

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA APÓS ENSAIO DE
SQUEEZING DE GCL PERCOLADO COM ÁGUA

Camila Miotto da Silva Luvison

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

L976c Luvison, Camila Miotto da Silva
Condutividade hidráulica após ensaio de squeezing de gel
percolado com água / Camila Miotto da Silva Luvison. – 2022.
72 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto.
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Felipe Floss.
Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de
Passo Fundo, 2022.

1. Compostos orgânicos. 2. Solos - Conservação.
3. Bentonita. I. Prietto, Pedro Domingos Marques, orientador.
II. Floss, Márcio Felipe, coorientador. III. Título.

CDU: 628.516

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

**Universidade de Passo Fundo
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental**

Camila Miotto da Silva Luvison

**CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA APÓS ENSAIO DE *SQUEEZING* DE
GCL PERCOLADO COM ÁGUA**

**Passo Fundo
2022**

Camila Miotto da Silva Luvison

**CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA APÓS ENSAIO DE *SQUEEZING* DE
GCL PERCOLADO COM ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre, sob a orientação do Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto e coorientação Dr. Márcio Felipe Floss.

**Passo Fundo
2022**

Camila Miotto da Silva Luvison

**CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA APÓS ENSAIO DE *SQUEEZING* DE
GCL PERCOLADO COM ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto
Orientador

Dr. Márcio Felipe Floss
Coorientador

Prof^a. Dra. Elisabeth Ritter
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Prof. Dr. Cleomar Reginatto
Universidade de Passo Fundo – PPGEng/UPF

Prof. Dr. Maciel Donato
Universidade de Passo Fundo - UPF

**Passo Fundo
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida.

A meus pais por sempre me apoiarem, pelo suporte necessário para concretização desse sonho que foi fazer o Mestrado, por vibrarem a cada pequena e importante conquista. A minha mãe pelas inúmeras velas acendidas e ao meu pai por sempre disponibilizar recursos automobilísticos para as idas a Passo Fundo.

Ao meu marido Lucas, pela compreensão, paciência, ausência, por ter sido meu suporte emocional e meu porto seguro, pelo zelo do nosso lar em momentos de turbulência, por me apoiar e vibrar com as minhas conquistas, sem teu apoio não seria possível.

Aos meus orientadores professores Pedro Domingos Marques Prietto e Márcio Felipe Floss, por toda dedicação, pela flexibilidade, conhecimentos transmitidos e principalmente incentivo a seguir em busca de oportunidades, vocês são inspiração para mim.

À Universidade de Passo Fundo (UPF), da qual tenho orgulho de ter feito minha graduação e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng), pela excelência de seus serviços, estrutura e Docentes. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao pessoal do laboratório Leunir e Nilton por toda a ajuda nas leituras dos ensaios e a amizade. Agradeço a doutoranda Júlia Favretto por toda ajuda na realização dos ensaios, conhecimentos compartilhados, pela amizade, a caminhada até aqui foi mais leve e descomplicada com teu apoio.

A todos os meus amigos e familiares que compreenderam minha ausência ao longo desses dois anos, que torceram por mim e nunca me abandonaram. Um agradecimento especial a minha melhor amiga Reni Bazanella, pelos incontáveis áudios motivacionais, orgulho de nós. Aos amigos (Camila Berta, Larissa, Júnior e Daniel) pelo apoio nos estudos no horário do intervalo do almoço.

“Se você pensa que pode ou se pensa que não pode, de qualquer
forma você está certo.”

(Henry Ford).

RESUMO

O uso de geocompostos bentoníticos (GCL) vem se mostrando uma alternativa eficiente para barreiras impermeabilizantes em obras de aterros sanitários, com a função de proteger da contaminação o solo e as águas subterrâneas. Este material apresenta baixa condutividade hidráulica quando hidratado, aumentando sua espessura devido à expansão da bentonita, o que, porém, torna-o mais frágil. Essa expansão expõe o GCL a possibilidade da ocorrência do fenômeno conhecido como deslocamento lateral da bentonita (do inglês *squeezing*). Tal fenômeno é consequência de uma carga não perfurante, estacionária, aplicada sobre o GCL, o qual se encontra instalado sob insuficiente solo de cobertura, podendo resultar em um aumento de permeabilidade do material. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi o de estudar a condutividade hidráulica de GCL permeado com água, após o fenômeno de deslocamento lateral da bentonita (*squeezing*). Para atingir esse objetivo, amostras (GCL + solo de cobertura) foram submetidas a um carregamento estático através de um pistão CBR (Índice de Suporte Califórnia), na versão modificada, com razões H/B (H é a espessura do solo de cobertura e B o diâmetro do pistão) de 1,0;1,5;2,0, em triplicata. Na sequência, as amostras eram submetidas ao ensaio de condutividade hidráulica, em triplicata, em um permeâmetro de parede flexível. Todas as amostras ensaiadas apresentaram valores altos de permeabilidade (na ordem de 10^{-9} m/s) no início da percolação, seguidos de uma redução gradual até atingirem um valor característico de aproximadamente 5×10^{-11} m/s. As amostras com H/B=1,0 apresentaram o fenômeno de *squeezing*, entretanto ao final do ensaio de condutividade hidráulica as mesmas haviam se regenerado, demonstrando assim que o GCL pode garantir um adequado funcionamento, mesmo sofrendo deslocamento lateral da bentonita.

Palavras-chave: Geocompostos Bentoníticos; Deslocamento Lateral da Bentonita; Geossintéticos; Camada de Proteção.

ABSTRACT

The use of bentonite geocomposites (GCL) has proven to be an efficient alternative for barriers system in landfill works, with the function of protecting the soil and groundwater from contamination. This material presents low hydraulic conductivity when hydrated, increasing its thickness due to the expansion of bentonite, which, however, makes it more fragile. This expansion exposes the GCL to the possibility of the occurrence of the phenomenon known as lateral displacement of bentonite (squeezing). This phenomenon is a consequence of a stationary, non-perforating load applied to the GCL, which is installed under insufficient topsoil, and may result in an increase in the permeability of the material. In this context, the objective of this research was to study the hydraulic conductivity of GCL permeated with water, after the phenomenon of lateral displacement of bentonite (squeezing). To achieve this goal, samples (GCL + topsoil) were subjected to static loading through a CBR (California Bearing Ratio) piston, in modified version, with ratios H/B (H is the thickness of the topsoil and B the diameter of the piston) of 1.0;1.5;2.0, in triplicate. Next, the samples were submitted to hydraulic conductivity testing, in triplicate, in a flexible wall permeameter. All samples showed high values of permeability (around 10^{-9} m/s) at the beginning of percolation, followed by a gradual reduction until they reached a characteristic value of approximately 5×10^{-11} m/s. The samples with H/B = 1.0 presented the squeezing phenomenon, however, by the end of the hydraulic conductivity test they had regenerated, thus demonstrating that the GCL can guarantee an adequate functioning, even when there is lateral displacement of the bentonite.

Keywords: Geosynthetic Clay Liner (GCL); Lateral Bentonite Displacement (Squeezing); Geosynthetic; Protection Layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: 20 principais autores pelo índice H.....	16
Figura 2: Produção científica dos países.....	16
Figura 3: Nuvem com as 20 principais palavras encontradas nos documentos	17
Figura 4: 20 principais revistas pelo índice H.....	17
Figura 5: 20 principais afiliações classificadas pela quantidade de documentos	18
Figura 6: 20 principais autores com maior número de citações	18
Figura 7: Múltiplas aplicações de geossintéticos em aterros sanitários	20
Figura 8: Modelos comerciais de GCLs.....	24
Figura 9: Estrutura cristalina da montmorilonita	26
Figura 10: Concepção da microestrutura e permeabilidade da argila	26
Figura 11: Ensaios de Expansão da bentonita.....	29
Figura 12: Diagrama e configuração de teste.....	33
Figura 13: Fluxograma da Pesquisa	36
Figura 14: Modelo GCL.....	36
Figura 15: Curva granulométrica da areia.....	38
Figura 16: Sequência de preparação dos corpos de prova de GCL.....	39
Figura 17: Teste CBR sobre o GCL – etapa de hidratação	40
Figura 18: Dispositivos para hidratação do GCL.....	41
Figura 19: Ensaio Densidade da Areia.....	42
Figura 20: Teste CBR sobre o GCL – a) etapa de penetração; b) medição do perfil.....	42
Figura 21: Equipamento CBR.....	43
Figura 22: Equipamento para ensaio de condutividade hidráulica do GCL.....	44
Figura 23: Sequência de montagem de um corpo de prova no permeâmetro	45
Figura 24: Curva tensão-penetração H/B=1,0.....	48
Figura 25: Comparação entre pistões com mesma razão de cobertura através da curva tensão-penetração H/B=1,0.....	49
Figura 26: Deformação GCL H/B=1,0.....	50
Figura 27: Comparação das deformações desenvolvidas pelos pistões H/B=1,0	50
Figura 28: Curva tensão-penetração H/B=1,5.....	51
Figura 29: Deformação GCL H/B=1,5.....	51
Figura 30: Comparação das deformações desenvolvidas pelos pistões H/B=1,5	52
Figura 31: Curva tensão-penetração H/B=2,0.....	52
Figura 32: Curva tensão-penetração H/B=2,0.....	53
Figura 33: Deformação GCL H/B=2,0.....	54
Figura 34: Comparação das deformações desenvolvidas pelos pistões H/B=2,0	54
Figura 35: Condutividade hidráulica H/B=1,0.....	55
Figura 36: Amostras A10-* após squeezing e ensaio de condutividade hidráulica	57
Figura 37: Condutividade hidráulica H/B=1,5.....	58
Figura 38: Amostra A15-3 após squeezing e condutividade hidráulica.....	59
Figura 39: Condutividade hidráulica H/B=2,0.....	60
Figura 40: Amostra A20-3 após squeezing e condutividade hidráulica.....	61
Figura 41: Gráfico do efeito de H/B em relação a deformação do GCL.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos GCLs.....	23
Tabela 2: Variação da condutividade hidráulica de GCL	31
Tabela 3: Propriedades físicas do GCL.....	37
Tabela 4: Caracterização geotécnica da areia.....	38
Tabela 5: Variáveis do experimento.....	47
Tabela 6: Plano experimental dos ensaios da pesquisa	47
Tabela 7: Valores condutividade hidráulica H/B=1,0	56
Tabela 8: Valores condutividade hidráulica H/B=1.5	58
Tabela 9: Valores condutividade hidráulica H/B=2,0	61
Tabela 10: Valores de condutividade hidráulica dos ensaios de validação.....	62
Tabela 11: Valores médios da espessura final das amostras ensaiadas.....	63
Tabela 12: ANOVA para a resposta da deformação do GCL	64
Tabela 13: Teste de Tukey para a deflexão do GCL	64
Tabela 14: Valores finais de Condutividade Hidráulica para as amostras ensaiadas	65
Tabela 15: ANOVA para a resposta da condutividade hidráulica	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Pesquisas relacionadas às espessuras de solo de cobertura para proteção do GCL	35
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	13
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i>	14
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. BIBLIOMETRIA	15
2.2. BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES DE ATERROS SANITÁRIOS	19
2.3. GCL (<i>GEOSYNTHETIC CLAY LINER</i>)	21
2.3.1. <i>Bentonita</i>	25
2.3.2. <i>Expansão da Bentonita</i>	27
2.3.3. <i>Condutividade hidráulica</i>	29
2.3.3.1 <i>Ensaios de condutividade hidráulica em GCL</i>	31
2.4. FENÔMENO DE <i>SQUEEZING</i>	34
3. MÉTODO DA PESQUISA	36
3.1. MATERIAIS	36
3.1.1. <i>GCL</i>	36
3.1.2. <i>Solo de cobertura</i>	37
3.1.3. <i>Água</i>	38
3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
3.2.1. <i>Preparação dos corpos de prova de GCL</i>	39
3.2.2. <i>Hidratação do GCL</i>	40
3.2.3. <i>Ensaio de squeezing - versão modificada do ensaio de penetração Índice de Suporte Califórnia (CBR)</i>	41
3.2.4. <i>Ensaios de condutividade hidráulica</i>	43
3.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	46
3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1. ENSAIOS DE <i>SQUEEZING</i>	48
4.1.1. <i>Razão solo de cobertura H/B=1.0</i>	48
4.1.2. <i>Razão solo de cobertura H/B=1.5</i>	50
4.1.3. <i>Razão solo de cobertura H/B=2.0</i>	52
4.2. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO GCL PERMEADO COM ÁGUA – APÓS ENSAIO DE <i>SQUEEZING</i>	54
4.2.1. <i>Condutividade hidráulica (H/B = 1,0)</i>	54
4.2.2. <i>Condutividade hidráulica (H/B = 1,5)</i>	57
4.2.3. <i>Condutividade hidráulica (H/B = 2,0)</i>	59
4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	62

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A situação da disposição final de RSU no Brasil, apresentada pelo SNIS (2021), indica que no ano de 2020 78,8% dos resíduos foram encaminhados para Aterros Sanitários, 11,6% em Aterros Controlados e 14,6% em Lixões. Em quantidade representa 652, 617 e 1.545 respectivamente.

A principal meta para solucionar o problema ambiental sanitário causado por aterros inadequados é a erradicação dos lixões. É uma questão de saúde pública e ambiental, pois estima-se que R\$1,00 investido em obras de aterros sanitários, economizaria R\$4,00 em saúde. Di Creddo (2016) estudou sobre a erradicação dos lixões no Brasil e concluiu que são necessários 448 novos aterros sanitários no país.

Aterros inadequados causam contaminação do solo e água subterrânea devido ao lixiviado, líquido gerado pelos resíduos do aterro, que acarretam inúmeros danos à saúde e ao meio ambiente.

Para limitar a percolação de líquidos contaminados e a água da chuva, os aterros sanitários são projetados com camadas compactadas de solos de granulometria fina, ou seja, solos predominantemente argilosos, e em boa parte dos casos, associados com geossintéticos, tanto para barreiras impermeabilizantes na camada de revestimento inferior, quanto para cobertura de aterros.

Em razão da demanda crescente da construção de aterros sanitários para os próximos anos por causa do Marco Regulatório do Saneamento Básico (2020), é imprescindível o estudo sobre barreiras de impermeabilização utilizando GCL.

