização, tem sido utilizada como referência a condutividade hidráulica da água. No entanto, os GCLs costumam ser usados para conter outros líquidos além da água e, portanto, uma avaliação justa da equivalência deve ser baseada, em parte, na condutividade hidráulica do material submetido ao fluxo do líquido permeante real. Budhu et al. (1991) orientam que é errôneo prever a condutividade hidráulica de solos permeados com fluidos orgânicos, por exemplo, tendo como base a medição da condutividade hidráulica com água. Para isso, geralmente se realiza um teste de compatibilidade, onde a amostra é permeada com o próprio líquido a ser contido (SHACKELFORD et al., 2000).

A boa performance de GCLs em barreiras de proteção fomenta sua utilização em diversas aplicações que propõem o isolamento de contaminantes do meio ambiente. Porém, atenta-se para a realização de estudos complementares. Considerando uma possível interação química entre a bentonita presente no geocomposto e o fluido contaminante, o desempenho hidráulico da barreira nessas condições requer investigação.

Há cerca de uma década, Rowe et al. (2008) constataram que pouca atenção havia sido dada para estudos de permeabilidade de GCLs com hidrocarbonetos. Embora tenha ocorrido um aumento no emprego de GCLs em sistemas de impermeabilização, ainda há pouco estudo sobre a percolação de contaminantes de uso frequente, como é o caso de materiais combustíveis derivados do petróleo e da biomassa, que fazem parte, em grande escala, da matriz energética brasileira. Em vista disso e do fato de se tratar de uma temática bastante recente, o cenário é promissor para o desenvolvimento de novos trabalhos nessa área.

Como a permeabilidade dos GCLs é controlada pela interface solo/fluido, a presente pesquisa busca monitorar possíveis mudanças no comportamento hidráulico de um geocomposto argiloso após percolação de biodiesel. O biodiesel é um combustível de origem renovável, produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais, que pode substituir, parcial ou totalmente, combustíveis fósseis. A escolha por um biocombustível nos estudos

tem motivação na positiva, e crescente, inserção de energias mais sustentáveis na matriz energética mundial, vistas nas últimas décadas.

Além do conhecimento sobre o fluido de percolação, é importante avaliar a permeabilidade do GCL levando em conta a possível exposição do material a ciclos de hidratação e desidratação da bentonita em condições de campo. Esses ciclos estão diretamente relacionados aos fatores climáticos, tais como chuva e estiagem, variações na profundidade do lençol freático e ciclos de dia e noite, e podem resultar em fissuras na estrutura do GCL, aumentando sua condutividade hidráulica.

Esta temática está inserida na linha de pesquisa de Infraestrutura Sustentável do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Todos os estudos foram conduzidos no Laboratório de Geossintéticos da Universidade de Passo Fundo, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o uso de barreiras de impermeabilização de contaminantes com GCL para a contenção de biocombustíveis.

1.2. Objetivos da pesquisa

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica, do ponto de vista da resposta hidráulica de uma barreira impermeável de geocomposto argiloso (GCL), para contenção de biodiesel.

Os objetivos específicos foram:

- a) Identificar os principais fatores intervenientes sobre o comportamento hidráulico de GCLs permeados com combustíveis;
- b) Construir e validar um permeâmetro de parede flexível para ensaios com contaminante orgânicos;
- c) Avaliar a expansão da bentonita em meio aquoso e com biodiesel;
- d) Avaliar a condutividade hidráulica do GCL hidratado com água após a exposição prolongada à percolação de biodiesel;
- e) Avaliar a condutividade hidráulica do GCL pré-hidratado e permeado com biodiesel;
- f) Avaliar a condutividade hidráulica do GCL permeado com biodiesel, após exposição a ciclos prévios de umedecimento e secagem.

1.3. Contribuição original da tese

O estudo da condutividade hidráulica de GCLs expostos à contaminação e percolação com biodiesel teve início em 2017, como parte de um projeto realizado pelo grupo de pesquisa de geossintéticos da Universidade de Passo Fundo, cujo primeiro trabalho concluído foi o de Zanella (2019). Este projeto tem como objetivo compreender as características hidráulicas de geocompostos bentoníticos diante de diferentes casos de contaminação. Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido um permeâmetro de parede flexível com características especiais, projetado por Zanella (2019), que permite medir a condutividade hidráulica de GCLs em análises de percolação de diferentes contaminantes. A construção do equipamento, bem como a sua validação, foram realizadas durante o desenvolvimento deste estudo, levando em consideração todas as particularidades do permeâmetro no processo de montagem.

Embora haja diversas pesquisas na literatura sobre a eficiência de GCLs como barreiras de impermeabilização para percolantes líquidos, ainda é pouco conhecido o comportamento deste geossintético após períodos de fluxo com combustíveis. Há uma escassez de pesquisas científicas sobre os efeitos da percolação de biodiesel na condutividade hidráulica do GCL. Este estudo tem como objetivo preencher essas lacunas investigando não apenas a eficiência de uma barreira hidráulica composta por GCL após diferentes períodos de percolação com biodiesel, mas também a influência do líquido de hidratação e da exposição do GCL a ciclos de hidratação e desidratação.

1.4. Organização da tese

Esta tese de doutorado está organizada em seções para melhor apresentação e compreensão do trabalho. A primeira seção introduz e contextualiza o tema, apresenta a problemática, justificativa e objetivos da pesquisa. A segunda seção é uma revisão abrangente da literatura sobre contaminação ambiental, biodiesel, barreiras de impermeabilização com GCL e ensaios de permeabilidade. A terceira seção descreve as etapas da pesquisa, planejamento experimental, materiais e métodos utilizados. A quarta seção apresenta os resultados da pesquisa, os quais estão diretamente relacionados aos objetivos propostos. Para uma melhor organização, esta seção está dividida em três partes. A parte I consiste em um estudo bibliométrico sobre o comportamento hidráulico de GCLs permeados com combustíveis, apresentado em formato de artigo científico (publicado). A parte II descreve o processo de construção e validação do permeâmetro de parede flexível. Já a parte III engloba

a análise dos resultados obtidos no programa experimental, incluindo os testes de expansão da bentonita e os ensaios de condutividade hidráulica do GCL. Na quinta e última seção são apresentadas as conclusões finais do trabalho. Por fim, é apresentada a lista de referências bibliográficas utilizadas no trabalho, que contempla as fontes consultadas para o embasamento teórico e metodológico do estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contaminação ambiental

Dados do Balanço Energético Nacional 2022 (EPE, 2022), indicam que aproximadamente 65% do consumo de energia do Brasil estava concentrado na indústria (32,3%) e nos transportes (32,5%), no ano de 2021. No setor de transportes, é visto que a maior fonte de consumo naquele ano foi o óleo diesel (45,1%), seguido pela gasolina (26,0%), álcool etílico (17,4%), biodiesel (5,2%) e querosene (3,0%), sendo notável o crescimento do consumo de biodiesel na última década. É comum que os serviços de armazenamento, transferência e transporte estejam localizados próximos a zonas industriais e urbanas, despertando assim, a necessidade de prevenir acidentes ambientais decorrentes do manuseio de combustíveis, visto a periculosidade e risco de contaminação associados a estes materiais.

Segundo o Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo (CETESB, 2023), que inclui dados atualizados até fevereiro de 2023, a atividade de revenda de combustíveis tem uma forte influência na contaminação das áreas cadastradas, sendo os principais grupos de contaminantes encontrados os combustíveis automotivos e solventes aromáticos, com 4.780 e 4.430 registros de contaminação, respectivamente.

Os dados alertam para a possibilidade da ocorrência de áreas contaminadas nos demais estados brasileiros, visto a possibilidade de haver inúmeros tanques de armazenamento de combustível danificados sem o conhecimento dos responsáveis e autoridades.

Embora seja importante prevenir falhas no processo de armazenamento e transporte de combustíveis, muitas vezes essas falhas ocorrem. Portanto, a implantação de técnicas de proteção ambiental em áreas de risco se torna fundamental. Essa preocupação se justifica pela alta toxicidade dos combustíveis e pelos efeitos negativos que podem causar ao solo.

O solo é um recurso natural vital para a manutenção da vida na Terra, desempenhando um papel fundamental na proteção das águas superficiais e subterrâneas. Infelizmente, em muitas partes do mundo, há um número significativo de áreas contaminadas por conta das atividades relacionadas à produção e operação de combustíveis, tanto fósseis quanto renováveis. A contaminação do solo por substâncias tóxicas é uma ameaça séria à saúde pública e ao meio ambiente, já que esses contaminantes podem se infiltrar no solo e na água, atingindo ecossistemas inteiros e afetando a biodiversidade. Portanto, ações efetivas são necessárias para prevenir e remediar a contaminação do solo, minimizando assim os impactos negativos sobre a saúde humana e a natureza.

O processo de transporte de contaminantes em solos porosos pode ser definido como sendo o movimento do composto em meio a uma ou mais camadas de solo, podendo ocorrer em fase líquida, sólida ou gasosa, bem como em meio saturado ou não saturado. A migração de contaminantes não depende apenas do fluxo de fluido no qual estão dissolvidos, como também dos processos físicos, químicos e biológicos, aos quais estas substâncias são submetidas, além das características do contaminante, do solo e as condições ambientais.

No contexto de fluxo multifásico no solo envolvendo água, ar e óleo, a água e o óleo são imiscíveis, o que significa que não se misturam. O ar, por sua vez, ocupa os espaços vazios entre os poros preenchidos pelos fluidos líquidos. A competição entre água e óleo pelos poros do solo é influenciada por uma série de fatores, incluindo as características dos fluidos, as propriedades do solo e as condições específicas do local. Devido à sua polaridade e interação com as partículas do solo, a água geralmente tende a ser a fase contínua, preenchendo os poros menores. Por outro lado, o óleo tende a se agrupar em forma de gotículas dispersas na fase aquosa ou formar interfaces separadas.

Tomando como exemplo a liberação de contaminantes de hidrocarbonetos de petróleo no solo, esta ocorre, principalmente, através de vazamentos em superfícies de tanques de armazenamento subterrâneos, disposição irregular de resíduos de destilação e acidentes durante o transporte até os postos de distribuição. Quando liberados no meio, os contaminantes tendem a migrar para regiões mais profundas do solo, sendo que parte pode ficar retida nos vazios do solo sob efeito de capilaridade. Em casos de contaminação contínua, a movimentação dos compostos pode ocorrer até o encontro com alguma barreira física, como regiões de baixa permeabilidade ou o próprio lençol freático (YARON et al., 2012; NADIM et al., 2000).

2.2. Biodiesel

Os principais recursos energéticos são provenientes de combustíveis fósseis, fontes não renováveis de energia, como petróleo, carvão e gás natural. Huang et al. (2012) apresentam estimativas de que os combustíveis fósseis contribuem com 80% das necessidades energéticas do mundo e que eles seriam consumidos em até cerca de 65 anos.

Em vista da dependência de combustíveis em muitos aspectos da vida cotidiana, como no transporte de pessoas e mercadorias, os combustíveis alternativos de fontes renováveis têm recebido crescente atenção de pesquisadores, empresários e entidades governamentais. Nesse contexto, o biodiesel surge como uma alternativa promissora ao combustível fóssil para

motores a diesel, como uma fonte de energia mais limpa, protegendo o meio ambiente através da redução de poluentes atmosféricos, como emissões de CO₂ (dióxido de carbono), SO₂ (dióxido de enxofre), CO (monóxido de carbono) e HC (hidrocarbonetos), por exemplo.

Biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia. Os dois principais biocombustíveis líquidos usados no Brasil são o etanol obtido a partir de cana-de-açúcar e, em escala crescente, o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais e adicionado ao diesel de petróleo em proporções variáveis.

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) foi instituída pela Lei nº 13.576/2017 com o objetivo de expandir a produção e o uso de biocombustíveis no Brasil, de forma previsível e sustentável do ponto de vista ambiental, econômico e social, em compatibilidade com o crescimento do mercado. O principal instrumento do RenovaBio é a definição de metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, que incentivam o aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes do país.

A mistura do biodiesel puro (B100) ao diesel fóssil teve início em 2004, em caráter experimental e, entre 2005 e 2007, no teor de 2% (B2), a comercialização passou a ser voluntária. A partir de 2008, a mistura de biodiesel B2 ao óleo diesel passou a ser obrigatória em todo o Brasil. Com o amadurecimento do mercado brasileiro, esse percentual vem crescendo a cada ano, com previsão de atingir a proporção de 15% em março de 2023, conforme estabelecido pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) na Resolução nº 16/2018. Atualmente, o percentual de adição está em 12% (B12) (ANP, 2023).

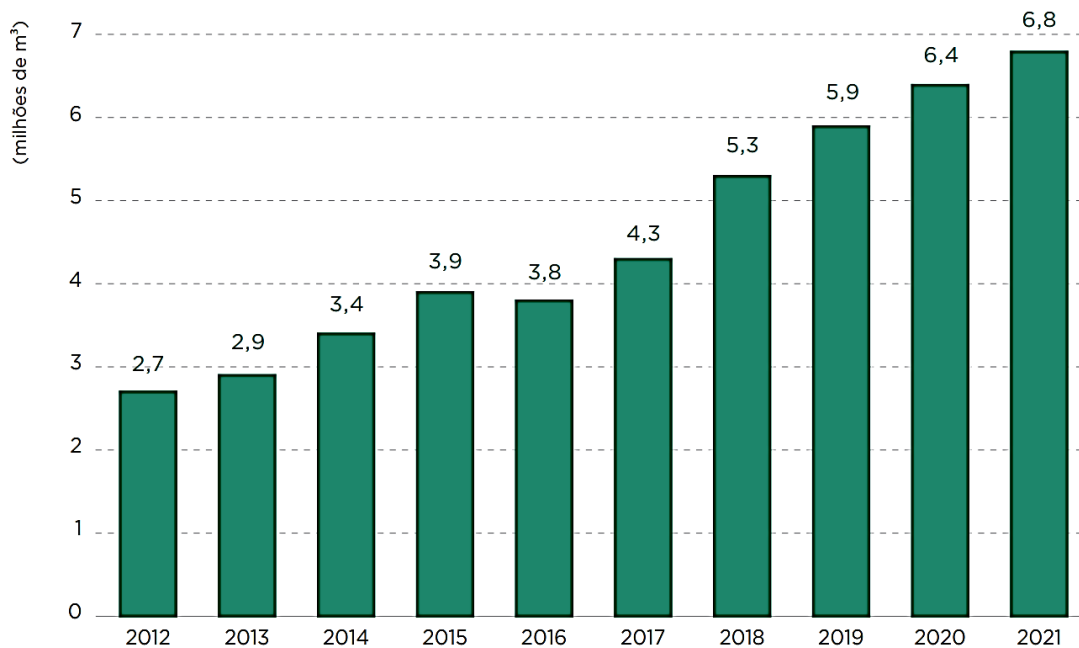
Além da relevância do biodiesel na descarbonização dos transportes, este biocombustível tem potencial para entrar no protagonismo da mobilidade, tornando-se parte da transição energética para fontes de energia mais limpas. De acordo com líderes da empresa de biodiesel BSBIOS (maior produtora de biodiesel do mercado brasileiro), o Brasil possui o maior programa operacional em larga escala de biocombustíveis do mundo, devido à força do agronegócio e da experiência prévia em energia limpa e sustentável, e a expectativa é de que os biocombustíveis ajudem o Brasil a cumprir a meta de reduzir 50% de emissões até 2030, conforme compromisso assumido pelo país na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas (BSBIOS, 2021).

O Brasil alcançou uma posição almejada por muitos países que buscam desenvolver fontes renováveis de energia como alternativas estratégicas ao petróleo. Em 2021, a

participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, num total de 44,7%. Destes, 16,4% são oriundos da biomassa da cana, 11,0% da energia hidráulica, 8,7% da lenha e carvão vegetal, 6,1% de outras fontes renováveis, 2,1% da energia eólica e 0,5% da energia solar (EPE, 2022).

Conforme o Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2022, recentemente apresentado (ANP, 2022), em 2021 a produção de biodiesel foi 5% superior ao ano anterior, atingindo o montante de 6.765.850 m³. Durante o período analisado, observou-se redução na produção de biodiesel nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste, enquanto a região Sul apresentou aumento de 16,1% no volume produzido. A Figura 1 apresenta a evolução da produção de biodiesel no país ao longo do tempo.

Figura 1: Evolução da produção de biodiesel (B100) na última década.



Fonte: ANP (2022).

Atualmente, existem 58 plantas produtoras de biocombustível autorizadas pela ANP para operação no país (ANP, 2023). Em 2021, a capacidade nominal de produção de biodiesel (B100) era de cerca de 12,4 milhões de m³ (33,9 mil m³/dia). Entretanto, a produção nacional no ano foi de 6,8 milhões de m³, o que correspondeu a 54,5% da capacidade total (ANP, 2022).

A maior produtora deste biocombustível em 2021 foi a região Sul, com volume de aproximadamente 3,2 milhões de m³, equivalente a 47% da produção nacional, seguida da região Centro-Oeste, com uma produção equivalente a 37,9% do total nacional. O Estado do

Rio Grande do Sul continua liderando a produção de biodiesel, com um volume de aproximadamente 1,9 milhão de m³, equivalente a 27,4% do total nacional, após um crescimento produtivo de 3,6% com relação ao ano anterior. Ocupando o segundo lugar está o Estado do Mato Grosso, com uma produção equivalente a 19,5% do total nacional (ANP, 2022).

De acordo com dados do anuário, em 2021, a soja continuou sendo a principal matéria-prima para a produção de biodiesel (B100), equivalente a 72,1% do total, seguida pelo grupo que inclui óleo de fritura usado e outros materiais graxos que representou 13,3% do total, pela gordura animal (bovina, de frango e de porco) com 10,5% do total e por demais óleos vegetais (de algodão, canola, girassol, milho etc.) com 4,1% do total (ANP, 2022).

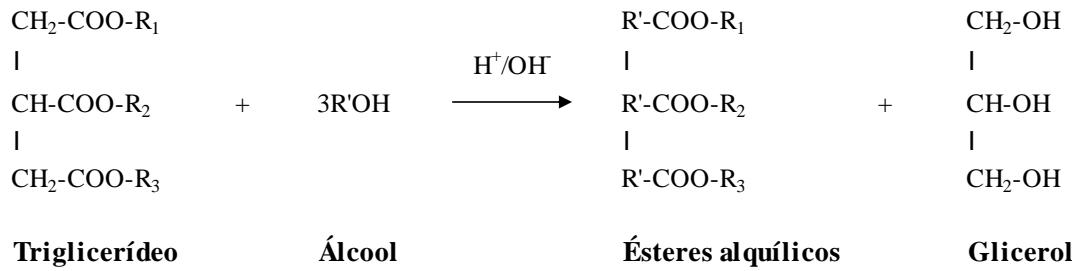
Conforme já discutido anteriormente, o biodiesel é uma opção de combustível renovável que apresenta vantagens em relação ao diesel de petróleo, tais como a redução de emissões de poluentes e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis. Esse biocombustível é produzido a partir de fontes vegetais ou animais e pode ser utilizado em motores de combustão interna sem a necessidade de adaptações significativas. Ele é composto principalmente por ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, que são obtidos através da transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais.

Óleos vegetais e gorduras animais são substâncias hidrofóbicas insolúveis em água, formadas por ésteres de ácidos carboxílicos saturados e insaturados com o tri álcool glicerol. Estes ésteres são chamados triglicerídeos, que podem reagir com o álcool na presença de um catalisador (ácido ou básico), cujo processo é conhecido como transesterificação (MA e HANNA, 1999; LEUNG et al., 2010).

Na transesterificação, os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal reagem com um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol), gerando dois produtos: ésteres alquílicos de ácidos graxos (compostos formadores do biodiesel) e um subproduto denominado glicerol. O primeiro somente pode ser comercializado como biodiesel, após passar por processos de purificação para adequação à especificação da qualidade, sendo destinado principalmente à aplicação em motores de ignição por compressão (ANP, 2019a). Normalmente, o metanol é mais utilizado como álcool reagente na produção de biodiesel devido ao seu baixo custo (LEUNG et al., 2010; HUANG et al. 2012).

A forma simplificada de sua reação química é apresentada na Figura 2, onde R₁, R₂ e R₃ são hidrocarbonetos de cadeia longa dos ácidos graxos, com variação de 12 a 24 átomos de carbono, e R' é a cadeia carbônica do álcool reagente, com 1 ou 2 átomos de carbono (COSTA NETO, 2002).

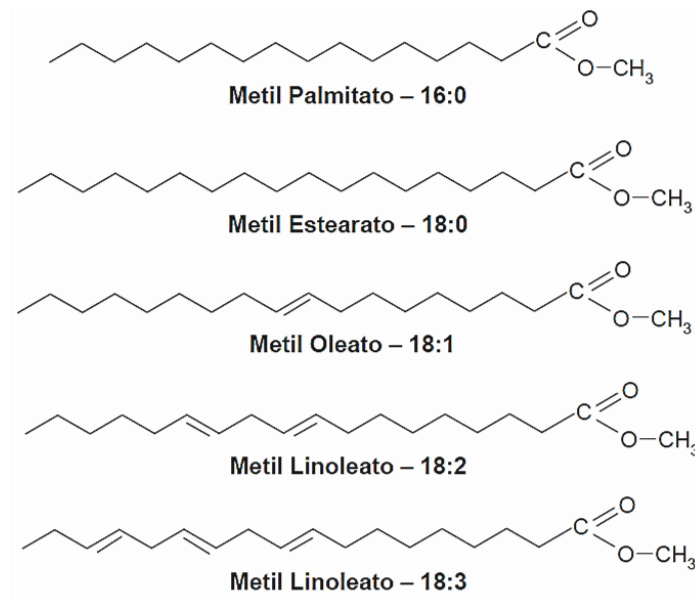
Figura 2: Reação de transesterificação de triglicerídeo para obtenção de biodiesel.



Fonte: Adaptado de Ma e Hanna (1999).

Os ácidos graxos são ácidos orgânicos lineares que diferem entre si pelo comprimento da cadeia de carbonos e pelo número de ligações insaturadas (ligações duplas) em sua cadeia (MA e HANNA, 1999). Normalmente, o teor de ácidos graxos presentes no óleo de soja está centrado em cinco principais, que são: ácido graxo palmítico (16:0), esteárico (18:0), oleico (18:1), linoleico (18:2) e linolênico (18:3) (COSTA NETO, 2002.; LEUNG et al., 2010) As estruturas moleculares dos principais ácidos graxos presentes no óleo de soja podem ser vistas na Figura 3 e um exemplo de concentrações típicas pode ser visualizado na Tabela 1.

Figura 3: Estrutura molecular dos principais ácidos graxos do óleo de soja.



Fonte: Chiaranda (2011).

Tabela 1: Composição química de um óleo de soja.

Ácido graxo	Composição (%)
Palmítico	10,5
Estearico	3,6
Oleico	23,5
Linoleico	54,7
Linolênico	7,1
Outros	0,6

Fonte: Wu et al. (2016).

Em geral, o biodiesel é livre de enxofre e aromáticos, possui maior densidade, viscosidade, alto número de cetano e ponto de fulgor que o diesel de petróleo. Apresenta cerca de 10% de teor de oxigênio, resultando em melhoria na sua eficiência de queima, baixas emissões de material particulado e outros poluentes gasosos (COSTA NETO, 2002; CHIARANDA, 2011; HUANG et al., 2012).

Os ésteres metílicos presentes no biodiesel são altamente hidrofóbicos devido ao comprimento de suas cadeias de carbono mais longas, o que faz com que sejam praticamente insolúveis em água (CECCHIN et al., 2016).

2.3. Barreiras de impermeabilização com GCL

2.3.1. Características

GCL é o acrônimo da expressão em língua inglesa *Geosynthetic clay liner*, que significa uma barreira hidráulica constituída por uma fina camada de argila bentonita, ou outro material de baixíssima permeabilidade, suportada por geotêxteis e/ou geomembranas, sendo mecanicamente unidos por meio de agulhamento, costura ou adesivação química (KOERNER, 2005).

De acordo com material elaborado pela Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS – *International Geosynthetics Society*), que expressa a classificação dos diferentes tipos de geossintéticos, os GCLs como geocompostos formados por uma camada de bentonita geralmente disposta entre dois geotêxteis ou ligadas a uma geomembrana ou a uma única manta de geotêxtil. A fim de garantir a resistência interna do produto ao cisalhamento, os

GCLs são costurados ou agulhados através do núcleo de bentonita. Ainda, quando hidratados, os GCLs atuam efetivamente como barreira de impermeabilização para líquido ou gás e são comumente utilizados em aterros sanitários em conjunto com geomembranas (IGS, 2023).

Historicamente, o GCL surgiu como uma categoria de geossintéticos após a primeira ocorrência, em 1988, como camada de segurança para uma geomembrana disposta em um aterro sanitário dos Estados Unidos. Tratava-se de bentonita misturada com adesivo de modo a unir a argila entre dois geotêxteis, dispostos na base e topo da argila. Na mesma época, surgia na Alemanha um produto manufaturado semelhante, composto por bentonita em pó unida entre dois geotêxteis por agulhamento (KOERNER, 2005).

Nas últimas décadas, é notável o crescente interesse acerca da utilização deste material. Bouazza (2002) atribui esse crescimento à maior confiança de projetistas e órgãos reguladores e ao melhor conhecimento acerca da performance do GCL, resultante da grande frequência de pesquisas apresentadas em congressos científicos e do montante de artigos publicados sobre o tema em periódicos geossintéticos, geotécnicos e geoambientais. Na engenharia, o GCL pode ser utilizado tanto em substituição a barreiras de argila compactada ou geomembranas, quanto associado a esses materiais, objetivando um melhor desempenho da barreira.

Geossintéticos bentoníticos são amplamente utilizados em sistemas de barreira de contaminantes. Os GCLs podem ser aplicados como barreiras de proteção ambiental em instalações de transporte, rodovias e ferrovias, visando a minimização da poluição de estratos subterrâneos proveniente de derramamentos acidentais e a infiltração de produtos químicos oriundos de acidentes rodoviários. Ainda, ocorre o emprego de GCLs como revestimentos secundários para tanques de armazenamento subterrâneo em postos de combustíveis, e como revestimentos únicos para canais, lagoas ou represas de superfície (BOUAZZA, 2002).

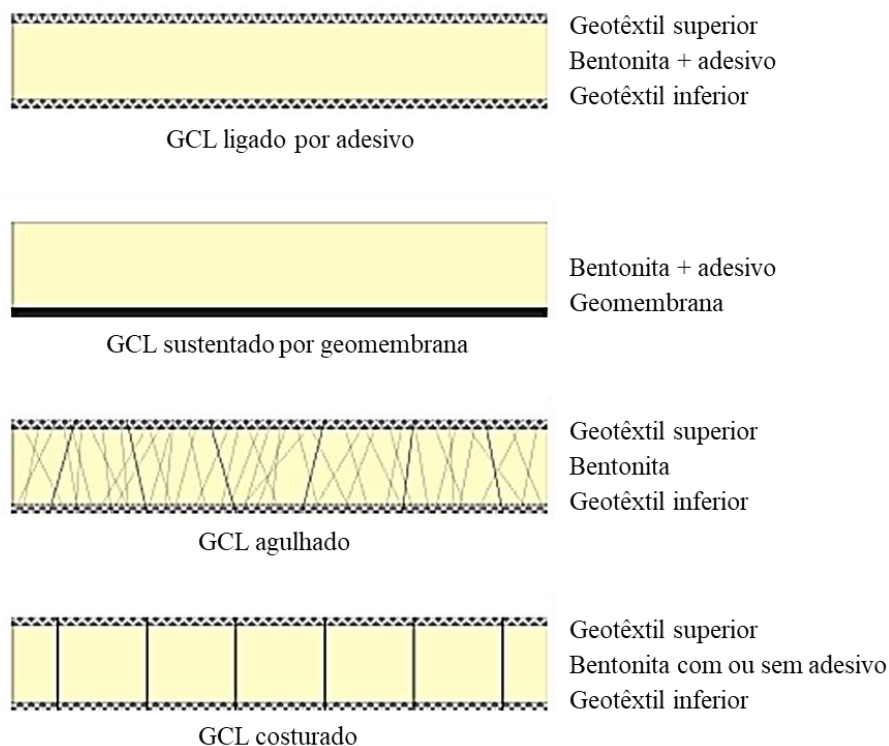
O desempenho do GCL está fundamentalmente associado às alterações, ao longo do tempo, de parâmetros de engenharia como a condutividade hidráulica, índice de expansão e capacidade de troca catiônica (CTC) da bentonita na presença de um determinado contaminante. A habilidade do GCL em atenuar diversos compostos contaminantes é atribuída, principalmente, à grande área superficial e CTC da bentonita sódica utilizada em muitos GCLs (TOUZE-FOLTZ et al. 2006).

Existem basicamente duas estruturas diferentes de GCLs, distinguidas através do método de fabricação do material, que são os GCLs não reforçados e os GCLs reforçados internamente. Como a bentonita hidratada apresenta baixa resistência ao cisalhamento, os GCLs não reforçados são utilizados em superfícies extremamente planas, e são constituídos

pela união da bentonita aos geossintéticos através de colagem adesiva. Por outro lado, os GCLs reforçados são requeridos em terrenos com inclinações mais íngremes. Estes, têm sua estrutura comumente reforçada por agulhagem de um geotêxtil não tecido através da bentonita e o geotêxtil oposto, criando um labirinto de fibras ao longo do material, ou por costura de dois geotêxteis tecidos que envolvem a camada de bentonita (KOERNER, 2005).

O mercado dispõe de diversos tipos de GCLs, os quais se diferenciam basicamente pela classificação da bentonita presente no núcleo (granular ou pó, cálcica ou sódica), pelo material geossintético constituinte (geotêxtil ou geomembrana nas faces inferior ou superior) e pelo processo de união dos materiais (agulhagem, costura ou adesivação). A Figura 4 ilustra alguns tipos de GCLs disponíveis no mercado.

Figura 4: Seções típicas de GCLs disponíveis no mercado.



Fonte: Adaptado de Koerner (2005).

A espessura da camada de argila varia entre 4 e 6 mm. A condutividade hidráulica varia de $(5 \text{ a } 1) \times 10^{-11}$ m/s, portanto 20 a 100 vezes menor que camadas de argila compactada. Os diversos produtos são levados a campo com teor de umidade variando entre 10 e 30%, isso devido em parte a extremamente alta natureza hidrofílica da bentonita. Os tipos de geotêxteis utilizados variam quanto seu processo de fabricação e sua massa específica. Quando utilizada geomembrana, esta também pode variar quanto ao tipo,

espessura e textura de superfície. Os GCLs são produzidos com largura de 4 a 5 m e comprimentos de 30 a 60 m. Após fabricados, eles são enrolados em torno de um núcleo e cobertos com filme plástico a fim de prevenir absorção de umidade adicional durante o armazenamento, transporte e disposição no local de atuação (KOERNER, 2005).

A Tabela 2 apresenta algumas vantagens e desvantagens da utilização de GCLs em barreiras hidráulicas.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens dos GCLs.

Vantagens	Desvantagens
Rápida instalação, fácil execução e custo baixo	Baixa resistência ao cisalhamento quando hidratado (GCL não reforçado)
Baixa condutividade hidráulica à água	Possibilidade de punção durante instalação
Boa resistência a recalques diferenciais	Possibilidade de perda de bentonita durante instalação
Ótima capacidade de auto cicatrização	Permeável a gás quando pouco hidratado
Independente da disponibilidade de solos locais	Potenciais problemas de cisalhamento na interface com outros materiais
Facilidade de reparo	Possibilidade de diminuir resistência de cisalhamento após o pico
Resistência a ciclos de gelo/degelo	Possibilidade de diminuição de espessura sob tensão, aumentando a permeabilidade
Grande espaço de armazenamento devido à pequena espessura	Potenciais problemas de condutividade hidráulica devido a incompatibilidade com contaminante
Não necessita ensaios de condutividade hidráulica em campo	Alto fluxo difusivo de contaminante, em comparação com solo compactado
Eficiente barreira de gás quando hidratado	Propensão à troca iônica (GCLs com bentonita sódica)
Diminui as tensões de sobrecarga em substrato compressível	Possibilidade de ressecamento

Fonte: Adaptado de Bouazza (2002).

A boa performance do GCL como barreira de impermeabilização está relacionada com a capacidade de expansão da bentonita presente no núcleo do geocomposto, quando hidratada. Heerten et al. (1993) apud Koerner (2005) recomendam um índice de expansão da bentonita presente no núcleo de, no mínimo, 24 mL para cada 2,0 g de bentonita. Maccaferri (2010)

informa que o GCL MacLine® GCL W 40 3.6, utilizado neste estudo, apresenta índice de expansão em água superior a 24 mL para cada 2,0g de bentonita, resultado confirmado por Zanella (2019), que usou o mesmo material em sua pesquisa.

A eficiência das barreiras com GCL também pode ser afetada por trincas resultantes de recalques diferenciais dos resíduos contidos, bem como por trincas oriundas da dessecação por ciclos de umedecimento e secagem do material geocomposto (PITANGA, 2007). Processos como o ressecamento, ciclos de gelo e degelo, gradientes de temperatura e recalques diferenciais agindo sobre uma barreira hidráulica podem resultar em fissuras da camada de bentonita (OMIDI et al., 1996). Em relação à elevada capacidade de expansão e retração da bentonita, esta pode conduzir a uma maior formação de trincas devido à dessecação do material (HE et al., 2015).

Thiel et al. (2006) afirmam que os ciclos de umedecimento e secagem têm um impacto significativo na contração do GCL, em contraste com o evento de secagem isoladamente. Em uma situação específica de um revestimento composto por geomembrana e GCL, deixado exposto ao tempo sem uma camada de solo de cobertura, os autores destacam que a geomembrana exposta ao sol aumentará a temperatura, causando a secagem do GCL durante o dia, e permitindo sua reidratação durante a noite, através da condensação do vapor confinado entre a geomembrana e o GCL. Eles também observam que a bentonita presente no GCL tende a absorver a umidade do subleito por sucção.

De acordo com Koerner (2005), é importante considerar o comportamento de GCLs expostos a ciclos alternados de umedecimento e secagem, pois eles podem causar ressecamento da bentonita presente no núcleo do geocomposto. Além das alterações na permeabilidade do GCL, a retração da bentonita pode resultar em perda de material na sobreposição das camadas e nas extremidades do rolo. Para evitar essa perda e garantir que a camada de GCL não sofra contração, o autor recomenda o cobrimento do material com uma espessura adequada de solo de proteção em tempo hábil.

2.3.2. Bentonita

Bentonita é o termo genérico de uma argila proveniente da alteração de cinzas vulcânicas, composta predominantemente pelo argilomineral montmorilonita, pertencente ao grupo das esmectitas, cujas propriedades físico-químicas e tecnológicas estão em função deste mineral. Sua denominação tem origem na descoberta do depósito de folhelhos argilosos em Fort Benton, Wyoming (EUA).

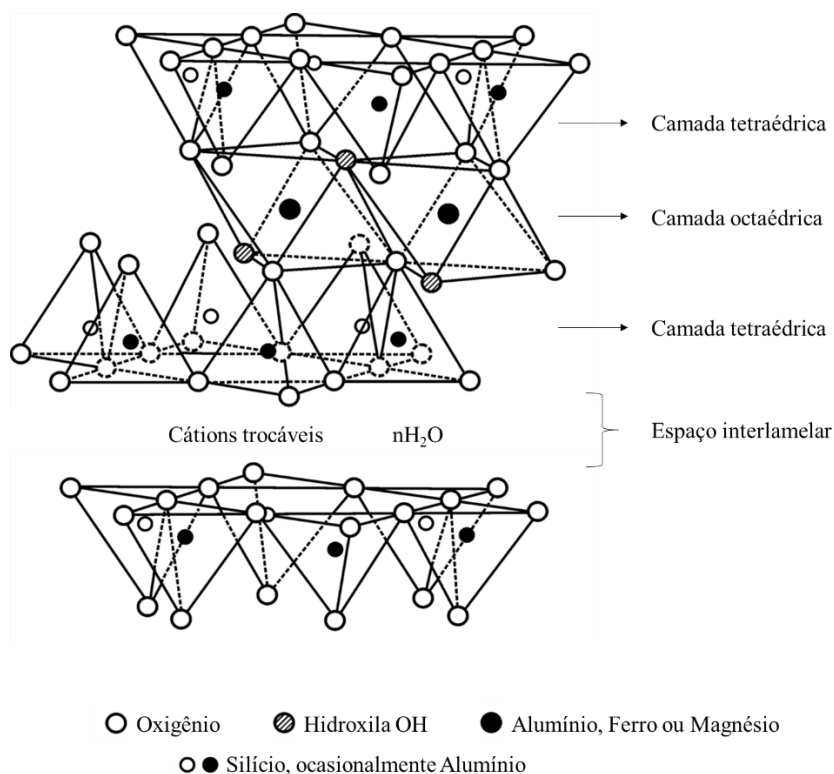
Os minerais de argila são compostos de várias combinações de folhas tetraédricas e octaédricas empilhadas, dando origem à argilominerais do tipo 1:1 e 2:1 e, geralmente, possuem carga elétrica negativa. A ligação de uma camada tetraédrica com uma octaédrica define um mineral de argila 1:1, tendo como exemplo a caulinita e haloisita. Os minerais se unem através de ligações de hidrogênio, de forma que a água ou outros íons não consigam entrar nas camadas. Esse tipo de argilomineral é considerado não-expansivo. Cátions monovalentes podem ser adsorvidos entre as camadas, porém a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) desse tipo de mineral é baixa, devido à baixa substituição isomórfica. Argilas com duas camadas tetraedrais separadas por uma camada octaedral, na forma de um sanduíche, definem os minerais de argila 2:1, como é o caso da montmorilonita. As camadas de montmorilonita são mantidas unidas por moléculas de água e podem se expandir para se unir com mais moléculas de água e íons hidratados. Esses argilominerais apresentam maior área superficial e maior CTC (LEWIS, 2009).

A montmorilonita possui grande área específica (valores próximos a 800 m²/g) e elevada concentração de cargas negativas. Essas características resultam em um elevado número de adsorção de cátions hidratados, bem como adsorção de moléculas de águas e, ainda, separação das camadas do material durante a hidratação (MITCHELL e SOGA, 2005). A Figura 5 apresenta a estrutura cristalina da montmorilonita.

O componente responsável pela eficácia dos GCLs é a bentonita presente em seu núcleo. As bentonitas podem se apresentar em pó ou formato granular e classificadas como sódicas ou cálcicas, dependendo do cátion trocável predominante (EGLOFFSTEIN, 1997). As propriedades de impermeabilização da bentonita se dá pela sua elevada afinidade com água e pela sua capacidade expansiva. Em condições confinadas, a expansão das partículas resulta no preenchimento dos vazios do solo, de modo a formar uma barreira contra a passagem do fluxo (GLEASON et al., 1997).

A qualidade de uma bentonita está relacionada com alguns fatores como, por exemplo, sua composição mineralógica, área superficial, cargas superficiais, composição dos íons trocáveis, quantidade e tipo de substituição isomórfica. Em geral, a qualidade da bentonita aumenta com o teor de montmorilonita, área superficial, deficiência de cargas superficiais e porcentagem de sódio (Na⁺) no complexo de troca iônica. Isso é devido a um aumento da capacidade de troca catiônica, da plasticidade, da capacidade de expansão na presença de água e conseqüente diminuição da condutividade hidráulica do material permeado com água (Lee e Shackelford, 2005).

Figura 5: Estrutura cristalina da montmorilonita.



Fonte: Adaptado de Mitchell e Soga (2005).

De acordo com Mesri and Olson (1971) apud Shackelford et al. (2000), a adsorção de moléculas de água e de cátions afetam significativamente o espaço dos poros, tornando essas moléculas imóveis. Assim, o espaço poroso ocupado por água não adsorvida é relativamente pequeno, conduzindo a caminhos de fluxo com formatos irregulares e dificultosos. Shackelford et al. (2000) comentam que esses fatores resultam em uma baixa condutividade hidráulica da montmorilonita para fluxo de água, da ordem de 10^{-8} cm/s, pois, devido a elevada afinidade com moléculas de água e cátions hidratados, ocorre uma significativa expansão da montmorilonita (cerca de 5 a 10 vezes o volume seco) quando esta é hidratada sob baixas pressões. De acordo com Bouazza (2002), a expansão de bentonitas sódicas pode variar de 10 a 15 vezes o seu volume quando hidratadas, enquanto nas bentonitas cálcicas essa variação de volume reduz para de 2 a 4 vezes.

A bentonita sódica é conhecida como sendo o tipo de material argiloso natural que apresenta menor permeabilidade. Em casos de baixa ocorrência deste material ou quando os custos de transporte são elevados, uma alternativa é tratar a bentonita cálcica (encontrada em maior quantidade no mundo todo) utilizando hidróxido de sódio, cujo resultado é a substituição dos íons de cálcio e, como consequência, ocorre a redução da permeabilidade até

valores próximos aos verificados nas bentonitas sódicas de origem natural (KOERNER, 2005).

A baixa condutividade hidráulica da montmorilonita para a água é responsável pela baixa condutividade hidráulica das bentonitas e, conseqüentemente, dos GCLs quando permeada com água. As bentonitas são sensíveis a mudanças na composição química do fluido permeante entre o meio poroso, pois isso afeta a espessura da camada adsorvida, que está diretamente relacionada com sua baixa condutividade hidráulica (SHACKELFORD et al., 2000). Líquidos que causam o colapso da camada adsorvida, fazem com que a condutividade hidráulica aumente (DANIEL et al. 1993; PETROV et al. 1997; SHACKELFORD et al. 2000; JO et al. 2001).

2.3.3. Condutividade hidráulica

O conhecimento do movimento da água no interior do solo é muito importante para diferentes obras de engenharia, visto, por exemplo, em estudos de determinação do fluxo e cálculo de vazões em barragens, cortinas ou poços de rebaixamento, análise da velocidade de recalques, estudos de estabilidade e sistemas de impermeabilização de solo.

Os solos possuem, com frequência, grande parte de seus poros ocupados com água que, quando exposta a uma diferença de potencial hidráulico, flui através dos poros interconectados, fissuras ou outros caminhos preferenciais. A facilidade com que a água flui através de um meio poroso como o solo, constitui a propriedade conhecida como permeabilidade.

De acordo com Daniel (1994), permeabilidade é a propriedade que um solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele, sendo esta variável de acordo com a tipologia do solo em estudo e é quantificada pelo coeficiente de permeabilidade. Um termo análogo a permeabilidade é condutividade hidráulica. Entretanto, além de estar relacionada com a permissividade de fluxo do meio poroso, a condutividade hidráulica leva em consideração a viscosidade e peso específico do fluido permeante no solo.

No caso específico de barreiras impermeabilizantes, a condutividade hidráulica é um fator decisivo na escolha do tipo de sistema, uma vez que é indispensável a utilização de materiais que apresentam valores extremamente baixos de condutividade hidráulica.

Experimentos pilotos sobre o movimento de água através de um filtro de areia foram realizados pelo engenheiro francês Henry Darcy, em 1856. O pesquisador verificou os fatores

que influenciam o fluxo de um fluido em meio poroso e estabeleceu que a Equação 1, conhecida como a Lei de Darcy.

$$v = k \times i \quad (1)$$

Através do estudo, foi concluído que a velocidade (v) de descarga é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (i), calculado a partir da Equação 2. A equação determina a perda de carga (Δh) do fluido permeante em um trecho de comprimento (L).

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

A constante de proporcionalidade (k) é conhecida como coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, e se trata de um parâmetro característico do próprio meio poroso e do líquido que por ele percola. Considerando um caso genérico de percolação de fluidos com densidades e viscosidades distintas através de um mesmo solo, os resultados de condutividade hidráulica serão diferentes. O mesmo ocorre quando percolado um mesmo fluido por amostras de solos diferentes. Em vista disso, a Lei de Darcy pode ser reformulada de acordo com a Equação 3, onde são levados em consideração também os parâmetros de viscosidade (μ) e peso específico (γ) do líquido de percolação.

$$v = \frac{k \times \gamma \times i}{\mu} \quad (3)$$

A condutividade hidráulica está fortemente relacionada com os vazios presentes no solo, sendo que quanto menor o tamanho das partículas, menor será o tamanho dos vazios e, como consequência, menor será a condutividade hidráulica do solo.

Budhu et al. (1991) relatam a importância da consideração das propriedades químicas e mineralógicas de solos argilosos, da sua natureza de adsorção, bem como das propriedades do fluido permeante nos estudos de condutividade hidráulica. Segundo os autores, é errôneo prever a condutividade hidráulica de solos permeados com fluidos orgânicos tendo como base a medição da condutividade hidráulica com água.

De acordo com Daniel et al. (1985), a condutividade hidráulica tende a aumentar à medida que o solo reage e contrai devido à presença de produtos químicos orgânicos. Broderick e Daniel (1990) complementam que muitos compostos químicos orgânicos tendem a contrair a dupla camada de íons presentes nas argilas, causando uma flocculação das

partículas, a qual resulta em uma contração na estrutura do solo e, como consequência, tem-se a formação de fissuras. No caso de argilas expansivas, existe a possibilidade de os compostos orgânicos desidratar as zonas entre as camadas dos argilominerais. Essa combinação de fatores pode ocasionar o aumento da condutividade hidráulica de um solo.

Desde o surgimento de GCLs como novos materiais de engenharia, extensa pesquisa sobre suas propriedades, comportamento e desempenho tem sido realizada. Através de ensaios em campo e laboratório conduzidos por especialistas de todo o mundo, têm sido desenvolvidos estudos de condutividade hidráulica sob diversas condições de controle.

O entendimento das propriedades hidráulicas dos GCLs é de extrema importância, uma vez que elas condicionam a eficiência destes materiais como barreiras de impermeabilização. Dentre as principais propriedades a serem consideradas, estão o tipo de líquido de hidratação, o índice de expansão do solo e a condutividade hidráulica ou fluxo.

Conforme já mencionado, a bentonita é o componente responsável pela baixa permeabilidade dos GCLs. Entretanto, sua hidratação depende da natureza do líquido hidratante. Em situações reais de campo, os GCLs poderão estar expostos à ação de íons orgânicos e inorgânicos provenientes do contato com as mais diversas soluções. De acordo com Ruhl e Daniel (1997), o fluido hidratante tem forte influência na impermeabilidade do material, podendo afetar positiva ou negativamente a percolação de soluções químicas.

A respeito da influência do pH da solução no desempenho hidráulico de GCLs, Jo et al. (2001) apontam que este parâmetro só causará efeitos quando se tratar de valores muito baixos ($\text{pH} < 3$) ou muito altos ($\text{pH} > 12$). Bouazza e Gates (2014) realizaram um amplo estudo de revisão acerca dos problemas de compatibilidade de desempenho de GCLs em relação a lixiviados em condições químicas extremas. Os autores comentam que sob soluções de pH extremo e/ou elevada salinidade, a bentonita pode sofrer reações de dissolução e alterações em sua estrutura porosa. Entretanto, ressaltam que os dados disponíveis na literatura ainda são limitados, de modo que, por exemplo, para algumas bentonitas expostas a soluções fortemente alcalinas, o pH parece ter um impacto mínimo na performance hidráulica da barreira, enquanto para outras, o efeito pode ser catastrófico.

Leisher (1992) apud Koerner (2005) testaram cinco diferentes líquidos para hidratação de quatro GCLs: água destilada, água de torneira da Filadélfia, lixiviado moderado de aterro, lixiviado severo de aterro e óleo diesel. Em todos os casos, a água destilada apresentou a melhor hidratação, seguida da água de torneira. Em contrapartida, o óleo diesel resultou na não hidratação das amostras. Não havendo adsorção de água pelas partículas de bentonita, também não ocorreu nenhum aumento de volume da amostra de argila. Esse é um resultado

importante para a utilização de GCLs, evidenciando que esses geossintéticos devem ser pré-hidratados com água caso sejam aplicados para contenção de hidrocarbonetos e fluidos apolares.

Egloffstein (1997) constata os processos de trocas iônicas da bentonita sódica natural contida em GCLs, através de investigações de campo. Os estudos identificaram que algumas propriedades da argila, como a redução do índice de expansão e capacidade de absorção, sofrem forte influência do processo de trocas iônicas, com notada predominância de substituições de íons sódio por íons cálcio. Assim, de acordo com Alexiew (2000) geocompostos bentoníticos sódicos podem ser convertidos em cálcicos, dependendo das ligações iônicas atuantes e, também, da quantidade de bentonita sódica no GCL.

Daniel et al. (1997) conduziram um amplo programa que contou com colaboração de 18 laboratórios comerciais, onde concluiu que a permeabilidade de um GCL composto por geotêxtil envolvendo uma camada de bentonita sódica variou entre 2×10^{-10} e 2×10^{-9} m/s. Os ensaios foram realizados com amostras retiradas do mesmo rolo e todos os participantes seguiram o mesmo procedimento de teste, sendo a tensão efetiva máxima de confinamento igual a 69 kPa, a contrapressão em 276 kPa e a diferença de pressão em 35 kPa.

A fim de avaliar o comportamento hidráulico do GCL exposto à diferentes soluções, Pitanga e Vilar (2007) realizaram um estudo percolando água deionizada e etanol combustível através de uma amostra de GCL. Os pesquisadores obtiveram valores médios de 1×10^{-11} m/s para água e 6×10^{-11} m/s para o etanol e consideraram relativamente pequena essa diferença. Por se tratar dos primeiros valores obtidos para esse ensaio, os autores alertam que os resultados não são conclusivos.

Pitanga (2007), embasado em demais estudos, comenta a importância da avaliação da compatibilidade química da bentonita com outras soluções, bem como de diversos outros parâmetros, como o fenômeno de trocas catiônicas, influência da pré-hidratação dos GCLs, grau de hidratação inicial, compatibilidade química com a água de hidratação e com outros líquidos hidratantes, tempo de duração do ensaio, capacidade de autocicatrização, migração lateral da bentonita em zonas de concentração de tensões, erosão interna da bentonita pela força de percolação, estrutura do GCL, reatividade química, granulometria e teor de montmorilonita da bentonita, gradiente hidráulico, índice de vazios, tensão confinante, variação de temperatura, ciclos de gelo e degelo, ciclos de umedecimento e secagem, entre outros.

Lin e Benson (2000) conduziram testes de permeabilidade em amostras de GCL expostas a ciclos de molhagem e secagem usando diferentes líquidos de hidratação. Os

resultados mostraram que todas as amostras de GCL apresentaram baixa condutividade hidráulica durante os três primeiros ciclos de molhagem, da ordem de 1×10^{-11} m/s. No entanto, esse valor aumentou drasticamente a partir do sexto ciclo para amostras hidratadas com água ou CaCl_2 e, posteriormente, com solução de CaCl_2 , chegando a 4×10^{-8} m/s. As alterações na condutividade hidráulica foram correlacionadas com a espessura das amostras. As amostras percoladas apenas com água não apresentaram alteração nesse parâmetro, enquanto as amostras percoladas com CaCl_2 tiveram sua espessura reduzida a cada ciclo, eventualmente diminuindo abaixo da espessura seca inicial do GCL.

Rowe et al. (2011) examinou o efeito do teor de umidade inicial da bentonita na contração de oito diferentes GCLs submetidos a ciclos de umedecimento e secagem. Os autores observaram que um teor de umidade inicial mais elevado resulta em uma contração maior durante os primeiros cinco ciclos, mas esse efeito diminui com o tempo. Após muitos ciclos, não houve diferença significativa na magnitude da contração final de equilíbrio entre as amostras.

Zangl e Likos (2016) estudaram a influência das técnicas experimentais de hidratação e desidratação em ensaios de laboratório com GCL. Os métodos variaram em termos de tensão de confinamento, ambiente de secagem, número de ciclos úmidos-secos e química das soluções permeantes. Foram testados três métodos de desidratação: desidratação sem confinamento, desidratação com confinamento axial e desidratação em permeâmetro. A análise quantitativa de imagens revelou que, apesar das diferentes condições de tensão durante a secagem, as características das fissuras na bentonita foram semelhantes entre os três métodos, e os valores de condutividade hidráulica após os ciclos foram semelhantes. Os autores atribuem que as falhas internas na bentonita podem controlar a iniciação e propagação das trincas decorrentes da secagem, ao invés de condições de tensões externas.

Um conjunto de estudos foi realizado sobre o comportamento de barreiras de GCL com a percolação de combustível na região ártica do Canadá, como parte de um programa de limpeza após derramamentos e vazamentos de Jet A-1 (diesel ártico). Nos estudos de Rowe et al. (2008) sobre a percolação desse combustível em amostras de GCL previamente saturadas, foi observado que devido à tensão interfacial entre o Jet A-1 e a água retida nos poros do GCL, juntamente com a alta viscosidade do combustível em comparação com a água, o Jet A-1 não flui através do GCL até que a pressão aplicada exceda a pressão de entrada, a qual variou de 27 a 55 kPa. Em outras palavras, para que o combustível permeie a amostra de GCL, é necessário que a pressão do fluido seja maior do que a pressão limiar necessária para superar a tensão interfacial entre a água nos poros e o Jet A-1 (ROWE et al., 2007). Rowe et

al. (2006) destacam que a condutividade hidráulica em relação ao Jet A-1 começa a aumentar a partir do momento em que o Jet A-1 é forçado a entrar nos poros maiores da bentonita e permear a amostra de GCL.

Zanella (2019) investigou o comportamento do GCL MacLine® GCL W 40 3.6, que é o mesmo material utilizado neste trabalho, quando submetido a um fluxo de biodiesel. Além dos testes de expansão da bentonita em água, o autor também avaliou a expansão da argila em contato com o biocombustível. Os resultados mostraram que a bentonita não apresentou expansão quando exposta ao biodiesel. Também foram realizados ensaios de condutividade hidráulica em um permeâmetro de parede rígida. Durante os primeiros 30 dias, a amostra apresentou um resultado médio de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-11} m/s. No entanto, a partir do segundo mês, a permeabilidade começou a aumentar gradualmente, alcançando um valor de 10^{-9} m/s no terceiro mês. Deste modo, considerando a aplicação de GCL como barreira para contenção de fluxo de biodiesel, o geossintético deve ser pré-hidratado antes de sua efetiva utilização.

2.4. Ensaios de permeabilidade

A condutividade hidráulica é uma propriedade importante no estudo de barreiras de impermeabilização, sendo um fator determinante para a escolha do solo a ser utilizado nesses sistemas. A condutividade hidráulica nos solos pode apresentar extensa variação, partindo de valores elevados para materiais granulares (maiores que 10^{-5} m/s), chegando a valores bastante baixos para materiais com presença de argilas de alta atividade (menores que 10^{-9} m/s). Ela pode ser determinada em tanto em campo quanto em laboratório.

De acordo com Daniel et al. (1984), os ensaios de permeabilidade em laboratório, quando comparados com ensaios in situ, permitem o controle nas condições de saturação, nível de tensões efetivas, carga hidráulica e direção do fluxo, possibilidade de medidas de anisotropia, tempo de ensaio controlado e conhecimento mais apurado do custo do ensaio. Em contrapartida, os ensaios de campo são menos sensíveis ao efeito escala, devido ao maior volume de solo ensaiado que em laboratório, e que é comum que ocorram variações entre as duas formas de determinação, causadas por problemas de amostragem.

A determinação da condutividade hidráulica de materiais em laboratório é dada através de algum tipo de permeâmetro. De modo geral, esses equipamentos são classificados em dois grandes grupos: permeâmetros de parede rígida e permeâmetros de parede flexível. A escolha do equipamento mais adequado é influenciada pelas condições de contorno dos

ensaios, pelo tipo de material ensaiado, pelas pressões aplicadas e pelo tipo de fluido de percolação (ALONSO, 2005). Boyton e Daniel (1985) e Daniel (1994) e apresentam um estudo abrangente sobre os diferentes tipos de permeâmetro e seus respectivos desempenhos.

Permeâmetros de parede rígida são constituídos por um tubo cilíndrico de material rígido, no qual é contido o corpo de prova, de modo que o líquido percolante atravessa a amostra ao longo de seu eixo (DANIEL, 1994). Normalmente, eles são utilizados para ensaiar solos que apresentam alta condutividade hidráulica, como solos granulares ou não-coesivos. As principais desvantagens deste tipo de equipamento são a impossibilidade de saturação completa da amostra por contrapressão, inexistência de controle das tensões atuantes na amostra e possibilidade de ocorrência de fluxo lateral pelas paredes do permeâmetro.

Para solos com baixa condutividade hidráulica, com valores iguais ou inferiores a 10^{-6} m/s, a norma ASTM D5084:2016 (*Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*) recomenda a utilização de permeâmetros de parede flexível. Neste tipo de equipamento, a amostra é disposta entre dois discos porosos e envolvida por uma membrana flexível. A amostra é posta dentro de uma câmara, a qual é preenchida com um líquido (geralmente água) e, posteriormente, aplica-se uma pressão controlada de modo a confinar a amostra. O confinamento ocorre devido a membrana ser pressionada contra a amostra, fazendo com que não haja fluxo lateral. A saturação da amostra ocorre por meio do aumento da pressão confinante e aplicação da contrapressão. A contrapressão se refere à pressurização das extremidades de entrada e saída da amostra de teste, comprimindo e dissolvendo bolhas de gás (DANIEL et al., 1997).

Permeâmetros de parede flexível são vantajosos por permitirem realização de ensaios em amostras indeformadas, por eliminar o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a parede do permeâmetro, pela possibilidade de saturação total da amostra por contrapressão e de monitoramento das tensões atuantes (ALONSO, 2005). Além disso, os dispositivos de parede flexível tendem a minimizar vazamentos laterais, o que pode ser particularmente importante quando o solo é permeado com produtos químicos orgânicos concentrados, pois esses produtos químicos podem causar contração do solo e afastá-lo das paredes do permeâmetro (DANIEL et al., 1985).

Daniel et al., (1985) também alertam que o dispositivo pode ser difícil de usar com certos produtos químicos devido à incompatibilidade entre a membrana e o produto químico. Ainda, recomendam que os permeâmetros com parede flexível são ideais para solos que serão submetidos a uma pressão significativa de sobrecarga, por exemplo, amostras naturais obtidas

em profundidade, materiais de preenchimento de partes inferiores de uma vala relativamente profunda ou materiais argilosos que serão sobrepostos por espessuras significativas de solo ou resíduos sólidos.

Além de classificados em função da espécie de parede, os permeâmetros também se diferenciam pelo tipo de sistema de controle hidráulico, podendo ser do tipo aberto ou fechado. Os sistemas ainda são configurados por um dos três princípios básicos: carga constante, carga variável ou fluxo constante.

Sistema aberto é aquele onde o fluido influente ou efluente, ou ambos, está em contato com a atmosfera ou faz parte de um sistema pressurizado. Nesse caso, a amostra poderá sofrer variação de volume ao longo do ensaio, absorvendo ou liberando fluido para o reservatório influente ou efluente. Já o sistema fechado é caracterizado por linhas de entrada e saída interligadas, onde o fluxo ocorre devido a um mecanismo que induz o fluxo através da amostra, como o caso de uma coluna de mercúrio para controle da diferença de pressão requerida. Neste tipo de sistema, após a saturação, o fluxo de entrada e saída serão iguais e não ocorre alteração no volume da amostra.

Nos sistemas de carga constante, a pressão do fluido de percolação é mantida sem variações na entrada e na saída da amostra, de forma que o gradiente hidráulico permanece constante e a vazão pode ser determinada. Já nos sistemas de carga variável, a pressão do fluido de percolação pode variar na entrada ou na saída da amostra, ou em ambas. Por fim, nos sistemas de fluxo constante, é utilizado um mecanismo de injeção onde o fluido percola através da amostra sob uma vazão constante, e são feitas leituras nas pressões de entrada e saída da câmara. Devem ser utilizados dispositivos adequados à cada tipo de sistema que permitam o controle e a medição das pressões.

Quando for utilizado compostos químicos como líquido permeante ou misturados ao solo, é imprescindível considerar a compatibilidade do líquido com o material do equipamento (DANIEL, 1994). Nesses casos, é comum utilizar peças confeccionadas em aço inoxidável e tubulação de nylon ou teflon nos dispositivos que terão contato com o composto.

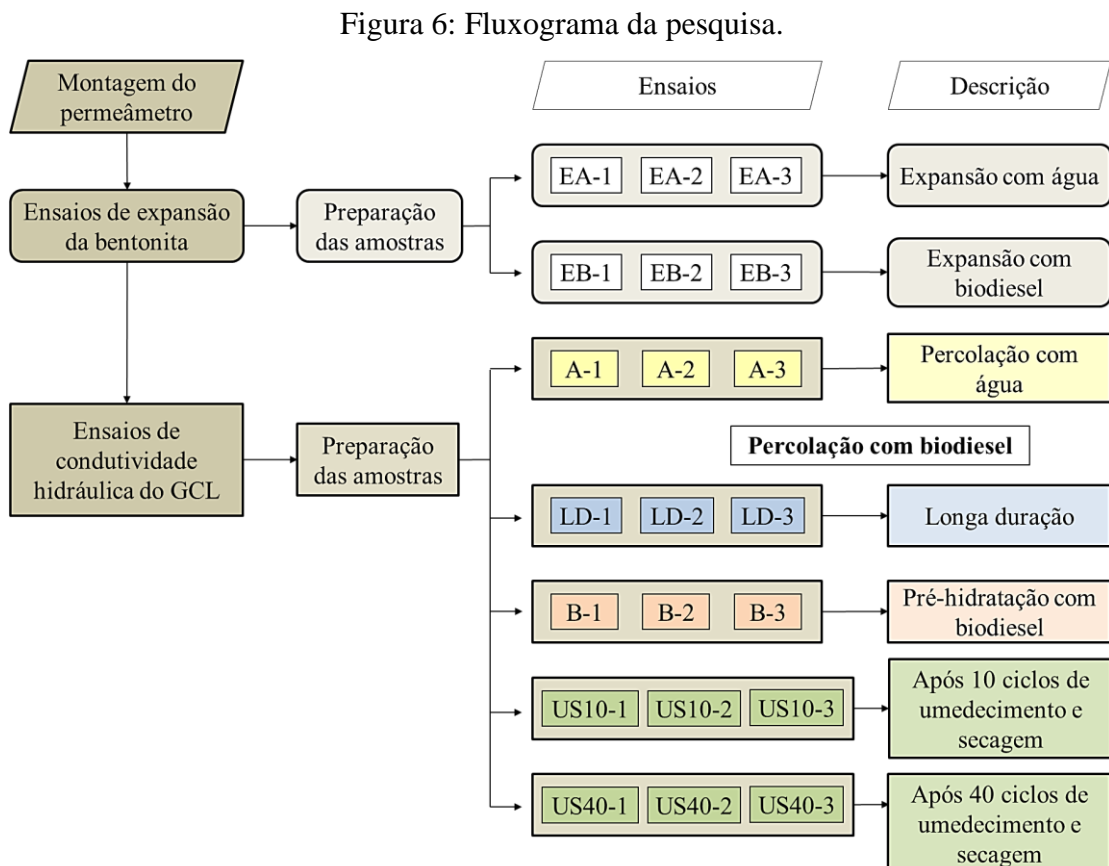
3. MÉTODO DA PESQUISA

3.1. Estudo bibliométrico

A metodologia deste estudo envolveu uma pesquisa sistemática e bibliométrica com abordagens qualitativas e quantitativas, tendo como base os estudos anteriores de Braun et al. (2019) e Visentin et al. (2020). O objetivo foi analisar publicações científicas sobre o uso de GCLs em barreiras de contenção de combustível e sua interação com o fluido. Foram utilizadas as bases de dados Scopus e Web of Science para identificar lacunas na literatura relacionadas à condutividade hidráulica de geocompostos bentoníticos após exposição à percolação com combustíveis. O estudo busca fornecer orientações para pesquisas futuras, por meio da síntese temática dos principais estudos e análise dos padrões de publicação. O procedimento metodológico detalhado pode ser encontrado no item 4.1.

3.2. Visão geral e etapas do programa experimental

As etapas do programa experimental são mostradas no fluxograma da Figura 6.



Fonte: Autor (2023).

3.3. Planejamento experimental

O planejamento experimental adotado neste estudo consistiu em realizar ensaios preliminares de expansão da bentonita com água (ensaios EA) e com biodiesel (ensaios EB), seguidos pelos ensaios de condutividade hidráulica com percolação de água (ensaios A) e de biodiesel. Os ensaios de permeabilidade com biodiesel foram divididos em diferentes tipos, a saber: ensaios de longa duração (ensaios LD), ensaios em amostras de GCL pré-hidratadas com biodiesel (ensaios B) e ensaios em amostras de GCL submetidas a ciclos de umedecimento e secagem (ensaios US).

Para os experimentos US, as amostras foram submetidas a 10 e 40 ciclos de umedecimento e secagem antes dos ensaios. Todos os ensaios foram realizados em triplicata, sendo representados pelos algarismos “1”, “2” e “3”. No total, foram realizados 6 ensaios de expansão da bentonita (3 com água e 3 com biodiesel) e 15 ensaios de condutividade hidráulica (3 com percolação de água e 12 com percolação de biodiesel - 3 de longa duração, 3 considerando pré-hidratação com biodiesel e 6 considerando ciclos de umedecimento e secagem). O programa de experimentos está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Programa de experimentos da pesquisa.

Tipo de ensaio	Amostras	Líquido de hidratação	Líquido de percolação	Ciclos de umed. e secagem	Tensão efetiva σ' (kPa)	Diferença de pressão Δu (kPa)	
Expansão	EA	EA-1 / EA-2 / EA-3	Água filtrada				
	EB	EB-1 / EB-2 / EB-3	Biodiesel				
Condutividade hidráulica	A	A-1 / A-2 / A-3	Água filtrada	Água filtrada	-	27,5	21,0
	LD	LD-1 / LD-2 / LD-3	Água filtrada	Biodiesel	-	27,5	21,0
	B	B-1 / B-2 / B-3	Biodiesel	Biodiesel	-	27,5	15,0
US	US10-1 / US10-2 / US10-3	Água filtrada	Biodiesel	10	27,5	41,0	
	US40-1 / US40-2 / US40-3	Água filtrada	Biodiesel	40	27,5	41,0	

Fonte: Autor (2023).

Nos ensaios conduzidos nesta pesquisa, foram aplicados diferentes níveis de tensão nas amostras, a fim de romper a tensão de interface entre os materiais e permitir o escoamento através do GCL. Uma descrição mais aprofundada sobre essas tensões será fornecida no item 3.6, que aborda a execução dos ensaios de permeabilidade.

3.4. Materiais utilizados na pesquisa

3.4.1. Geocomposto bentonítico

O GCL utilizado na presente pesquisa foi doado pela empresa Maccaferri e é comercialmente conhecido como MacLine® GCL W 40 3.6. De acordo com informações do próprio fabricante Maccaferri (2010), o produto é caracterizado como um geocomposto reforçado, formado por uma camada de bentonita sódica confinada entre dois geotêxteis, sendo um tecido e outro não tecido, agulhados entre si. Na Tabela 4, estão dispostas as principais propriedades físicas do GCL empregado no estudo.

Tabela 4: Propriedades físicas do GCL.