O geocomposto bentonítico ou GCL (representação da expressão em inglês *Geosynthetic Clay Liner*), vem se tornando uma alternativa eficiente quando comparado a *liners* de argila compactada, ou seja, CCL (representação da expressão em inglês *Compacted Clay Liner*). O GCL é formado por um núcleo de bentonita envolvido por dois materiais geossintéticos, dando origem a uma barreira de contenção a partir da hidratação da bentonita, para que se obtenha uma baixa condutividade hidráulica. Porém, após hidratado, o GCL aumenta sua espessura devido à expansão da bentonita, tornando-o mais frágil.

Segundo Koerner (2005) e Chen *et al* (2010), essa expansão expõe o GCL à possibilidade da ocorrência do fenômeno conhecido como deslocamento lateral da bentonita (do inglês: *squeezing*). Tal fenômeno é decorrente de uma carga não perfurante, estacionária, atuante sobre o GCL, quando este se encontra com insuficiente solo de cobertura. Além disso,

outros fatores podem danificar o GCL como: irregularidades na base, tráfego de veículos pesados utilizados na construção da obra, tráfego sobre o GCL desprotegido, a não instalação do GCL no mesmo dia, conforme recomendado pelo fabricante. Para Koerner *et al.* (1998a, 1998b), a extrusão da bentonita ou deslocamento lateral normalmente ocorre quando está úmida e instável.

As pesquisas relacionadas com a condutividade hidráulica de GCLs, conduzidas pelo grupo de pesquisa em geossintéticos da Universidade de Passo Fundo tiveram início em 2017. O primeiro trabalho foi desenvolvido por Zanella (2019), que projetou um equipamento para medição de condutividade hidráulica, um permeâmetro de parede flexível. No mesmo ano, Miguel *et al.* (2017) estudou a razão ótima de cobertura adequada para proteger o GCL, utilizando resíduo do beneficiamento de ágata. A montagem e validação do equipamento de ensaio, e posterior análise da percolação de Biodiesel na condutividade hidráulica do GCL, é um trabalho que está sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa, com previsão de conclusão em 2022.

Atualmente, não há pesquisas científicas que abordem o comportamento da condutividade hidráulica do GCL após o fenômeno de deslocamento lateral da bentonita (*squeezing*), mas somente estudos separados, isto é, ou sobre a condutividade hidráulica do GCL ou sobre o fenômeno do *squeezing*, justificando, desta forma, o trabalho realizado.

Com base nesse contexto, este estudo pretendeu responder a seguinte pergunta: de que forma o fenômeno de *squeezing* afeta a condutividade hidráulica do GCL?

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar o comportamento da condutividade hidráulica do GCL permeado com água, após fenômeno de deslocamento lateral da bentonita (*squeezing*).

1.2.2. Objetivos Específicos

- a. Avaliar o fenômeno de *squeezing* no GCL em diferentes razões (espessuras) de solo de cobertura;
- b. Avaliar a condutividade hidráulica do GCL após o fenômeno de *squeezing*.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BIBLIOMETRIA

Para identificar o estado da arte sobre a utilização de geocomposto argiloso (GCL) em obras de aterros sanitários, foi realizada uma análise bibliométrica, para posteriormente selecionar os melhores trabalhos e analisar a metodologia utilizada, os materiais empregados, bem como os resultados obtidos.

Foram utilizados os mecanismos de busca das bases de dados da *Web of Science* e da *Scopus*. Para a busca, foram utilizados os seguintes termos abrangentes, em inglês: *Geosynthetic Clay Liner* (geocomposto argiloso, GCL) e *Landfills* (aterro sanitário). A palavra *squeezing* não foi utilizada pois a mesma quando colocada com as de GCL e aterro sanitário, não resultou em quaisquer resultados.

Após a busca, foi utilizado o *software* R para a consolidação dos resultados obtidos em ambas as bases de dados e também para realizar as estatísticas através da ferramenta “Bibliometrix” e sua interface “Biblioshiny”. Na sequência são apresentados os principais gráficos gerados na análise bibliométrica.

A Figura 1 apresenta os principais autores pelo índice H. Nota-se uma grande contribuição das pesquisas de autores como Benson C (1), Rowe R (2), Bouazza A (6), Fox P (8) e Koerner R (18).

A Figura 2 apresenta a produção científica por país. Nota-se um grande volume de pesquisas nos continentes da América do Norte e Ásia.

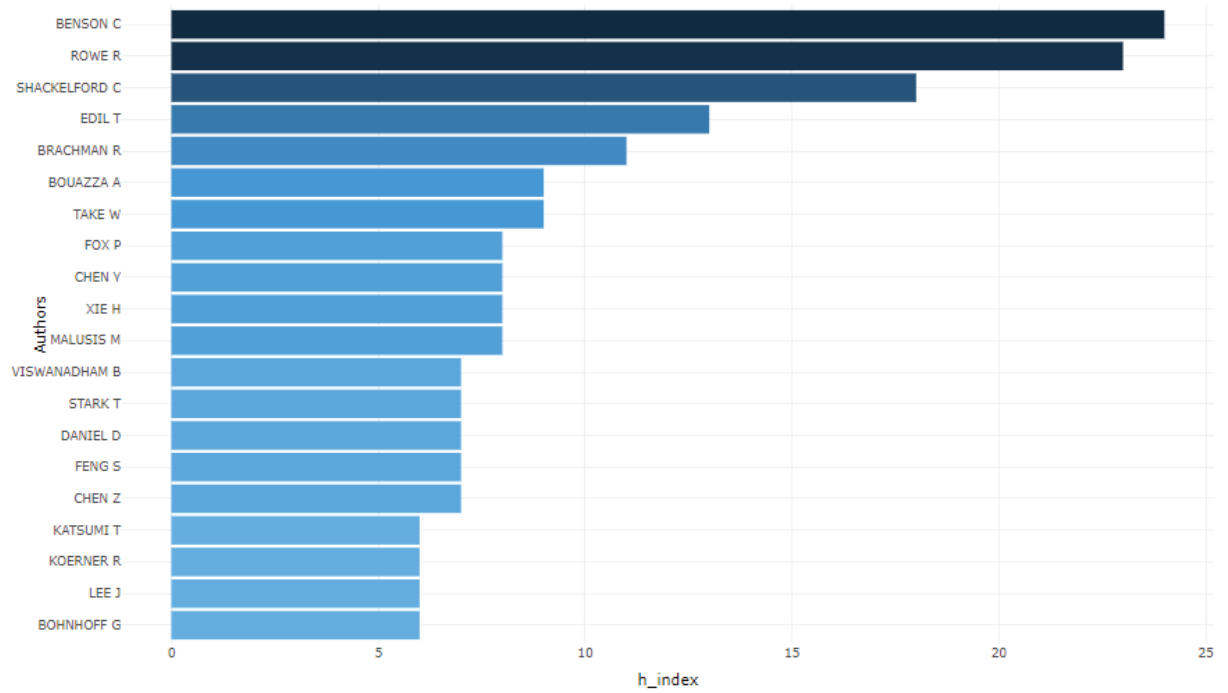
A Figura 3 apresenta as 20 principais palavras encontradas nos documentos, tais como: bentonita, aterro sanitário, geossintéticos, entre outras.

A Figura 4 apresenta as 20 principais revistas pelo índice H com publicações no tema, onde o *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* aparece com grande destaque em comparação aos demais veículos.

A Figura 5 apresenta as 20 principais afiliações dos autores classificadas pela quantidade de documentos, em que se destaca a *Queen's University*, situada no Canadá.

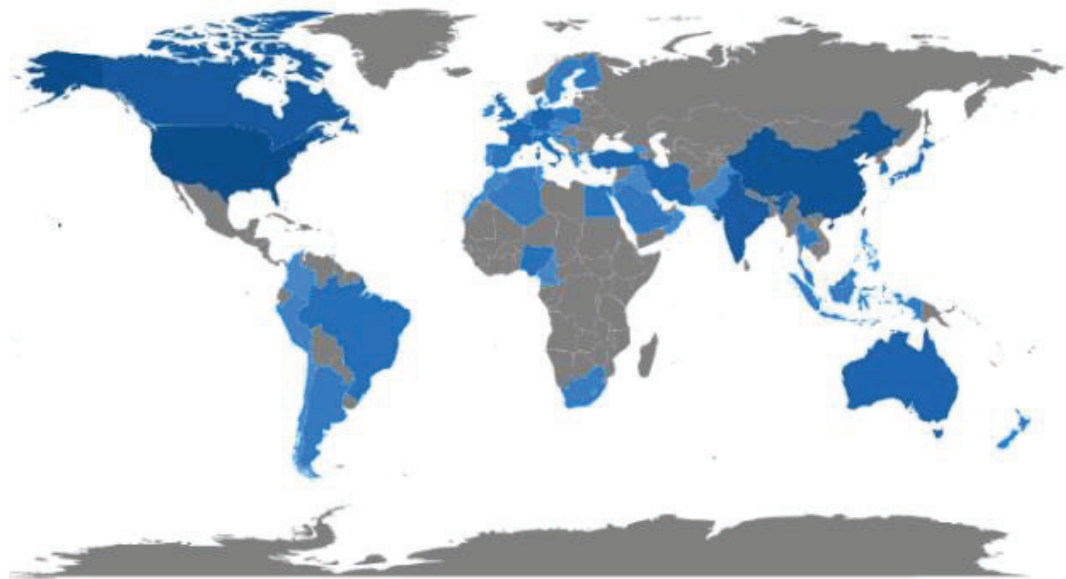
A Figura 6 apresenta os 20 principais autores com maior número de citações. De forma geral, é possível perceber a grande contribuição ao estado da arte referente ao uso de geossintéticos em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários do pesquisador Rowe.

Figura 1: 20 principais autores pelo índice H



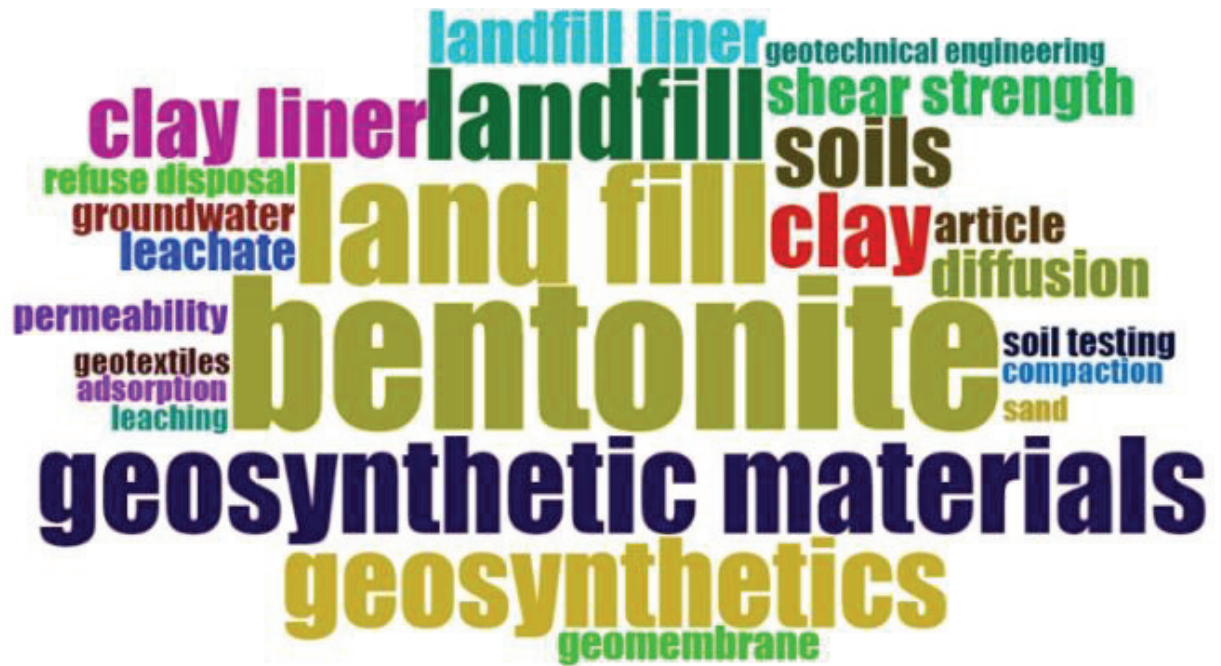
Fonte: Bibliometrix (2020).

Figura 2: Produção científica dos países



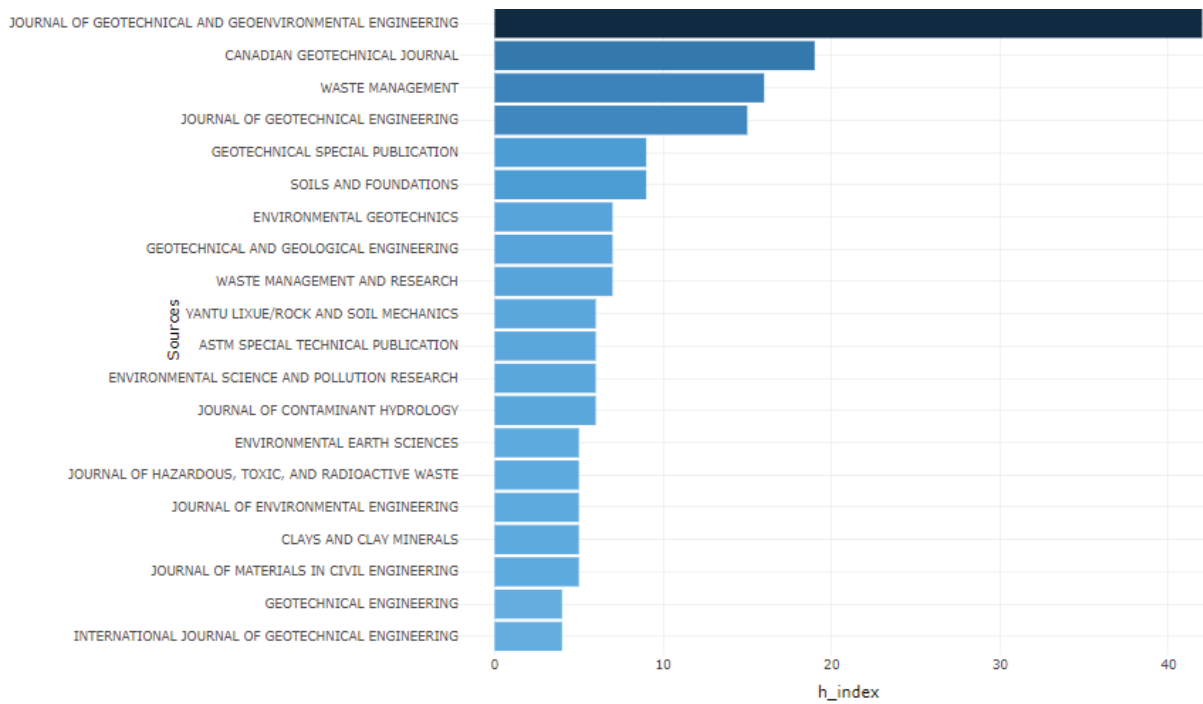
Fonte: Bibliometrix (2020).

Figura 3: Nuvem com as 20 principais palavras encontradas nos documentos



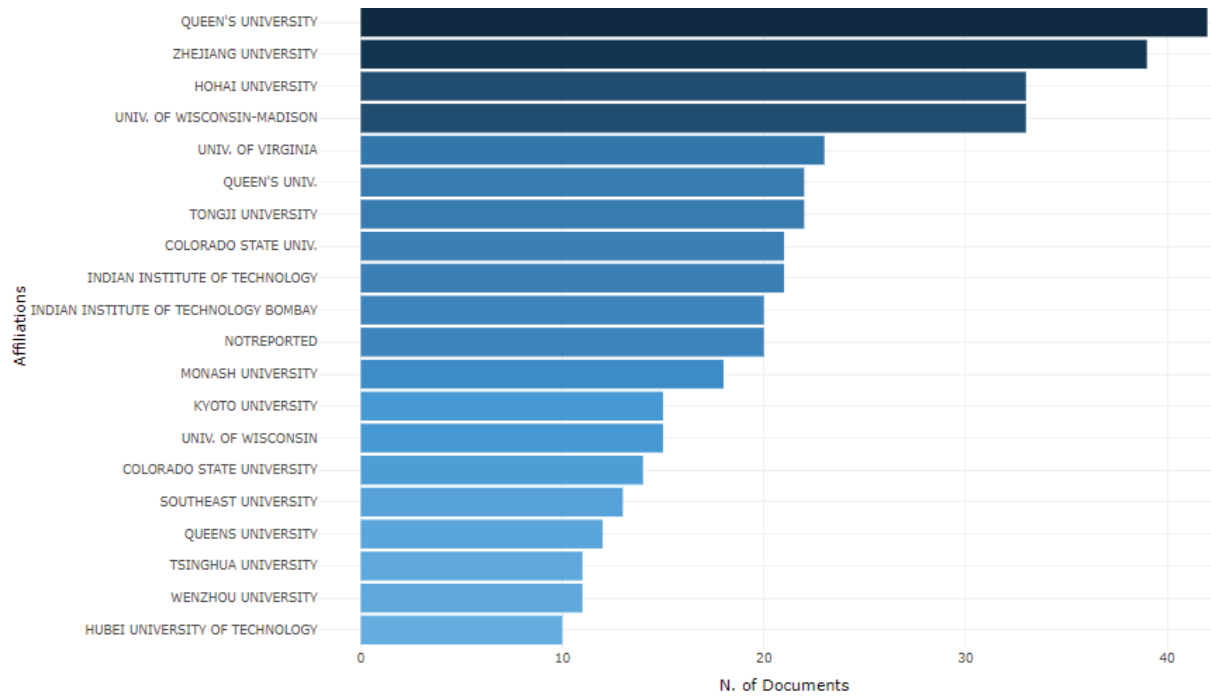
Fonte: Bibliometrix (2020).

Figura 4: 20 principais revistas pelo índice H



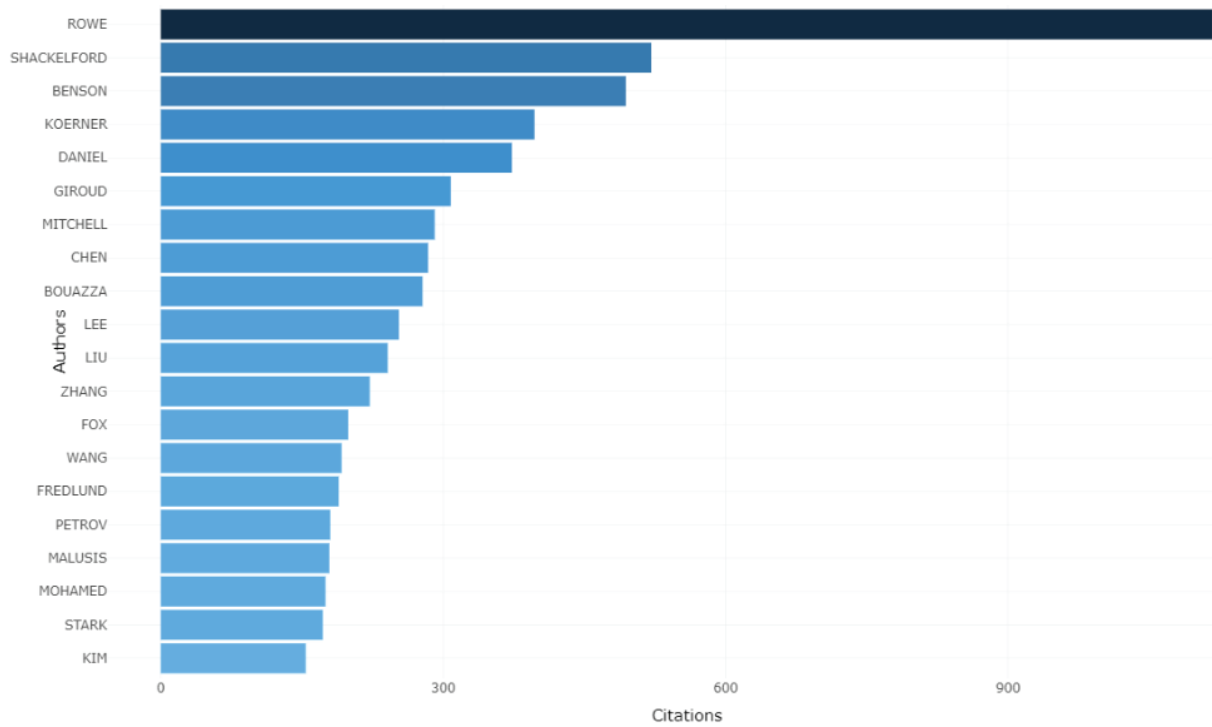
Fonte: Bibliometrix (2020).

Figura 5: 20 principais afiliações classificadas pela quantidade de documentos



Fonte: Bibliometrix (2020).

Figura 6: 20 principais autores com maior número de citações



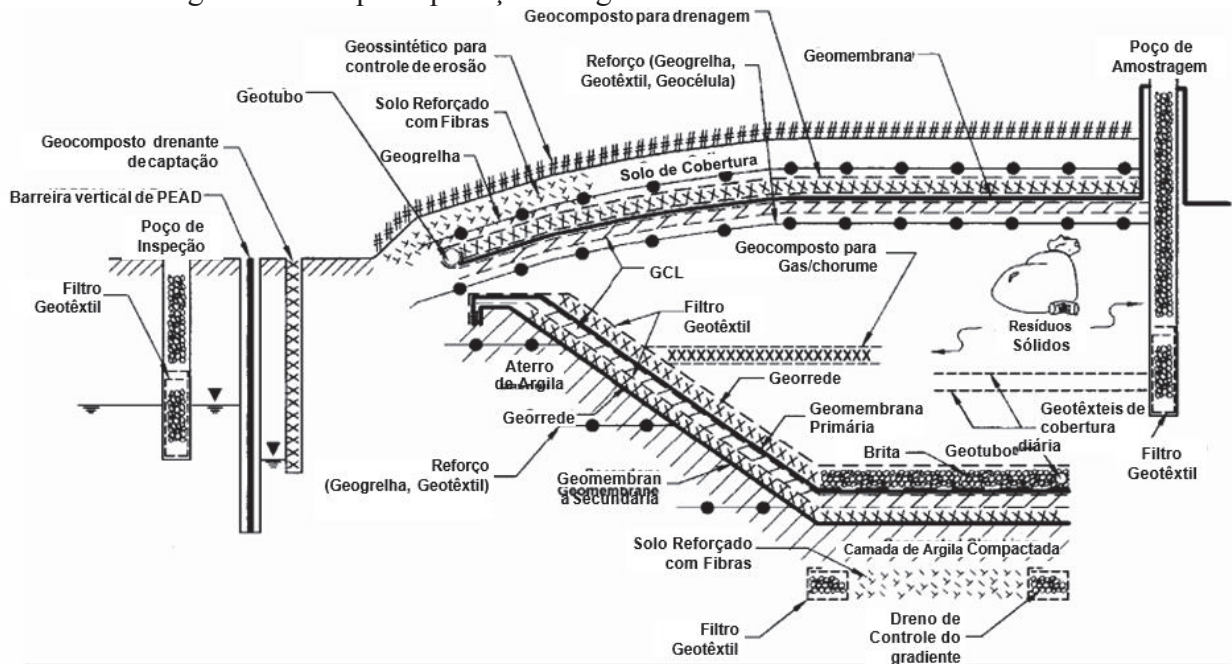
Fonte: Bibliometrix (2020).

2.2. BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES DE ATERROS SANITÁRIOS

O GCL é amplamente utilizado como barreiras hidráulicas, sempre em conjunto com um ou mais componentes. Aterros sanitários, aterros de resíduos sólidos perigosos, barragens de rejeito, tanques de armazenamento de líquidos (resíduos de processos industriais/de mineração) (BOUAZZA, 2002; ROWE, 2014), são alguns exemplos de obras que fazem o uso de GCL como barreira impermeabilizante. No caso de aterros sanitários, normalmente é necessário o projeto de barreira para conter o líquido oriundo da decomposição dos resíduos, e também uma camada para drenar esse líquido, evitando que se acumule sobre a camada impermeável o que aumentaria a carga hidráulica sobre a mesma e/ou se direcione a camadas subjacentes devido a falhas na barreira. Portanto, os componentes de fundo são: camada de transição/filtração, camada drenante, camada de proteção e barreira impermeável, já na cobertura, um sistema semelhante se faz necessário para barrar e direcionar os gases e infiltração da água da chuva (MENDES, 2010).

A Figura 7 apresenta as inúmeras aplicações de geossintéticos em aterros sanitários. Para reforço dos taludes podem ser utilizadas as geogrelhas, já os geotêxteis são usados para filtração de percolados ou para proteção da geomembrana. Para a drenagem do lixiviado é utilizado as georredes e geotubos. E por fim, os geocompostos bentoníticos (material do presente estudo) juntamente com as geomembranas exercem a função de impermeabilização do fundo a da cobertura de aterros sanitários, detendo a propagação dos líquidos e gases oriundos da decomposição dos resíduos.

Figura 7: Múltiplas aplicações de geossintéticos em aterros sanitários



Fonte: Adaptado de Bouazza & Zornberg (2007).

Em revestimentos compostos, a geomembrana é a principal camada para conter o fluxo de contaminantes. Mesmo com todos os cuidados indicados pelo fabricante quanto ao manuseio e instalação da geomembrana, estudos apresentaram defeitos (NOSKO e TOUZE-FOLTZ, 2000; ROLLIN *et al.*, 2002). Esses defeitos são caminhos de fluxo para migração de contaminantes para as camadas inferiores.

A interface geomembrana com a camada de GCL é bastante estudada. Barroso *et al.* (2006) investigou em laboratório a taxa de fluxo de contaminantes de um revestimento composto por geomembrana, GCL e camada de solo de três diferentes escalas, pequena (célula de 0,2 m de diâmetro), intermediária (célula de 1 m de diâmetro) e grande (célula quadrada de 0,2 de largura), onde constatou que o aumento de tensão de confinamento de 50 a 200 kPa apresenta maior impacto na taxa de fluxo para GCLs hidratados, quando comparado aos não hidratados, também sugere que existe uma não uniformidade da transmissividade na interface da geomembrana com o GCL. Os resultados identificaram que é difícil obter tendências que apontem a influência da pré-hidratação, pressão confinante e carga hidráulica. Segundo Palmeira e Gardoni (2000; 2002) e Gardoni e Palmeira (2002), a permissividade e a transmissibilidade do geotêxtil de cobertura do GCL pode ser influenciada pela pressão confinante.

Problemas relacionados às altas temperaturas presentes em obras de aterros em geral, tem impacto na durabilidade e desempenho hidráulico em barreiras impermeabilizantes

(ROWE, 2005; BOUAZZA *et al.*, 2013, 2014). Esse calor tem potencial de induzir a secagem da camada de GCL resultando na rachadura por dessecação do mesmo, conseqüentemente criando um fluxo de contaminante (BOUAZZA *et al.*, 2014). Segundo Bouazza *et al* (2017) para proteger o GCL de possível secagem ou dessecação causada pelo calor, as lacunas cheias de ar presentes na camada de geomembrana auxiliam na redução da condutividade térmica, ou seja, quanto maior a lacuna cheia de ar, menor era o fluxo de calor, porém existe a necessidade de bombear o líquido que irá passar pelas rachaduras da geomembrana. Segundo Rowe e Hoor (2009), o fluxo de calor interfere na vida útil dos revestimentos de aterros sanitários pois acelera o envelhecimento da geomembrana (HSUAN e KOERNER, 1998; ROWE, 1998). Para evitar esse problema, é importante fazer uma estimativa da temperatura do revestimento, afim de prever a vida útil dos componentes dos revestimentos (ROWE e HOOR, 2009).

Observa-se que boa parte das pesquisas relacionadas a barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário é sobre danos causados na camada da geomembrana, tanto na fase de construção como operação, conseqüentemente afetando a camada de GCL por causa da maior carga hidráulica de contaminantes. Para Rowe (2020), a escolha do tipo de GCL é de extrema importância, pois implica em uma diferença de quatro ordens de magnitude na questão da condutividade hidráulica.

Para um GCL mal selecionado, caso a geomembrana possua um dano com menos de 10 metros de comprimento, poderia resultar em uma taxa de vazamento de mais de 1000 litros por hectare por dia, já se for assertivo a escolha do GCL a ser aplicado, o mesmo dano, porém com 1000 metros de comprimento, a taxa de vazamento poderia ser inferior a 140 litros por hectare por dia. Para ajudar na escolha do GCL, estudos mais recentes trazem informações relevantes sobre as características do material no que diz respeito à condutividade hidráulica (PETROV e ROWE, 1997; ROWE, 1998, 2005, 2014, 2016, 2019; BENSON *et al.*, 2010a; BRADSHAW e BENSON, 2014; CHAI *et al.*, 2016; ROUF *et al.*, 2016; BOUAZZA *et al.*, 2017; SETZ *et al.*, 2017; LU *et al.*, 2017, 2018; SCALIA *et al.*, 2018; ROWE *et al.* 2019).