Ensaio	Resultado	Unidade	Método
Massa/Área do geotêxtil tecido	100	g/m ²	UNE EN ISO 9864
Massa/Área do geotêxtil não tecido	200	g/m ²	UNE EN ISO 9864
Quantidade de montmorilonita	> 80	%	XRD
Índice de expansão da bentonita	> 24	mL/2g	ASTM 5890
Absorção de água	> 600	%	ASTM E 946
Perda de fluido da bentonita	< 18	mL	ASTM D 5891
Massa/Área do GCL	3900	g/m ²	UNE EN 14196
Massa/Área da bentonita	3600	g/m ²	UNE EN 14196
Espessura	6	mm	UNE EN ISO 9863-1
Resistência à tração	10	kN/m	UNE EN ISO 10319
CBR	2000	N	UNE EN ISO 12236
Resistência à pelagem do GCL	6,1	N/m	ASTM D 6496
Resistência ao cisalhamento interno hidratado do GCL	24	kPa	ASTM D 5887
Permeabilidade K	5 x 10 ⁻¹¹	m/s	ASTM D 5887

Nota: As informações dos ensaios são referentes ao produto MacLine® GCL W 40 3.6.

Fonte: Adaptado de Maccaferri (2010).

3.4.2. Biodiesel

Para percolação através das amostras de GCL, está sendo utilizado o biodiesel em sua forma pura (B100), produzido e doado pela empresa BSBIOS, localizada no distrito industrial de Passo Fundo. O combustível é composto por metanol e óleo de soja (65%), gordura bovina (12,5%), gordura de porco (18%) e gordura de frango (4,5%) (BSBIOS, 2019). O produto utilizado possui caracterização especificada, com certificado de qualidade da empresa, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização do biodiesel (B100).

Ensaio	Resultado	Unidade	Especificação	Método
Aspecto a 26,5 °C	LII	-	LII - Límpido e isento de impurezas	MA-CQ-018 rev08
Massa específica a 20 °C	878,7	kg/m ³	850-900	ASTM D 4052/2018
Viscosidade cinemática a 40 °C	4,291	mm ² /s	3,0 - 6,0	ASTM D 445/2018
Teor de água	195	mg/kg	Máximo 200,0	ASTM D 6304/2016
Contaminação total	21,8	mg/kg	Máximo 24	EN 12662/2008
Ponto de fulgor	139,5	°C	Mínimo 100,0	ASTM D 93/2018
Teor de éster	96,7	% massa	Mínimo 96,5	EN 14103/2011
Enxofre total	3,1	mg/kg	Máximo 10	NBR 15867/2018
Sódio + Potássio	< 2,0	mg/kg	Máximo 5	NBR 15553/2019
Cálcio + Magnésio	< 2,0	mg/kg	Máximo 5	NBR 15553/2019
Fósforo	< 2,0	mg/kg	Máximo 10	NBR 15553/2019
Ponto de entupimento de filtro a frio	5	°C	JAN/FEV/MAR/NOV/DEZ: máx. 14 °C; ABR/OUT: máx. 10 °C; MAI/JUN/JUL/AGO/SET: máx. 5 °C	ASTM D 6371/2017
Índice de acidez	0,40	mg KOH/g	Máximo 0,50	EN 14104/2003
Glicerina livre	0,015	% massa	Máximo 0,02	ASTM D 6584/2017
Glicerina total	0,210	% massa	Máximo 0,25	ASTM D 6584/2017
Monoglicerídeos	0,623	% massa	Máximo 0,70	ASTM D 6584/2017
Diglicerídeos	0,167	% massa	Máximo 0,20	ASTM D 6584/2017
Triglicerídeos	0,089	% massa	Máximo 0,20	ASTM D 6584/2017
Índice de Iodo	107	g/100g	Anotar	EN 14111/2003
Estabilidade à oxidação a 110 °C	14,2	horas	Mínimo 8	EN 14112/2016

Nota: Todos os ensaios foram realizados nas instalações permanentes do Laboratório BSBIOS Passo Fundo, cadastrado no CRQ-V pelo N° 051906626.

Fonte: Fornecido pela empresa BSBIOS (2019).

3.4.3. Água

Para a realização de todos os ensaios de condutividade hidráulica, utilizou-se água potável proveniente de um poço artesiano, filtrada por meio de um equipamento de osmose reversa para criar um padrão de qualidade controlada nos experimentos. Já nos ensaios de expansão da bentonita em meio aquoso, foi utilizada água destilada.

3.5. Ensaios de expansão da bentonita

A expansão da bentonita presente nos GCLs foi avaliada por meio de ensaios de expansão volumétrica, conforme a norma ASTM D5890:2019 (*Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners*).

Para os experimentos, foram utilizadas provetas contendo 100 mL de água destilada e 2,0 g de bentonita em pó, que foram adicionados lentamente em incrementos de 0,1 g com intervalos de 10 minutos entre cada adição para permitir a floculação da argila e sua deposição no fundo do tubo de ensaio. Após 24 horas de repouso, o volume ocupado pela argila foi medido para avaliar a expansão da bentonita sob condições de saturação em água.

Além disso, neste estudo foi realizado o teste de expansão em biodiesel, seguindo os mesmos procedimentos indicados pela norma ASTM D5890:2019. Entretanto, em vez da água, o biodiesel foi utilizado como meio de expansão. Dessa forma, além de verificar o índice de expansão da argila em água, foi possível avaliar o comportamento da bentonita quando exposta ao biodiesel.

3.6. Ensaios de permeabilidade

3.6.1. Considerações iniciais

Os ensaios para determinação da condutividade hidráulica em amostras de GCL foram conduzidos de acordo com as normas ASTM D5887:2022 e ASTM D6766:2020. Elas estabelecem que os ensaios de permeabilidade sejam conduzidos com uma tensão efetiva de confinamento (diferença entre a pressão confinante na célula e a pressão no poro d'água) de 27,5 kPa e diferença de pressão do fluido através da amostra de 15 kPa. No entanto, é necessário destacar que uma tensão efetiva média de 27,5 kPa pode não refletir as condições reais do local onde o GCL será aplicado. Caso as condições específicas do local justifiquem, é

possível especificar pressões diferentes durante os ensaios para reproduzir com maior precisão as condições esperadas em campo. É fundamental considerar que tensões efetivas médias inferiores a 13,75 kPa podem não ser suficientes para evitar vazamentos pelas paredes laterais do GCL.

Com relação ao gradiente hidráulico, a norma ASTM D5084:2016 estabelece que, ao testar materiais de condutividade hidráulica muito baixa, esse valor não deve exceder 30. Por outro lado, as normas ASTM D5887:2022 e D6766:2020 recomendam uma diferença de pressão através da amostra de GCL de 15 kPa, o que resulta em um gradiente hidráulico significativamente mais elevado (aproximadamente 300, dependendo da espessura do GCL). No entanto, essa condição permite realizar um teste de conformidade do material e obter rapidamente um valor de fluxo de referência. Para testes de desempenho, é aconselhável utilizar um gradiente hidráulico muito menor, como o recomendado pela norma ASTM D5084.

Quando o GCL é exposto a um fluido com maior viscosidade do que a água de hidratação que fica retida em seus poros, como é o caso do biodiesel, o fluxo só ocorrerá após a pressão aplicada ultrapassar a tensão interfacial entre os materiais (ROWE et al., 2006; ROWE et al., 2007; ROWE et al., 2008). Em alguns dos ensaios realizados nesta pesquisa, foi necessário aplicar diferentes níveis de tensão nas amostras para romper a tensão de interface entre os materiais e permitir o escoamento através do GCL. A determinação da tensão necessária para superar a tensão interfacial foi realizada com base na metodologia aplicada por Rowe et al. (2008), aumentando gradualmente a diferença de pressão que atravessa a amostra em pequenos incrementos.

Inicialmente, estabeleceu-se que a tensão efetiva de confinamento, ou seja, a tensão efetiva média no meio do GCL, fosse a mesma para todas as amostras, com valor de 27,5 kPa. Dessa forma, a diferença de pressão do fluido foi o parâmetro que variou conforme o tipo de ensaio. Portanto, os valores de pressão confinante e de contrapressão de fluxo aplicados foram calculados e especificados para cada ensaio.

Os ensaios em amostras hidratadas e percoladas com biodiesel foram conduzidos com a diferença de pressão de 15 kPa estabelecida pelas normas, pois tratava-se de um único fluido no interior do GCL. Já os ensaios em amostras hidratadas e percoladas com água e, posteriormente, com biodiesel, foram realizados com uma diferença de pressão ligeiramente mais elevada de 21 kPa. Nos ensaios em amostras de GCL com ciclos prévios de umedecimento e secagem, foi conduzida uma análise cuidadosa das pressões aplicadas em uma das amostras para identificar o momento em que a tensão interfacial fosse rompida e o

biodiesel começasse a fluir através da amostra. Para isso, a diferença de pressão foi aumentado progressivamente a partir de 21 kPa, por meio de pequenos incrementos, com a quantidade de fluxo sendo verificada pela medição das massas dos reservatórios influente e efluente. A diferença de pressão foi aumentado gradualmente até que o biodiesel superasse a tensão interfacial e começasse a fluir. Nos ensaios de permeabilidade deste grupo de amostras, foi utilizada uma diferença de pressão de 41 kPa.

3.6.2. Preparação dos corpos de prova

O processo de preparação do corpo de prova é crucial para garantir a representatividade da amostra e a precisão dos resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade. A preparação de cada amostra de GCL para ensaio consistiu em várias etapas. Inicialmente, o material foi inspecionado a fim de garantir que não apresentasse qualquer irregularidade ou defeito. Em seguida, uma seção representativa foi selecionada e extraída com o auxílio de um molde de área conhecida, que foi um quadrado de dimensões 200 mm x 200 mm para este trabalho em particular. É importante que o corte da seção seja feito com tesoura ou lâmina afiadas de maneira cuidadosa para evitar a perda do material particulado (bentonita).

Uma vez extraída a seção, esta foi disposta sobre uma superfície plana e lisa, e um disco de diâmetro igual a 100 mm foi colocado no centro do GCL para delimitação do corpo de prova com marcador fino, que deve ser cortado com tesoura ou lâmina afiadas. Antes do corte, as bordas do corpo de prova foram umedecidas com água por um tempo de hidratação de 2 a 5 minutos. Para evitar perdas, uma fina camada de pasta de bentonita foi aplicada na área de bentonita exposta lateralmente após o corte, em torno do perímetro externo da amostra, com pressão mínima e cuidado. É importante destacar que a pasta de bentonita não deve ser utilizada para restaurar a bentonita perdida das bordas da amostra devido a manuseio inadequado, e nem ser aplicada nas faces com geotêxtil. O diâmetro final da amostra de ensaio deve estar entre 100 mm e 102 mm.

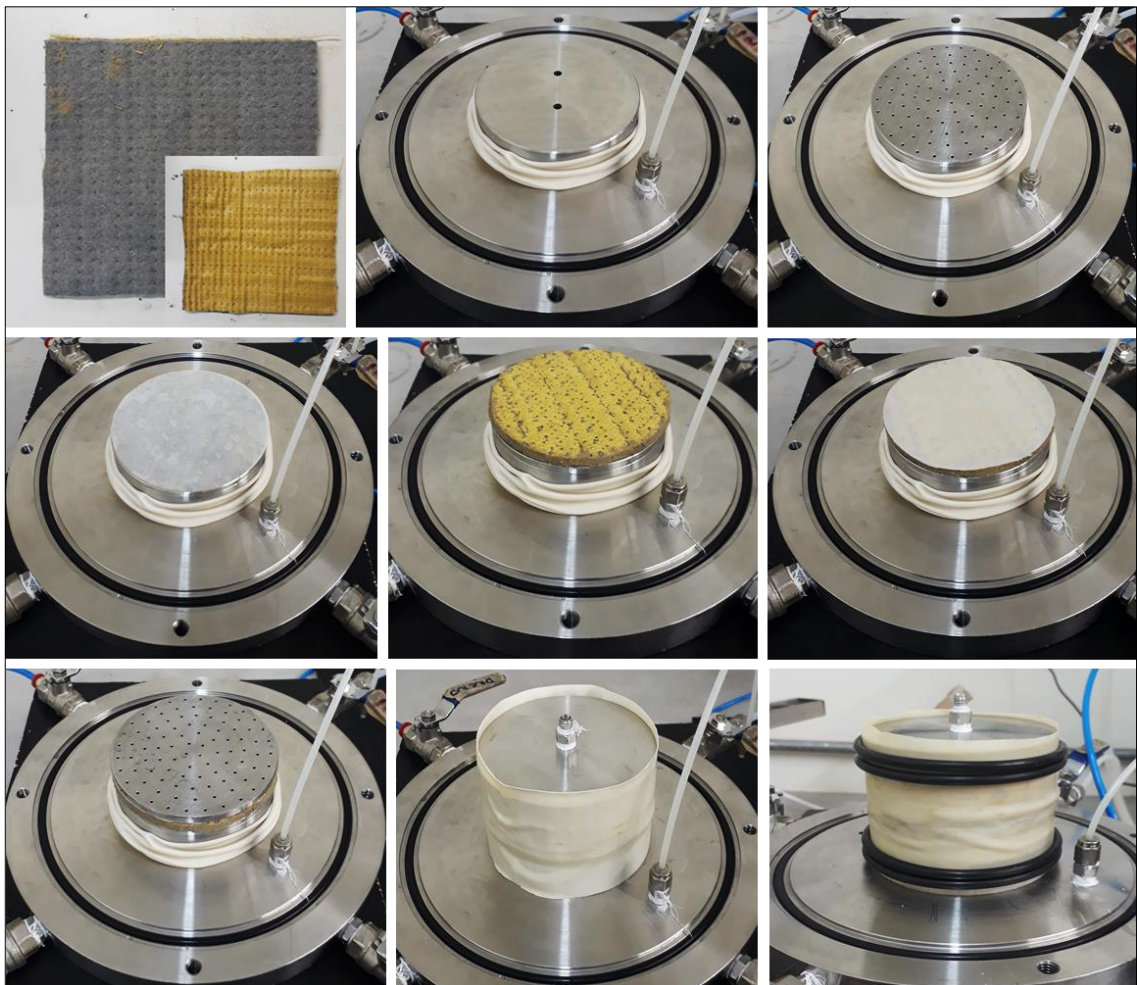
Para as amostras cujos ensaios consideraram ciclos de umedecimento e secagem, elas foram previamente expostas a esses ciclos antes de serem preparadas seguindo o procedimento padrão. Isso significa que o GCL foi submetido aos determinados ciclos completos de umedecimento e secagem antes de ser cortado e preparado como corpo de prova para o ensaio.

3.6.3. Procedimentos de montagem para teste

A montagem foi iniciada pela colocação da membrana no extensor e sobreposição dos elementos de base, incluindo o *cap* inferior, o disco poroso, o papel filtro, a amostra de GCL, outro papel filtro, o disco poroso e, por fim, o *cap* superior. Depois de sobrepor o conjunto, a membrana foi posicionada ao seu redor juntamente com os *o-rings* nas peças de base e topo para fixá-la.

Com o corpo de prova preparado e a câmara de ensaio no lugar adequado, a tubulação de fluxo superior foi conectada ao *top cap* e a câmara do permeâmetro foi preenchida com água. Em seguida, a linha de alimentação de pressão da câmara foi conectada ao conjunto do permeâmetro, assim como o sistema hidráulico dos acumuladores de fluido de percolação foi conectado às linhas de fluxo influente e efluente. A Figura 7 apresenta a sequência de montagem do ensaio, enquanto a Figura 8 ilustra o permeâmetro em execução.

Figura 7: Sequência de montagem de um corpo de prova no permeâmetro.



Fonte: Autor (2023).

Figura 8: Execução de um ensaio de condutividade hidráulica.



Fonte: Autor (2023).

3.6.4. Saturação dos corpos de prova

A consolidação e saturação das amostras por contrapressão foram realizadas com água, exceto nos ensaios que previam a pré-hidratação do GCL com biodiesel. Para isso, os três reservatórios acumuladores foram preenchidos com água, enquanto nos casos em que o biodiesel foi utilizado, apenas o acumulador destinado a alimentar à câmara do permeâmetro foi preenchido com água e os demais, com biodiesel.

Após o preenchimento adequado dos acumuladores, iniciou-se a pressurização da câmara de ensaio até 105 kPa, e contrapressão até 70 kPa em ambas as extremidades do corpo de prova (no caso, as chamadas linhas de fluxo influente e efluente). Nessa fase, foi importante drenar a água percolada pelas linhas de descarga até que bolhas de ar visíveis fossem removidas. A pressão da câmara e a contrapressão foram aumentadas simultaneamente em incrementos de 70 kPa em intervalos de 1 minuto, até a pressão da câmara atingir 550 kPa e a contrapressão chegar a 515 kPa. Essas pressões foram mantidas por um período mínimo de 48 horas para que ocorresse a consolidação ou expansão, saturação e hidratação da amostra.

3.6.5. Percolação e cálculo do índice de fluxo

Após o período de saturação do corpo de prova, foi iniciada a percolação de fluido através da amostra, por meio da aplicação de um gradiente hidráulico. A pressão da linha influente na base da amostra foi gradualmente aumentada para induzir um fluxo ascendente. A diferença de pressão na amostra variou de acordo com o tipo de ensaio realizado, conforme considerado inicialmente.

Nos ensaios com amostras de GCL hidratadas e percoladas com biodiesel, foram utilizadas pressões confinante, influente e efluente de 550 kPa, 530 kPa e 515 kPa, respectivamente, com uma tensão efetiva média de $\sigma' = 27,5$ kPa e uma diferença de pressão de $\Delta u = 15$ kPa. Já nos ensaios com percolação de água e biodiesel em amostras hidratadas com água, as pressões confinante, influente e efluente foram configuradas em 550 kPa, 533 kPa e 512 kPa, respectivamente, com $\sigma' = 27,5$ kPa e $\Delta u = 21$ kPa. Por fim, nos ensaios em amostras com ciclos de umedecimento e secagem, as pressões confinante, influente e efluente foram configuradas em 550 kPa, 543 kPa e 502 kPa, respectivamente, com $\sigma' = 27,5$ kPa e $\Delta u = 41$ kPa.

Nos ensaios em que o fluido de percolação era o mesmo utilizado na saturação das amostras, a imposição do gradiente hidráulico foi facilitada, pois não foi necessário substituir o fluido. No entanto, nos ensaios em que houve a percolação de contaminante após saturação com água, o líquido contido nos acumuladores foi substituído pelo biodiesel, que é o contaminante de estudo. Para essa troca de fluido, as válvulas das linhas influente e efluente foram fechadas, seguidas da drenagem das linhas e dos seus respectivos acumuladores. Com as linhas drenadas, o acumulador referente à linha influente foi abastecido com biodiesel e as linhas de fluxo foram conectadas.

As medições das vazões das linhas de fluxo foram realizadas com uma balança eletrônica de precisão de 0,1 g. Durante o ensaio, foram feitas pesagens consecutivas dos acumuladores conectados às linhas de fluxo influente e efluente para medir a quantidade de fluido percolado. A partir da diferença de massa observada no período entre duas medições e sabendo a massa específica do fluido (água $\rho_{\text{água}} = 998,20$ kg/m³ e biodiesel $\rho_{\text{biod}} = 878,70$ kg/m³ à 20 °C), calculou-se o volume de fluido percolado naquele período. Para garantir a precisão do teste, foi importante assegurar que o fluxo estivesse em estado estacionário e que o solo fosse permeado por tempo suficiente para que o líquido influente atravessasse completamente o solo e atingisse a concentração total no líquido efluente.

Para encerrar o ensaio, foram adotados os critérios de realizar no mínimo três medições de vazão ao longo do período de percolação e, para considerar a estabilidade do fluxo, não ter havido alterações significativas nas últimas três medições consecutivas. Além disso, o valor de fluxo reportado foi calculado pela média dos últimos três valores calculados, garantindo uma estimativa mais precisa da vazão. Esses critérios foram estabelecidos para assegurar que o fluxo medido durante o ensaio representasse de maneira confiável a condutividade hidráulica do material testado.

O fluxo foi calculado pela Equação 4.

$$q_i = \frac{Q}{A \cdot t} \quad (4)$$

Onde:

q_i = fluxo, [(m³/m²)/s];

Q = quantidade de fluxo, definido como a média das vazões de entrada e saída (m³);

A = 0,00785 m², área transversal da peça porosa de 100 mm de diâmetro;

t = intervalo de tempo do fluxo, (s).

3.6.6. Determinação da condutividade hidráulica

Após ter sido estabelecido o fluxo, a condutividade hidráulica do material foi calculada. Para tal, é necessária a medição da espessura da argila componente do GCL durante o ensaio. Devido a essa medição ser difícil de ser realizada durante o teste, foi adotado o procedimento comum de medir a espessura ao final do ensaio, nos primeiros 30 minutos após desmontar o corpo de prova. A norma recomenda realizar um corte diametral na amostra e fazer três medições de espessura, desconsiderando a espessura dos geotêxteis que envolvem a bentonita. A espessura resultante foi obtida pela média dos valores medidos. Como a temperatura do laboratório foi controlada e mantida constante, não foi necessário corrigir esse parâmetro nos cálculos.

A condutividade hidráulica k da amostra testada de GCL foi calculada pela Equação 7.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad (7)$$

Onde:

k = condutividade hidráulica, (m/s);

Q = quantidade de fluxo, (m³);

L = espessura da amostra, (m);

A = área transversal amostra, (m^2);

t = intervalo de tempo do fluxo, (s);

h = diferença de carga hidráulica através da amostra, (mca).

No final do ensaio, após ter decorrido o intervalo de tempo (t), a espessura da amostra (L) é medida. É importante ressaltar que a área transversal da amostra (A) é constante durante todo o teste. A carga hidráulica (h) é determinada a partir da diferença de pressão entre as linhas influente e efluente, e é expressa em metros de coluna d'água.

3.6.7. Ensaios de percolação com água e validação do equipamento

Antes de iniciar os ensaios de validação deste estudo, foram realizados quatro ensaios preliminares de condutividade hidráulica do GCL para percolação de água, com o objetivo de verificar o bom funcionamento do equipamento de parede flexível desenvolvido durante a pesquisa e garantir as condições necessárias para o avanço das etapas previstas neste trabalho. Os ensaios preliminares estão descritos em Favretto et al. (2022), cujos resultados apresentados foram próximos a 6×10^{-11} m/s, estando de acordo com valores usuais da literatura.

Com base nesse resultado inicial satisfatório, o processo de validação do permeâmetro foi iniciado. Todos os processos, desde a montagem das peças e instrumentos necessários até a finalização dos experimentos, foram cuidadosamente considerados.

A validação do permeâmetro foi realizada por meio da comparação entre os resultados medidos nos ensaios com amostras de GCL percoladas com água e o valor de condutividade hidráulica indicado pelo fabricante do GCL, que é de 5×10^{-11} m/s (MACCAFERRI, 2010). Essa validação ocorreu simultaneamente aos ensaios de condutividade hidráulica das amostras de GCL percoladas com água. Dessa forma, o permeâmetro foi validado enquanto os ensaios de permeabilidade foram realizados. Esses ensaios foram realizados em triplicata, com três amostras de GCL testadas sob percolação contínua de água.

Com o objetivo de minimizar possíveis interferências amostrais decorrentes do manuseio e da variabilidade das amostras, foi adotada uma estratégia de sequenciamento dos ensaios a fim de manter condições de testes semelhantes. Após a finalização de cada ensaio de percolação com água, a mesma amostra de GCL foi utilizada para o ensaio de percolação com biodiesel, sem desmoldar a amostra, preparar uma nova amostra ou fazer qualquer

intervenção na câmara do permeâmetro. A substituição da água pelo biodiesel nos reservatórios de entrada e saída de fluxo foi a única intervenção necessária.

Uma vez que os valores de referência foram atendidos, como será visto posteriormente na seção de resultados, o equipamento foi considerado apto para a realização de ensaios de permeabilidade. Essa validação foi fundamental para garantir a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos, bem como a qualidade dos dados produzidos no âmbito da pesquisa.

3.6.8. Ensaios de percolação com biodiesel

3.6.8.1. Ensaios de longa duração

Foram realizados ensaios de longa duração em triplicata para verificar o efeito da percolação de biodiesel na condutividade hidráulica do GCL. Cada experimento foi monitorado durante 90 dias. De acordo com as diretrizes da norma ASTM D6766:2020, o geocomposto deve ser previamente hidratado e saturado com água antes de ser dado início ao fluxo com determinado fluido químico.

Vale ressaltar que os mesmos corpos de prova ensaiados a longo prazo com biodiesel já haviam sido ensaiados com água, o que permitiu, além da adequada pré-hidratação, a definição prévia da condutividade hidráulica das amostras para fluxo de água. Essa etapa prévia possibilitou uma comparação mais fidedigna dos resultados e maior clareza na verificação dos efeitos da percolação de biodiesel na condutividade hidráulica do GCL.

3.6.8.2. Ensaios com pré-hidratação de biodiesel

Como já mencionado anteriormente, a norma recomenda pré-hidratar e saturar o material com água antes de iniciar a percolação com outro líquido. No entanto, com o objetivo de obter uma comparação mais precisa e avaliar os efeitos da hidratação e contato direto do GCL com o biodiesel (que é o fluido permeante em estudo), também foram realizados testes em amostras de GCL pré-hidratadas com biodiesel. Os ensaios foram realizados em triplicata.

3.6.8.3. Ensaio após ciclos de umedecimento e secagem

Para avaliar a resistência do GCL em condições adversas de uso, é comum a realização de ensaios que simulam as variações de umidade que ocorrem em campo (SHAN e DANIEL, 1991; LIN e BENSON, 2000; THIEL et al., 2006; ZANGL e LIKOS, 2016). Essa técnica, conhecida como ciclos de umedecimento e secagem, consiste na submersão do GCL em água por um período definido, seguido da retirada do excesso de líquido e exposição do material ao ar ou estufa para secar. O processo é repetido várias vezes, com o número de ciclos variando de acordo com o objetivo do teste. Essa metodologia busca simular condições de campo que podem ocorrer devido a mudanças climáticas sazonais ou variações na profundidade do lençol freático.

As amostras destinadas aos ensaios de permeabilidade com biodiesel, que levam em conta os ciclos prévios de umedecimento e secagem do GCL, foram hidratadas seguindo o procedimento descrito por Thiel et al. (2006). Esse procedimento envolveu o corte de uma amostra de GCL com dimensões de 500 mm x 300 mm e a colocação da amostra em um recipiente de tamanho semelhante. Em seguida, 500 mL de água foram adicionados sobre a amostra, que foi coberta com material plástico e mantida em temperatura constante por 8 horas para garantir a hidratação adequada. Segundo os autores, o volume de 500 mL de água equivale a 65% de umidade do GCL, o que está dentro de uma faixa de teor de umidade típico resultante da sucção do subleito, de acordo com Daniel et al. (1993).

Após a hidratação, a amostra foi disposta em estufa a 60°C por 15 horas. Thiel et al. (2006) destacam que essa temperatura é representativa da temperatura que uma geomembrana preta exposta ao sol pode atingir. Um ciclo é concluído em 24 horas, incluindo 8 horas para hidratação, 15 horas de secagem e aproximadamente 1 hora para manipulação da amostra.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao longo deste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa. A apresentação está dividida em três partes, conforme descrito no item 1.4. No item 4.1 (parte I), os resultados relacionados ao objetivo específico "a" são apresentados no formato de artigo científico (em inglês) publicado na revista *Soils & Rocks* (ISSN 1980-9743). No item 4.2 (parte II), é detalhada a construção do permeâmetro de parede flexível, em conformidade com o objetivo específico "b". No item 4.3 (parte III), são apresentados e discutidos os resultados do programa experimental, incluindo ensaios complementares, abrangendo os objetivos específicos de "c" a "f".

4.1. Revisão bibliométrica (artigo publicado)

The hydraulic conductivity of fuel permeated geosynthetic clay liners:

A bibliometric study ¹

Abstract: The use of geosynthetic clay liners (GCLs) as a hydraulic barrier for contaminants containment has proved to be an efficient alternative for the soil and groundwater protection. This geocomposite can be used in engineering systems to contain accidental spills and leaks of fuel in distribution centers, reservoirs and resulting from transport, where the geosynthetic acts as a protection against subsoil contamination. However, there is a concern about the behavior of GCLs in the face of these contaminants about possible changes in their properties, in order to compromise the retention capacity and permeability of the material. In this regard, the present work aimed to carry out a systemic and bibliometric study of publications related to the hydraulic conductivity of GCLs after contact with some type of fuel, available in the Scopus database (Elsevier) and Web of Science (Clarivate). The primary data selected directly from the databases were analyzed, making it possible to filter the publications that made up the bibliographic portfolio of the research, resulting in 14 selected documents, which were synthesized, and the main points were highlighted. From the bibliographic portfolio, bibliometric indexes of scientific production were created, as well as the temporal distribution of publications, authors, countries, and scientific journals that most contribute to the theme and the terms most evidenced in the documents. The panorama observed through bibliometrics was that it is a very recent theme, which still has a lack of scientific production, revealing itself as a promising area for the development of research.

Keywords: Soil contamination; Hydraulic barriers; Bentonite geocomposites; Database; Bibliometric indicators.

¹ FAVRETTO, Julia; BRAUN, Adeli Beatriz; FLOSS, Márcio Felipe; PRIETTO, Pedro Domingos Marques, *Soils & Rocks*, São Paulo, 2023 46(3). <https://doi.org/10.28927/SR.2023.012222>

1. Introduction

Environmental protection in infrastructure facilities has been receiving greater concern over time with respect to the main problems such as the intrusion of toxic contaminants in the subsurface soil and groundwater. The low hydraulic conductivity of bentonite geocomposites encouraged its use in several civil engineering to flow containment applications, such as hydraulic barriers in waste disposal, landfill bottom and cover systems, ponds, canals, reservoirs, whose first associated function was to control the water percolation (Petrov et al., 1997; Viana et al., 2011).

Geocomposites of bentonite or geosynthetic clay liners (GCLs) are industrialized products, consisting of a bentonite layer chemically or mechanically bonded to geotextiles and/or geomembranes (Lake & Rowe, 2000; Bouazza, 2002; Bouazza & Vangpaisal, 2007). The low permeability of GCLs is due to the high swelling capacity of the bentonite present in the compound.

Effective barriers against the advective transport of both liquids and gases can be achieved with the use of GCLs. In the absence of any other materials, the permeant flow is controlled by the permeability of the GCL with respect to that fluid (Rowe, 2020). The hydraulic conductivity k of GCLs is normally in the range of $(1 \text{ to } 5) \times 10^{-11}$ m/s when permeated with water (Koerner, 2012). Bouazza (2002) presents compiled results from various sources of laboratory tests conducted on GCLs, that indicate values of hydraulic conductivity with respect to water varying between 2×10^{-12} m/s and 2×10^{-10} m/s, depending on applied confining stress.

The GCLs can also be used in secondary containment barriers for chemicals, as part of a composite containment system in applications to contain accidental fuel spills, caused by leaks in underground reservoirs, spills and accidents during the exploration, refinement, transport, and storage operations of oil and its derivatives, in order to provide short-term barrier to prevent site contamination (Rowe et al., 2004; Mukunoki et al., 2005; Rowe et al., 2006; Rowe et al., 2008; Hosney & Rowe, 2014; McWatters et al., 2016; McWatters et al., 2020).

When GCLs is applied to contain liquids other than water, its hydraulic performance can potentially be affected in some cases due to the chemistry of the permeant fluid and bentonite. To ensure good performance of the GCLs as a barrier, the compatibility between the bentonite and the expected pollutant liquid should be verified (Mazzieri et al., 2000) and it is necessary sufficient hydration of the bentonite with water before contact with contaminants (Mazzieri et al., 2000; Rowe et al., 2005a; Rowe et al., 2005b; Rowe et al., 2007).

Research on the performance of GCLs has made considerable progress in recent decades (e.g., Hewitt & Daniel, 1997; LaGatta et al., 1997; Bouazza, 2002; Bouazza et al., 2006; Touze-Foltz et al., 2006; Meer & Benson, 2007; Rowe, 2012; Bradshaw & Benson, 2013; Rowe, 2014; Rowe et al., 2016; Bouazza et al., 2017; Rowe et al., 2019; Wang et al., 2019; Carnero-Guzman et al., 2021; Rowe & AbdelRazek, 2021). However, to-date there has been very little research relating to the use of GCLs in fuel containment barriers, as already noted by Rowe et al. (2008) years ago with respect to GCLs in contact with hydrocarbons.

This study employs a quantitative-descriptive bibliometric approach to locate and analyze existing studies on the use of GCLs in fuel containment barriers and their interaction with contaminants, with a focus on changes in permeability and hydraulic conductivity. Two of the most widely used databases in the field are Scopus and the Web of Science (WoS). Scopus is the largest database of abstracts and citations of literature, scientific journals, books, and peer-reviewed scholarly works. The Web of Science (WoS), on the other hand, is a bibliographic reference database that contains information about scientific production from 1945 onwards (Scopus, 2022; Web of Science, 2022).

Bibliometrics is a tool that expands knowledge on the subject presented and is characterized by a search with pre-defined criteria, minimizing implicit tendencies of the researcher and enabling the direction of new research with greater precision (Macedo et al., 2010). This type of research, in addition to allowing the collection of data from primary sources, also allows the collection of secondary data through the elaboration of a bibliographic portfolio, which represents the perception and delimitation of the authors regarding the relevance and representativeness of the studies according to with the interests of the research and the topic addressed (Braun et al., 2019).

The objective of this article is to address a significant research gap related to the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners after exposure to fuel. Through a thematic synthesis of the main studies in this area and an examination of publication patterns (including temporal distribution, authors, countries, and scientific journals that contribute most to the topic) it is expected to identify gaps in the literature and provide guidance for future research.

2. Materials and methods

The methodology of this study involved a systematic and bibliometric research using qualitative and quantitative approaches, which was based on the studies of Braun et al. (2019) and Visentin et al. (2020).