2.3. GCL (*GEOSYNTHETIC CLAY LINER*)

O GCL é classificado como um geocomposto, pois é um produto manufaturado constituído por uma fina camada de argila bentonita, ou material similar de baixa condutividade, ligada a uma ou mais camadas de material geossintético (geotêxteis e/ou geomembranas), onde esses materiais são unidos mecanicamente por meio de agulhamento, costura ou adesivação química (KOERNER, 2005). Tem a função de barreira hidráulica tanto

para conter água ou lixiviados e também, em alguns casos, até mesmo gases (ESTORNELL; DANIEL, 1992; KOERNER, 2005).

Conforme material elaborado pela Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS – *International Geosynthetics Society*), os geotêxteis que compõem os GCLs normalmente são costurados ou agulhados através do núcleo argiloso, tem o objetivo de aumentar a resistência interna do produto ao cisalhamento. No quesito aplicação, os GCL's quando hidratados, são utilizados em aterros sanitários em conjunto com geomembranas, pois atuam efetivamente como barreira hidráulica (IGS, 2020).

Além da aplicação citada anteriormente, esse material vem sendo amplamente utilizado nas últimas décadas, como barreiras de proteção ambiental em instalações de transporte, rodovias e ferrovias, com o intuito de minimizar a poluição do solo e águas subterrâneas causadas pelos derramamentos acidentais e infiltração de produtos químicos causados por acidentes rodoviários. Segundo Bouazza (2002), esse material pode ser empregado em lagoas ou represas de superfície, revestimentos secundários em tanques de armazenamento subterrâneo de postos combustíveis e como revestimentos únicos para canais. Ainda, o GCL pode ser uma alternativa para substituição de camadas de argila compactada, pois apresenta permeabilidade de $(5 \text{ a } 1) \times 10^{-11} \text{ m/s}$, ou seja, de 20 a 100 vezes menor (ROWE, 2010). Os GCL's possuem duas estruturas diferentes, não-reforçados e reforçados. Os GCL's não-reforçados são constituídos pela união da bentonita aos geossintéticos através de colagem adesiva, usualmente utilizado em superfícies planas. Já os reforçados, sua estrutura é mantida por meio de costura ou agulhamento, são mais usuais, pois são empregados em terrenos com inclinações mais íngremes. A desvantagem do GCL no quesito suscetibilidade ao cisalhamento interno, é solucionada pela opção reforçada, pois atua no sentido de aumentar a resistência (KOERNER, 2005).

A Tabela 1 apresenta algumas vantagens e desvantagens da utilização de GCLs em barreiras hidráulicas.

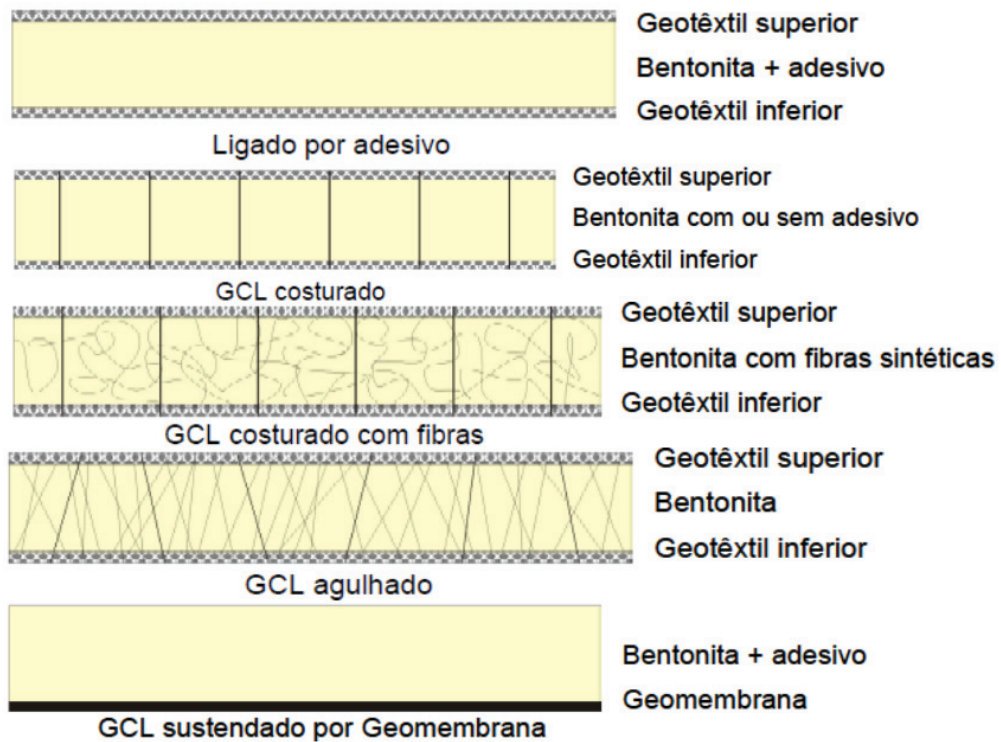
Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos GCLs

Vantagens	Desvantagens
Rápida instalação, custo baixo	Os GCL's não reforçados apresentam baixa resistência ao cisalhamento da bentonita, quando hidratados
Não há necessidade de mão-de-obra qualificada	Durante a instalação tem a possibilidade de perda de parte da bentonita
Baixa condutividade hidráulica se instalado corretamente	Problemas de cisalhamento na interface com outros materiais
Boa capacidade de suportar recalques diferenciais	Baixa resistência de cisalhamento de pós-pico
Capacidade de cicatrização	Predisposto a dissecação, ocorrendo fissuras que aumentam a permeabilidade
Não depende da disponibilidade de solos locais	Risco de puncionamento durante ou após a instalação
O reparo é de fácil manuseio	Com baixa umidade pode ocorrer a permeabilidade de gases
Resistência a ciclos de gelo/degelo	
Por causa da sua fina espessura, ocupa menor espaço de armazenamento	Propenso a troca de íons para o caso de GCLs com bentonita sódica
Não há necessidade de ensaios de condutividade hidráulica	Caso a bentonita não for hidratada corretamente, é possível aumentar a condutividade hidráulica e entrar em contato diretamente com o contaminante
Capacidade de atuar como barreira para gases quando hidratados	Possibilidade de aumento da condutividade hidráulica com o tempo devido a diminuição da espessura da bentonita causado pelas sobrecargas
Diminui as tensões de sobrecarga em substrato compressível	Alto fluxo difusivo de contaminante (migração do local de maior concentração para o local de menor concentração) comparado com CCL

Fonte: Adaptado de Bouazza (2002).

Os GCLs disponíveis no mercado se diferenciam pelo tipo da bentonita presente no núcleo (granular ou pó, cálcica ou sódica), pelo geossintético constituinte (geotêxtil ou geomembrana nas faces inferior ou superior) e pelo processo de união dos materiais (agulhagem, costura ou adesivação). A Figura 8 ilustra alguns tipos de GCLs disponíveis no mercado.

Figura 8: Modelos comerciais de GCLs



Fonte: Adaptado de Mendes (2010).

2.3.1. Bentonita

Bentonitas são argilas onde sua principal característica é a grande capacidade de expansão, grande capacidade de troca catiônica e baixa permeabilidade (EGLOFFSTEIN, 2001; 2002). Essas argilas são resultantes da alteração de cinzas vulcânicas, onde o argilomineral montmorilonita é predominante em sua composição. As bentonitas usadas em GCLs, geralmente contêm de 75 a 95% de seu peso de montmorilonita. Esse mineral é composto de três camadas (2:1): uma camada de alumínio (octaédrica) entre dois silicatos (tetraédricos). Ainda, o mineral possui outros componentes como: quartzo, crisobalita, feldspatos, mica, ilita, caulinita, carbonatos, zeolitas, sílica, hidróxidos de alumínio, componentes orgânicos, hematita, limonita e metais pesados, dentre outros (GRIM, 1968; GRIM e GÜVEN, 1978). O argilomineral montmorilonita possui camadas que são unidas por moléculas de água podendo se expandir para se unir com mais moléculas de água e íons hidratados, além de apresentarem maior área superficial e maior CTC (LEWIS, 2009).

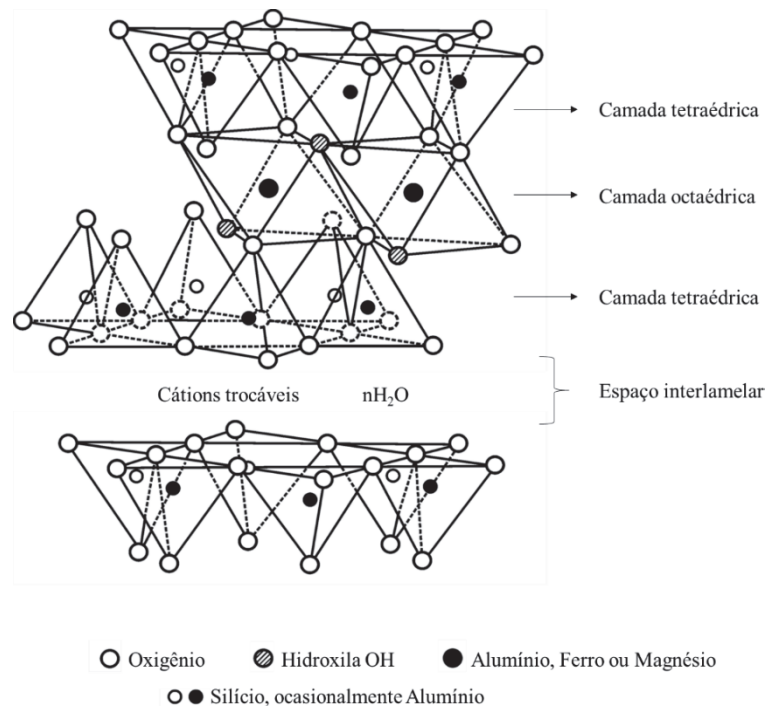
A montmorilonita apresenta grande área específica (valores próximos a 800 m²/g) e grande concentração de cargas negativas. Tais características têm como consequência um número elevado de cátions hidratados, separação das camadas do material durante a hidratação, e por fim, uma absorção de moléculas de águas (MITCHELL e SOGA, 2005). A Figura 9 mostra a estrutura cristalina da montmorilonita.

A classificação das bentonitas depende do cátion trocável predominante, onde pode ser sódica ou cálcica. As bentonitas cálcicas (Bentonita-Ca) apresentam uma expansão em consequência da expansão inter-cristalina em função da hidratação dos cátions entre as camadas de silicato. Já as bentonitas sódicas (Bentonita-Na) ocorre uma expansão maior, porque além da expansão inter-cristalina, também ocorre a expansão osmótica, que resulta em uma delaminação parcial dos silicatos, em consequência aumentando a distância entre eles (EGLOFFSTEIN, 1997). Essa expansão das partículas acaba por preencher os vazios do solo, formando uma barreira contra a passagem do fluxo (GLEASON *et al.*, 1997). A Figura 10 mostra a concepção da microestrutura e permeabilidade da argila.

A baixa permeabilidade das bentonitas ocorre por causa de três fatores principais: dupla camada difusa envolvendo a partícula de argila (a carga negativa da partícula de argila causa a atração de íons de carga positiva formando uma dupla camada de cargas ao redor da partícula), adesão de água nos cristais de montmorilonita (às partículas sólidas aderem a água de hidratação e a água adsorvida, onde apenas uma parte da água ocupa os poros da bentonita seguindo à lei de Darcy), e por último, é a microestrutura das partículas de argila

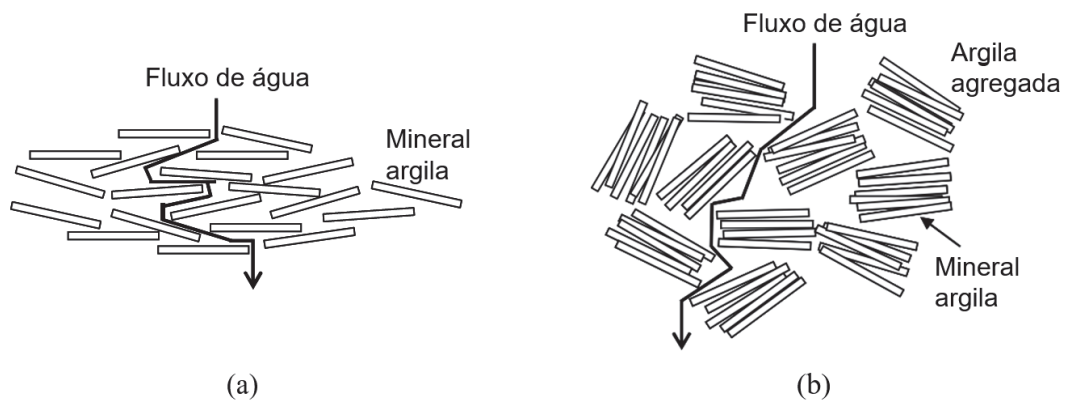
(EGLOFFSTEIN, 2002). No fator referente a microestrutura das partículas de argila: em função da delaminação parcial das camadas de silicato, bentonitas sódicas possuem cristais de tamanhos menores e uma microestrutura dispersa, muito mais eficiente em comparação às bentonitas cálcicas. Sendo assim, bentonitas sódicas são menos permeáveis, apresentam caminhos de fluxo mais longos, contornando partículas individuais de argila.

Figura 9: Estrutura cristalina da montmorilonita



Fonte: Adaptado de Mitchell e Soga (2005).

Figura 10: Concepção da microestrutura e permeabilidade da argila



(a) bentonita sódica; (b) bentonita cálcica

Fonte: Adaptado de Hasenpatt (1988).

Segundo Bouazza (2002), bentonitas cálcicas expandem de 2 a 4 vezes o volume inicial, enquanto as bentonitas sódicas podem expandir de 10 a 15 vezes o seu volume quando hidratadas. Porém, bentonitas cálcicas naturais são encontradas com maior frequência na natureza, já as bentonitas sódicas naturais são relativamente raras (EGLOFFSTEIN, 2001). Uma alternativa para utilizar as bentonitas cálcicas é utilizar o hidróxido de sódio, onde resulta na substituição dos íons de cálcio resultando em uma redução da permeabilidade com valores próximos aos das bentonitas sódicas (KOERNER, 2005). Segundo Guyonnet *et al.* (2009) para garantir um desempenho adequado do GCL no fundo de aterros sanitários, a porcentagem de hidróxido de cálcio da bentonita não deve exceder 5% do seu peso. Para Bouazza (2002) a consequência da transformação de bentonita sódica em cálcica se observa na troca de íons nos GCLs de camadas de cobertura de aterros sanitários, pois as tensões confinantes são menores que 20 kPa. Já nos GCLs instalados no fundo dos aterros sanitários, até podem provocar um aumento da condutividade hidráulica, no entanto, os efeitos da troca de íons são minimizados pelas altas pressões confinantes sobre os GCLs de fundo.

2.3.2. Expansão da Bentonita

Para que o GCL funcione como barreira impermeabilizante, é necessário que ocorra a expansão da bentonita. A norma americana ASTM D 5890 (2019) descreve o ensaio de expansão da bentonita. O ensaio fornece resultados qualitativos sobre a capacidade de inchaço da bentonita em água destilada. Embora não tenha uma correlação direta e proporcional que relacione a expansão da bentonita hidratada e sua condutividade hidráulica de serviço, sabe-se que quanto maior o aumento de volume, maior será a capacidade de preencher os vazios internos e diminuir sua permeabilidade.

A norma menciona somente a taxa de inchamento da bentonita hidratada com água destilada, porém os materiais compostos por bentonita, em sua maioria, são sujeitos à percolação de líquidos que não sejam somente água destilada. Com isso, vários estudos aplicam as diretrizes da norma americana para analisar a expansão da bentonita hidratando-a com soluções diversificadas ou fluídos não usuais (GATES *et al.*, 2012; ÖREN e AKAR, 2017; MAZZIERI *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2018; ZANELLA, 2019).

Gates *et al.* (2012) comparou o índice de expansão de três tipos de bentonita (duas bentonitas de sódio natural e uma de magnésio ativada por sódio) usualmente utilizadas em GCL, sendo hidratadas em soluções aquosas de NaCl. As amostras também foram avaliadas

quanto à mineralogia quantitativa e capacidade de troca catiônica. Concluem que a expansão das três bentonitas responderam ao aumento da concentração de NaCl de maneira semelhante e os valores de k permaneceram abaixo de 1×10^{-9} m/s até NaCl 0,5 M.

Da mesma forma, Mazzieri *et al* (2017) estudou dois tipos de bentonita, uma hidratada com água destilada e outra com água do mar. As amostras foram submetidas a cinco ciclos de molhagem e secagem. Após os ciclos, a capacidade de expansão da bentonita com a água do mar reduziu consideravelmente. Ambos os materiais aumentaram sua condutividade hidráulica, atribuíram esse aumento de permeabilidade em função das fissuras de dessecação não cicatrizadas na bentonita.

Ören e Akar (2017) investigaram a expansão e condutividade hidráulica de seis bentonitas, das quais foram hidratadas com água da torneira e com lixiviados de aterro sanitário. O volume de expansão da bentonita hidratada com lixiviados (5,0-19,5 mL/2g) foi menor comparada à hidratada com água (14,5-27,0 mL/2g). Resultado devido a espessura da dupla camada difusa onde circula as partículas de bentonita ser comprimida por causa dos cátions do lixiviado de aterro sanitário.

Yang *et al* (2018) investigaram a eficácia de uma parede de lama de contenção composta por solo-bentonita, aplicada em aterros de resíduos da combustão do carvão (CCR), onde o mesmo pode contaminar as águas subterrâneas. Os experimentos laboratoriais determinaram o índice de expansão, condutividade hidráulica, dentre outros, para tais, utilizaram água destilada bem como, água contaminada com o resíduo. Verificaram que a bentonita hidratada com água contaminada com o resíduo (30 mL/2g) obteve uma maior expansão do que a bentonita hidratada com água destilada (26 mL/2g).

Zanella (2019) realizou ensaios de expansão da bentonita seguindo a norma ASTM D 5890, hidratou as amostras com água destilada e também com biodiesel por um período de 24 horas. Como esperado, a bentonita hidratada com água obteve uma grande capacidade de inchamento, com média de 24 mL/2g. Porém, nas amostras que foram hidratadas com biodiesel não ocorreu a expansão, refletindo as características das moléculas de biodiesel, como a hidrofobia e as longas cadeias carbônicas. Nesse caso, é difícil garantir uma barreira impermeabilizante quando a bentonita for saturada com biodiesel. A Figura 11 apresenta os ensaios realizados por Zanella (2019), onde é possível verificar a expansão, ou não, na base da proveta da bentonita hidratada com água destilada e biodiesel.

Figura 11: Ensaio de Expansão da bentonita



Fonte: Zanella (2019).

2.3.3. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica, ou também conhecida como permeabilidade, está relacionada com a permissividade de fluxo de meio poroso como o solo, ou seja, é a facilidade que a água flui sobre o mesmo. Ainda, a condutividade hidráulica leva em consideração a viscosidade e o peso específico do fluido permeante no solo. Exerce um papel fundamental na escolha do tipo de sistema que será utilizado em barreiras impermeabilizantes, por exemplo, pois nesses casos os materiais devem apresentar valores baixos de condutividade hidráulica.

O engenheiro francês Henry Darcy, em 1856, realizou ensaios pilotos sobre o movimento de água através de um filtro de areia, verificando os fatores dos quais influenciavam o fluxo de um fluido em meio poroso. Sua pesquisa resultou na Equação 1, conhecida como a Lei de Darcy.

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

Onde, (v) é a velocidade de descarga que é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (i), calculado a partir da Equação 2. Nesta equação é possível determinar a perda de carga (Δh) do fluido percolante em um determinado trecho de comprimento (L).

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

O coeficiente de condutividade hidráulica (k) é um parâmetro característico do próprio meio poroso e do líquido que nele percola. Quando as densidades e viscosidades do fluido são diferentes, bem como as amostras de solos, a Lei de Darcy pode ser reformulada conforme a Equação 3, pois são considerados também os parâmetros de viscosidade (μ) e peso específico (γ) do líquido percolante.

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

Solos arenosos apresentam elevados índices de permeabilidade, isso se deve ao fato que a condutividade hidráulica está relacionada com os vazios presentes no solo, onde quanto menor é o tamanho das partículas, menor será o tamanho dos vazios, sendo assim, maior será a permeabilidade e menor a condutividade hidráulica do solo. Por outro lado, solos argilosos apresentam baixa permeabilidade, em função dos pequenos diâmetros e formato dos grãos de argila.

Em GCLs a condutividade hidráulica é ligada a expansão da bentonita, exceto os casos em que é utilizado como base uma geomembrana. Sua condutividade hidráulica varia da ordem de 10^{-10} a 10^{-12} m/s, o que representa um valor muito abaixo do recomendado pela norma de barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários (10^{-7} m/s). A Tabela 3 apresenta valores de condutividade hidráulica em pesquisas com GCL.

A variação de permeabilidade apresentada na Tabela 2 pode estar ligada à qualidade dos geotêxteis utilizados, da bentonita, e da tensão de confinamento aplicada ao GCL durante sua hidratação (MIGUEL *et al.*, 2020).

Daniel *et al.* (1997) em sua pesquisa sobre a permeabilidade de um GCL composto por geotêxtil envolvendo uma camada de bentonita sódica, obteve como resultados de condutividade hidráulica variando entre 2×10^{-10} a 2×10^{-9} m/s. A tensão efetiva máxima foi igual a 69 kPa, contrapressão em 276 kPa e o gradiente de pressão em 35 kPa.

Pitanga e Vilar (2007) estudaram sobre amostras de GCL percolada com água deionizada e etanol combustível. Os valores médios de permeabilidade encontrados foram de 1×10^{-11} m/s para água e 6×10^{-10} m/s para o etanol. Como há pouca diferença nos resultados, os autores enfatizam que os valores não são conclusivos. Já Meer e Benson (2007) encontraram valores de 10^{-7} a 10^{-6} m/s em GCLs extraídos de fundos de aterros. O valor alto de condutividade

hidráulica presente nesses GCLs desenterrados após certo tempo de serviço, mostra que a bentonita perde a capacidade de expansão durante a desidratação e ressecamento, além de formar rachaduras e outras deformações macroscópicas.

Tabela 2: Variação da condutividade hidráulica de GCL

Autor	Condutividade hidráulica	Situação
Rowe <i>et al.</i> (2017)	$3,8 \times 10^{-11}$ cm/s	-
Rowe <i>et al.</i> (2017)	$4,4 \times 10^{-11}$ cm/s	-
Rowe <i>et al.</i> (2017)	$4,3 \times 10^{-11}$ cm/s	-
Rowe <i>et al.</i> (2017)	$5,9 \times 10^{-11}$ cm/s	-
Melchior <i>et al.</i> (2010)	$6-7 \times 10^{-9}$ cm/s	-
Benson <i>et al.</i> (2007)	$6-8 \times 10^{-11}$ cm/s	(permeabilidade original)
Benson <i>et al.</i> (2007)	2×10^{-7} e 8×10^{-8} cm/s	(permeabilidade após 2 anos)
Benson <i>et al.</i> (2007)	$1-9 \times 10^{-7}$ cm/s	(permeabilidade após 5 anos)
Estornell e Daniel (1992)	10^{-8} a 10^{-10} cm/s	-
Petrov e Rowe (1997)	10^{-9} cm/s	(permeabilidade quando hidratado com água)
Petrov e Rowe (1997)	10^{-9} cm/s	(permeabilidade quando hidratado com 2 Molar de NaCl)

Fonte: Autor (2020).

2.3.3.1 Ensaios de condutividade hidráulica em GCL

Existem duas modalidades para medir ou estimar a condutividade hidráulica de materiais: testes em laboratório e em campo. Ensaios em laboratório permitem o controle nas condições de saturação, nível de tensões efetivas, carga hidráulica e direção do fluxo, possibilitando medidas de anisotropia e controle do tempo de ensaio. Outra vantagem dos ensaios de laboratório comparada aos de campo, é em relação ao custo envolvido. Por outro lado, ensaios de campo são menos sensíveis ao efeito escala, pois a amostragem ensaiada em laboratório é consideravelmente pequena, podendo ocorrer variações entre as duas formas de determinação (DANIEL *et al.*, 1984).

A medição da condutividade hidráulica de materiais em laboratório é através de algum tipo de permeâmetro. Um permeâmetro pode ser classificado como de parede rígida ou flexível.

Alguns estudos abordam sobre os diferentes tipos de permeâmetro e seus respectivos desempenhos (BOYTON e DANIEL, 1985; DANIEL, 1994).

Permeâmetro de parede rígida geralmente são indicados para ensaios com solos que apresentam alta condutividade hidráulica, por exemplo, solos granulares ou não-coesivos. É composto de um corpo de prova cilíndrico contido em um tubo rígido, onde o fluido percolante atravessa a amostra ao longo do seu eixo (DANIEL, 1994). Apresenta algumas desvantagens, dentre elas, a incapacidade de saturação completa da amostra por contrapressão, falta de controle sobre as pressões atuantes na amostra, e por fim, apresenta dificuldade de conter fluxo lateral pelas paredes do todo do permeâmetro (BOYNTON e DANIEL, 1985).

A norma ASTM 5084:2016 (*Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*) recomenda a utilização de permeâmetros de parede flexíveis para solos com baixa condutividade hidráulica, na casa de valores iguais ou inferiores a 10^{-6} m/s. Koerner (2004) comparou a performance de ensaios de condutividade hidráulica do GCL em permeâmetros tanto de parede rígida como flexível, recomendando a utilização de permeâmetro de parede flexível para solos de baixa permeabilidade. Diferente do permeâmetro de parede rígida, permeâmetros de parede flexível possibilitam a total saturação da amostra por contrapressão, monitoramento das tensões atuantes, além de eliminar o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a parede do permeâmetro. Segundo Alonso (2005) uma desvantagem desse equipamento é a introdução de ar na amostra saturada e adensamento do corpo de prova.

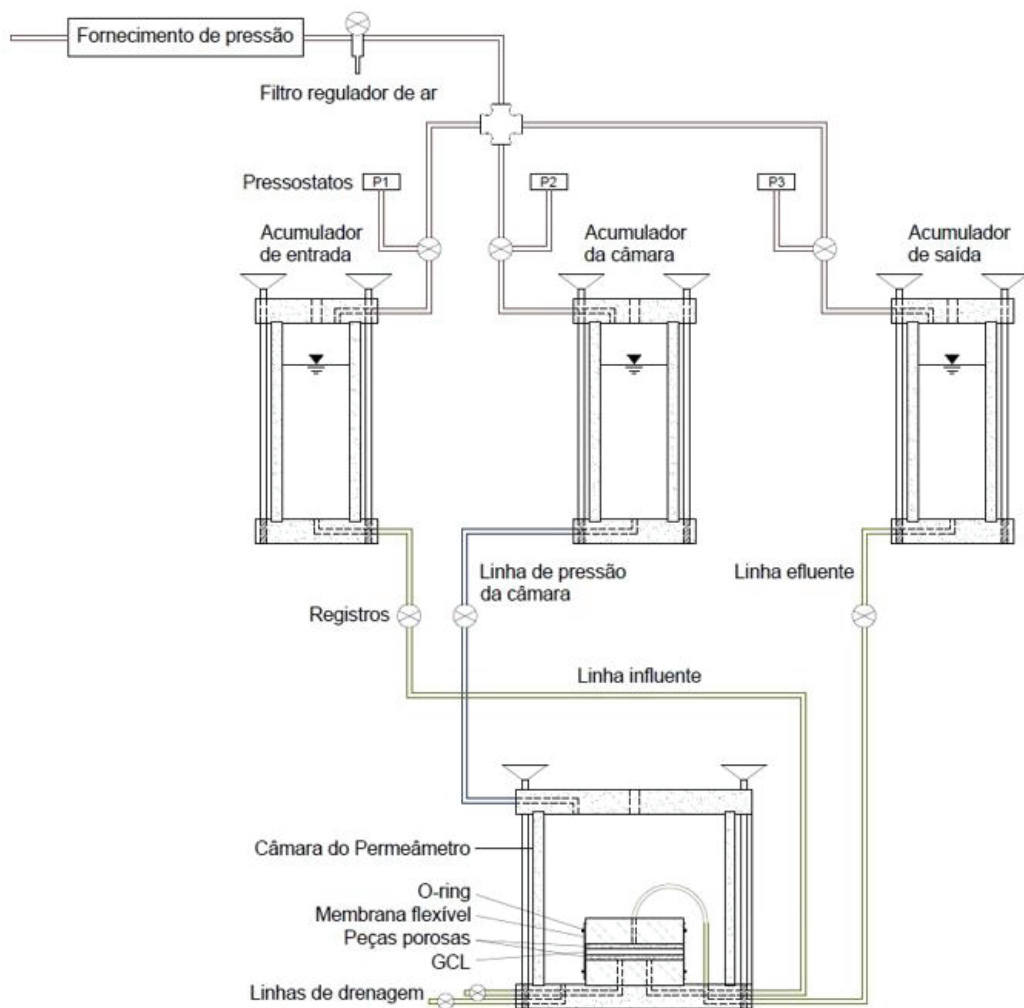
Os permeâmetros também se diferem quanto ao tipo de sistema de controle hidráulico, podendo ser do tipo aberto ou fechado. Tais sistemas são configurados por um ou três princípios básicos: carga constante, carga variável ou fluxo constante. Um sistema aberto funciona de forma onde o líquido influente ou efluente, ou ambos, estão em contato com a atmosfera ou faz parte de um sistema pressurizado. Com isso, a amostra saturada pode mudar seu volume, absorvendo ou liberando fluido durante a permeação. Já em sistema fechado consiste em um circuito fechado de líquido para permear o solo, sendo possível conectar as linhas de drenagem de entrada e saída do permeâmetro com um tubo capilar preenchido com mercúrio. Neste sistema o fluxo de entrada e saída serão iguais e a amostra não apresenta mudanças no volume, considerando após a saturação (ZANELLA, 2019).