2.1. Database and research delimitation

This research was conducted using two prominent scientific databases, Scopus (Elsevier) and Web of Science (Clarivate), selected for their extensive coverage of scientific publications and their ability to provide reliable citation data. No restrictions were placed on the types of documents, type of access and areas of knowledge that publish on the subject. Therefore, this review encompasses a broad range of materials, including scientific articles, reviews, books and book chapters, conference proceedings, contributions to edited volumes and working papers.

The analysis time considered in the research was until the year 2022, when the last query in the databases was performed. The initial year of the research was not specified, to verify the entire scientific contribution related to the topic. The language selected for research in both databases was English. In Scopus, the search was carried out using as a criterion that the combinations of the selected keywords were found in the “title, abstract and keywords” of the publications. In WoS, the keyword search criterion was in the “topic” of the publications, which corresponds to the “title, abstract, author's keywords and keywords plus”, the latter consisting of words or phrases created or extracted from the titles of cited articles and retrieved by searching the topic field.

2.2. Selection and composition of the Bibliographic Portfolio

Initially, the keywords for the research were defined, being: “hydraulic conductivity”, “permeability”, “GCL”, “geosynthetic clay liners”, “fuel”, “oil”, “petroleum”, “hydrocarbons”, “diesel”, “biodiesel”, “gasoline” and “ethanol”.

For the combination of words, the Boolean operators “AND” and “OR” were used. The use of the AND operator is necessary when you want all the terms used to appear in publications, while the OR operator indicates that at least one of the terms must appear in the document. In the case of a term or expression, operators (“ ”) were also used in order to represent a single word in the search.

The systemic search of primary data (raw) in both databases, Scopus and WoS, considering the previously defined boundaries, included 54 documents, 34 of which were found in the Scopus database and 20 in the WoS. These publications were stored in the Bibliometrix/R software, which allows for the initial filtering of the publications; assists in coding and managing data and ideas, visually modeling and generating reports through Biblioshiny, a web interface to Bibliometrix, which facilitates data analysis; and allows extracting the main information from each publication.

The filtering process used in this study consisted of reading the entire text of each publication. First, duplicate publications (14 in total) were excluded, followed by those that were unavailable for full download (3 in total, indexed in Scopus). Additionally, 15 publications were excluded due to their incompatibility with the study theme, indexed in Scopus, and 6 more were excluded from WoS. Finally, 2 publications that were redundant and incompatible with the study theme, indexed in both databases, were also excluded. Thus, a total of 40 publications were excluded, and the bibliographic portfolio was reduced to 14 publications, which correspond to specific works on the hydraulic conductivity of GCLs permeated with some type of combustible fluid. Figure 1 presents the synthesis of the process of treatment of the primary results for the construction of the work portfolio.

When comparing the initial results of the research, there is a greater difference in the number of publications indexed in each database. However, after a more careful analysis, it is seen that this difference significantly reduces the composition of the portfolio, so that the difference of articles exclusively indexed is reduced to only 2 articles, which are indexed in Scopus, against none exclusively indexed in WoS. The other articles that make up the group are found in both databases.

In the end, 14 articles were part of the set of publications related to the theme, also called the bibliographic research portfolio (Petrov et al., 1997; Mazzieri et al., 2000; Rowe et al., 2004; Mukunoki et al., 2005; Rowe et al., 2005a; Rowe et al., 2005b; Rowe et al., 2006; Rowe et al., 2007; Rowe et al., 2008; Sari & Shai, 2013; Hosney & Rowe, 2014; Gitipour et al., 2015; McWatters et al., 2016; McWatters et al., 2020).

With the portfolio defined, the analysis of the selected works began and the elaboration of indicators, such as number of publications per year, authors, countries and journals that contribute most with publications on this topic. And finally, each article was analyzed individually, and comparisons were made to detect higher order themes within the literature and thus compose a synthesis regarding the theme.

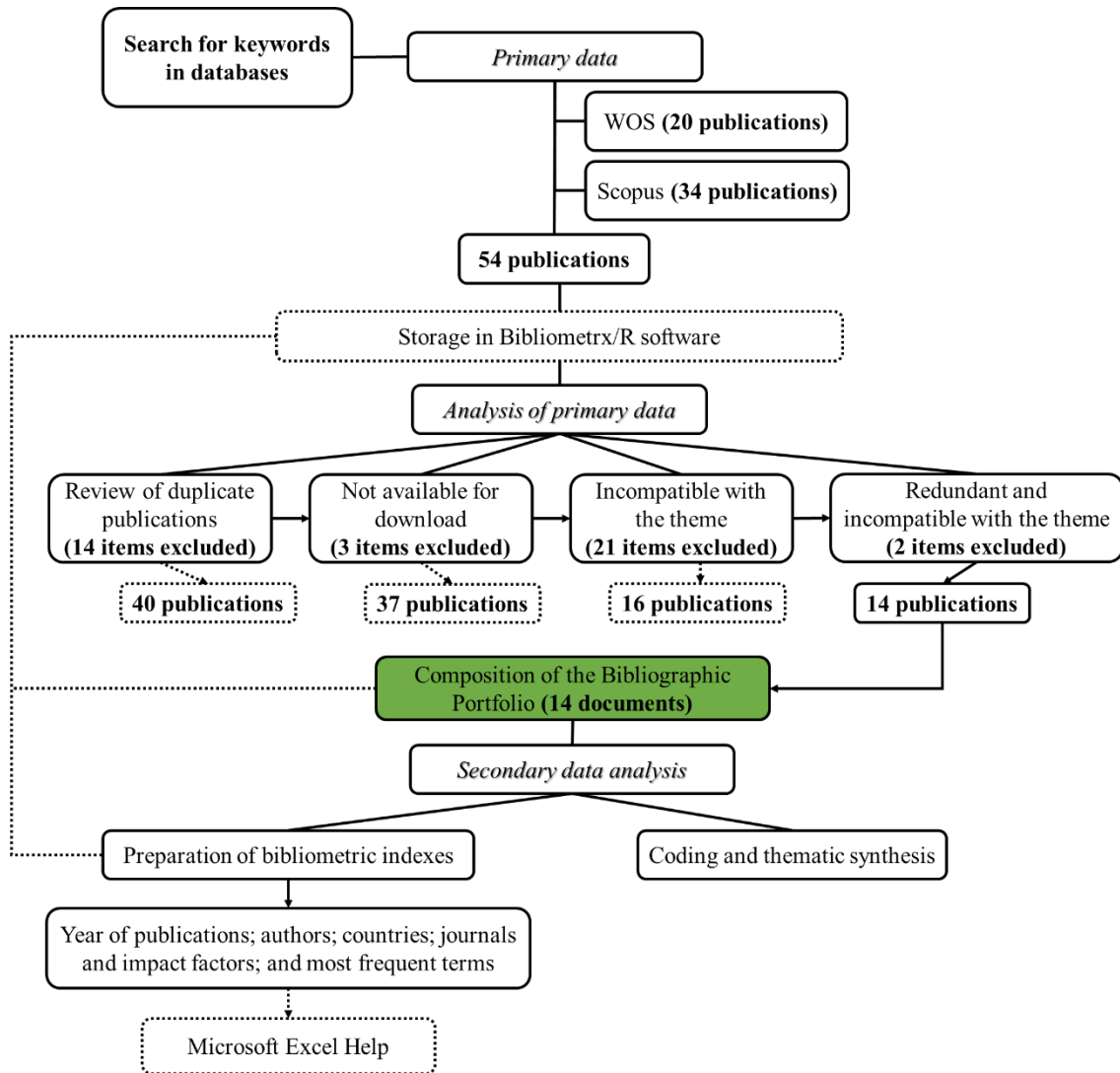


Figure 1. Scheme of the bibliographic portfolio construction process.

3. Analysis and results

3.1. Temporal distribution of scientific production of primary data

The distribution referring to the temporal cut of the data of the first phase of the research, where 54 publications were found (34 in Scopus and 20 in WoS), is represented in Figure 2. The temporal distribution of the works found is situated in a period of 24 years, starting in 1997 until 2021.

It was observed that the first research on the subject began in mid-1997. However, clearly in the following years there were no publications, and these were resumed with greater frequency only from 2004 onwards. There was no gradual growth, there were always oscillations in the number of annual publications, with the peak being reached in 2016, and the last publication in 2021.

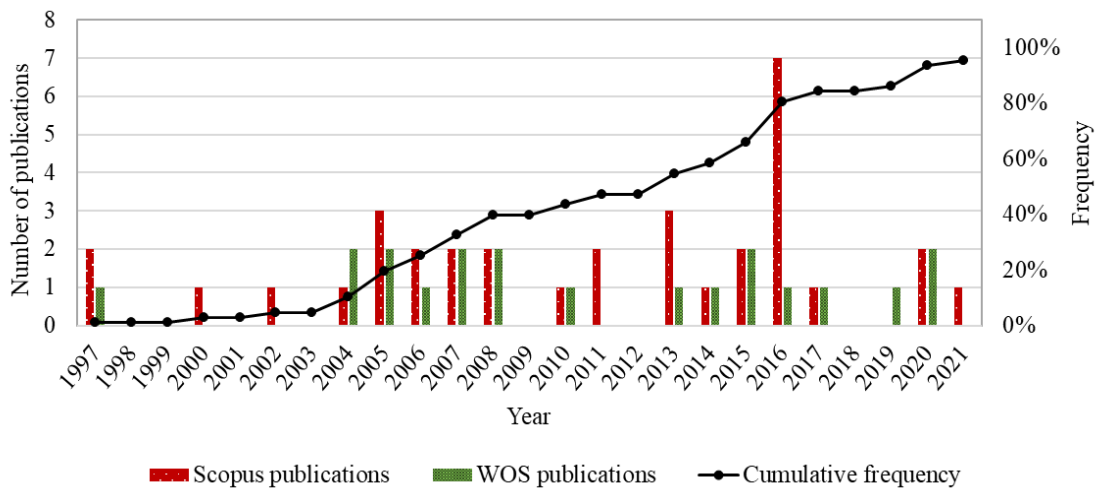


Figure 2. Time evolution of total publications in Scopus and WOS databases.

3.2. Temporal distribution of scientific production of secondary data

This item presents the evolution of scientific production only of publications related to the subject of study, which make up the bibliographic portfolio (14 articles) and from which subsequent analyses are presented. The temporal distribution of these works is situated in a period of 12 years, as can be seen in Figure 3.

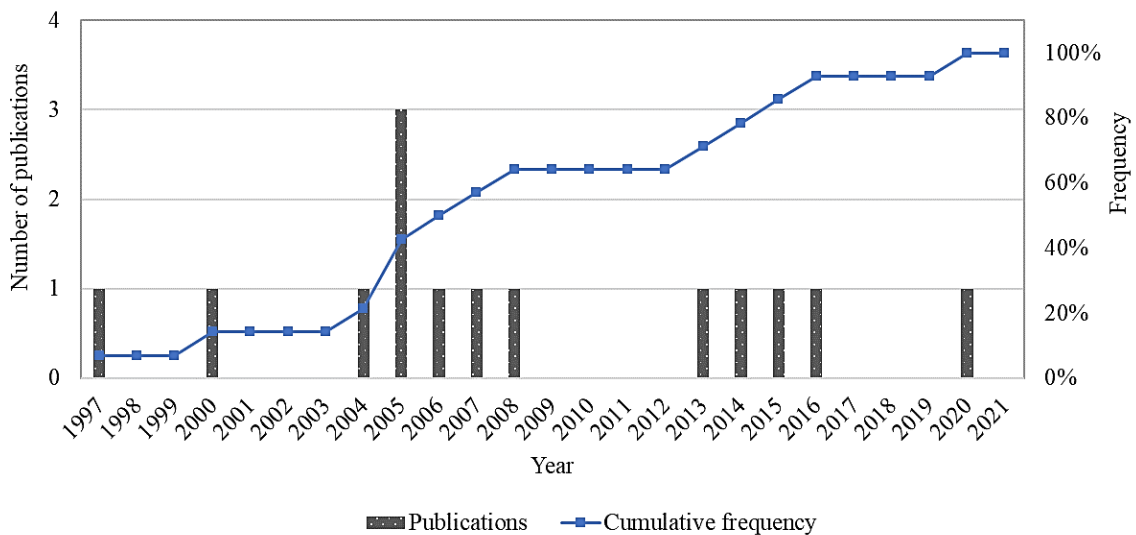


Figure 3. Temporal distribution of scientific production of secondary data.

The more specific theme was already present in the first publications by Petrov et al. (1997). However, from this first publication there were no major developments, since the number of annual publications and the accumulated frequency remained constant, except for the year 2005, which peaked in publications directly related to the theme. Another important

finding is related to the last publication specific to the theme that occurred in 2020 by McWatters et al. (2020), approximately two years from the date of this research, which shows that studies are evolving quite slowly, with extended periods without publication.

Therefore, the scientific production related to the evaluation of the hydraulic conductivity of the GCL material when in contact with fuels still lacks research, seen by the low number of publications over the years. In view of this and the fact that it is a very recent theme, the scenario, in addition to being relevant, is promising for the development of new works in this area.

3.3. Authors with the greatest contribution to the topic

Based on the 14 selected publications, it was possible to identify the authors with more publications on the subject. In total, 33 different authors were responsible for the publications, and of these, 10 authors have two or more publications.

Highlight is given to researcher Ronald Kerry Rowe, professor and researcher at Queen's University, (Kingston, Canada), which has the largest number of published research in the area and is one of the leaders in research on GCL. Rowe is a renowned researcher in geoenvironmental engineering, considered one of the pioneers in research on waste barrier systems. In a broad search in Scopus databases, searching documents where only the words “GCL” or “geosynthetic clay liners” appear in the title, abstract or keywords, Rowe appears first in terms of the number of publications, with a total of 98 articles, distributed in the period from 1997 to 2021. The same search, when performed in the WoS database searching for “topic”, resulted in a total of 110 articles, distributed in the period from 1997 to 2021.

Of the 14 analyzed works that made up the bibliographic portfolio, Rowe contributed in 11 works, which represents 79% of the portfolio. In second place is Toshifumi Mukunoki with participation in 7 published articles, equivalent to 50% of the total, followed by Richard J. Bathurst with 6 articles, 43% of the total and by Paul Hurst, who collaborated in 4 articles, 29% of the total. Six authors participated in 2 publications, each representing 14.3% of the total. The other authors (23 remaining) contributed to only 1 publication, or 7.14% of the total.

In Figure 4, generated by the Biblioshiny interface of the Bibliometrix/R software, it is possible to better observe the distribution networks of publications among the 10 main authors highlighted. The authors are divided into two large groups that publish on the subject, with Rowe as the highlight. The greater the thickness of the branch, the greater the number of publications together between the authors. The largest collaboration network is between

Rowe, Bathurst, Mukunoki and Hansen. Group 1 can be considered as the main research group on the topic addressed.

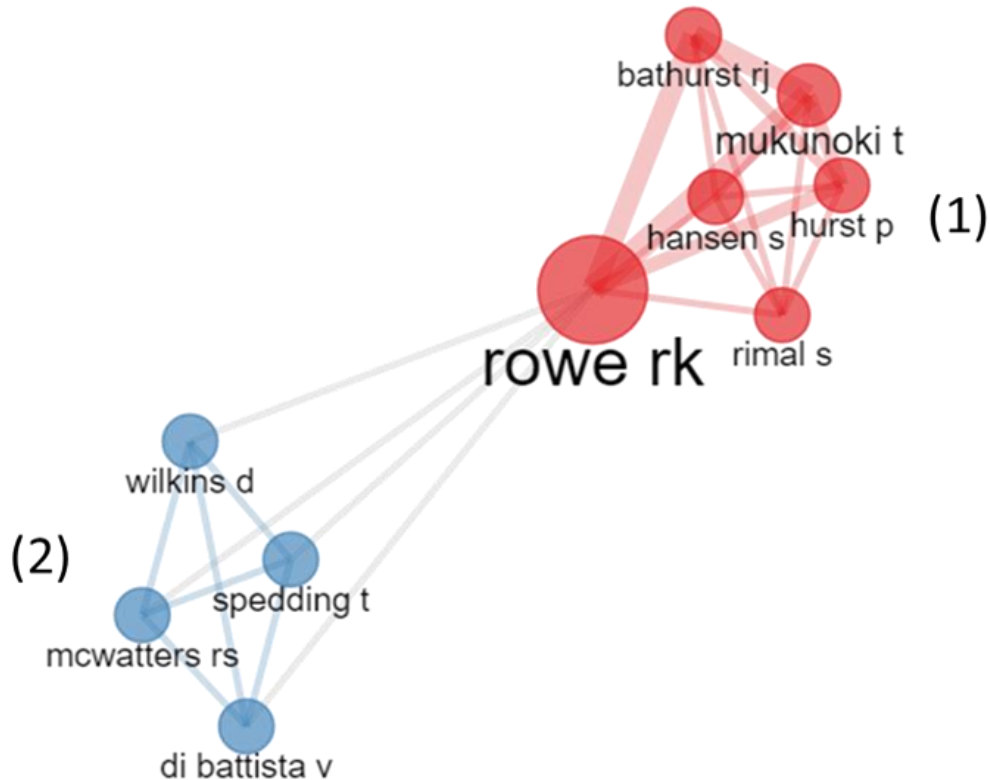


Figure 4. Network collaboration between the main authors of publications.

3.4. Countries that publish the most on the topic

An analysis of the countries that have publications on the subject was carried out and a total of 5 countries involved in the research were verified. The emphasis is given to Canada, which has 11 of the 14 publications representing the portfolio, which corresponds to 79% of the total publications. Followed by Japan with 4 publications, Australia with 2, Belgium, Iran and Italy with 1 publication each. Figure 5 represents the geographic distribution of the analyzed studies.

Exploring the articles, it was observed two significant research groups composed of institutions from more than one country. One of them resulted from the co-authors union from institutions in Canada and Japan, and the other was formed by the relations between institutions in Canada and Australia. In this regard, it was noticed that 50% of the articles that have more than one author were developed in partnership with foreign institutions.

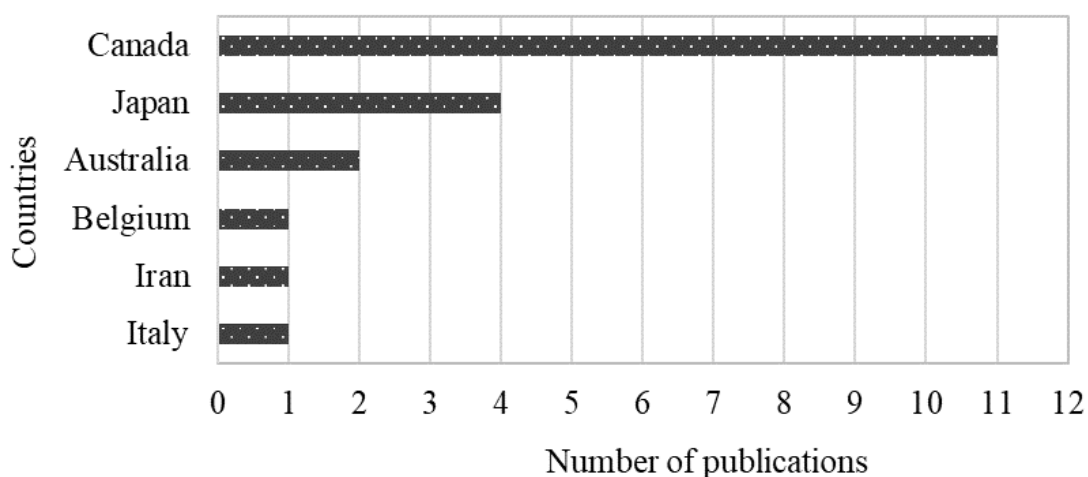


Figure 5. List of countries with publications on the subject.

Canada had the highest number of publications involving GCLs and permeation with fuels. Some important studies were developed in Canada by one of these groups, specifically in the Canadian radar region on Brevoort Island, located in northern Canada, because of a cleanup program initiated in the summer of 2001 by the Canadian Department of National Defence in consequence of spills and fuel leaks at the site (Rowe et al., 2004; Rowe et al., 2005b; Rowe et al., 2007; Mukunoki et al., 2005; Bathurst et al., 2006; Hosney & Rowe, 2014).

As part of the cleanup program, the alternative built to control the contamination plume was a subsurface geosynthetic composite barrier wall, composed of needle-punched and non-woven GCL with sodium bentonite, HDPE geomembrane, protection layer with needle-punched geotextile and local filling material, constructed during the summer of 2001 (Li et al., 2002; Bathurst et al., 2006).

With regards to the other group of researchers from different countries, Tin et al. (2009) report that several stations in Antarctica have soils contaminated with hydrocarbons due to fuel spills over the years. The strategy developed to remediate the contaminated soil with hydrocarbons was through the construction of biopiles, composed of GCL, HDPE geomembrane and geotextiles, installed over 2011-2013 (McWatters et al., 2016; McWatters et al., 2020).

3.5. Journals where scientific research has been published

The articles that comprise the portfolio of work were distributed in seven journals (not counting the three publications in congresses, conferences and symposia), as shown in Figure

6. The journals “Geotextiles and Geomembranes” and “Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering” had featured, with 3 publications each. The other journals - “Géotechnique”, “International Journal of Environmental Research”, “Canadian Geotechnical Journal”, “Geosynthetics International”, and “Journal of ASTM International” - contributed with only 1 article each.

Analyzing the two journals with the highest number of publications, “Geotextiles and Geomembranes” is a journal indexed by Elsevier, aimed at disseminating information among researchers, designers, users and manufacturers of geosynthetic materials. By providing a growing base of information, the journal raises general awareness, stimulates further research and assists in the establishment of codes and regulations. The “Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering” is a journal indexed by the ASCE Library and covers research in the field of geotechnical engineering practice.

Another indicator analyzed and represented in Figure 6 was the impact factor (IF) of the mentioned journals, based on the most recent year available (2021). This factor corresponds to a measure of evaluation of journals and is based on citations received, considering publications for the same period, normally one year. Clarivate annually publishes the Journal Citation Report (JCR) with journal impact factor values.

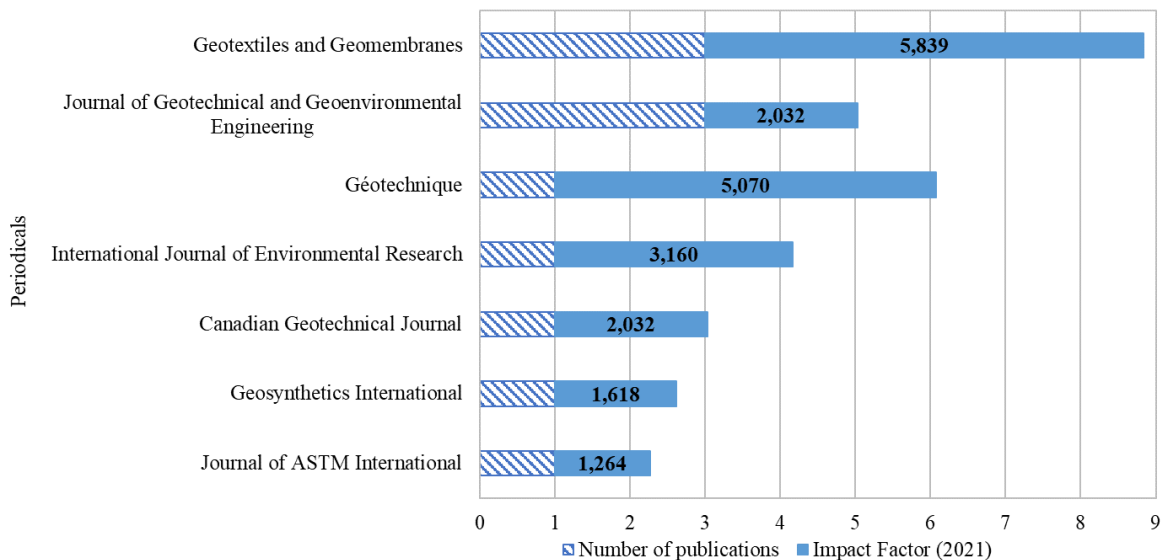


Figure 6. Periodicals with publications on the subject and the respective Impact Factors.

In this case, it is possible to verify that one of the journals - “Geotextiles and Geomembranes” - with the highest number of publications also has a higher impact factor (FI = 5.839). The other journal that also presented the highest number of publications - “Journal

represent 15% of the total, with “hydraulic” and “conductivity” having 43 and 37 counts each, respectively. The emphasis of these words is justified by the fact that they represent the keywords used in the research in the databases.

Next come the words “jet” and “water”, each representing 5% of the total frequency. The word “jet” is in evidence because it is the nomenclature of a type of diesel, common in the Canadian arctic regions, where most of the studies were carried out, and the word “water” is quite frequent due to its use as a reference liquid in permeability tests. The same justification given for the word “jet” can also be associated with the expression “freeze and thaw cycles” (composed of the words “cycles” and the expression “freeze_thaw”) which, due to the arctic climate where the GCL was exposed and tested, these cycles were considered in the studies. In addition to these two terms, each representing 4% of the total frequency, the words “geomembrane”, “specimens” and “fuel” are also found in this range. The other words follow less frequently (less than 20 counts in the publications).

From the thematic map, it is possible to observe the grouping of words into three large niches (Figure 7b). Group 1 includes words that represent basic, emerging themes, with a degree of central relevance, especially the terms “gel”, “hydraulic” and “clay”. Group 2 represents the motor themes, with emphasis on the words “conductivity”, “liner” and “jet”, presenting a degree of development and relevance. Group 3, on the other hand, combines the terms that present more niche themes, with a low-density degree of development, especially the words “performance”, “conditions” and “hydrocarbons”.

In general, it is possible to highlight that the elaboration of the word cloud and the thematic map complements what was previously observed, about most of the works on containment barriers for fuels with GCL being concentrated on a specific research group, seen by the highlight observed in words and expressions related to climate issues and type of fuel, typical of the places where the research was carried out.

3.7. Thematic synthesis

The bibliometric research carried out on the evaluation of the hydraulic conductivity of protective barriers for fuels with GCL revealed that it is a topic of interest to a limited group of researchers. The indices pointed to several studies on the hydraulic behavior of GCL in containment barriers for the spills of Jet A-1 diesel, a common fuel in the Canadian arctic regions. As the work was concentrated in these extreme climate regions, the freezing and thawing cycles of the geosynthetic were also objectives of these studies.

Petrov et al. (1997) examined the hydraulic conductivity of hydrated GCLs permeated with different concentrations of water and ethanol solutions. Mazzieri et al. (2000) also evaluated the hydraulic conductivity of GCLs with various ethanol solutions in water, performing tests on hydrated and unhydrated GCLs. Sari & Chai (2013) investigated self-healing capacity of GCLs with respect to different liquids permeation, including ethanol, considering circular induced damages. Rowe et al. (2004), Mukunoki et al. (2005), Rowe et al. (2006) and Rowe et al. (2008) presented results on the performance of GCLs used in temporary containment barriers for fuel spills of Jet A-1, considering the freeze and thaw cycles in laboratory investigation and exhumation of samples in different periods of exposition in the field. Rowe et al. (2005a), Rowe et al. (2005b) and Rowe et al. (2007) studied the hydraulic behavior of GCLs in the laboratory with respect to jet fuel A-1 for saturated and unsaturated conditions, also considering temperature variations. Hosney & Rowe (2014) conducted research on the hydraulic conductivity of samples extracted from the field over 10 years, exposed to arctic diesel contact, at different depths. Gitipour et al. (2015) performed permeability tests on bentonites sandwiched between geotextiles, which simulate a sample of GCL, with respect to permeation of water and crude oil. McWatters et al. (2016) and McWatters et al. (2020) evaluated the hydraulic performance of biopiles developed to contain and remediate soil contaminated by hydrocarbons and leachate in Antarctica.

A decade ago, Rowe et al. (2008) found that little attention had been paid to permeability studies of GCLs with hydrocarbons. Through the portfolio of the present research, it is observed that there has been no significant growth in the number of publications related to the theme over the years, until today.

The Table 1 presents the synthesis of the main data from these articles obtained on hydraulic conductivity of GCLs permeated with fuels, published over the years.

Table 1. Results from published research on hydraulic conductivity of GCLs in contact with fuels.

Reference	Main Points		Permeameter type	Hydraulic conductivity k (distilled/de-aired/de-ionized water / <i>tap water</i>)			Hydraulic conductivity k (fuel)			
	General	Specifics		Freeze-thaw cycles (n); <i>Exposure time</i>	k Virgin (m/s) [σ' (kPa)]	k Exhumed (m/s) [σ' (kPa)]	Fuel type	Freeze-thaw cycles (n); <i>Exposure time</i>	k Virgin (m/s) [σ' (kPa)]	k Exhumed (m/s) [σ' (kPa)]
Petrov et al. 1997	Ethanol/water mixtures	Fixed-WP		6.0 x 10 ⁻¹¹ [4]		100% ethanol		2.0 x 10 ⁻⁹ [35]		
				1.3 x 10 ⁻¹¹ [35]		75% ethanol		4.1 x 10 ⁻¹¹ [35]		
				7.5 x 10 ⁻¹² [114]		50% ethanol		6.0 x 10 ⁻¹² [35]		
				1.6 x 10 ⁻¹¹ [35]		25% ethanol		7.3 x 10 ⁻¹² [35]		
Mazzieri et al. 2000	Ethanol/water mixtures	FWP	Water-hydrated GCL	1.0 x 10 ⁻¹¹ [50]		100% ethanol		1.0 x 10 ⁻¹⁰ [50]		
			Ethanol-hydrated GCL				100% ethanol		5.5 x 10 ⁻⁸ [50]	
							75% ethanol		5.5 x 10 ⁻⁸ [50]	
							50% ethanol		3.5 x 10 ⁻¹⁰ [50]	
					25% ethanol		3.0 x 10 ⁻¹¹ [50]			
Rowe et al. 2004	Canadian Arctic; Hydrocarbon spill	Freeze-thaw cycles	FWP	0	8.3 x 10 ⁻¹¹ [1.4] 4.0 x 10 ⁻¹¹ [14]		0	4.3 x 10 ⁻¹² [14]		
				5	6.3 x 10 ⁻¹¹ [1.4] 2.9 x 10 ⁻¹¹ [14]		6	8.7 x 10 ⁻¹² [14]		
				12	4.3 x 10 ⁻¹¹ [1.4] 2.3 x 10 ⁻¹¹ [14]		12	2.7 x 10 ⁻¹⁰ [14]		
				1 year		4.0 x 10 ⁻¹¹ [1.4] 2.0 x 10 ⁻¹¹ [14]	Jet Fuel A-1	13	5.6 x 10 ⁻¹² [14]	
Mukunoki et al. 2005	Canadian Arctic; Hydrocarbon spill	Freeze-thaw cycles	RWP	0	2.0 x 10 ⁻¹¹ [14]		0	2.0 x 10 ⁻¹¹ [14]		
				5	2.0 x 10 ⁻¹¹ [14]		5	8.0 x 10 ⁻¹¹ [14]		
				3 years		7.1 x 10 ⁻¹² [14]	Jet Fuel A-1	3 years	3.6 x 10 ⁻¹¹ [14]	

		5°C		1.0×10^{-11} [14]		4.1×10^{-11} [14]	
		5°C; $w_c=60\%$				1.6×10^{-9} [14]	
		5°C; $w_c=90\%$				1.7×10^{-9} [14]	
		5°C; $w_c=120\%$				1.2×10^{-9} [14]	
	Canadian Arctic; Laboratory investigation	-5°C; $w_c=60\%$				1.3×10^{-9} [14]	
		-5°C; $w_c=90\%$	Fixed- WP			0.4×10^{-9} [14]	
		-5°C; $w_c=120\%$				0.4×10^{-9} [14]	
		-5°C				$< 1.3 \times 10^{-12}$ [14]	
		5°C; 1 freeze				4.1×10^{-10} [14]	
		$0 < T < 20^\circ\text{C}$; $S_i=77\%$				$\leq 3.0 \times 10^{-10}$ [14]	
		$0 > T > -20^\circ\text{C}$; $S_i=70\%$				$\leq 2.5 \times 10^{-10}$ [14]	
				0	2.0×10^{-11} [15]		0
				5	2.0×10^{-11} [15]		5
				12	2.6×10^{-11} [15]		12
			<i>1 year</i>	1.2×10^{-11} [15]		<i>1 year</i>	
			<i>3 years</i>	0.7×10^{-11} [15]		<i>3 years</i>	
			0	2.0×10^{-11} [14]		0	
			5	2.0×10^{-11} [14]		5	
			0	3.4×10^{-11} [14]		0	
			12	3.4×10^{-11} [14]		12	
	Canadian Arctic; Laboratory investigation	20°C; $S_i=60\%$				1.6×10^{-8} [14]	
		5°C; $S_i=60\%$				1.6×10^{-9} [14]	
		-5°C; $S_i=60\%$	RWP			2.4×10^{-10} [14]	
		-20°C; $S_i=60\%$				2.8×10^{-11} [14]	
		20°C; $S_i=90\%$				3.4×10^{-10} [14]	
Rowe et al. 2005a					Jet Fuel A-1		
Rowe et al. 2006	Canadian Arctic; Hydrocarbon spill				Jet Fuel A-1		
Rowe et al. 2005b; Rowe et al. 2007					Jet Fuel A-1		

			5°C; S _r =90%			1.4 x 10 ⁻⁹ [14]		
			-5°C; S _r =90%			9.0 x 10 ⁻¹¹ [14]		
			-20°C; S _r =90%			1.8 x 10 ⁻¹¹ [14]		
Rowe et al. 2008	Canadian Arctic; Hydrocarbon spill	Contrast with Rowe et al. (2006)	FWP	0	3.3 x 10 ⁻¹¹ [13]	0	< 7.8 x 10 ⁻¹¹ [23-41]	
				5	4.3 x 10 ⁻¹¹ [13]	5	< 2.6 x 10 ⁻¹¹ [17-20]	
				12	3.1 x 10 ⁻¹¹ [13]	12	< 7.9 x 10 ⁻¹¹ [20-30]	
				50	5.3 x 10 ⁻¹¹ [13]	50	< 1.5 x 10 ⁻¹⁰ [17-27]	
				100	3.6 x 10 ⁻¹¹ [13]	100	< 3.4 x 10 ⁻¹⁰ [13-20]	
				3 years	2.3 x 10 ⁻¹¹ [13]	3 years	< 3.3 x 10 ⁻¹¹ [17-27]	
Hosney & Rowe 2014	Canadian Arctic; Hydrocarbon spill	FWP	Jet Fuel A-1		3.8 x 10 ⁻¹¹ [15]		6.2 x 10 ⁻¹² [15]	
				Trench; Depth: 0.8 m	1 year	2.6 x 10 ⁻¹¹ [15]	1 year	3.3 x 10 ⁻¹² [15]
				Trench; Depth: 0.8 m	4 years	4.0 x 10 ⁻¹¹ [15]	4 years	2.7 x 10 ⁻¹¹ [15]
				Frame; Depth: 1.5-2.3 m	6 years	3.1 x 10 ⁻¹⁰ [15]	6 years	1.4 x 10 ⁻⁹ [15]
				Frame; Depth: 0-0.5 m	7 years	3.0 x 10 ⁻¹¹ [15]	7 years	3.5 x 10 ⁻¹¹ [15]
				Frame; Depth: 0.8-1.3 m	10 years	3.9 x 10 ⁻¹⁰ [15]	10 years	3.2 x 10 ⁻¹⁰ [15]
Gitipour et al. 2015	Simulated GCL; GTX + Bentonite + GTX	RWP		9.6 x 10 ⁻¹³ -	Crude oil	1.2 x 10 ⁻⁸ -		
McWatters et al. 2016	Antarctica; Biopiles; Hydrocarbon spill	FWP	w _c =13%	4.0 x 10 ⁻¹¹ [13]				
			w _c =162%	3 years	3.1 x 10 ⁻¹¹ [13]			
			w _c =22%	3 years	3.0 x 10 ⁻¹¹ [13]			
McWatters et al. 2020	Antarctica; Biopiles; Hydrocarbon spill	FWP	w _c =12%	1.5 x 10 ⁻¹¹ [13]				
			w _c =10%	4 years	3.6 x 10 ⁻¹¹ [13]			
			w _c =200%	4 years	3.9 x 10 ⁻¹¹ [13]			

Legend: FWP – flexible wall permeameter; RWP – rigid wall permeameter; Fixed-WP – fixed-wall permeameter; n – quantity of freeze-thaw cycles; w_c – moisture content; S_r – saturation degree; GCL – geosynthetic clay liner; GTX – geotextile; k – hydraulic conductivity; σ' – effective confining stress.