Em sistemas de carga variável, a pressão hidráulica na entrada e na saída, ou em ambas, pode variar. Já nos sistemas de carga constante, não há variação da pressão do fluido percolante na entrada e nem na saída, a vazão pode ser determinada pois o gradiente hidráulico se mantém

constante. E por último, nos sistemas de fluxo constante o percolante passa pelo corpo de prova por meio de uma bomba de injeção, sempre em uma vazão constante.

Zanella (2019) desenvolveu em sua pesquisa um projeto de um permeâmetro de parede flexível de acordo com as especificações da norma ASTM D5887:2016 (*Standard test method for measurement of index flux through saturated geosynthetic clay liner specimens using a flexible wall permeameter*). Essa norma refere-se exclusivamente ao geocomposto bentonítico onde é possível obter o índice de fluxo de amostras de GCL saturadas, ainda, pode ser convertida para obtenção da condutividade hidráulica através da espessura do material. Refere-se a um sistema hidráulico aberto de carga constante, indicado para solos de baixa condutividade hidráulica e solos não granulares. A Figura 12 apresenta um diagrama esquemático do sistema projetado.

Figura 12: Diagrama e configuração de teste



Fonte: Zanella (2019).

O sistema é composto por uma câmara de ensaio e três reservatórios acumuladores de fluidos, todos mantidos sob pressão. Os três acumuladores servem para: alimentação da câmara de ensaio; alimentação da linha de fluxo influente; e alimentação da linha de fluxo efluente. É necessário 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.

2.4.FENÔMENO DE *SQUEEZING*

O fenômeno de *squeezing*, também conhecido como espalhamento lateral, pode ocorrer devido ao aumento da fragilidade do GCL, causada pela excessiva expansão da bentonita. Segundo Koerner (2005) esse fenômeno ocorre quando uma carga não perfurante estiver estacionada sobre o GCL com insuficiente solo de cobertura. Para Fox *et al.* (1996), o fenômeno de *squeezing* causa uma redução da espessura de GCL. Ainda, o espalhamento lateral ou extrusão da bentonita, pode ocorrer quando a mesma estiver úmida e instável (KOERNER *et al.*, 1998a; 1998b). Tal fenômeno pode acarretar um local de alta permeabilidade, descaracterizando a função esperada de GCLs (FOX *et al.*, 1997).

Segundo Fox *et al.* (1996), na fase de aplicação do material em campo é necessário tomar alguns cuidados para minimizar os efeitos do fenômeno de *squeezing*. Os autores recomendam a instalação do GCL no mesmo dia, deve-se optar por veículos leves para a construção e evitar tráfego em cima de GCL desprotegido. Ainda, Chen *et al.* (2010) sugere a aplicação de GCL em campo sem uma pré-hidratação, visto que na construção se leva em conta uma sobrecarga, então, somente após isto é que ocorreria a hidratação, podendo resultar em menores perdas de bentonita no interior do produto. Mas, o principal fator para evitar os problemas causados pelo espalhamento lateral da bentonita, é a escolha correta do solo de cobertura e sua respectiva espessura.

Nesse sentido, pesquisas foram realizadas com a finalidade de investigar qual a espessura recomendada (H é a espessura do solo de cobertura e B o diâmetro do pistão) pelos autores para adequada proteção do GCL, e todas utilizaram o ensaio de penetração Índice de Suporte Califórnia (CBR) na versão modificada. O Quadro 1 apresenta os resultados dessas pesquisas.

Quadro 1: Pesquisas relacionadas às espessuras de solo de cobertura para proteção do GCL

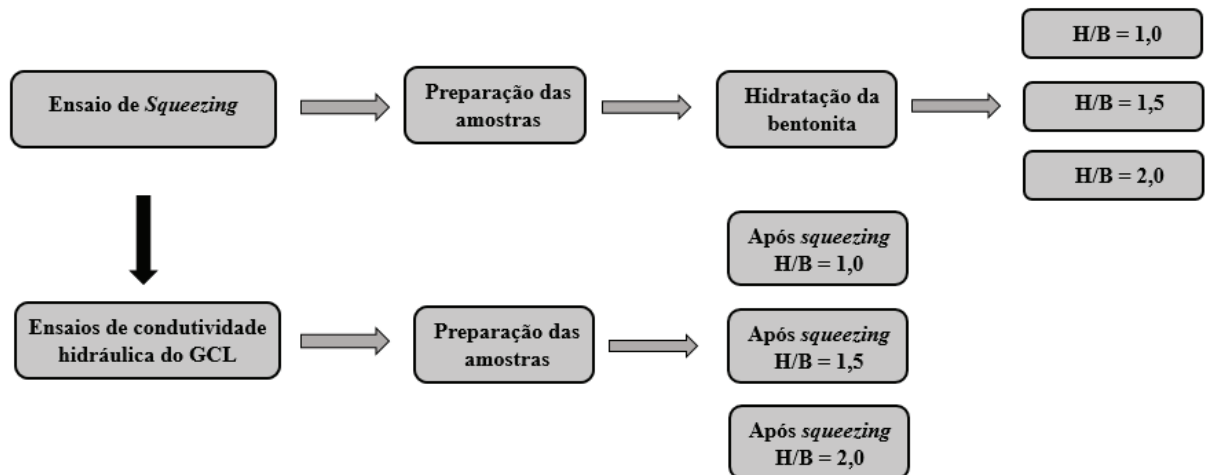
Autor	Solo de cobertura	Pressão de confinamento (kPa)	Diâmetro do pistão (mm)	Diâmetro do molde (mm)	Tempo de hidratação do GCL (horas)	Razão H/B recomendada
Koerner e Narejo (1995)	Areia bem graduada	0,68	50	150	24	1
De Battista e Fox (1996)	Areia mal graduada sem pedregulhos ou finos, com diâmetro médio dos grãos de D50 = 0,6 mm	0,68	50	150	24	1,5
Miguel <i>et al.</i> (2017)	Resíduo oriundo do beneficiamento de ágata (D50 = 0,42 mm)	0,69	25 e 50	152,5	24	1,5

Fonte: Autor (2020).

3. MÉTODO DA PESQUISA

Neste capítulo são apresentadas as etapas da pesquisa, em forma de fluxograma (Figura 13), incluindo a caracterização dos materiais, a metodologia de preparação das amostras e realização dos ensaios, bem como os equipamentos utilizados.

Figura 13: Fluxograma da Pesquisa



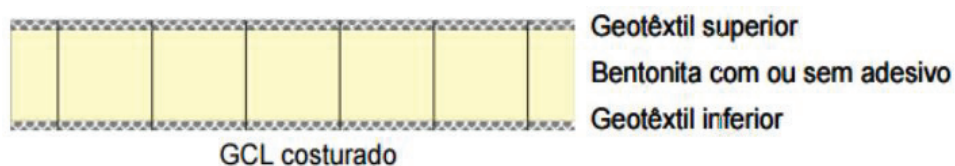
Fonte: Autor (2022).

3.1. MATERIAIS

3.1.1. GCL

O GCL que foi utilizado na presente pesquisa (Figura 14) 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 (MACCAFERRI, 2010). O produto manufaturado foi doado pela empresa Maccaferri e é comercialmente conhecido como MacLine® GCL W 40 3.6. A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas do GCL.

Figura 14: Modelo GCL



Fonte: Mendes (2010).

Tabela 3: Propriedades físicas do GCL

Ensaio	Método	Resultado MacLine® GCL W 40 3.6	Unidade
Massa/Área do geotêxtil tecido	UNE EN ISO 9864	100	g/m ²
Massa/Área do geotêxtil não tecido	UNE EN ISO 9864	200	g/m ²
Quantidade de montmorilonita	XRD	> 80	%
Índice de dilatação da bentonita	ASTM 5890	> 24	ml/2g
Absorção de água	ASTM E 946	> 600	%
Perda de fluido da bentonita	ASTM D 5891	< 18	ml
Massa/Área do GCL	UNE EN 14196	3900	g/m ²
Massa/Área da bentonita	UNE EN 14196	3600	g/m ²
Espessura	UNE EN ISO 9863-1	6	mm
Resistência à tração	UNE EN ISO 10319	10	kN/m
CBR	UNE EN ISO 12236	2000	N
Resistência à pelagem do GCL	ASTM D 6496	6,1	N/m
Resistência ao cisalhamento interno hidratado do GCL	ASTM D 5887	24	kPa
Permeabilidade K	ASTM D 5887	5 x 10 ⁻¹¹	m/s

Fonte: Adaptado de Maccaferri (2010).

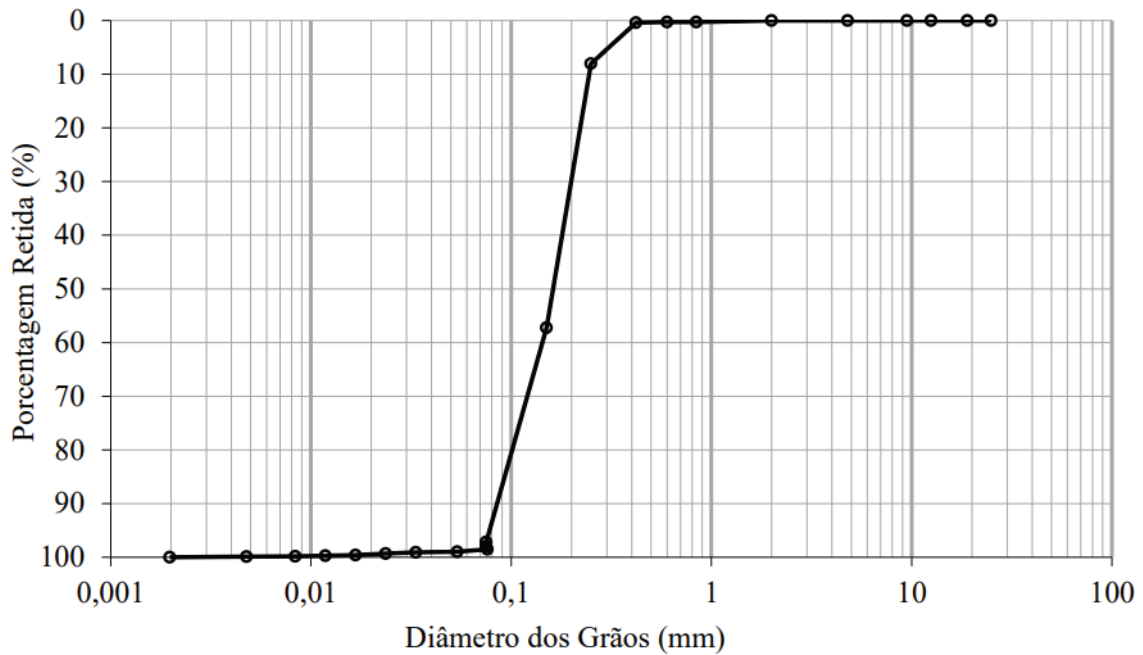
Zanella (2019) realizou ensaios de expansão da bentonita utilizando água, com o objetivo de verificar se o material apresentava o mesmo comportamento indicado pelo fabricante. A avaliação foi realizada através de ensaios de expansão volumétrica, padronizados pela norma ASTM D5890:2019 (*Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners*) e obteve como resultados valores médios de 24 ml/2g, os quais são coerentes com as informações passadas pelo fabricante, conforme visto na Tabela 3.

3.1.2. Solo de cobertura

Para proteger o GCL, alguns autores recomendam uma camada de proteção constituída por solo de granulometria uniforme, livre de pedregulhos e/ou material muito fino. Para atender a esses requisitos, a areia proveniente do município de Osório/RS foi utilizada, pois possui uma granulometria que atende à demanda. Este solo já foi muito estudado em várias pesquisas anteriores, o que resulta em características geotécnicas bem consolidadas (DONATO, 2007; CONSOLI *et al.* 2010; CONSOLI *et al.*, 2013; MIGUEL 2016).

A areia do município de Osório/RS é caracterizada como uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme. A Figura 15 e a Tabela 4 apresentam a curva granulométrica e os índices físicos, respectivamente.

Figura 15: Curva granulométrica da areia



Fonte: Donato (2007).

Tabela 4: Caracterização geotécnica da areia

Parâmetro	Valor
Peso específico real dos grãos (γ_s)	25,94 kN/m ³
Coefficiente de uniformidade (C_u)	6,15
Coefficiente de curvatura (C_c)	1,25
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,65 mm
Diâmetro médio (D_{50})	3,20 mm
Índice de vazios mínimo ($e_{\min.}$)	0,40
Índice de vazios máximo ($e_{\max.}$)	0,68

Fonte: Adaptado de Miguel (2016) e Donato (2007).