4. Conclusion

The present research aimed to evaluate the scientific production on the hydraulic conductivity of GCL in contact with fuels through a quantitative and descriptive analysis. The study provided an overview of the publications, authors, countries, and journals that published the most on the subject. The analyzed databases, Scopus and Web of Science, presented similar consistency and bibliographic coverage regarding the theme, since most of the articles were found in both bases, proving to be efficient research tools.

The bibliometric review identified that the scientific production on the subject is limited to a small number of articles, with a total of 14 articles forming the bibliographic portfolio. Through a critical analysis of these studies, several knowledge gaps and opportunities for future research were identified. The main contributions of this review study, including the synthesis of key results and the identification of general trends in the research area, are of great importance to the scientific community. Additionally, the bibliometric indicators obtained in this study indicate that this is a promising area for further research, given the limited scientific production found on the topic.

As already mentioned, GCL can be used as an hydraulic barrier in places where there is movement and distribution of fuels, in storage tanks and to contain some type of accidental spillage, to avoid contact and percolation of fuel towards the subsoil and groundwater waters. Therefore, it is important to pay attention to the development of research in the area aimed at clarifying the behavior of the hydraulic conductivity of GCL in contact with fuels, ensuring the efficiency of the barrier.

The collected data show that the number of publications related to the studied topic did not increase significantly over the years. Most studies were conducted by the same research group, indicating that more researchers should be encouraged to explore this area.

The study achieved its objective of expanding readers' knowledge about the scientific collection related to the use of GCL in fuel hydraulic containment systems, as well as the hydraulic conductivity of the geosynthetic in contact with these contaminants. Through the collected data, the study established indicators that allow the researcher to select and analyze existing publications, directing their future research in order to contribute to the scientific development of the area.

References

- Bathurst, R.J., Rowe, R.K., Zeeb, B., & Reimer, K. (2006). A geocomposite barrier for hydrocarbon containment in the Arctic. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, 1(1), 18-34.
- Bouazza, A. (2002). Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 3-17. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00025-5).
- Bouazza, A., Vangpaisal, T., & Jefferis, S. (2006). Effect of wet-dry cycles and cation exchange on gas permeability of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 1011–1018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:8\(1011\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:8(1011)).
- Bouazza, A., & Vangpaisal, T. (2007). Gas permeability of GCLs: effect of poor distribution of needle punched fibres. *Geosynthetics International*, 14(4), 248-252. <https://doi.org/10.1680/gein.2007.14.4.248>.
- Bouazza, A., Rouf, M.A., Singh, R.M., Rowe, R.K., & Gates, W.P. (2017). Gas advection-diffusion in geosynthetic clay liners with powder and granular bentonites. *Geosynthetics International*, 24(6), 607-614. <https://doi.org/10.1680/jgein.17.00027>.
- Bradshaw, S.L., & Benson, C.H. (2013). Effect of municipal solid waste leachate on hydraulic conductivity and exchange complex of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001050](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001050).
- Braun, A.B., Trentin, A.W.S., Visentin, C., & Thomé, A. (2019). Sustainable remediation through the risk management perspective and stakeholder involvement: a systematic and bibliometric view of the literature. *Environmental Pollution*, 255, 113221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113221>.
- Carnero-Guzman, G.G., Bouazza, A., Gates, W.P., Rowe, R.K., & McWatters, R. (2021). Hydration/dehydration behavior of geosynthetic clay liners in the Antarctic environment. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(1), 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.020>.
- Gitipour, S., Hosseinpour, M.A., Heidarzadeh, N., Yousefi, P., & Fathollahi, A. (2015). Application of modified clays in geosynthetic clay liners for containment of petroleum contaminated sites. *International Journal of Environmental Research*, 9(1), 317–322. <https://doi.org/10.22059/IJER.2015.903>.
- Hewitt, R.D., & Daniel, D.E. (1997). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners after freeze-thaw. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 305-313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(305\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(305)).
- Hosney, M.S., & Rowe, R.K. (2014). Performance of GCL after 10 years in service in the Arctic. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001160).
- Koerner, R.M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. Xlibris Corporation, Bloomington, USA, 6th ed., v. 2.

- LaGatta, M.D., Boardman, B.T., Cooley, B.H. & Daniel, D.E. (1997). Geosynthetic clay liners subjected to differential settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 402–410. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:5\(402\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:5(402)).
- Lake, C.B., & Rowe, R.K. (2000). Swelling characteristics of needlepunched thermally treated geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2), 77-101. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(99\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(99)00022-9).
- Li, H.M., Bathurst, R.J., & Rowe, R.K. (2002). Use of GCLs to control migration of hydrocarbons in severe environmental conditions. In: Proceedings of International Symposium on Geosynthetic Clay Barriers. Nuremberg, Germany, April, pp. 187–198. <https://doi.org/10.1201/9781003078777-22>.
- Macedo, M., Botelho, L.L.R., & Duarte, M.A.T. (2010). Revisão bibliométrica sobre a produção científica em aprendizagem gerencial. *Gestão e Sociedade*. 4(8), 619-639 (in Portuguese). <https://doi.org/10.21171/ges.v4i8.999>.
- Mazzieri, F., Pasqualini, E., & Van Impe, W.F. (2000) Compatibility of GCLs with organic solutions. In: Proceedings of ISRM International Symposium 2000. Melbourne.
- McWatters, R.S., Rowe, R.K., Wilkins, D., Spedding, T., Jones, D., Wise, L., Mets, J., Terry, D., Hince, G., Gates, W.P., Di Battista, V., Shoaib, M., Bouazza, A., & Snape, I. (2016). Geosynthetics in Antarctica: Performance of a composite barrier system to contain hydrocarbon-contaminated soil after three years in the field. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(5), 673-685. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.06.001>.
- McWatters, R.S., Rowe, R.K., Di Battista, V., Sfiligoj, B., Wilkins, D., & Spedding, T. (2020). Exhumation and performance of an Antarctic composite barrier system after 4 years exposure. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(8), 1130-152. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0715>.
- Meer, S.R., & Benson, C.H. (2007). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), 550–563. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:5\(550\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(550)).
- Mukunoki, T., Rowe, R.K., Hurst, P., & Bathurst, R.J. (2005). Application of geosynthetic barrier wall to containment of hydrocarbons in the Arctic. In: Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnology in Harmony with the Global Environment. Osaka, Japan, 2415-2418. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-2415>.
- Petrov, R.J., Rowe, R.K., & Quigley, R.M. (1997). Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8), 683-695. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:8\(683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:8(683)).
- Rowe, R.K., Mukunoki, T., Li, M.H., & Bathurst, R.J. (2004). Effect of freeze-thaw on the permeation of arctic diesel through a GCL. ASTM Special Technical Publication, (1456), 134-146. <https://doi.org/10.1520/STP12203S>.

- Rowe, R.K., Hurst, P., & Mukunoki, T. (2005a). Permeating partially hydrated GCLs with jet fuel at temperatures from -20 °C and 20 °C. *Geosynthetics International*, 12(6), 333-343. <https://doi.org/10.1680/gein.2005.12.6.333>.
- Rowe, R.K., Mukunoki, T., Bathurst, R.J., Rimal, S., Hurst, P., & Hansen, S. (2005b). The performance of a composite liner for retaining hydrocarbons under extreme environmental conditions. In: Proceedings of Geo-Frontiers 2005, Austin, Texas, Geotechnical Special Publication GSP 140, 2795-2811. [https://doi.org/10.1061/40787\(166\)16](https://doi.org/10.1061/40787(166)16).
- Rowe, R.K., Mukunoki, T., & Bathurst, R.J. (2006). Compatibility with Jet A-1 of a GCL subjected to freeze thaw cycles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(12), 1526-1537. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:12\(1526\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1526)).
- Rowe, R.K., Mukunoki, T., Bathurst, R.J., Rimal, S., Hurst, P., & Hansen, S. (2007). Performance of a geocomposite liner for containing Jet A-1 spill in an extreme environment. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(2), 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.10.003>.
- Rowe, R.K., Mukunoki, T., & Bathurst, R.J. (2008). Hydraulic conductivity to Jet-A1 of GCLs after up to 100 freeze-thaw cycles. *Geotechnique*, 58(6), 503-511. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.6.503>.
- Rowe, R.K. (2012). Short and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, 141-169. <https://doi.org/10.1139/t11-09>.
- Rowe, R.K. (2014). Performance of GCLs in liners for landfill and mining applications. *Environmental Geotechnics*, 1 (1), 3-21. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00031>.
- Rowe, R.K., Brachman, R.W.I., Take, W.A., Rentz, A., & Ashe, L.E. (2016). Field and laboratory observations of down-slope bentonite migration in exposed composite liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (5), 686-706. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.05.004>.
- Rowe, R.K., Garcia, J.D., Brachman, R.W.I., & Hosney, M.S. (2019). Hydraulic and chemical performance of geosynthetic clay liners isothermally hydrated from silty sand subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(6), 740-754. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103486>.
- Rowe, R.K., & Li, T.K. (2020). Self-healing of circular and slit defects in GCLs upon hydration from silty sand under applied stress. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(5), 667-683. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.05.001>.
- Rowe, R.K. (2020). Geosynthetic clay liners: perceptions and misconceptions. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(2), 137-156. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.11.012>.
- Rowe, R.K., & AbdelRazek, A.Y. (2021). Performance of multicomponent GCLs in high salinity impoundment applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(2), 358-368. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.007>.
- Sari, K., & Chai, J. (2013). Self healing capacity of geosynthetic clay liners and influencing factors. *Geotextiles and Geomembranes*, v.41, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.08.006>.

- Scopus. (2022). *Quick reference guide*. Retrieved in 2022, August 16, from <https://www.scopus.com/>.
- Tin, T., Fleming, Z.L., Hughes, K.A., Ainley, D.G., Convey, P., Moreno, C.A., Pfeiffer, S., Scott, J., & Snape, I. (2009). Impacts of local human activities on the Antarctic environment. *Antarctic Science*, 21, 3-33. <https://doi.org/10.1017/S0954102009001722>.
- Touze-Foltz, N., Duquennoi, C., & Gaget, E. (2006). Hydraulic and mechanical behavior of GCLs in contact with leachate as part of a composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.01.004>.
- Viana, P.M.F., Palmeira, E.M., Viana, H.N.L. (2011). Evaluation on the use of alternative materials in geosynthetic clay liners. *Soils and Rocks*, 34(1), 65-77. <https://doi.org/10.28927/SR.341065>.
- Visentin, C., Trentin, A.W.S., Braun, A.B., & Thomé, A. (2020). Life cycle sustainability assessment: a systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122509>.
- Wang, B., Xu, J., Chen, B., Dong, X., & Dou, T. (2019). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to inorganic waste leachate. *Applied Clay Science*, 168, 244-248. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.021>.
- Web of Science. (2022). *Quick reference guide*. Retrieved in 2022, August 16, from <https://clarivate.com/webofsciencegroup/>.

4.2. Construção do permeâmetro de parede flexível

A construção do permeâmetro de parede flexível foi uma etapa fundamental na pesquisa, pois permitiu a realização de ensaios de permeabilidade do GCL de forma precisa e controlada. O equipamento foi desenvolvido com base em um modelo projetado por Zanella (2019), que atende às normas ASTM D5887:2022 (*Standard test method for measurement of index flux through saturated geosynthetic clay liner specimens using a flexible wall permeameter*) para medição de fluxo de líquido através de amostras de GCL saturadas. O Anexo A contém o projeto detalhado das peças do permeâmetro.

Esse tipo de permeâmetro é amplamente utilizado em ensaios de permeabilidade com GCLs, pois as células de parede flexível permitem um controle preciso de todas as tensões atuantes na amostra e, mais importante ainda, permitem que a amostra de teste seja completamente saturada usando contrapressão (DANIEL et al., 1997).

O permeâmetro foi idealizado especificamente para solos não granulares e de baixa condutividade hidráulica, empregando um sistema hidráulico aberto de carga constante. Foram selecionados para sua construção materiais adequados e compatíveis com diversos

agentes químicos, visando possibilitar a realização de ensaios com diferentes fluidos de percolação em amostras de GCL.

A montagem e validação do permeâmetro foram conduzidas no Laboratório de Geossintéticos da Universidade de Passo Fundo, seguindo rigorosamente os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis e com meticulosa atenção aos detalhes durante a execução.

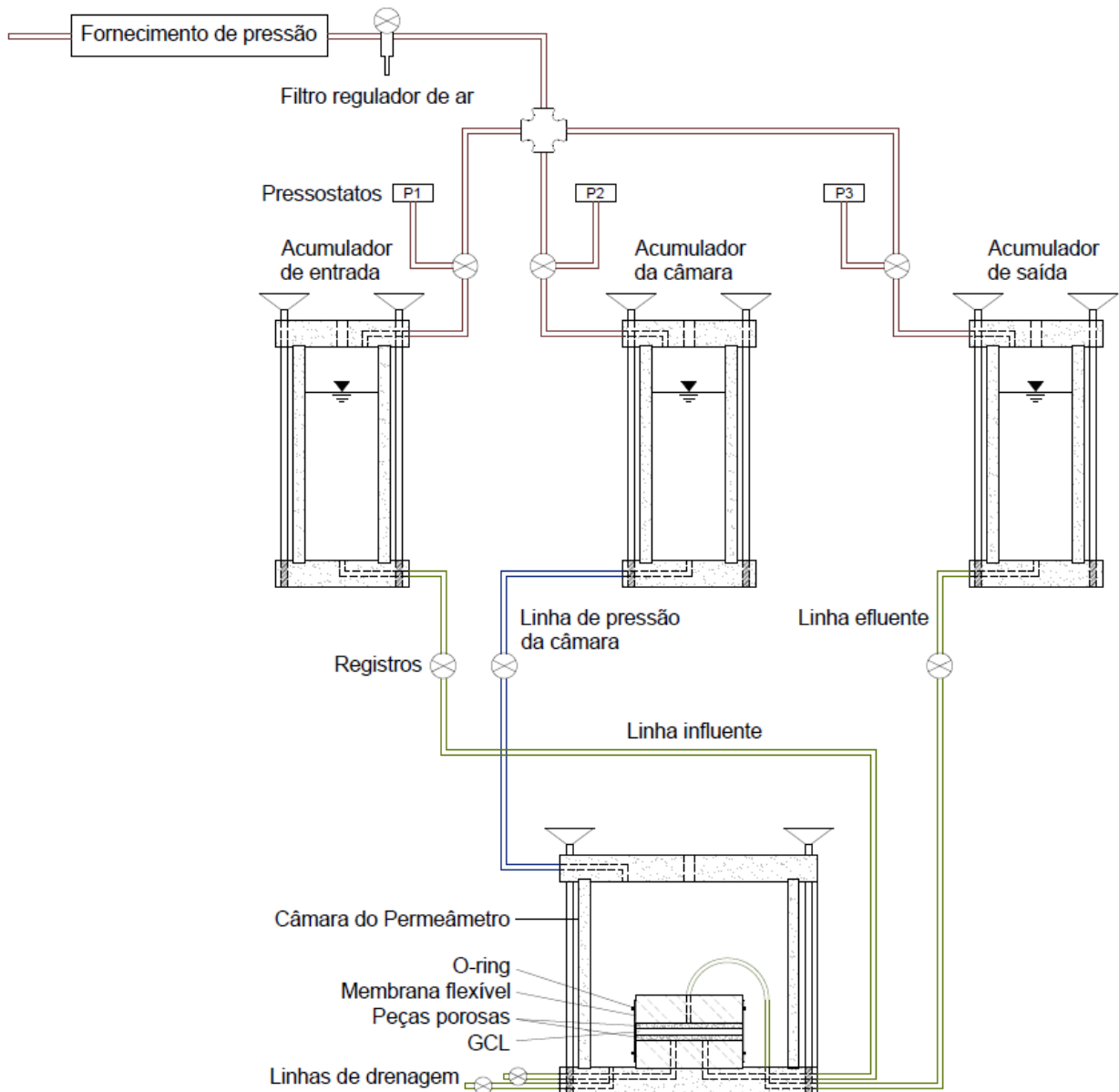
A norma ASTM D5887:2022 indica a utilização do método de teste apenas para fins de controle de qualidade de fabricação ou verificação de conformidade de GCLs, alertando que o valor do fluxo determinado não deve ser utilizado diretamente em cálculos de projeto de campo. A determinação do fluxo em situações de serviço é dependente de inúmeros fatores como, por exemplo, pressões de confinamento, espécie do fluido de percolação, gradiente hidráulico, grau de saturação e de hidratação do material.

A condutividade hidráulica pode ser calculada indiretamente pela medição da vazão de líquido através do GCL, seguindo o método de teste padronizado e, posteriormente, aplicando a Lei de Darcy. Para obter o valor da condutividade hidráulica, é necessário medir a espessura da amostra após o ensaio usando um paquímetro capaz de detectar variações de até 0,3 mm.

Na sequência, será discorrido com maior detalhe acerca dos materiais e dispositivos utilizados na execução do permeâmetro de parede flexível, bem como sobre os procedimentos de teste especificados pela norma ASTM D5887:2022, levando em consideração as orientações da norma ASTM D6766:2020 (*Standard test method for evaluation of hydraulic properties of geosynthetic clay liners permeated with potentially incompatible aqueous solutions*), que se refere a um método de avaliação das propriedades de GCLs permeados com diferentes soluções químicas. Na Figura 9, está apresentado um diagrama esquemático do sistema executado.

O sistema contempla uma câmara de ensaio e três reservatórios acumuladores de fluidos, todos mantidos sob pressão por meio de uma rede de ar comprimido.. Os três acumuladores servem para: alimentação da câmara de ensaio; alimentação da linha de fluxo influente; e alimentação da linha de fluxo efluente. O mecanismo foi executado de modo a garantir a manutenção das pressões hidráulicas constantes, através de registros adequados e pressostatos eletrônicos de precisão. Tanto a câmara de ensaio, quanto as linhas de fluxo possuem drenos que auxiliam na remoção de eventuais bolhas de ar por circulação de fluido.

Figura 9: Layout do ensaio de condutividade hidráulica.



Fonte: Autor (2023).

A linha de ar comprimido para pressurização dos acumuladores, assim como a linha de alimentação da câmara do permeâmetro, foram executadas com tubos de poliuretano 1/4" e conexões de engate rápido NPT 1/4". Para a conexão de entrada na câmara de ensaio, as linhas de fluxo influente e efluente foram executadas com tubos de teflon 1/4" e conexões em aço inoxidável com anilha NPT 1/4". A linha de fluxo efluente, que segue no interior da câmara, foi executada com tubo de teflon 1/8" e conexões em aço inoxidável com anilha NPT 1/8".

As peças de base e topo dos acumuladores foram fabricadas em aço inoxidável, com faces lisas, diâmetro igual a 125 mm e espessura igual a 25 mm. As células dos acumuladores foram confeccionadas em acrílico sem costura, com diâmetro interno igual a 69 mm, espessura igual a 10 mm e altura igual a 301 mm. A montagem dos acumuladores consistiu no encaixe das peças e na fixação do conjunto com hastes metálicas rosqueadas. Para completa vedação dos equipamentos, as peças possuem ranhuras para o recebimento de anéis de borracha (chamados de *o-rings*).

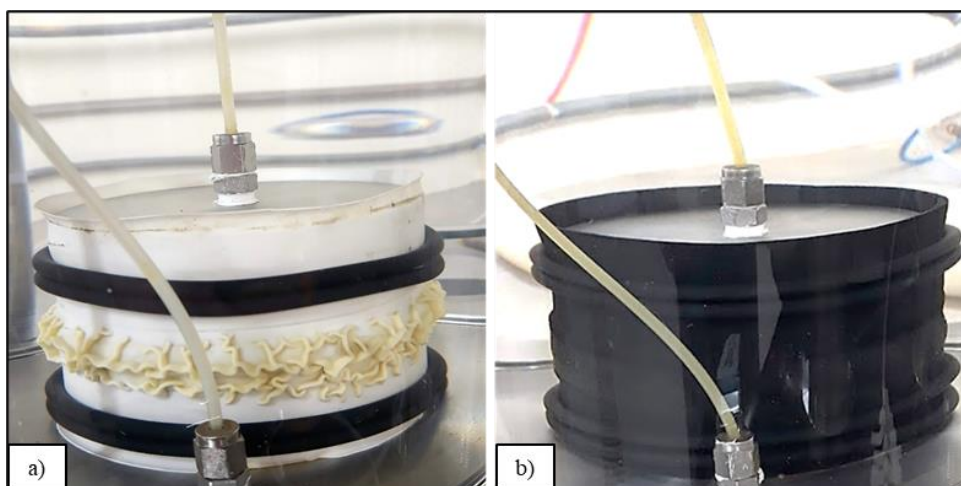
A célula do permeâmetro possui peças de base e topo fabricadas em aço inoxidável, com faces lisas, diâmetro igual a 241 mm, espessura igual a 25 mm, que, além de serem suportes do permeâmetro, possuem os orifícios para conexão das linhas de fluxo. A câmara foi confeccionada em parede de acrílico sem costura, com diâmetro interno igual a 186 mm, espessura igual a 9 mm e altura igual a 215 mm. A montagem da câmara do permeâmetro consistiu no encaixe das peças, com vedação através de *o-rings*, e na fixação do conjunto com hastes metálicas rosqueadas.

É relevante destacar que o acrílico pode ser suscetível a danos quando exposto a certos compostos orgânicos. Durante os ensaios, observou-se que uma das câmaras acumuladoras foi afetada quimicamente, resultando em danos à estrutura do acrílico por meio de microfissuras.

O ensaio de permeabilidade é configurado por um corpo de prova disposto entre dois discos porosos revestidos com papel filtro, encapsulados por uma membrana flexível e selados por dispositivos de base e topo (também chamados de *base cap* e *top cap*), os quais estão ligados às linhas de fluxo influente e efluente.

Para a realização dos ensaios, é possível utilizar diferentes tipos de membranas. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar membranas de látex para a percolação com água e membranas de elastômero nitrílico, reforçadas com bandagem têxtil na face externa, nos testes com biodiesel, devido à incompatibilidade química entre esse composto orgânico e a membrana de látex. A Figura 10a apresenta a membrana de látex após exposição e contato com biodiesel, evidenciando sua deterioração estrutural. Devido a esse comprometimento, a membrana de látex não é adequada para ser usada em ensaios de fluxo com combustíveis. Para testes que envolvam percolação deste tipo de contaminante, é recomendada a utilização de membranas de nitrílico, conforme demonstrado na Figura 10b.

Figura 10: Membranas flexíveis para ensaio.



Fonte: Autor (2023).

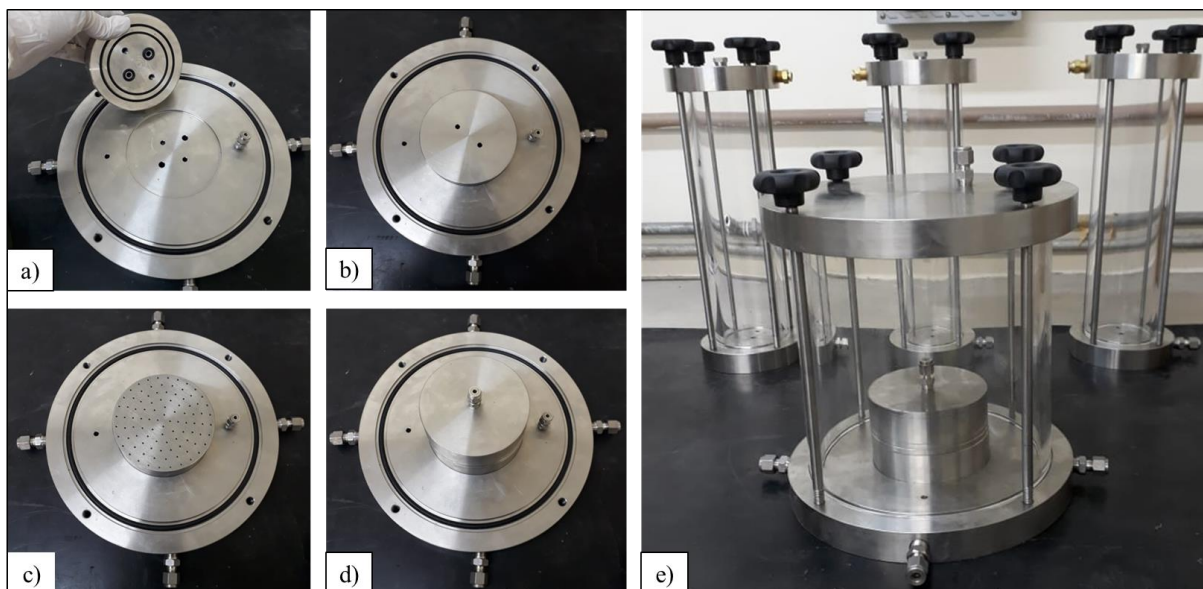
As peças porosas foram fabricadas em aço inoxidável, com faces lisas, diâmetro igual a 100 mm (igual ao diâmetro da amostra de GCL), espessura igual a 5 mm, com furos de diâmetro igual a 1 mm, espaçados de forma homogênea ao longo de toda superfície, e são utilizadas para distribuição mais homogênea do fluxo. A fim de prevenir a entrada de materiais pelos poros das peças, fez-se uso de papel filtro de diâmetro igual a 100 mm, entre o topo e a base das peças porosas e a amostra. Indica-se a utilização de filtros com capacidade de reter partículas maiores que 11 μm .

Os dispositivos *base cap* e *top cap* foram fabricados em aço inoxidável, com faces lisas, diâmetro igual a 100 mm (igual ao diâmetro da amostra de GCL), espessura igual a 27 mm, e têm como função a prevenção de vazamentos, movimentação ou inclinação do corpo de prova. A vedação do contato entre a base da câmara de ensaio e o *base cap* foi através de *o-rings*. A Figura 11 ilustra o conjunto de peças fabricadas para a construção do permeâmetro.

A membrana flexível é utilizada para envolver o conjunto que contém o corpo de prova e garantir proteção contra possíveis vazamentos. Durante manuseio, deve-se evitar o esticamento do material acima de 95% o diâmetro das peças. A membrana foi selada ao conjunto através de *o-rings* apertados contra as peças de base e topo. É indicado que o diâmetro interno dos *o-rings* de selamento seja menor que 90% o diâmetro das peças.

Para montagem do corpo de prova, a membrana foi posicionada envolta aos dispositivos sobrepostos, fixando e selando o conjunto nas peças *base cap* e *top cap* pela inserção dos *o-rings*, estes instalados com auxílio de um dispositivo para expansão e posicionamento sobre o conjunto.

Figura 11: Conjunto de peças principais do permeâmetro a) base do permeâmetro e face inferior do *base cap*; b) *base cap* fixado; c) disco poroso; d) *top cap* e) conjunto de câmaras.



Fonte: Autor (2023).

A vazão, ou volume de fluxo, foi obtida através da diferença de massa dos acumuladores das linhas de entrada (influyente) e saída (efluente), utilizando uma balança eletrônica com capacidade de 16,2 kg e precisão de 0,1 g.

Após a construção do permeâmetro e a verificação de sua estanqueidade, foram realizados testes preliminares para avaliar a qualidade do equipamento e identificar quaisquer irregularidades. Os resultados desses testes preliminares foram positivos e estão registrados no trabalho de Favretto et al. (2022). Posteriormente, para validar o permeâmetro, foram realizados testes específicos de permeabilidade em amostras de GCL, cujos resultados estão detalhados no item 4.3.3.1.

4.3. Análise dos resultados do programa experimental

4.3.1. Considerações iniciais

Nesta seção, serão apresentados os resultados e discussões da pesquisa que teve como objetivo avaliar a permeabilidade de um geossintético bentonítico em contato com o biodiesel. Os ensaios foram realizados em laboratório utilizando um permeâmetro de parede flexível, desenvolvido na fase inicial deste trabalho, que permitiu a medição da condutividade hidráulica do GCL. A análise dos resultados está organizada em subseções, que abordam os

ensaios de índice de expansão da bentonita e de permeabilidade do GCL. Os testes foram realizados considerando diferentes variações, incluindo o fluxo de percolação com água e biodiesel em amostras de GCL hidratadas e saturadas com água, a percolação de biodiesel em amostras hidratadas e saturadas com biodiesel, e a percolação de biodiesel em amostras previamente submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, hidratadas e saturadas com água. Ao final, é realizada uma análise geral comparando os ensaios realizados e avaliando seus comportamentos.

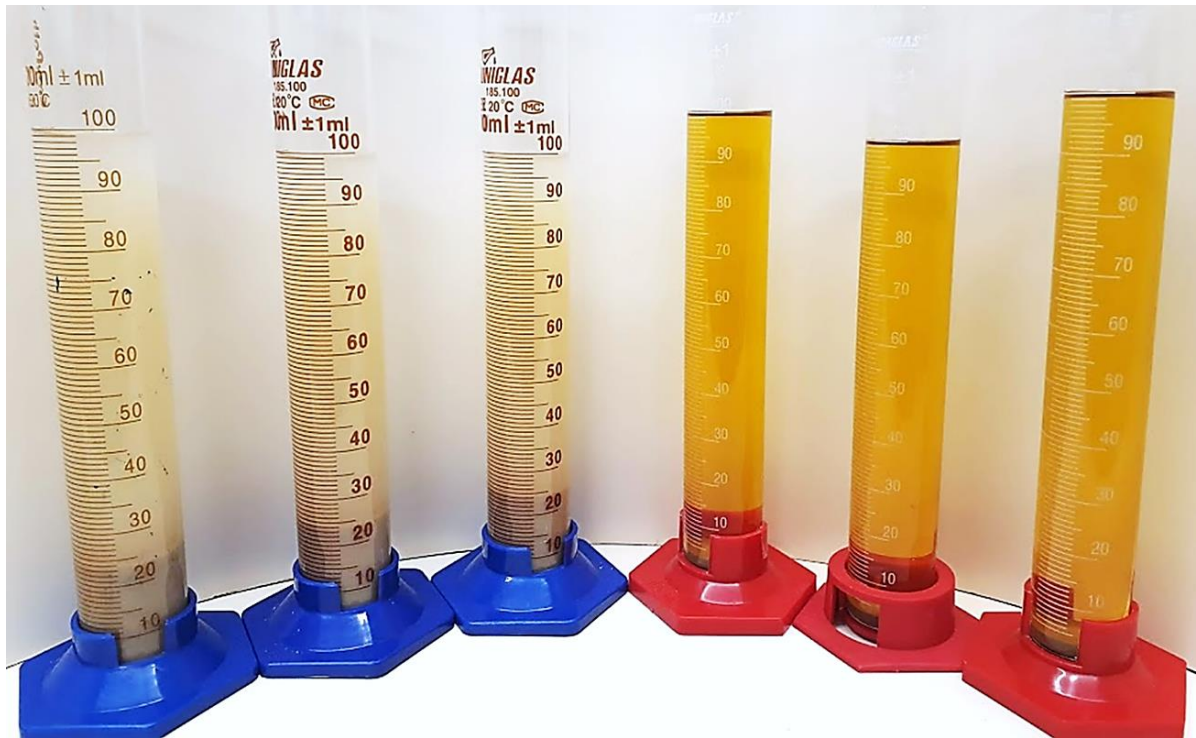
4.3.2. Índice de expansão da bentonita

Os ensaios de expansão da bentonita foram realizados em triplicata, utilizando 2 g da argila em meio aquoso e em biodiesel. Observou-se uma elevada capacidade de expansão da bentonita hidratada em água destilada, com valores médios de 24 mL/2g. Esses valores estão de acordo com as especificações do GCL fornecidas pelo fabricante Maccaferri (2010), apresentadas na Tabela 4, com as recomendações técnicas de Heerten et al. (1993) apud Koerner (2005) e com os resultados de Zanella (2019).

Por outro lado, durante a tentativa de hidratação da bentonita com biodiesel, não foi observada qualquer expansão. Esse comportamento também foi relatado por Zanella (2019) em seus estudos. A Figura 12 ilustra o resultado dos ensaios. As provetas com base azul representam o fluido água, enquanto as provetas com base vermelha representam o biodiesel. É possível notar claramente que, em meio aquoso, o volume de material particulado atingiu a marcação expressiva de 24 mL, enquanto em meio ao biodiesel, o volume ocupado no cilindro foi o mesmo representado por 2 g de bentonita seca.

A não expansão da bentonita com biodiesel pode ser explicada pela composição química das moléculas. A bentonita possui cargas negativas em sua superfície, o que permite que ela adsorva moléculas carregadas positivamente ou que possuem grupos polares em sua estrutura. No entanto, as moléculas do biodiesel são compostas por longas cadeias carbônicas que não possuem carga ou grupos polares significativos, o que dificulta a interação com as superfícies da bentonita. Deste modo, a capacidade de expansão da bentonita em contato com o biodiesel é reduzida ou insignificante, como observado nos ensaios realizados.

Figura 12: Ensaio de expansão da bentonita presente no GCL em água (bases de cor azul) e em biodiesel (bases de cor vermelha).



Fonte: Autor (2023).

A eficiência de uma barreira com GCL está diretamente associada à baixa condutividade hidráulica do material, que, por sua vez, é dependente da expansão da bentonita constituinte. Essa expansão é responsável pelo preenchimento dos espaços interlamelares do argilomineral. Portanto, por meio dos ensaios de expansão realizados neste estudo, fica evidenciada a necessidade de pré-hidratação com água antes que o GCL seja submetido ao fluxo do contaminante biocombustível. É importante destacar que o comportamento não expansivo da bentonita em contato com o biodiesel pode afetar a permeabilidade do GCL, e essa questão será avaliada nos ensaios subsequentes com GCL pré-hidratado e permeado com biodiesel.

4.3.3. Ensaio de permeabilidade

A Tabela 6 apresenta uma síntese dos dados obtidos nos ensaios de permeabilidade para uma visão geral dos resultados.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados em conformidade com as normas ASTM D5887:2022 e ASTM D6766:2020, considerando os detalhes e condições descritas na

metodologia deste trabalho. Os resultados obtidos são importantes para o avanço no desenvolvimento de soluções de impermeabilização mais eficientes e seguras para o armazenamento e transporte de biodiesel. Ao longo das seções seguintes, serão apresentados e discutidos em detalhes os resultados obtidos em cada tipo de ensaio, permitindo uma análise mais aprofundada de cada aspecto avaliado.

Tabela 6: Resultados de condutividade hidráulica do GCL com percolação de água e biodiesel.

Ensaio	Líquido de hidratação	Líquido de percolação	Ciclos de umed. e secagem	Tensão efetiva σ' (kPa)	Diferença de pressão Δu (kPa)	Condutividade hidráulica k (m/s)	Condutividade hidráulica média $k_{m\acute{e}a}$ (m/s)
A-1						3,9E-11	
A-2	Água filtrada	Água filtrada	-	27,5	21,0	7,1E-11	4,9E-11
A-3						3,6E-11	
LD-1						1,3E-10	
LD-2	Água filtrada	Biodiesel	-	27,5	21,0	1,1E-10	9,9E-11
LD-3						6,0E-11	
B-1						2,4E-09	
B-2	Biodiesel	Biodiesel	-	27,5	15,0	2,8E-09	2,9E-09
B-3						3,4E-09	
US10-1						2,3E-09	
US10-2	Água filtrada	Biodiesel	10	27,5	41,0	2,1E-09	3,3E-09
US10-3						5,6E-09	
US40-1						1,2E-08	
US40-2	Água filtrada	Biodiesel	40	27,5	41,0	1,2E-08	1,2E-08
US40-3						1,3E-08	

Fonte: Autor (2023).

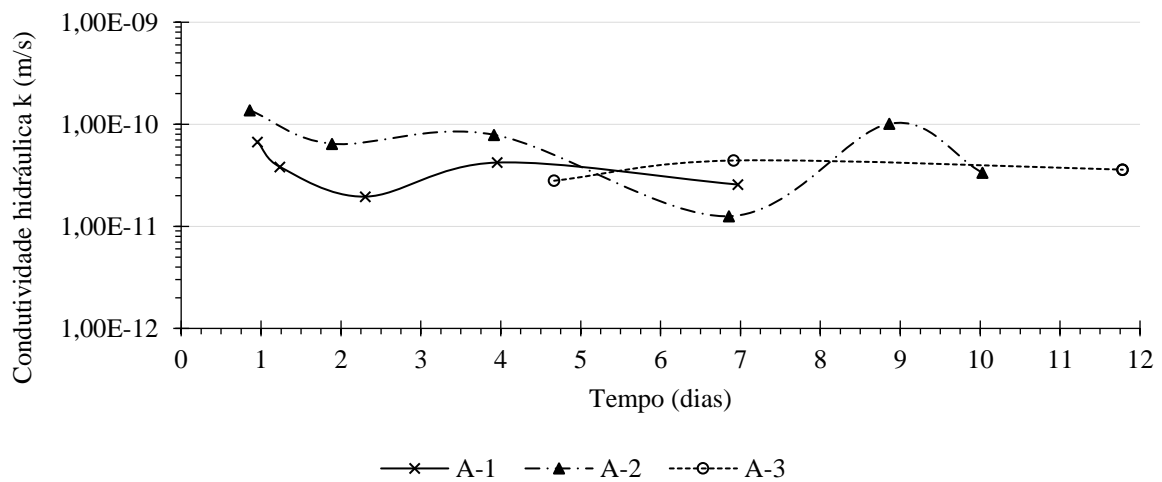
4.3.3.1. Condutividade hidráulica do GCL com percolação de água

Além de obter os parâmetros de permeabilidade, os ensaios de condutividade hidráulica realizados em amostras de GCL percoladas com água possibilitaram a validação do permeâmetro de parede flexível desenvolvido na pesquisa. A Figura 13 apresenta o resultado dos ensaios com percolação de água (ensaios A).

Os valores médios de condutividade hidráulica do GCL registrados nos ensaios apresentaram variação entre $3,6 \times 10^{-11}$ m/s e $7,1 \times 10^{-11}$ m/s, resultando em uma média final

de $4,9 \times 10^{-11}$ m/s, para uma tensão efetiva de 27,5 kPa. É importante ressaltar que esse resultado é próximo do valor de referência indicado pelo fabricante do geossintético Maccaferri (2010), que é de até 5×10^{-11} m/s, e também é consistente com os valores de estudos anteriores com percolação de água, conforme evidenciado na tabela que apresenta os resultados do artigo (item 4.1, parte I dos resultados da tese). Esses resultados atestam a confiabilidade dos ensaios realizados e a eficiência do equipamento utilizado.

Figura 13: Condutividade hidráulica do GCL com percolação de água.



Fonte: Autor (2023).

Durante os ensaios de permeabilidade com água, foi observada uma leve oscilação nos valores medidos. No entanto, vale destacar que essa variação está dentro da faixa esperada para ensaios de condutividade hidráulica em materiais de baixa permeabilidade, como é o caso dos GCLs, e não compromete a validade dos resultados obtidos. Essa variabilidade pode estar possivelmente relacionada ao procedimento de medição de fluxo adotado no projeto e construção do permeâmetro, que se baseia na aferição da diferença de massa entre os reservatórios influente e efluente para estimar o volume percolado no período analisado. Como sugestão para melhoria futura do equipamento e redução da variabilidade dos resultados, seria possível considerar o uso de duas balanças, uma para cada reservatório. Essa abordagem permitiria um controle mais preciso durante as medições, ajudando a mitigar as influências da operação manual e aumentando a confiabilidade dos resultados.

Embora tenham sido tomadas precauções para controlar potenciais variações, como a limitação da posição dos reservatórios na balança, é importante ressaltar que operações manuais durante a medição podem influenciar os resultados. Com o objetivo de minimizar possíveis interferências nas medições de permeabilidade, optou-se por não realizar medições

em intervalos muito curtos de percolação. Isso se deve ao fato de que a baixa permeabilidade do GCL ao fluxo de água pode tornar os resultados mais sensíveis a variações na operação do permeâmetro. Além disso, é importante destacar que o GCL é um material poroso que pode sofrer variações na permeabilidade devido às interações químicas entre a argila e o fluido de percolação, bem como ao rearranjo das partículas durante o processo de equilíbrio. Essas variáveis podem contribuir para a instabilidade observada nos resultados da permeabilidade do GCL durante os ensaios.

4.3.3.2. Condutividade hidráulica do GCL com percolação de biodiesel

4.3.3.2.1. Ensaios de longa duração

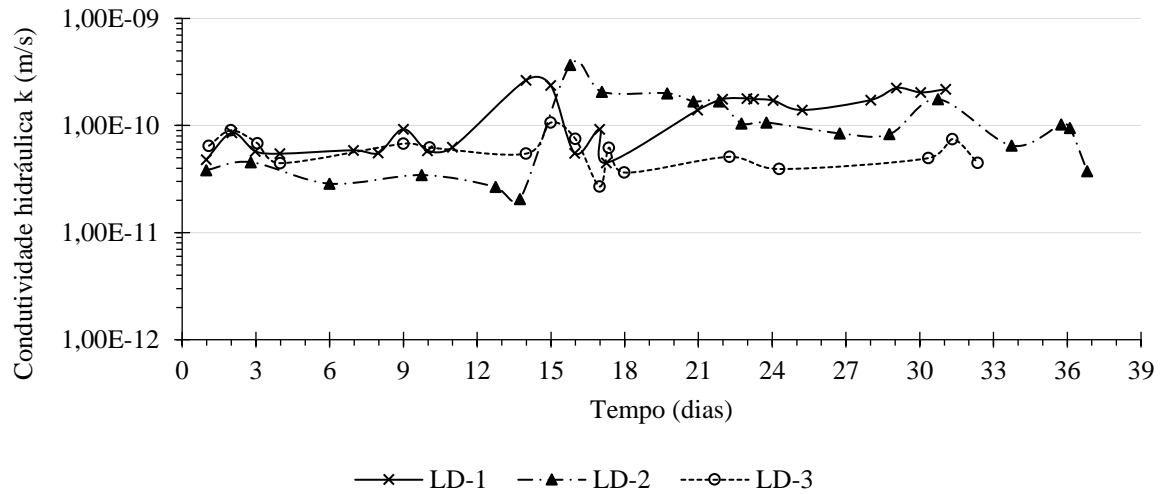
As mesmas amostras de GCL utilizadas nos ensaios de validação do permeâmetro foram submetidas a ensaios de longo prazo com percolação de biodiesel, apenas procedendo a troca do fluido nas linhas influente e efluente. O fluxo de biodiesel foi imposto às amostras por no mínimo 30 dias. O tempo de duração do ensaio foi determinado com base no tempo hábil de pesquisa e na capacidade do equipamento e recursos disponíveis para realizá-lo.

É importante salientar que o termo "longa duração" pode variar de acordo com o contexto. No caso dos ensaios de permeabilidade que foram realizados neste estudo, um ensaio de 30 dias pode ser considerado de longa duração, visto que sua execução ocorreu em laboratório. No entanto, deve ser ressaltado que os resultados obtidos através destes ensaios não devem ser extrapolados para condições de campo sem o devido aprofundamento experimental.

A Figura 14 apresenta o resultado dos ensaios de longa duração com percolação de biodiesel (ensaios LD). Conforme já destacado anteriormente, a variabilidade dos resultados pode ser atribuída tanto às operações manuais de medição da vazão, como também à intrínseca variabilidade do arranjo amostral do GCL, devido, principalmente, à presença de material particulado em seu núcleo.

Durante os ensaios de percolação com biodiesel em amostras hidratadas com água, foram registrados valores médios de condutividade hidráulica do GCL que variaram entre $1,1 \times 10^{-10}$ m/s e $6,0 \times 10^{-11}$ m/s, com média final de $9,9 \times 10^{-11}$ m/s, para uma tensão efetiva de confinamento de 27,5 kPa. Analisando os gráficos, é possível observar que houve um pico significativo de aumento de permeabilidade em torno de 15 dias após o início do experimento, elevando a média para cerca de duas vezes o valor registrado no início do ensaio.

Figura 14: Condutividade hidráulica do GCL com percolação de biodiesel a longo prazo.



Fonte: Autor (2023).

Em estudo anterior realizado por Zanella (2019) com amostras do mesmo GCL, hidratadas com água e percoladas com biodiesel utilizando um permeâmetro de parede rígida, foi obtido um valor médio de mesma ordem em 30 dias de ensaio, igual a $5,5 \times 10^{-11}$ m/s, a uma pressão de confinamento de 25 kPa.

Embora não haja mais estudos específicos sobre a condutividade hidráulica de GCLs em barreiras de contenção para o biodiesel, foram realizadas análises comparativas com outros combustíveis em condições similares de aplicação.

Os resultados desta pesquisa com biodiesel foram semelhantes aos relatados por Mazzieri et al. (2000) e Pitanga e Vilar (2007), que testaram amostras de GCL hidratadas com água e percoladas com etanol em um permeâmetro de parede flexível, obtendo valores de $1,0 \times 10^{-10}$ m/s e $6,0 \times 10^{-11}$ m/s, respectivamente.

Ao comparar os resultados de permeabilidade do GCL para a percolação de biodiesel com os ensaios realizados com água (ensaios A), constatou-se um aumento de cerca de 2 vezes na condutividade hidráulica. É importante enfatizar que, embora tenha havido um aumento na permeabilidade do material, esse aumento é consideravelmente baixo, o que é positivo para sua aplicação como barreiras hidráulicas para contenção de contaminantes.

A elevação da condutividade hidráulica do GCL percolado com biodiesel, em comparação aos ensaios com percolação de água, assemelha-se ao aumento registrado nos ensaios de Zanella (2019), que foi de aproximadamente 3 vezes. Por outro lado, nos estudos realizados com etanol por Mazzieri et al. (2000) e Pitanga e Vilar (2007), a elevação da condutividade hidráulica foi 10 e 6 vezes maior, respectivamente.

Ao contrário do desempenho observado com biodiesel, estudos que investigaram a permeabilidade de GCLs percolados com diesel ártico em permeâmetros de parede flexível revelaram resultados distintos. Em tensões efetivas de confinamento baixas, próximas a 15 kPa, a condutividade hidráulica do geocomposto pode diminuir em até uma ordem de grandeza quando comparada à percolação com água, conforme descrito nos estudos de Rowe et al. (2004) e Hosney e Rowe (2014). Essa redução significativa na permeabilidade ocorre devido à tensão interfacial entre os fluidos presentes nos poros da bentonita. Por outro lado, Rowe et al. (2008), ao considerar tensões efetivas maiores, que variaram até 41 kPa, verificaram que a condutividade hidráulica do GCL para fluxo de Jet A-1 foi cerca de 2,5 vezes maior do que para água.

Em fluxos multifásicos, a viscosidade dos fluidos influencia diretamente a tensão interfacial entre as fases. A tensão interfacial é a força que atua na interface entre dois fluidos imiscíveis, como água e óleo, e é responsável pela resistência ao fluxo entre as fases. Quanto maior a viscosidade de um fluido, maior será a resistência ao fluxo e, conseqüentemente, maior será a tensão interfacial. Isso significa que o GCL previamente saturado com água dificulta a passagem do biodiesel, principalmente nos poros menores, onde a água prevalece.

Dentre os fluidos analisados, o biodiesel apresenta a maior viscosidade cinemática, com um valor de 4,29 mm²/s a 40°C (BSBIOS, 2019), seguido pelo combustível de aviação Jet A-1, que varia de 1,0 a 2,5 mm²/s a 40°C (SHELL, 2023), e o etanol, com um valor de 1,54 mm²/s a 20°C (FERNANDEZ e QUIGLEY, 1985). A variação no aumento da condutividade hidráulica observada em cada estudo após a percolação dos contaminantes, em comparação com os valores de percolação da água, pode estar relacionada à viscosidade de cada material. Verificou-se que o menor aumento ocorreu neste estudo com o biodiesel (2 vezes), seguido pelo estudo de Rowe et al. (2008) (2,5 vezes), Pitanga e Vilar (2007) (6 vezes) e Mazzieri et al. (2000) (10 vezes). Isso evidencia que fluidos com viscosidade mais elevada apresentam maior dificuldade de percolação por meio das barreiras de GCL saturadas com água.

A barreira de GCL em estudo, apresentou desempenho satisfatório para a contenção de biodiesel quando pré-hidratada e saturada com água. Entretanto, é importante ressaltar que a determinação do prazo de bom desempenho da barreira de contenção de químicos orgânicos não deve ser baseada somente em ensaios de laboratório, uma vez que a sua eficácia em situações reais de serviço é influenciada por diversos fatores. Por isso, é altamente recomendável complementar o estudo com ensaios in situ que simulem as condições reais de contaminação com biodiesel, considerando pressões de confinamento, gradiente hidráulico,

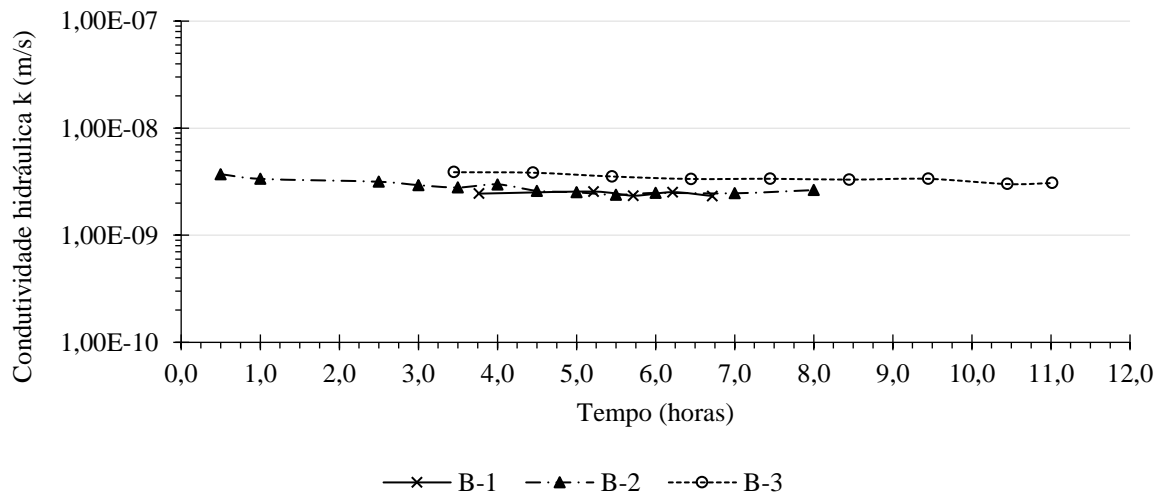
grau de saturação e hidratação do GCL, a fim de proporcionar uma avaliação ainda mais precisa da sua performance.

4.3.3.2.2. Ensaios com pré-hidratação de biodiesel

Para avaliar a influência da correta hidratação do material na eficiência da barreira de GCL, foram realizados ensaios de condutividade hidráulica com percolação de biodiesel em amostras de GCL pré-hidratadas e saturadas com o mesmo biocombustível (ensaios B).

Os resultados dos ensaios, apresentados na Figura 15, mostram que durante os ensaios com saturação e percolação com biodiesel, foram registrados valores médios de condutividade hidráulica do GCL que variaram entre $2,4 \times 10^{-9}$ m/s e $3,4 \times 10^{-9}$ m/s, com média final de $2,9 \times 10^{-9}$ m/s, a uma tensão efetiva de confinamento de 27,5 kPa.

Figura 15: Condutividade hidráulica do GCL com pré-hidratação e percolação de biodiesel.



Fonte: Autor (2023).

É importante destacar que os valores obtidos nos ensaios indicam um aumento significativo na permeabilidade dos materiais em relação às amostras pré-hidratadas e saturadas com água. Para a percolação de água (ensaios A), houve um aumento de quase 60 vezes, enquanto que para a percolação de biodiesel (ensaios LD), houve um aumento de cerca de 30 vezes, representando pouco mais de uma ordem de grandeza.

Os estudos realizados por Mazzieri et al. (2000) apresentaram valores de condutividade hidráulica de GCLs permeados com etanol puro, em amostras hidratadas também com etanol, usando um permeômetro de parede flexível. Os resultados mostraram

uma condutividade hidráulica da ordem de $5,5 \times 10^{-8}$ m/s, o que representa um aumento de mais de duas ordens de magnitude em relação às amostras pré-hidratadas com água antes da percolação com etanol.

Já nos estudos realizados por Rowe et al. (2005) e Rowe et al. (2007), foram apresentados resultados de amostras de GCLs não saturadas (grau de saturação $S_r = 60\%$) com fluxo de diesel ártico em um permeâmetro de parede rígida, a 5°C e 20°C . Os valores de condutividade hidráulica encontrados foram de $1,6 \times 10^{-9}$ m/s e $1,6 \times 10^{-8}$ m/s, respectivamente, representando um aumento de duas a três ordens de grandeza em relação às amostras pré-hidratadas com água antes da percolação com diesel Jet-A1.

Ao comparar com os dados expostos na literatura, constata-se que o aumento de permeabilidade de GCLs não hidratados e saturados previamente com água e expostos a combustíveis é mais discreto para fluxo de biodiesel do que para fluxo de etanol e diesel ártico, os quais apresentaram um aumento mais expressivo.

Devido à maior permeabilidade do GCL nesses testes com hidratação com biodiesel, as medições de fluxo volumétrico foram menos sensíveis a pequenas variações tanto amostrais quanto de execução dos ensaios, como evidenciado nos gráficos em que os valores de condutividade hidráulica permaneceram praticamente inalterados ao longo de todo o período experimental.

A partir desses resultados, ressalta-se a importância da saturação prévia do GCL com água antes de sua instalação e exposição ao contaminante, com o intuito de prevenir a contaminação do solo e do lençol freático.

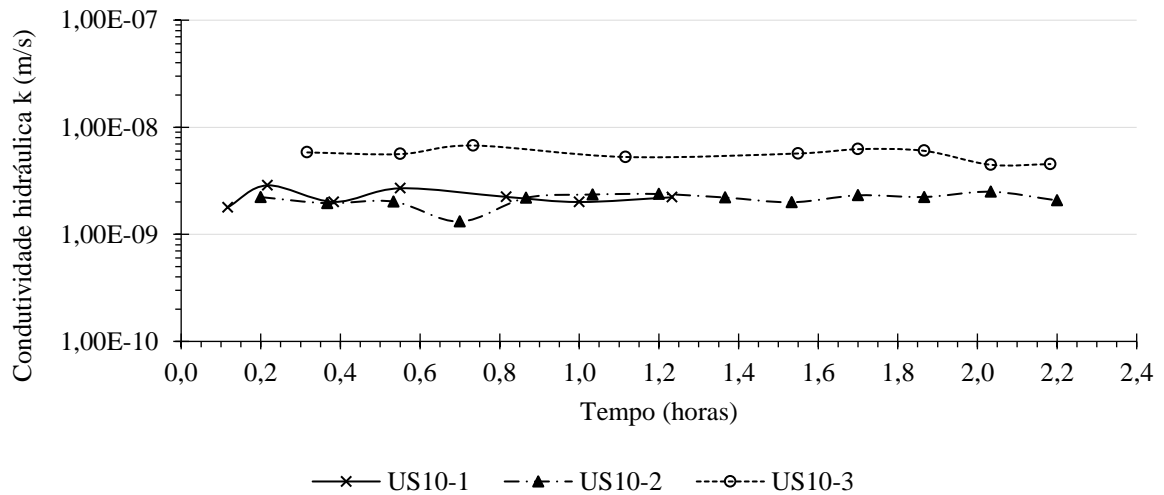
4.3.3.2.3. Ensaios após 10 ciclos de umedecimento e secagem

Os ciclos de umedecimento e secagem em GCLs referem-se a uma técnica de envelhecimento acelerado usada para avaliar a estabilidade do material em relação à variação de umidade, visto que a expansão e contração excessivas podem levar a fissuras e desintegração do material, o que reduz sua eficácia como barreira impermeabilizante. Nesta série de ciclos, o objetivo foi avaliar a capacidade do GCL de resistir à expansão e contração resultantes de 10 mudanças repetidas de umidade, ou então, 10 ciclos completos de umedecimento e secagem (ensaios US10). A Figura 16 apresenta o resultado desses ensaios.

Os ensaios de permeabilidade em amostras com 10 ciclos prévios de variação extrema de umidade resultaram em valores médios de condutividade hidráulica do GCL que variaram entre $2,1 \times 10^{-9}$ m/s e $5,6 \times 10^{-9}$ m/s, com média final de $3,3 \times 10^{-9}$ m/s, sob tensão efetiva de

27,5 kPa. A Figura 17 ilustra as fissuras causadas por retração devido aos ciclos de umedecimento e secagem em amostras de GCL.

Figura 16: Condutividade hidráulica do GCL após 10 ciclos de umedecimento e secagem com percolação de biodiesel.



Fonte: Autor (2023).

Figura 17: Fissuras em amostras de GCL expostas aos ciclos de umedecimento e secagem.



Fonte: Autor (2023).

Uma comparação dos resultados revela que o material apresentou um aumento de permeabilidade de aproximadamente 70 vezes em relação aos ensaios com água (ensaios A), cerca de 35 vezes em relação aos ensaios com biodiesel em amostras hidratadas com água (ensaios LD) e 1,2 vezes nas amostras saturadas e percoladas com o biocombustível (ensaios B).

Esses resultados evidenciam que o desempenho efetivo do GCL como barreira hidráulica está fortemente ligado à sua capacidade de expansão com a presença de água, e a perda dessa umidade pode resultar em retração do material, abertura de fissuras e formação de macroporos no argilomineral. Além disso, os resultados indicam que a exposição do GCL a ciclos subsequentes de hidratação e secagem pode agravar os efeitos negativos de retração do argilomineral, enfatizando a afirmação de Thiel et al. (2006) de que os ciclos de umedecimento e secagem têm um forte impacto na contração do GCL, em contraste com o evento de secagem isoladamente.

Conforme Broderick e Daniel (1990) destacaram, a formação de fissuras na bentonita pode ser atribuída à interação com compostos químicos orgânicos, que tendem a contrair a dupla camada de íons presente nas argilas, causando a floculação das partículas e uma redução na estrutura do solo, o que pode levar à formação de fissuras.

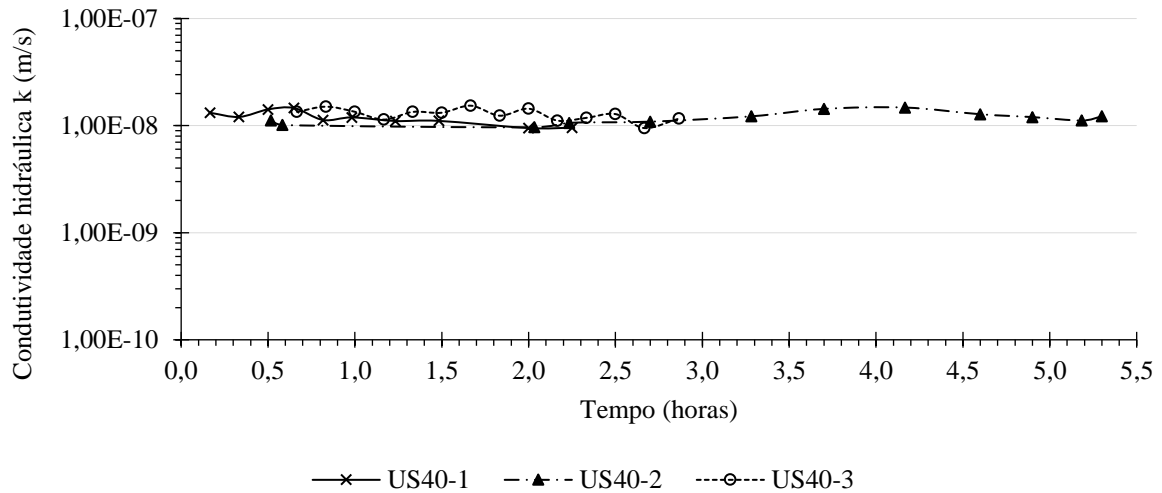
Após avaliar amostras de GCL submetidas a condições climáticas extremas, Mukunoki et al. (2005) constataram que o volume de poros na bentonita aumentou significativamente após ciclos sucessivos de gelo e degelo. Rowe et al. (2006) explicam que quando a bentonita é submetida a temperaturas abaixo de zero, ocorre congelamento nos poros livres maiores e, à medida que a água congela, ela atrai água de outras partes da argila, aumentando o tamanho dos macroporos devido à expansão dessa água. Os autores também afirmam que ciclos repetidos de congelamento e descongelamento podem ainda expandir esses macroporos à medida que o processo é repetido.

4.3.3.2.4. Ensaios após 40 ciclos de umedecimento e secagem

Foram realizados testes de permeabilidade com percolação de biodiesel em amostras de GCL submetidas a 40 ciclos de umedecimento e secagem, a fim de se obter parâmetros hidráulicos mais precisos do material frente às variações de umidade e avaliar o impacto da quantidade de ciclos na eficiência hidráulica do GCL. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 18.

Os resultados obtidos demonstram que os valores médios de condutividade hidráulica do GCL exposto a 40 ciclos de umedecimento e secagem variaram entre $1,2 \times 10^{-8}$ m/s e $1,3 \times 10^{-8}$ m/s, com média final de $1,2 \times 10^{-8}$ m/s, para uma tensão de confinamento efetiva de 27,5 kPa.

Figura 18: Condutividade hidráulica do GCL após 40 ciclos de umedecimento e secagem com percolação de biodiesel.



Fonte: Autor (2023).

Em comparação com os outros ensaios, constata-se um aumento significativo na permeabilidade, cerca de 250 vezes superior aos ensaios com percolação de água (ensaios A), 120 vezes superior aos ensaios com biodiesel (ensaios LD), 4 vezes superior aos ensaios com amostras saturadas e percoladas com biodiesel (ensaios B) e 3,7 vezes superior aos ensaios submetidos a 10 ciclos prévios de molha e seca (ensaios US10).

Os resultados destacam a importância do tipo de fluido percolante e das condições de hidratação do GCL no seu desempenho como barreira hidráulica. Observou-se que a condutividade hidráulica foi maior em amostras previamente submetidas a ciclos de hidratação e desidratação e posterior percolação com biodiesel. Isso ocorre devido à dificuldade desse fluido adentrar no espaço interlamelar da bentonita e à formação de poros maiores decorrente da retração do GCL durante a secagem. Ademais, foi constatado que a retração do GCL aumenta à medida que o número de ciclos aumenta no intervalo de 10 a 40, como indicado pelo aumento do valor médio da condutividade hidráulica. No entanto, esse aumento pode ser considerado discreto, devido à grande diferença de ciclos entre os testes realizados.

Esta análise sobre a influência dos ciclos de hidratação e desidratação em GCLs pode auxiliar os projetistas na avaliação do potencial de retração de painéis de GCL, de acordo com a quantidade de ciclos a que o material é exposto, contribuindo para o desenvolvimento de barreiras geocompostas mais seguras.

É importante ressaltar que, para assegurar a eficácia das barreiras hidráulicas na prevenção da contaminação do solo e do lençol freático, é crucial considerar não apenas as condições de umidade do geocomposto, mas também ter conhecimento quanto ao tipo de contaminante a ser controlado e sua interação física e química com a bentonita. Além disso, é necessário avaliar cuidadosamente os materiais utilizados na construção das barreiras hidráulicas e monitorar regularmente sua integridade e desempenho ao longo do tempo, especialmente com base nos resultados dos ensaios de condutividade hidráulica do GCL.

Uma maneira de controle efetivo da barreira é através da realização de experimentos paralelos em locais específicos designados para testes de controle, que possuam as mesmas características e condições daquela em operação. Essa abordagem permitirá uma comparação direta e a detecção precoce de quaisquer desvios ou deteriorações que possam comprometer a eficácia da barreira hidráulica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentou valores satisfatórios de condutividade hidráulica para o geocomposto bentonítico, demonstrando boa performance do GCL como barreira de contenção de biocombustíveis, desde que seja previamente hidratado com água.

Para percolação de água, a condutividade hidráulica do GCL foi de $4,9 \times 10^{-11}$ m/s. A precisão da medida de condutividade hidráulica obtida, próxima do valor de referência do fabricante, confirma a funcionalidade do equipamento desenvolvido e evidencia a importância de uma execução atenta e rigorosa na construção do permeâmetro.

Durante os ensaios de percolação com biodiesel, o GCL pré-hidratado com água apresentou um valor médio de condutividade hidráulica de $9,9 \times 10^{-11}$ m/s, cerca de 2 vezes maior do que nos ensaios com percolação de água. No entanto, ao analisar o pior cenário de fluxo com biodiesel, por meio dos testes em amostras de GCL hidratadas e saturadas com biodiesel, houve um aumento significativo da permeabilidade do material, de quase 30 vezes em comparação com as amostras pré-hidratadas e saturadas com água.