3.1.3. Água

Foi utilizada água destilada para as seguintes etapas da pesquisa: hidratação da amostra de GCL e determinação da condutividade hidráulica após o fenômeno de *squeezing*.

3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

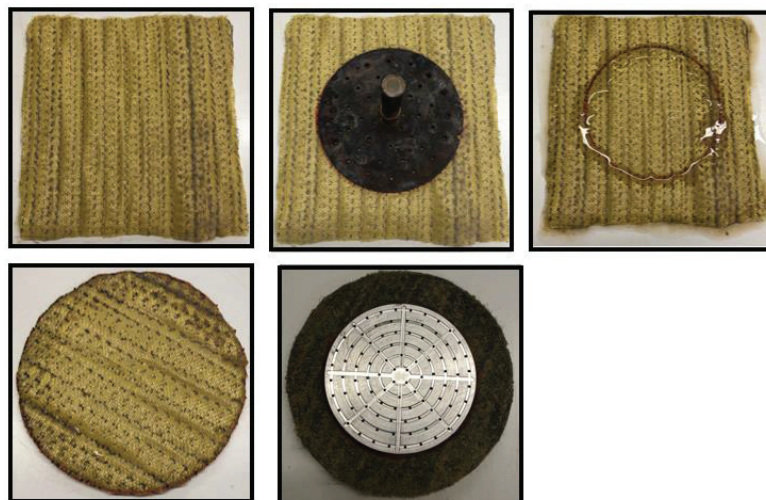
3.2.1. Preparação dos corpos de prova de GCL

O primeiro passo para a preparação dos corpos de prova de GCL se deu por uma inspeção no material, a fim de verificar se este não possuía defeito ou irregularidade. Na sequência, para obter a amostra de teste, o GCL foi cortado em um molde quadrado de 200 mm x 200 mm com o auxílio de tesoura ou lâmina afiada.

Além do cuidado na hora da extração do molde para evitar que não ocorresse a perda do material particulado (bentonita), foi necessário umedecer as bordas do corpo de prova com água destilada, mantendo o tempo de hidratação entre 2 e 5 minutos, antes de executar o corte do molde para extração do corpo de prova, evitando-se assim, possíveis perdas de bentonita. Após o corte, novamente foi hidratada a área de bentonita exposta lateralmente, com o mesmo intuito descrito anteriormente. As amostras foram cortadas sobre superfície plana e lisa, com o auxílio de moldes com as dimensões requeridas para cada ensaio. Para o ensaio de *squeezing*, a amostra é colocada no cilindro do ensaio do CBR com o intuito de evitar a perda de bentonita na fase de hidratação.

As amostras que foram submetidas ao *squeezing*, através do ensaio CBR modificado, foram preparadas com o diâmetro do molde de CBR, igual a 152,5 mm. Na sequência, a amostra, após o carregamento, era cortada novamente, porém no diâmetro final de 100 mm para realização do ensaio de condutividade hidráulica. A Figura 16 apresenta a sequência de preparação dos corpos de prova de GCL.

Figura 16: Sequência de preparação dos corpos de prova de GCL



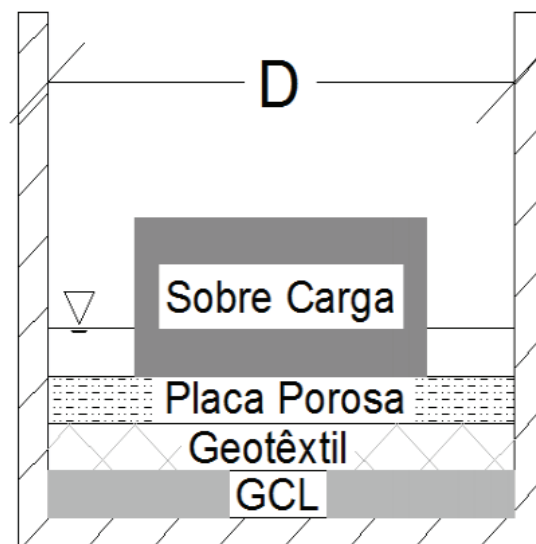
Fonte: Autor (2022).

3.2.2. Hidratação do GCL

Para que o GCL funcione como barreira hidráulica é preciso que ocorra a sua hidratação. Para obter o máximo inchamento da bentonita, os moldes contendo as amostras foram hidratados com água destilada, seguindo sugestão de Koerner (2005).

A Figura 17 apresenta o esquema da etapa de hidratação do GCL no qual observa-se a amostra de diâmetro 152,5 mm, seguida por uma camada de geotêxtil não tecido previamente umedecido (para a distribuição uniforme da pressão), uma chapa metálica porosa e uma sobrecarga de 0,69 kPa sobre a chapa metálica. A pressão aplicada tem a função de fazer com que o inchamento da bentonita seja uniforme além de melhorar a resistência ao cisalhamento (KOERNER, 2005).

Figura 17: Teste CBR sobre o GCL – etapa de hidratação



Fonte: Adaptado de Fox et al. (1997).

A hidratação, por um período mínimo de 24 horas, foi realizada a partir da colocação de água no interior do molde, conforme ilustra a Figura 18, e a submersão deste numa bacia com água destilada.

Figura 18: Dispositivos para hidratação do GCL



Fonte: Autor (2022).

3.2.3. Ensaio de *squeezing* - versão modificada do ensaio de penetração Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Após a hidratação do GCL, foram removidos todos os dispositivos sobre a amostra e substituídos por uma camada de cobertura, a qual foi composta pelo solo arenoso descrito no item 3.1.2. A espessura dessa camada de cobertura (H) foi variável (ver item 3.3) enquanto o diâmetro do pistão (B) foi de 25mm face reta (desenvolvido para esta pesquisa).

Foram realizados 10 ensaios para a obtenção da densidade da areia seca resultando em 1480 kg/m^3 , no estado fofo. Então, para as razões H/B iguais a 1,0, 1,5 e 2,0 (ver item 3.3) as quantidades de areia foram 675,82g, 1013,73g e 1351,64g, respectivamente. A Figura 19 apresenta o ensaio para obtenção da densidade da areia.

A versão modificada do ensaio de penetração Índice de Suporte Califórnia (CBR) consiste em duas principais fases. Na primeira, como mostra a Figura 20a, ocorre a penetração do solo de cobertura por meio de um pistão CBR, com deslocamento constante de 1,27 mm/min, registrando a cada 30 segundos a respectiva carga e os deslocamentos verticais ocorridos no material. Na segunda fase é feita a medição da espessura da amostra de GCL com um paquímetro (Figura 20b), após ter atingido o critério de paralisação do ensaio (penetração de 20mm sobre o material no interior do molde). Estas medições foram realizadas a cada 10mm

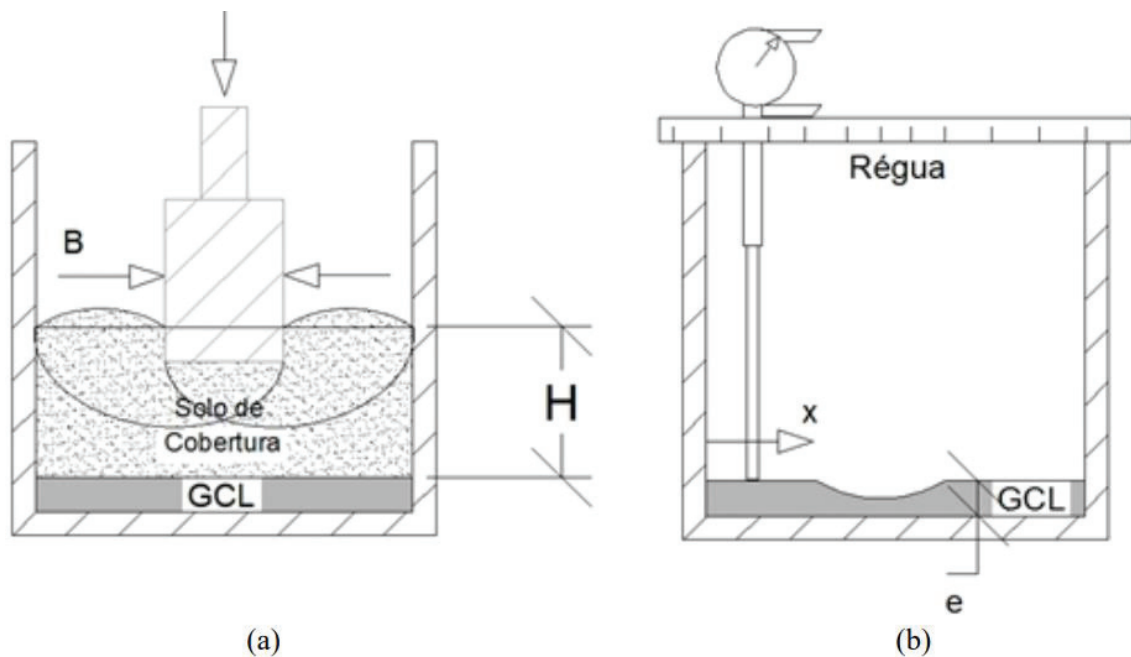
ao longo do eixo x (direção horizontal), conforme ilustra a Figura 21b. A Figura 21 ilustra o equipamento utilizado no ensaio de *squeezing* (versão modificada do ensaio de penetração Índice de Suporte Califórnia - CBR).

Figura 19: Ensaio Densidade da Areia



Fonte: Autor (2022).

Figura 20: Teste CBR sobre o GCL – a) etapa de penetração; b) medição do perfil



Fonte: Adaptado de Fox et al. (1997).

Figura 21: Equipamento CBR



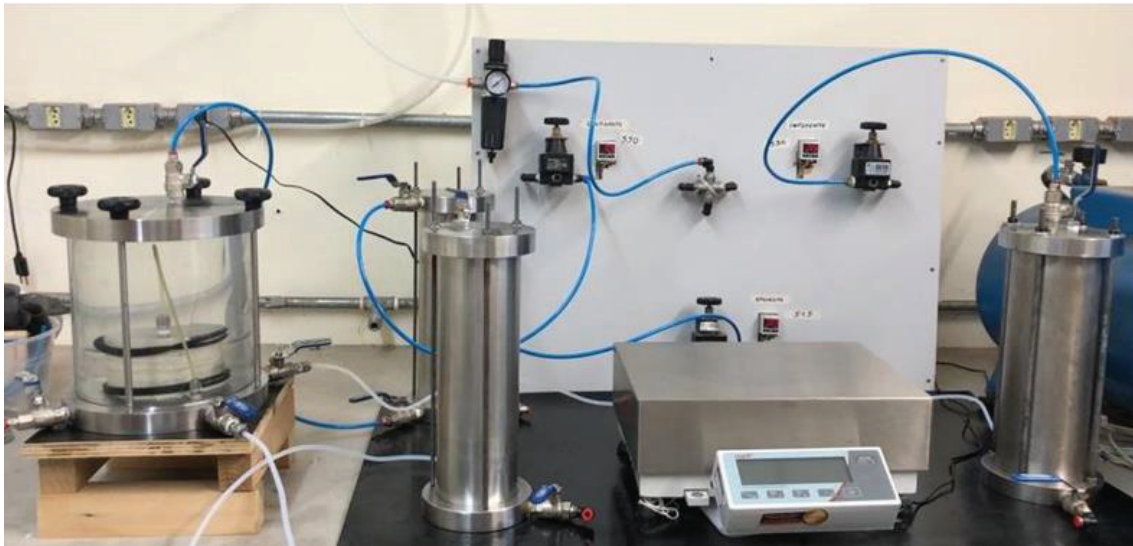
Fonte: Autor (2022).

3.2.4. Ensaio de condutividade hidráulica

Após serem submetidas ao ensaio de *squeezing*, as amostras foram cortadas em um diâmetro final de 100mm para a realização do ensaio de condutividade hidráulica.

O equipamento utilizado para tal ensaio (Figura 22) foi construído por Zanella (2019) e se trata de um permeâmetro de parede flexível projetado de acordo com as especificações da norma ASTM D5887:2016 (*Standard test method for measurement of index flux through saturated geosynthetic clay liner specimens using a flexible wall permeameter*), a qual descreve um método de teste padrão para medição de fluxo em amostras de GCL saturadas. O equipamento é composto por uma balança eletrônica com capacidade de 16,2 kg e precisão de 0,1g, com a função de medir o volume de fluxo, ou vazão dos acumuladores das linhas de entrada e saída.

Figura 22: Equipamento para ensaio de condutividade hidráulica do GCL

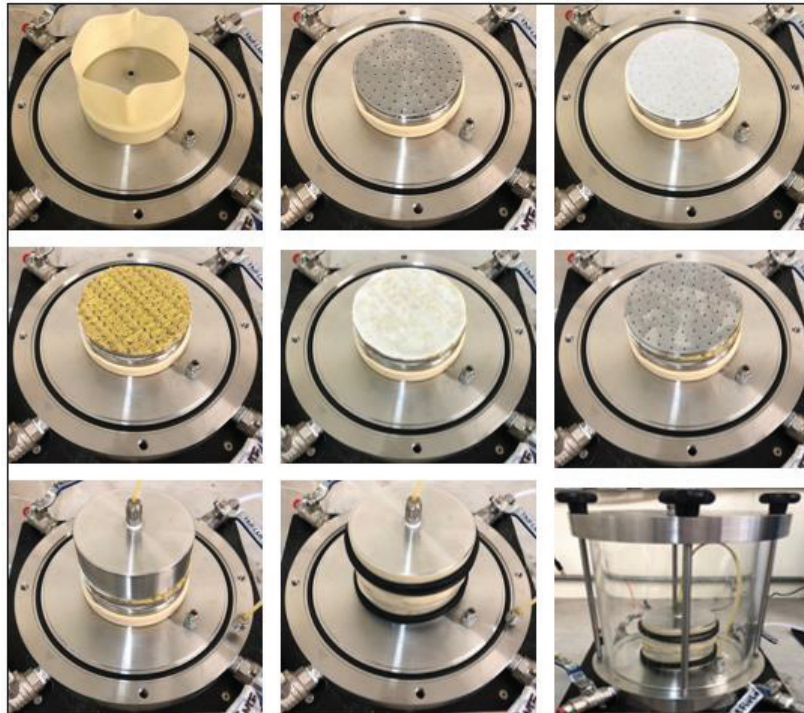


Fonte: Autor (2022).