Com base nestes resultados, é importante salientar a necessidade de saturar previamente o GCL com água antes de instalá-lo e expô-lo ao contaminante, uma vez que a eficácia da barreira de GCL para conter o biodiesel é diretamente afetada pelos parâmetros de hidratação e saturação do geocomposto. Além disso, os testes de expansão realizados mostraram que a bentonita hidratada em água apresentou uma elevada capacidade de expansão, enquanto nenhum aumento de volume foi observado quando exposto ao biodiesel.

Os ensaios de permeabilidade em amostras com 10 e 40 ciclos prévios de variação extrema de umidade e percolação com biodiesel resultaram em valores médios de condutividade hidráulica do GCL de $3,3 \times 10^{-9}$ m/s e $1,2 \times 10^{-8}$ m/s, respectivamente. Esses resultados indicam que a quantidade de ciclos de hidratação e desidratação do geocomposto bentonítico exerce uma importante influência na sua performance hidráulica. Observou-se que, para a quantidade de ciclos estudada, quanto maior o número de ciclos, maior a permeabilidade da barreira para percolação de biodiesel.

A resposta hidráulica do GCL como barreira impermeável para contenção de combustível mostrou-se efetiva, indicando a viabilidade técnica de seu uso para contenção de biodiesel. É importante ressaltar, contudo, que uma hidratação adequada do material do GCL antes de sua exposição ao composto orgânico é crucial, assim como a importância de considerar possíveis variações de umidade durante a operação.

Os resultados deste estudo representam uma contribuição significativa para o avanço científico e o desenvolvimento de soluções mais eficientes e seguras de impermeabilização e controle de contaminação por biodiesel, ao identificar lacunas e oportunidades para pesquisas futuras através do uso de índices bibliométricos. Entretanto, é importante destacar que uma compreensão mais completa da efetividade das barreiras com GCL em sistemas de contenção de biocombustíveis a longo prazo requer a exploração de condições reais de contaminação em campo, considerando as pressões de confinamento e gradiente hidráulico aos quais as barreiras são comumente expostas, além das condições de hidratação do geocomposto.

Embora haja uma falta de dados sobre o comportamento de GCLs após períodos de fluxo com combustíveis, especialmente o biodiesel, a presente pesquisa é original e inédita por trazer dados sobre a condutividade hidráulica de GCLs em barreiras de contenção de biodiesel, contribuindo para preencher uma importante lacuna na literatura científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXIEW, N. New perspectives for geosynthetic clay liners using calcium bentonite. **Proceedings of II European Geosynthetics Conference**, Bologna, p. 707-712, 2000.

ALONSO, T. DE P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Biodiesel**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

_____. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/anuario-2022.pdf>. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D5084:2016**. Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. West Conshohocken, PA, 2016.

_____. American Society for Testing and Materials. **ASTM D5887:2022**. Standard test method for measurement of index flux through saturated geosynthetic clay liner specimens using a flexible wall permeameter. West Conshohocken, PA, 2022.

_____. American Society for Testing and Materials. **ASTM D6766:2020**. Standard test method for evaluation of hydraulic properties of geosynthetic clay liners permeated with potentially incompatible aqueous solutions. West Conshohocken, PA, 2020.

_____. American Society for Testing and Materials. **ASTM D5890:2019**. Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners. West Conshohocken, PA, 2019.

BOUAZZA, A. Geosynthetic clay liners. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 20, n. 1, p. 3-17, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00025-5)

BOUAZZA, A.; GATES, W. P. Overview of performance compatibility issues of GCLs with respect to leachates of extreme chemistry. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 2, p. 151-167, 2014. <http://dx.doi.org/10.1680/gein.14.00006>

BOYNTON, S. S.; DANIEL, D. E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 111, n. 4, p. 465-478, 1985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:4\(465\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:4(465))

BRODERICK, G. P.; DANIEL, D. E. Stabilizing compacted clay against chemical attack. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 10, p. 1549-1567, 1990.

BSBIOS. **Ficha técnica do biodiesel B100**, BSBIOS, 2019.

BSBIOS. **Relatório de sustentabilidade 2021**. 2021 Disponível em: <https://www.bsbios.com/pt/sustentabilidade/relatorio-de-sustentabilidade>. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

BUDHU, M.; GEISE, R. F.; CAMPBELL, G.; BAUMGRASS, L. The permeability of soils with organic fluids. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 28, p. 140-147, 1991. <https://doi.org/10.1139/t91-015>

CECCHIN, I.; REGINATTO, C.; THOMÉ, A.; COLLA, L. M.; REDDY, K. R. Influence of physicochemical factors on biodiesel retention in clayey residual soil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 142, n. 4, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001060](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001060)

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo**. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas/>. Acesso em 22 de fevereiro de 2023.

CHIARANDA, H. S. **Alterações biogeoquímicas em águas subterrâneas impactadas por biodiesel de soja e misturas de diesel/biodiesel (B20)**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

COSTA NETO, P. R. **Obtenção de ésteres alquílicos (biodiesel) por via enzimática a partir do óleo de soja**. 2002. Tese (Doutorado em Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

DANIEL, D. E; TRAUTWEIN, S. J.; BOYNTON, S. S.; FOREMAN, D. E. Permeability testing with flexible-wall permeameters. **Geotechnical Testing Journal**, v. 7, n. 3, p. 113-122, 1984. <https://doi.org/10.1520/GTJ10487J>

DANIEL, D. E; ANDERSON, D. C.; BOYNTON, S. S. Fixed-wall versus flexible-wall permeameters. In: JOHNSON, A. I.; FROBEL, R. K.; CAVALLI, N. J.; PETTERSSON, C. B. (eds.). **Hydraulic Barriers in Soil and Rock**, ASTM STP 874, p. 107-126, 1985. <https://doi.org/10.1520/STP34573S>

DANIEL, D. E.; SHAN, H. -Y.; ANDERSON, J. D. Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner. In: **Proceedings of Geosynthetics '93**, Vancouver, p. 1483-1496, 1993.

DANIEL, D. E. State-of-art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In: DANIEL, D. E. and TRAUTWEIN, S. J. (eds.). **Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**, ASTM STP 1142, p. 30-78, 1994. <https://doi.org/10.1520/STP23884S>

DANIEL, D. E.; BOWDERS, J. J.; GILBERT, R. B. Laboratory hydraulic conductivity testing of GCLs in flexible-wall permeameters. In: WELL, L. W. (ed.). **Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners**, ASTM STP 1308, p. 208-226, 1997. <https://doi.org/10.1520/STP11804S>

EGLOFFSTEIN, T. A. Ion exchange in geosynthetic clay liners. **Geotechnical Fabrics Report**, v. 15, n. 5, p. 38-42, 1997.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

FAVRETTO, J.; ZANELLA, P. N.; SILVA, C. M.; FLOSS, M. F. Montagem e validação de um permeâmetro de parede flexível para avaliação da condutividade hidráulica de GCLs. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, COBRAMSEG 2022, Campinas, 2022.

FERNANDEZ, F.; QUIGLEY, A. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 22, p. 205-214, 1985. <https://doi.org/10.1139/t85-028>.

GITIPOUR, S.; HOSSEINPOUR, M. A.; HEIDARZADEH, N.; YOUSEFI, P.; FATHOLLAHI, A. Application of modified clays in geosynthetic clay liners for containment of petroleum contaminated sites. **International Journal of Environmental Research**, v. 9, n. 1, p. 317-322, 2015. <https://doi.org/10.22059/IJER.2015.903>

GLEASON, M.; DANIEL, D. E.; EYKHOLT, G. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 5, p. 438-445, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:5\(438\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:5(438))

HE, J.; WANG, Y.; LI, Y.; RUAN, X. Effects of leachate infiltration and desiccation cracks on hydraulic conductivity of compacted clay. **Water Science and Engineering**, v. 8, n. 2, p. 151-157, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2015.04.004>

HOSNEY, M. S.; ROWE, R. K. Performance of GCL after 10 years in service in the Arctic. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 10, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001160)

HUANG, D.; ZHOU, H.; LIN, L. Biodiesel: an alternative to conventional fuel. **Energy Procedia**, v. 16, p. 1874-1885, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.287>

IGS. International Geosynthetics Society. **Classificação dos geossintéticos**. Elaborado por BATHURST, R. J.; Tradução de MENDES, M. J. A. 2023. Disponível em: <https://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/04/1.pdf>. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

JO, H.; KATSUMI, T.; BENSON, C.; EDIL, T. Hydraulic conductivity and swelling of non-pre-hydrated GCLs with single-species salt solutions. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 7, p. 557-567, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(557\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(557))

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**, 5th ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall, 796 p. 2005.

LEE, J. M.; SHACKELFORD, C. D. J. Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 1, p. 64-77, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:1\(64\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:1(64))

LEUNG, D. Y. C.; WU, X.; LEUNG, M.K.H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, v. 87, n. 4, p. 1083-1095, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>

LEWIS, B. G. Soil chemistry. In: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). **Environmental and Ecological Chemistry**, EOLSS Publishers, v. 2, p. 78-114, 2009.

LIN, L.; BENSON, C. H. Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 1, p. 40-49, 2000. [https://doi-org.ez116.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:1\(40\)](https://doi-org.ez116.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:1(40))

MA, F.; HANNA, M., A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v. 70, n. 1, p. 1-15, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)

MACCAFERRI. **Catálogo MacLine GCL W 40 Geocomposto Bentonítico**, Maccaferri, 2010.

MAZZIERI, F.; PASQUALINI, E.; VAN IMPE, W. F. Compatibility of GCLs with organic solutions. In: **Proceedings of ISRM International Symposium 2000**, Melbourne, 2000.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**, 3 ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MUKUNOKI, T.; ROWE, R.K.; HURST, P.; BATHURST, R.J. Application of geosynthetic barrier wall to containment of hydrocarbons in the Arctic. In: **Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Geotechnology in Harmony with the Global Environment, p. 2415-2418, 2005. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-2415>

NADIM, F.; HOAG, G. E.; LIU, S. L.; CARLEY, R. J.; ZACK, P. Detection and remediation of soil and aquifer systems contaminated with petroleum products: an overview. **Journal of Petroleum Science Engineer**, v. 26, p. 169-178, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(00\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(00)00031-0)

OMIDI, G.H., THOMAS, J.C., BROWN, K.W. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner. **Water, Air, Soil Pollution**, v. 89, n. 1, p. 91-103, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF00300424>

PETROV, R. J.; ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 8, p. 683-695, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:8\(683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:8(683))

PITANGA, H. N. **Caracterização dos comportamentos hidráulico e mecânico de geocompostos bentoníticos e de outros sistemas geossintéticos destinados às camadas de cobertura de aterros sanitários**. 2007. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PITANGA, H. N.; VILAR, O. M. Condutividade hidráulica de geocompostos bentoníticos permeados por etanol biocombustível. In: **Anais do VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, REGEO '2007, Recife, 2007.

ROWE, R. K.; MUKUNOKI, T.; LI, M. H.; BATHURST, R. J. Effect of freeze-thaw on the permeation of arctic diesel through a GCL. **Journal of ASTM International**, v. 1, n. 2, p. 1-13, 2004. <https://doi.org/10.1520/JA111741>

ROWE, R. K.; MUKUNOKI, T.; BATHURST, R. J.; RIMAL, S.; HURST, P.; HANSEN, S. The performance of a composite liner for retaining hydrocarbons under extreme environmental conditions. In: **Proceedings of Geo-Frontiers 2005**, Slopes and Retaining Structures Under Seismic and Static Conditions, Geotechnical Special Publication GSP 140, 2005. [https://doi.org/10.1061/40787\(166\)16](https://doi.org/10.1061/40787(166)16)

ROWE, R. K.; MUKUNOKI, T.; BATHURST, R. J. Compatibility with Jet A-1 of a GCL subjected to freeze-thaw cycles. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 12, p. 1526-1537, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:12\(1526\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1526))

ROWE, R. K.; MUKUNOKI, T.; BATHURST, R. J.; RIMAL, S.; HURST, P.; HANSEN, S. Performance of a geocomposite liner for containing Jet A-1 spill in an extreme environment. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, n. 2, p. 68-77, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.10.003>

ROWE, R. K.; MUKUNOKI, T.; BATHURST, R. J. Hydraulic conductivity to Jet-A1 of GCLs after up to 100 freeze-thaw cycles. **Geotechnique**, v. 58, n. 6, p. 503-511, 2008. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.6.503>

ROWE, R. K.; BOSTWICK, L. E.; TAKE, W. A. Effect of GCL properties on shrinkage when subjected to wet-dry cycles. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 11, p. 1019-1027, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000522](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000522)

RUHL, J. L.; DANIEL, D. E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 4, p. 369-381, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(369))

SHACKELFORD, C. D.; BENSON, C. H.; KATSUMI, T.; EDIL, T. B.; LIN, L. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, n. 2, p. 133-161, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(99\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(99)00024-2)

SHELL. **Civil jet fuel: grades and specifications of Jet A-1**. 2022 Disponível em: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/civil-jet-fuel-grades.html>. Acesso em 20 de junho de 2023.

THIEL, R.; GIROUD, J. P.; ERICKSON, R.; CRILEY, K.; BRYK, J. Laboratory measurements of GCL shrinkage under cyclic changes in temperature and hydration conditions. In: **Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics**, v. 1, 2006.

TOUZE-FOLTZ, N.; DUQUENNOI, C.; GAGET, E. Hydraulic and mechanical behavior of GCLs in contact with leachate as part of a composite liner. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 24, n. 3, p. 188-197, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.01.004>

WU, L.; WEI, T.; TONG, Z.; ZOU, Y.; LIN, Z.; SUN, J. Bentonite-enhanced biodiesel production by NaOH-catalyzed transesterification of soybean oil with methanol. **Fuel Processing Technology**, v. 144, p. 334-340, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.017>

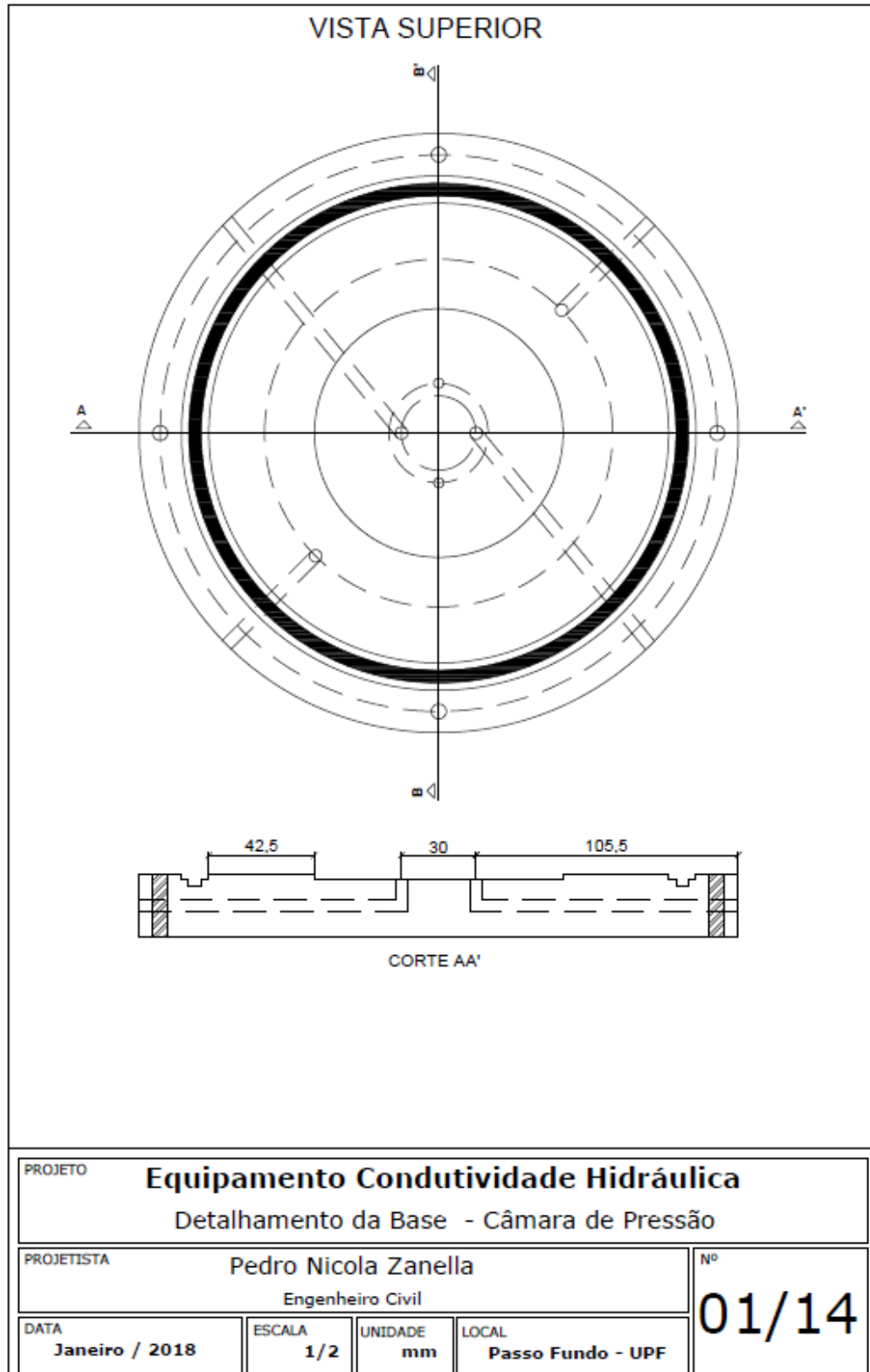
YARON, B.; DROR, I.; BERKOWITZ, B. **Soil-Subsurface Change - Chemical Pollutant Impacts**, Springer, 378 p. 2012.

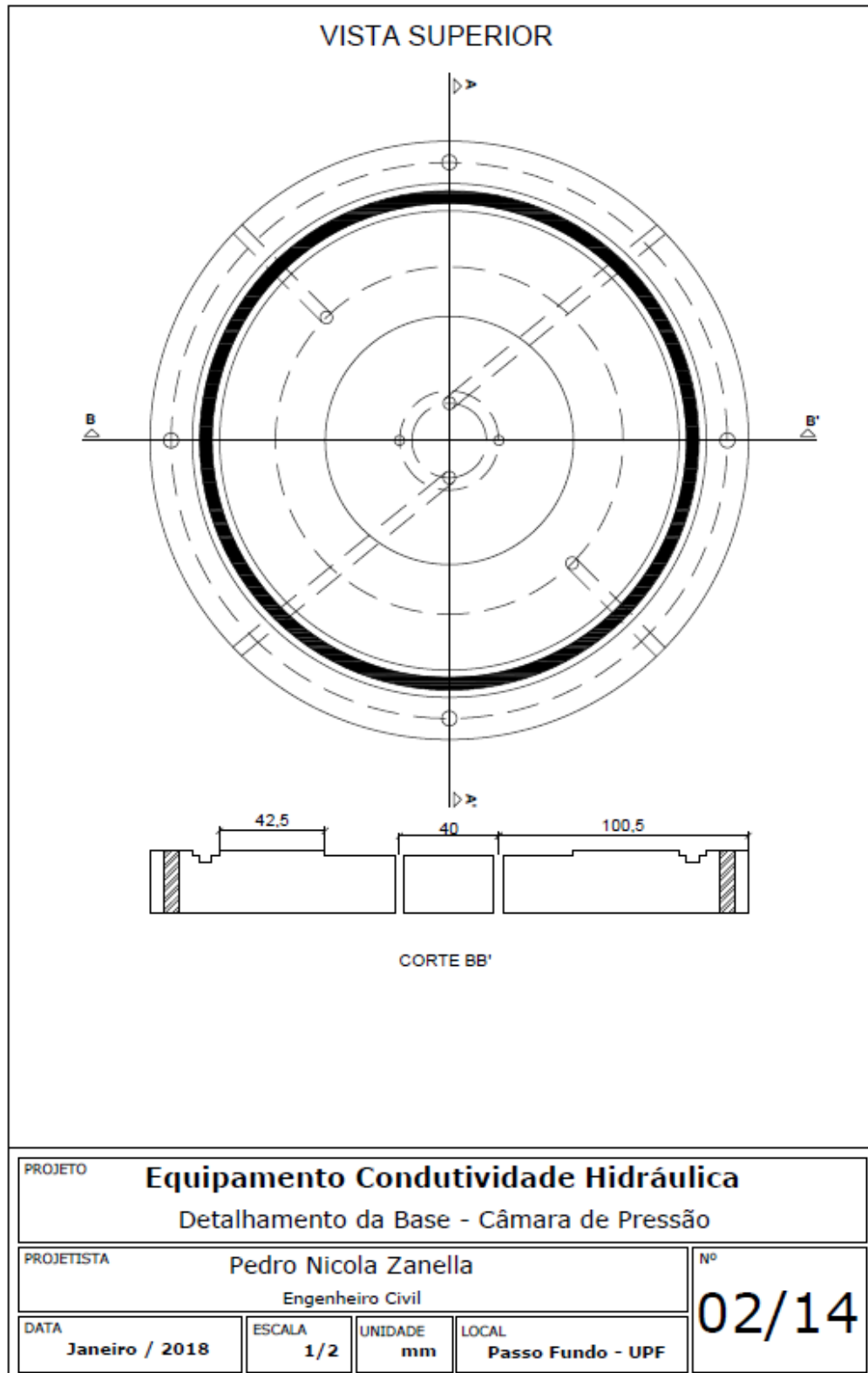
ZANELLA, P. N. **Comportamento da condutividade hidráulica do GCL permeado com biodiesel**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.

ZANGL, F.; LIKOS, W. J. Alternative methods for wet-dry cycling of geosynthetic clay liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 142, n. 11, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001508](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001508)

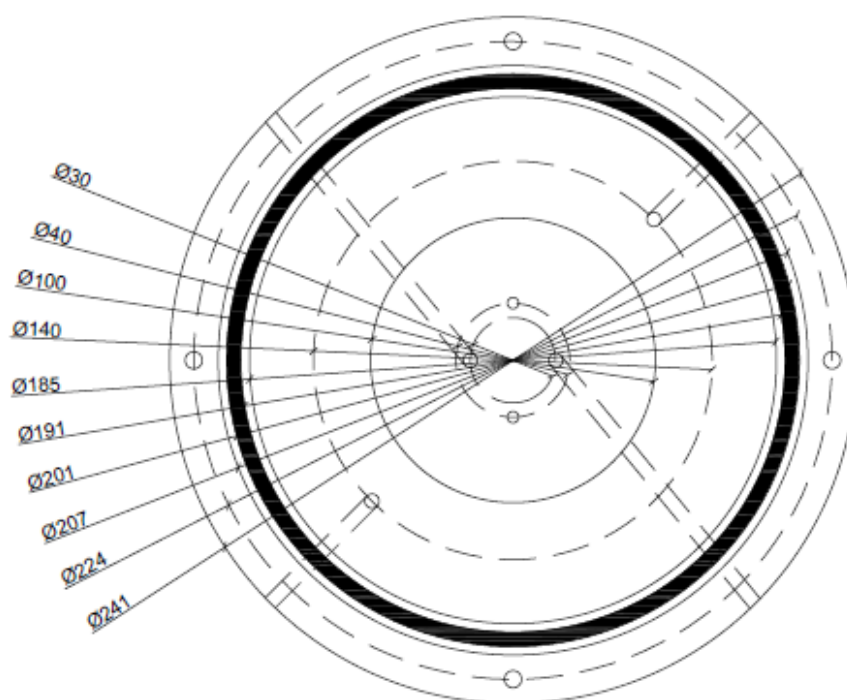
ANEXO A – Projeto do permeâmetro

Este anexo apresenta o projeto detalhado das peças do permeâmetro de parede flexível construído neste trabalho de tese. O equipamento foi projetado por Zanella (2019).

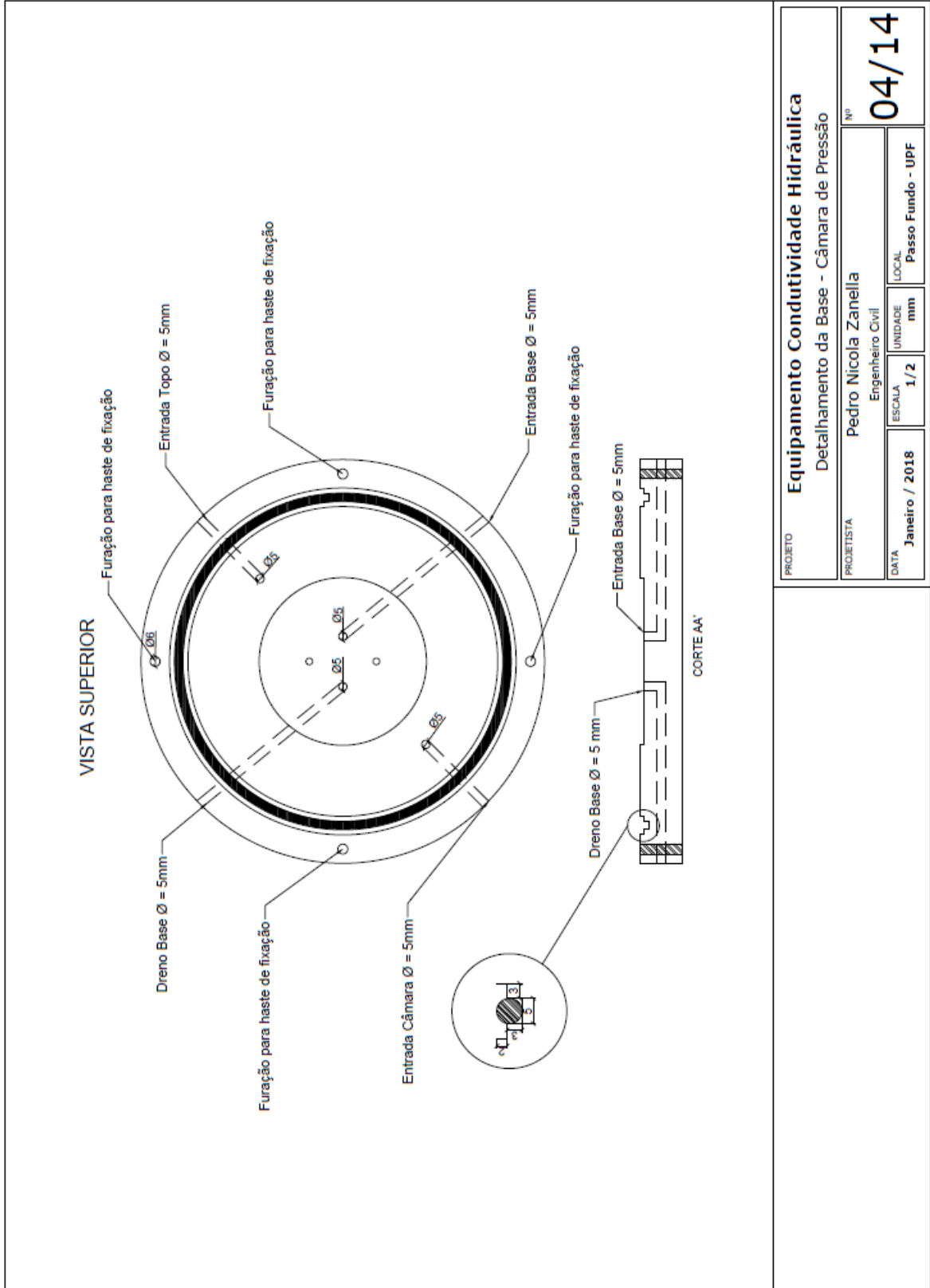




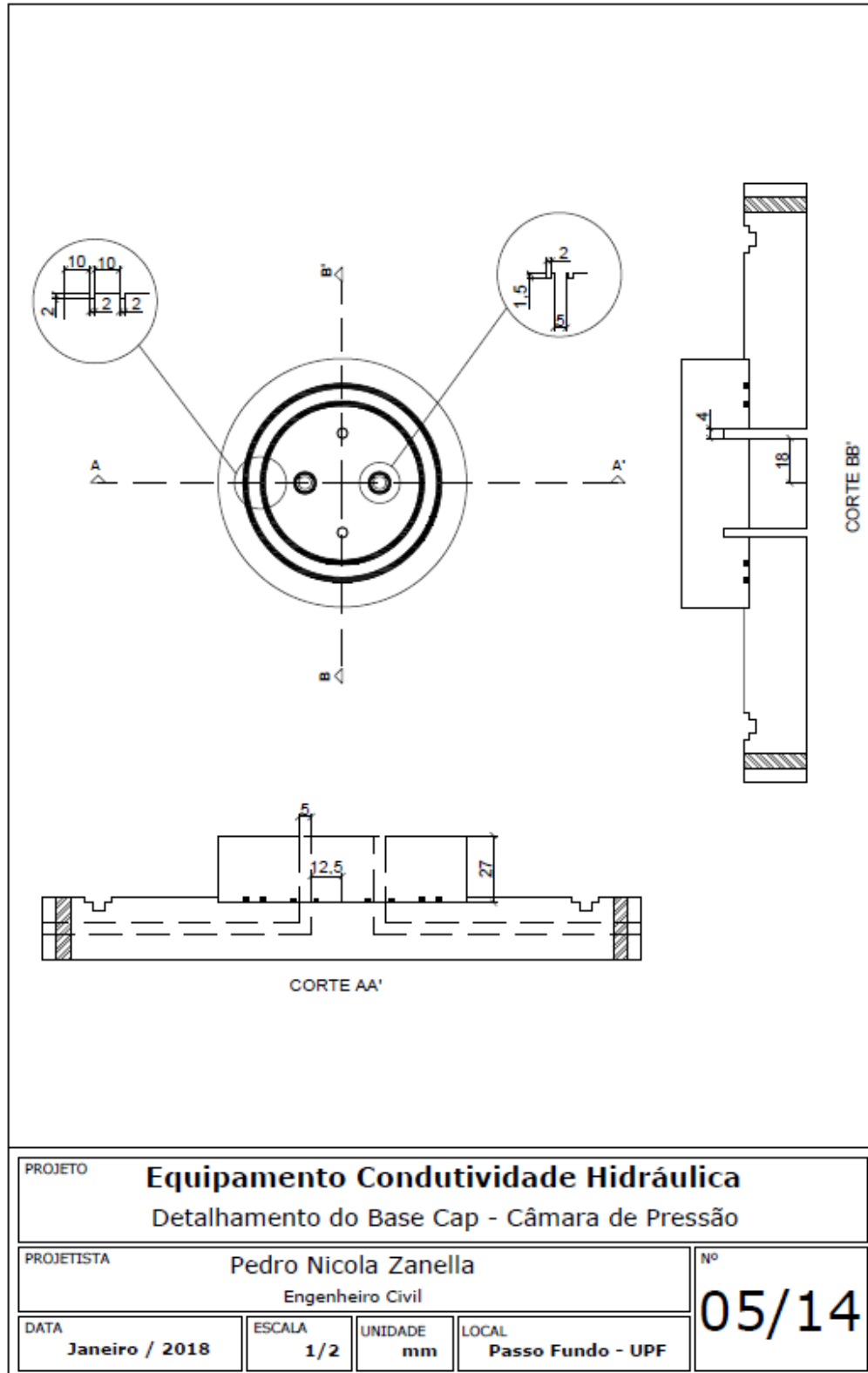
VISTA SUPERIOR



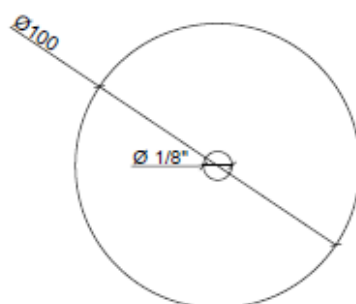
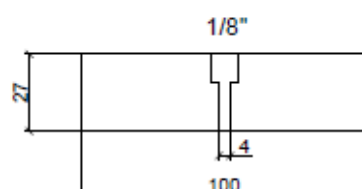
PROJETO	Equipamento Condutividade Hidráulica			
	Detalhamento da Base - Câmara de Pressão			
PROJETISTA	Pedro Nicola Zanella		Nº	03/14
	Engenheiro Civil			
DATA	ESCALA	UNIDADE	LOCAL	
Janeiro / 2018	1/2	mm	Passo Fundo - UPF	



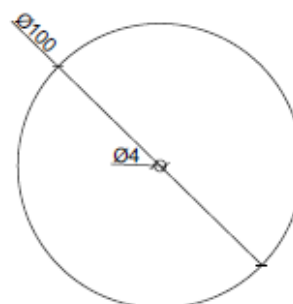
Projeto			
Equipamento Condutividade Hidráulica			
Detalhamento da Base - Câmara de Pressão			
Projeto		Nº	
Pedro Nicola Zanella Engenheiro Civil		04/14	
Data	Escala	Unidade	Local
Janeiro / 2018	1 / 2	mm	Passo Fundo - UPF



Corte topo

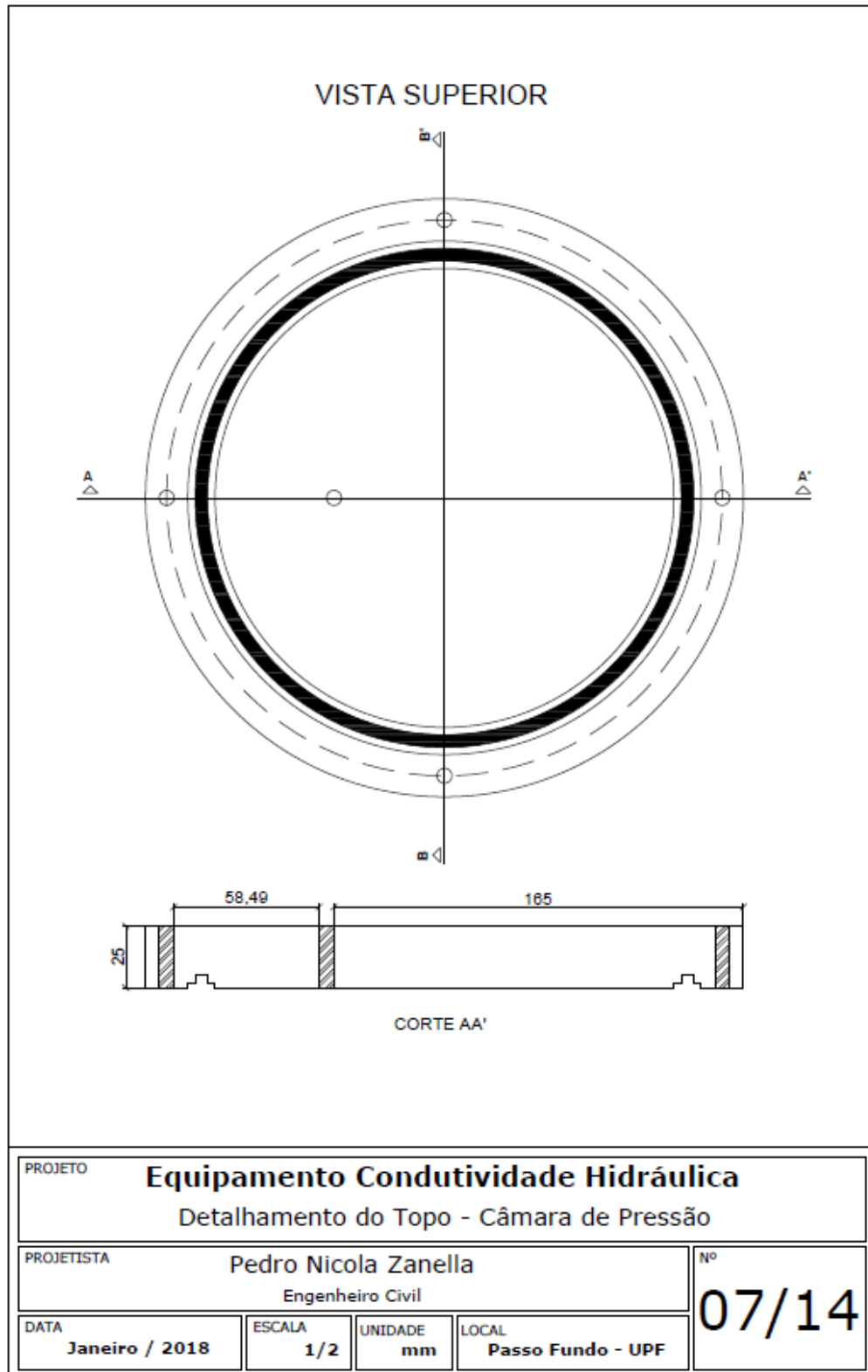


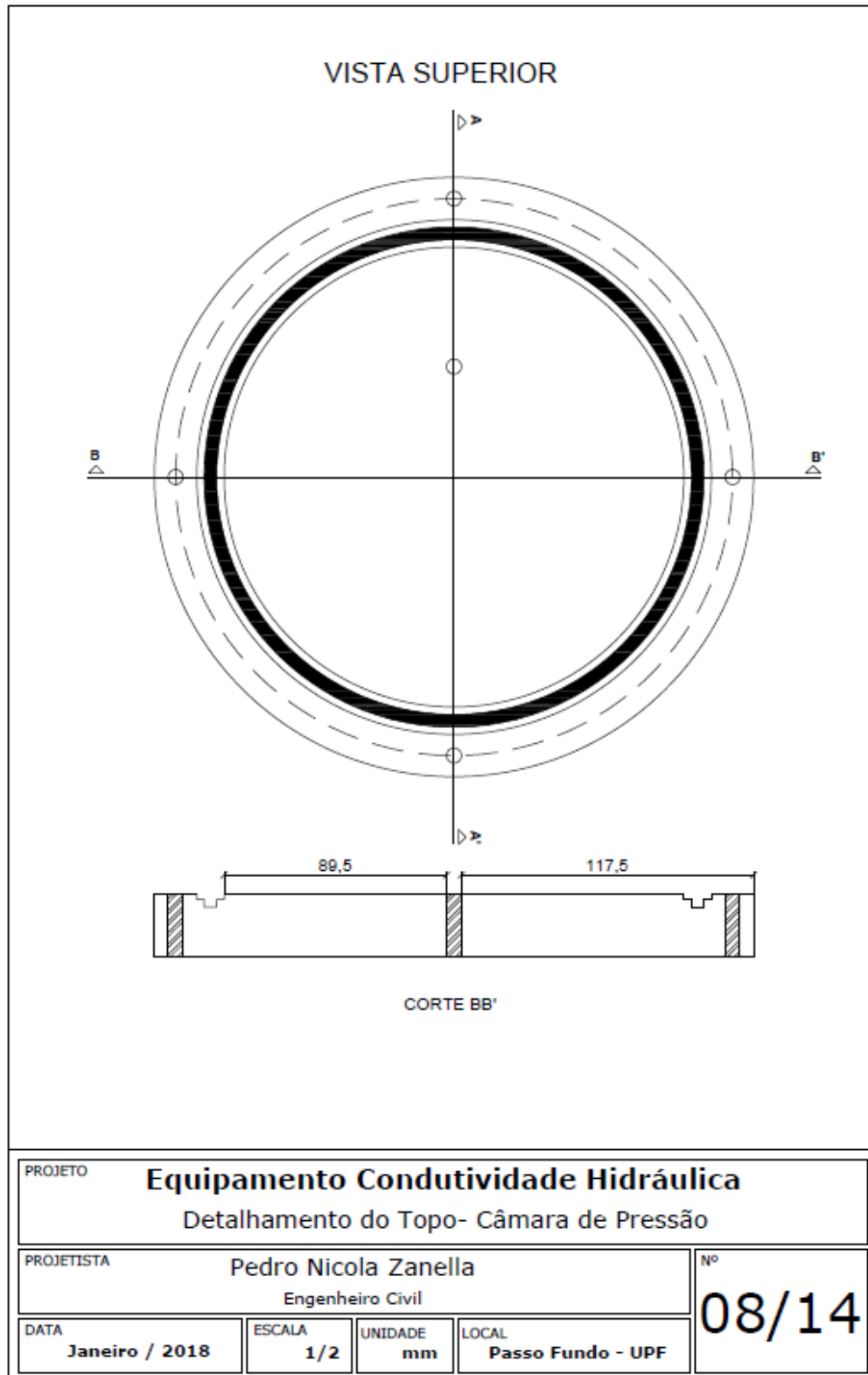
Vista superior

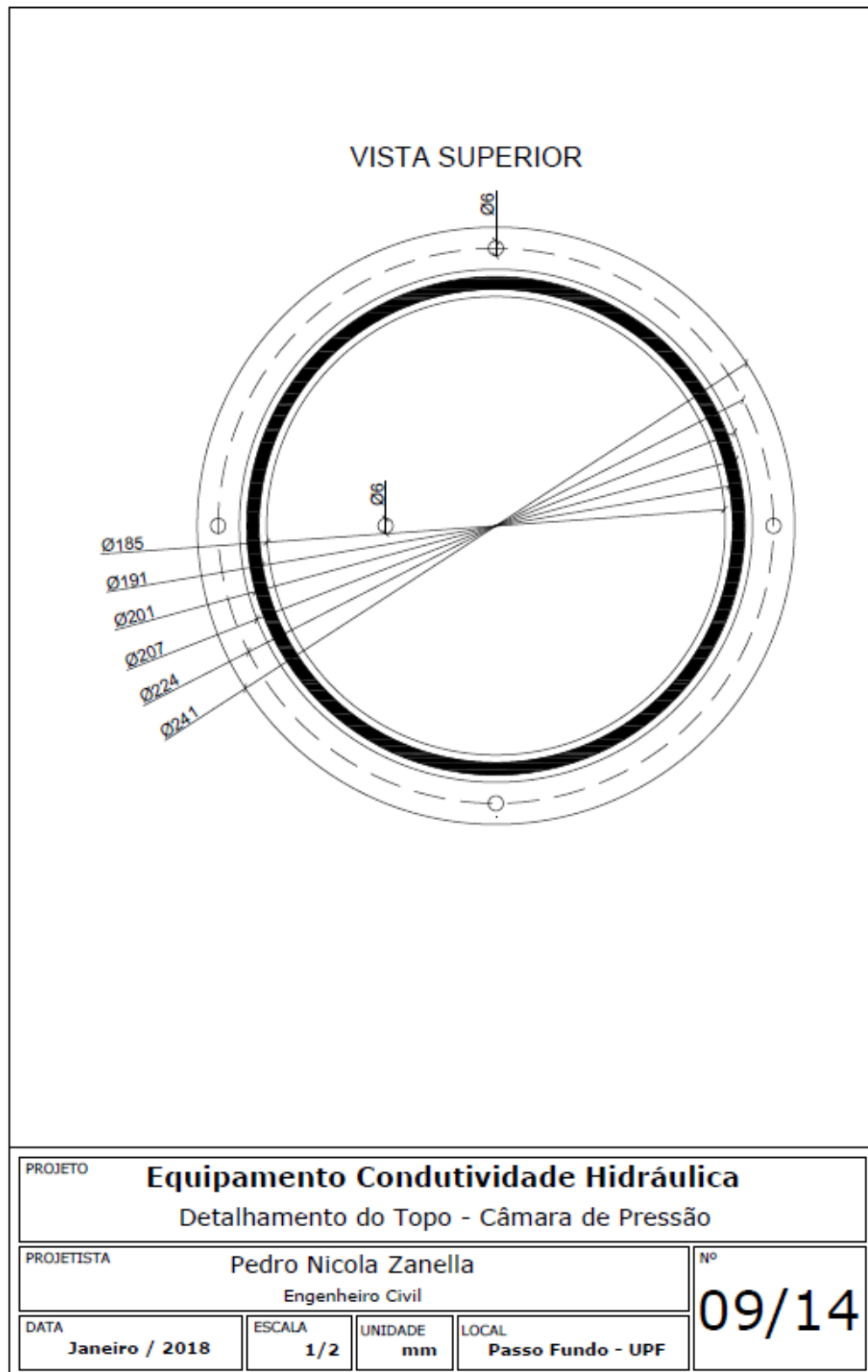


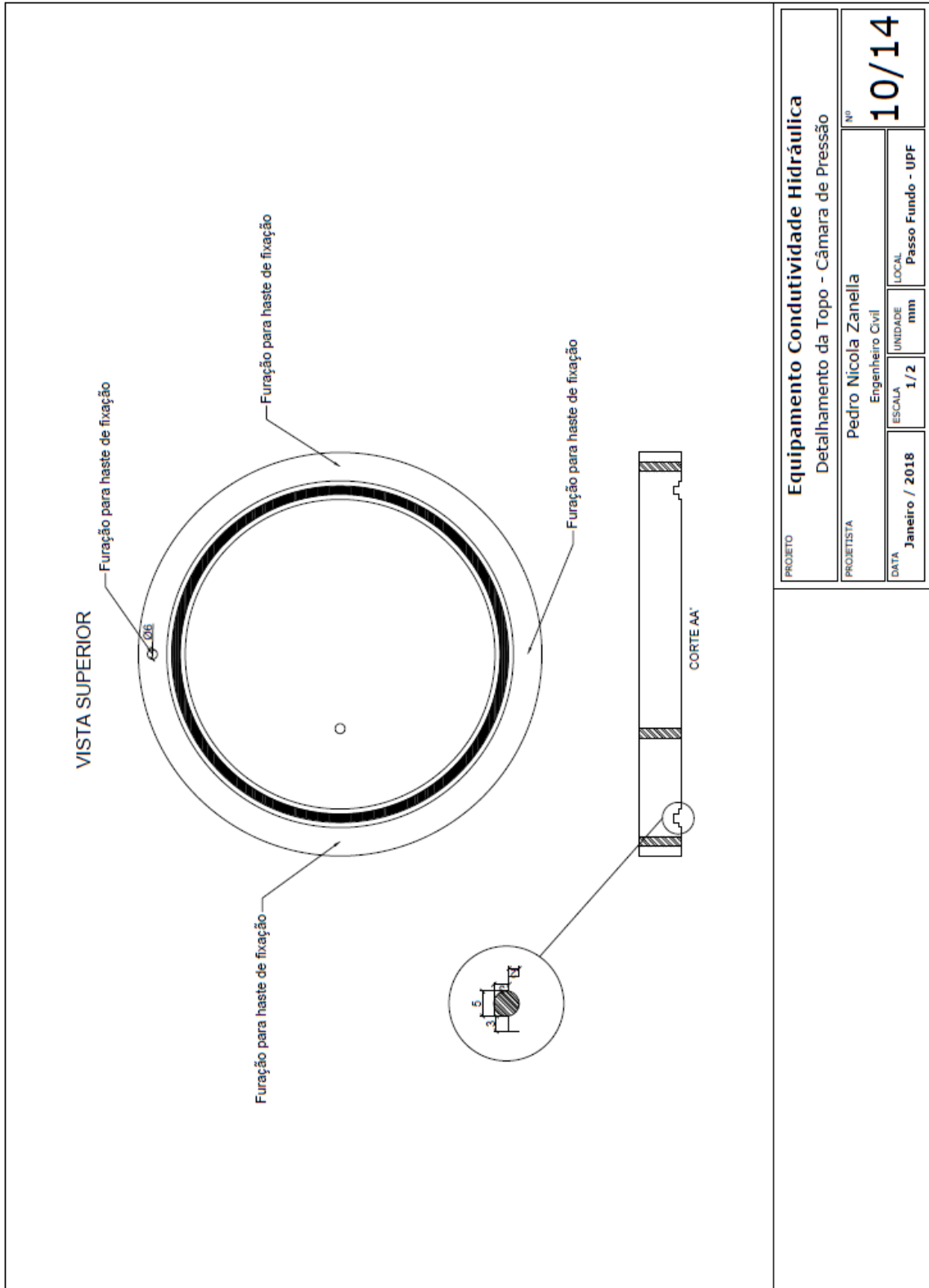
Vista inferior

PROJETO	Equipamento Condutividade Hidráulica			
	Detalhamento do Top Cap - Câmara de Pressão			
PROJETISTA	Pedro Nicola Zanella		Nº	06/14
	Engenheiro Civil			
DATA	ESCALA	UNIDADE	LOCAL	
Janeiro / 2018	1/2	mm	Passo Fundo - UPF	

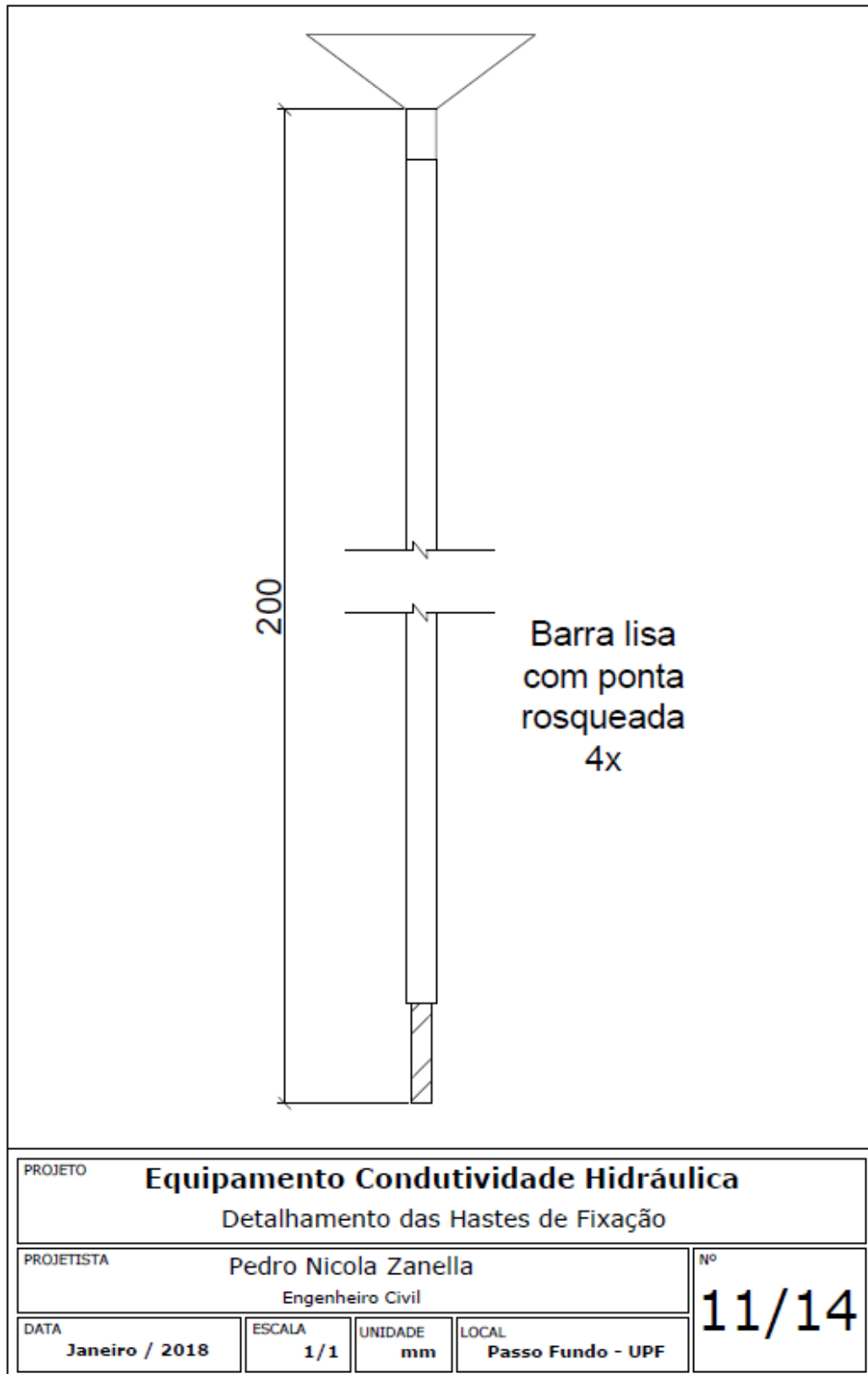


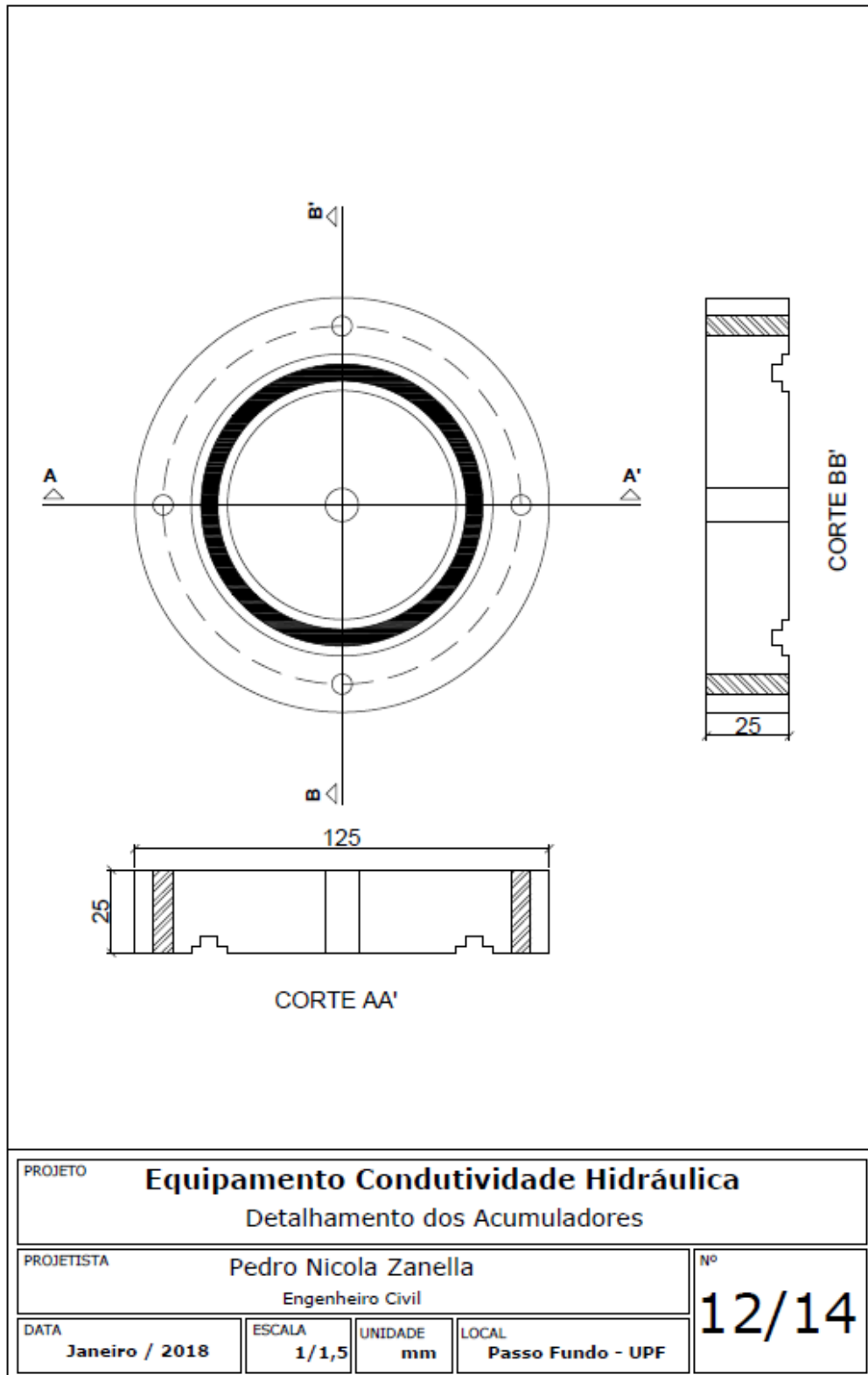


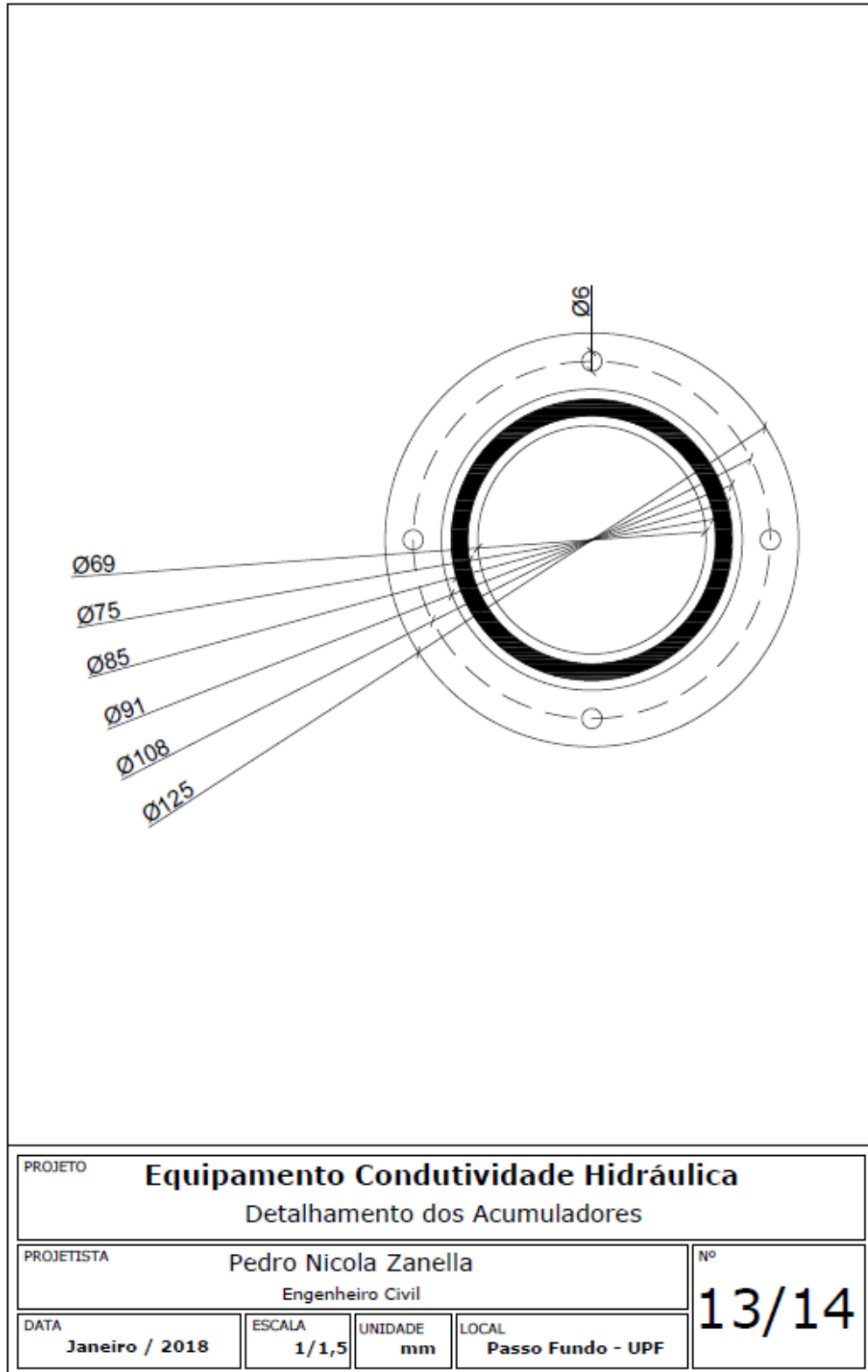


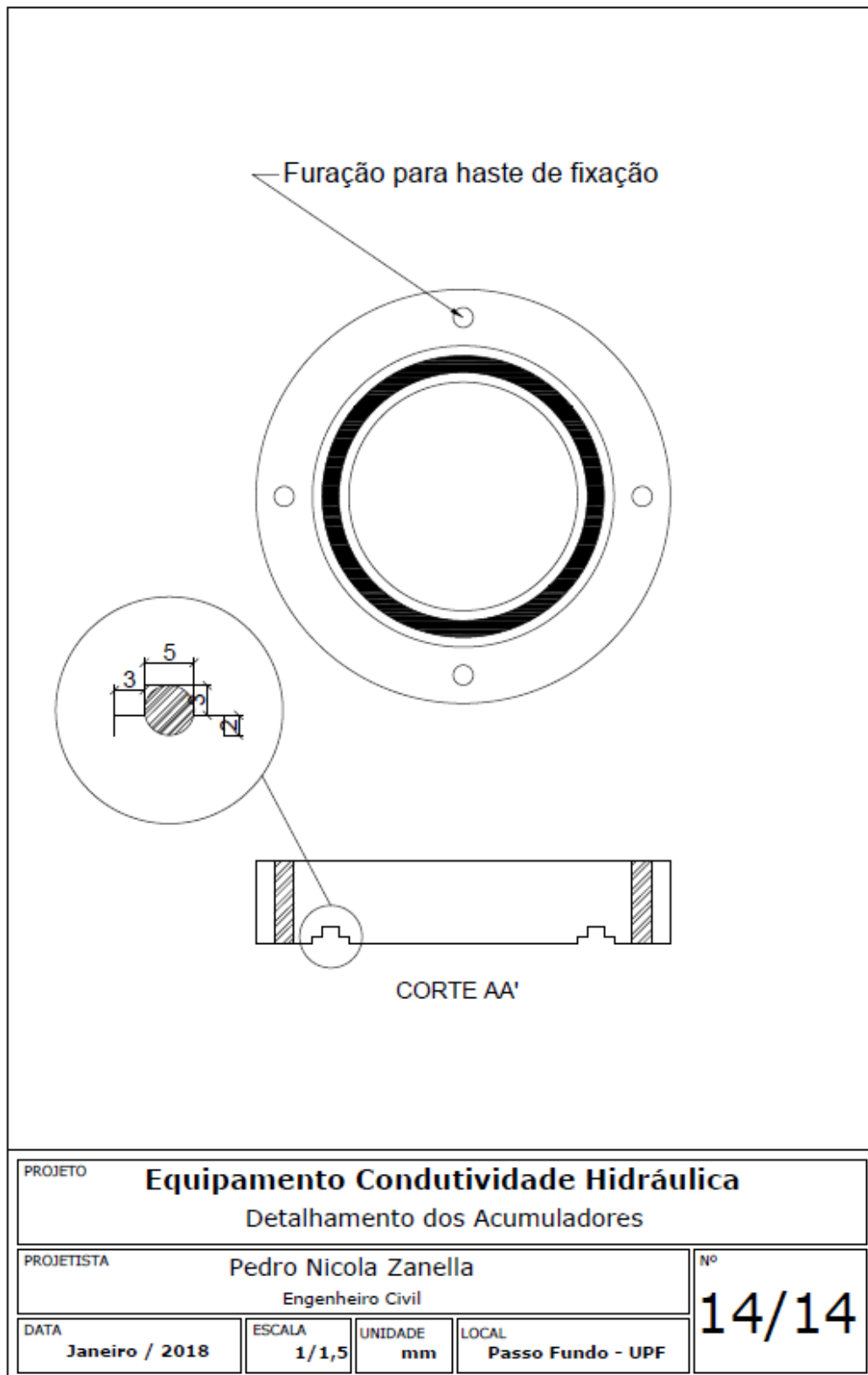


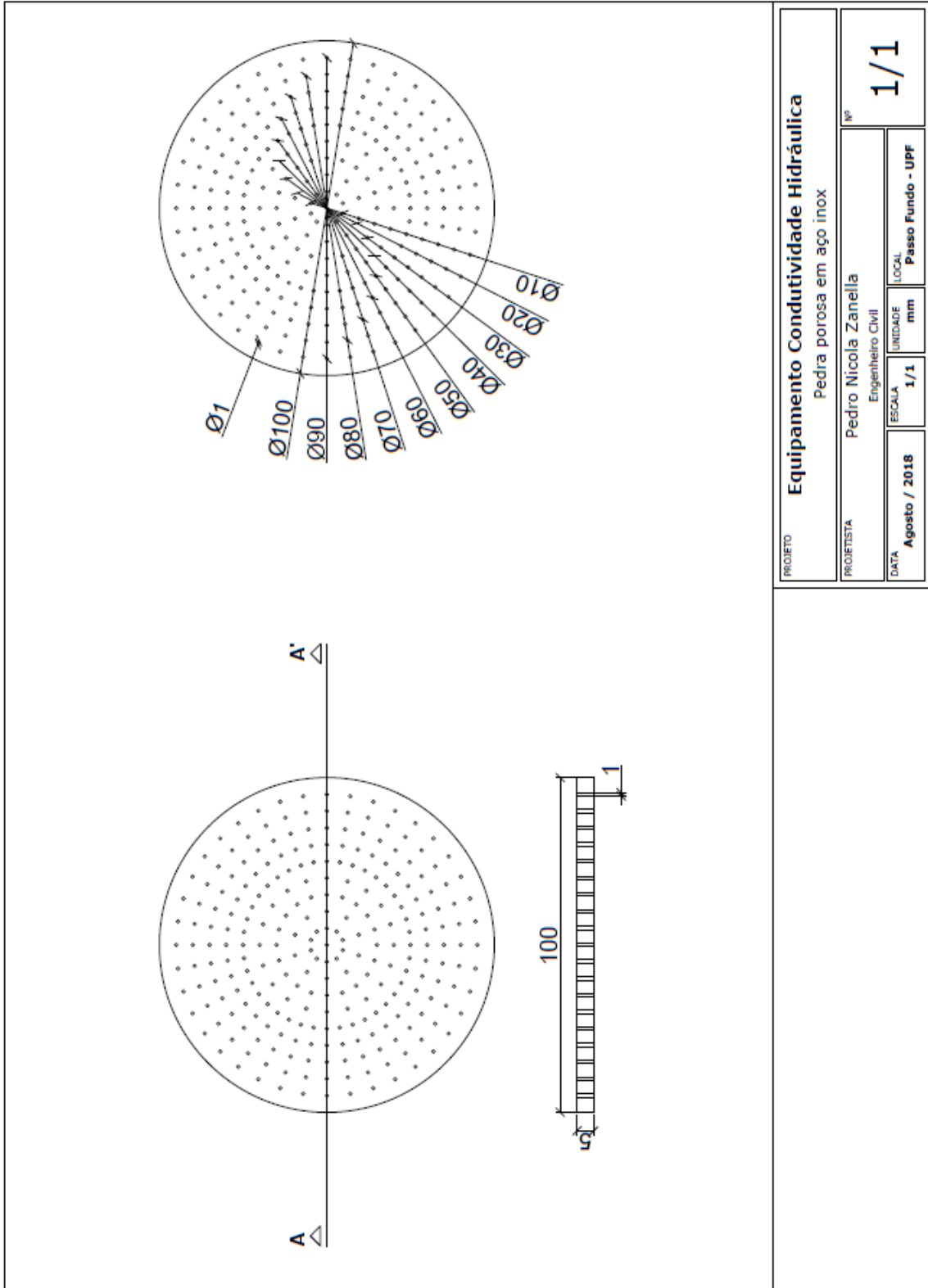
PROJETO		Equipamento Condutividade Hidráulica	
		Detalhamento da Topo - Câmara de Pressão	
PROJETISTA	Pedro Nicola Zanella Engenheiro Civil		
DATA	ESCALA	UNIDADE	LOCAL
1 Janeiro / 2018	1/2	mm	Passo Fundo - UPF
			Nº 10/14











PROJETO		Equipamento Condutividade Hidráulica	
Pedra porosa em aço inox		Nº	
PROJETISTA		1/1	
Pedro Nicola Zanella		ESCALA	UNIDADE
Engenheiro Civil		1/1	mm
DATA	LOCAL	LOCAL	
Agosto / 2018	Passo Fundo - UPF	Passo Fundo - UPF	



UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br