O ensaio iniciou com a colocação da membrana no extensor e a sobreposição dos seguintes materiais: elementos de base, disco poroso, papel filtro, amostra de GCL, papel filtro, disco poroso e elemento de topo. Para auxiliar na vedação, foi umedecida uma fina camada de bentonita aplicada nas laterais da amostra. Finalizada essa etapa, foi colocada a membrana ao seu redor da amostra e os *orings* de fixação nas peças de base e topo. Com a tubulação de fluxo superior conectada ao *top cap*, a câmara era enchida com água destilada. Por fim, a linha de pressão da câmara era conectada à câmara do permeâmetro, além do sistema hidráulico dos acumuladores de fluido permeante, o qual era conectado às linhas de fluxo influente e efluente. A Figura 23 apresenta a sequência de montagem do ensaio.

Após a montagem, a amostra era saturada com água destilada por aplicação de contrapressão. Para tal, os três acumuladores eram preenchidos com água destilada. A pressurização da câmara de ensaio iniciava-se com 35 kPa, juntamente com uma contrapressão de 14 kPa na linha efluente e na linha influente. Era necessário remover as bolhas de ar visíveis e, para isso, a água permeante era drenada pelas linhas de descarga. A cada intervalo de 10 minutos, eram aumentadas em 70 kPa simultaneamente a pressão da câmara e a contrapressão, até atingirem uma pressão de 550 kPa e 515 kPa, respectivamente. Tais pressões eram mantidas até a amostra saturar, hidratar e consolidar. A recomendação é que este processo ocorra por um período de no mínimo 40 horas, mas, na presente pesquisa, o período foi de somente 24 horas, pois as amostras já vieram do ensaio anterior saturadas.

Figura 23: Sequência de montagem de um corpo de prova no permeâmetro



Fonte: Autor (2022).

Após a saturação das amostras, era iniciada a percolação de fluido através da amostra pela imposição de um gradiente hidráulico. Desta forma, aumentava-se a pressão da linha de influente de 515 kPa para 530 ± 5 kPa, com o intuito de produzir um fluxo ascendente. A diferença nominal de pressão na amostra era, portanto de 15 kPa. Para determinar o fluxo, a variação das vazões influente e efluente devem ser aproximadamente iguais e/ou variando em $\pm 25\%$.

Na realização do ensaio, foram feitas pesagens consecutivas dos acumuladores conectados às linhas de fluxo influente e efluente, de modo a medir a quantidade de fluido percolado. A partir da diferença de massa observada no período entre duas medições, e conhecendo-se a massa específica do fluido ($998,20 \text{ kg/m}^3$ para a água destilada), o volume de fluido percolado naquele intervalo era determinado e o fluxo calculado pela Equação 4.

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

Onde q_i = fluxo, $[(\text{m}^3/\text{m}^2)/\text{s}]$; Q = quantidade de fluxo, definido como a média das vazões de entrada e saída (m^3); $A = 0,00785 \text{ m}^2$, área transversal da peça porosa de 100 mm de diâmetro; t = intervalo de tempo do fluxo, (s).

Para encerrar o ensaio, alguns critérios deveriam ser atendidos: a) pelo menos três medições de vazão durante um período mínimo de 8 horas (neste caso, considera-se vazão como sendo um volume de fluxo, expresso em m³); b) a razão entre as taxas de vazão influente e efluente deve estar entre 0,75 e 1,25, nas últimas três medições consecutivas; c) não haver alterações significativas da vazão nas últimas três medições consecutivas; d) nenhuma das últimas três medições devem apresentar valores menores que 0,75 vezes a vazão média, nem superiores a 1,25 vezes a vazão média; e) o valor de fluxo reportado será calculado pela média dos últimos três valores calculados.

Conhecido o fluxo, era possível calcular a condutividade hidráulica do material. A norma orienta realizar um corte diametral na amostra e realizar três medições de espessura da bentonita, desconsiderando os geotêxteis. Essa medição não é possível ser realizada durante o ensaio, portanto foi medida nos primeiros 30 minutos após o final do teste. A espessura considerada foi a média dos três valores medidos.

A condutividade hidráulica kT da amostra testada de GCL é dada pela Equação 5.

$$kT = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad (5)$$

Onde:

kT = condutividade hidráulica, (m/s);

Q = quantidade de fluxo, (m³);

L = espessura da amostra, (m);

A = área transversal amostra, (m²);

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

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

3.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental da pesquisa teve como objetivo a avaliação do efeito de diferentes razões H/B sobre a condutividade hidráulica de amostras de GCL hidratadas submetidas ao ensaio de *squeezing*. As Tabelas 5 e 6 apresentam as variáveis consideradas no planejamento e o resumo dos ensaios realizados, em que cada razão H/B foi testada em triplicata.

Tabela 5: Variáveis do experimento

Variáveis fixas	Valores adotados
Modelo de GCL	Reforçado por costura
Pressão na hidratação	0,69 kPa (S)
Tempo de hidratação	24 horas (S)
Diâmetro do molde	152,5 mm (S) 100mm (C)
Taxa de deslocamento	1,27 mm/min (S)
Diâmetro (forma) do pistão	25 mm (face reta) (S)
Solo de cobertura	Areia do município de Osório/RS (S)
Tipo de Fluido	Água
Variáveis de controle	Valores adotados
Razão do solo de cobertura, H/B	1,0; 1,5; 2,0 (S)
Variáveis de resposta	
Deslocamento do GCL (S)	
Condutividade hidráulica do GCL após o ensaio de <i>squeezing</i> (C)	

Nota: (S) ensaio de *squeezing* (C) ensaio condutividade hidráulica

Fonte: Autor (2020).

Tabela 6: Plano experimental dos ensaios da pesquisa

Descrição	Especificação	Ensaio
Ensaio de <i>squeezing</i>	H/B = 1,0	A10-1, A10-2, A10-3
	H/B = 1,5	A15-1, A15-2, A15-3
Condutividade hidráulica do GCL permeado com água - após <i>squeezing</i>	H/B = 2,0	A20-1, A20-2, A20-3

Fonte: Autor (2020).

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada utilizando o *software Statistica* para verificar a influência do *squeezing* na condutividade hidráulica do GCL. Foram analisados ANOVA (*Analysis-of-variance*) e Teste de *Tukey*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

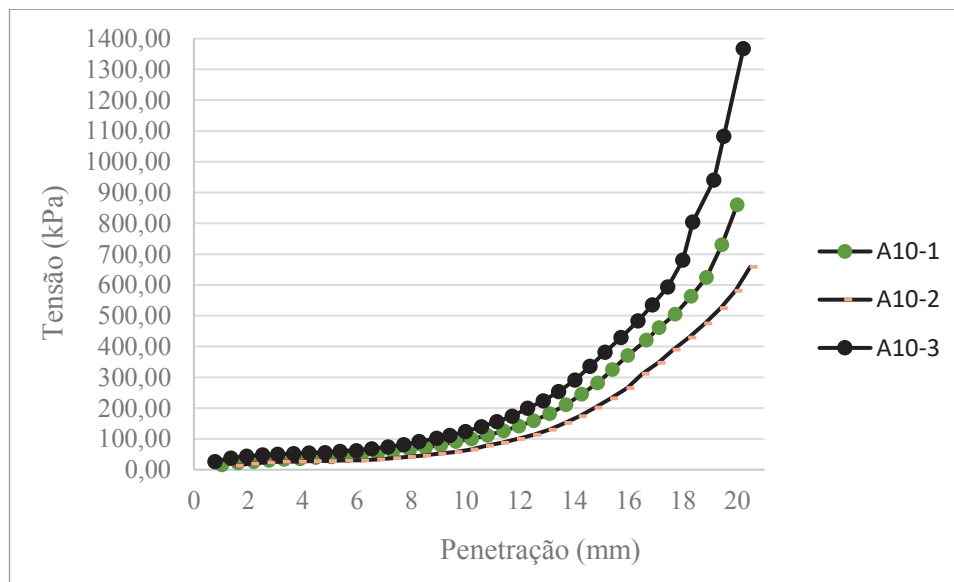
Os resultados apresentados no presente capítulo se referem ao ensaio de *squeezing* (versão modificada do ensaio de penetração Índice de Suporte Califórnia - CBR) e na sequência ao ensaio de condutividade hidráulica das amostras de GCL permeadas com água, após o ensaio de *squeezing*.

4.1. ENSAIOS DE *SQUEEZING*

4.1.1. Razão solo de cobertura H/B=1.0

A tensão desenvolvida pelo pistão de 25 mm face reta é mostrada na Figura 24 para os ensaios A10-1, A10-2 e A10-3. Os valores altos de Tensão (próximos a 1000 KPa) demonstram que o pistão atravessou toda a camada de solo mais a amostra de GCL, chegando próximo a placa de aço, sendo assim, danificando o GCL.

Figura 24: Curva tensão-penetração H/B=1,0

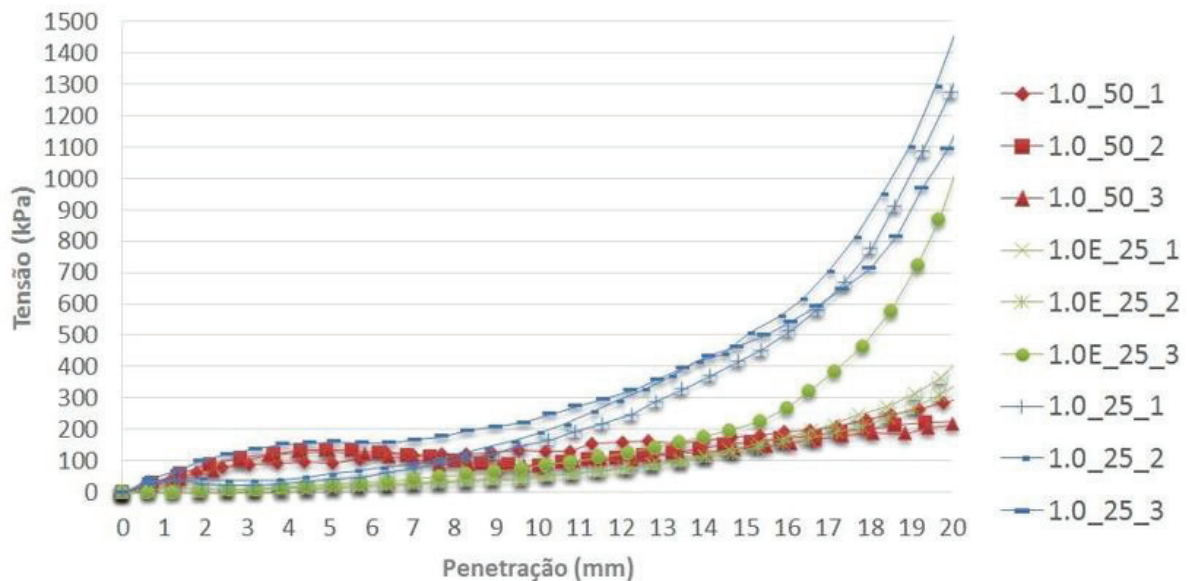


Fonte: Autor (2022).

Miguel *et al.* (2017) estudou sobre a mínima razão de cobrimento adequada para proteger geocompostos argilosos do fenômeno de *squeezing*. A Figura 25 apresenta a resposta tensão-penetração deste estudo, o qual abrangeu três modelos de pistão (50 mm, 25 mm face reta e 25 mm face esférica) e as mesmas variáveis H/B da presente pesquisa. O gráfico referente

aos ensaios 1.0_25-1, 1.0_25-2 e 1.0_25-3 apresentaram o mesmo comportamento encontrado no ensaio H/B=1.0, porém os valores de tensão foram menores em função do tipo de material. Miguel *et al.* (2017) utilizaram, como camada protetora, resíduo oriundo do beneficiamento de ágata, com granulometria de areia fina e com densidade e relativa de 50%.

Figura 25: Comparação entre pistões com mesma razão de cobertura através da curva tensão-penetração H/B=1,0

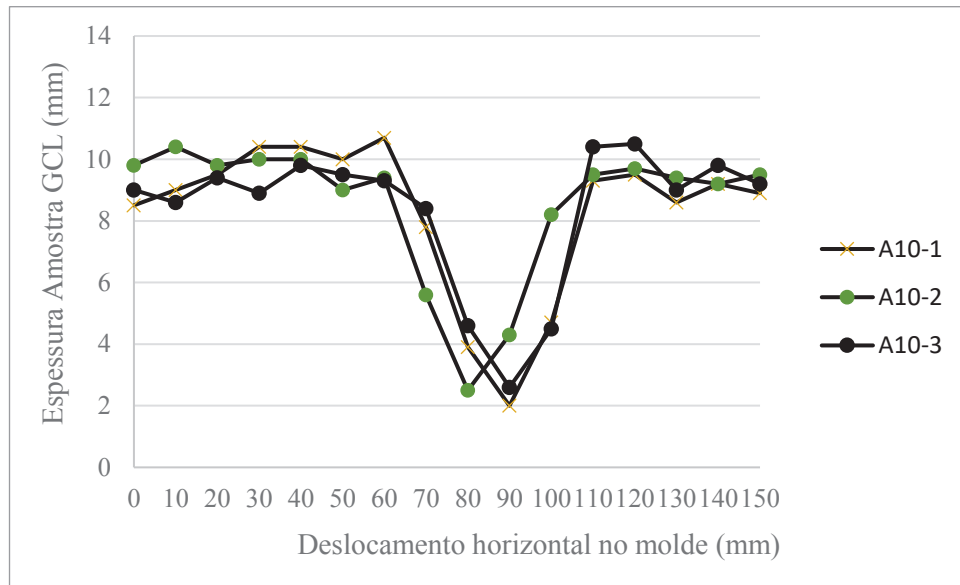


Fonte: Miguel et al (2017).

Após finalizados os ensaios, foram realizadas medições para obtenção do perfil do GCL após aplicação da carga, como mostra a Figura 26. Todas as amostras ensaiadas apresentam a deformação máxima no ponto médio – principal alvo do pistão, evidenciando que a amostra sofreu *squeezing*. O composto bentonítico apresentou espessuras próximas aos 8 mm após hidratado (diferenças de até 2 mm foram consideradas dentro do limite de aceitabilidade). Nota-se que a amostra A10-2 ficou deslocada quando comparada às outras amostras, isso ocorreu em razão do posicionamento da amostra em relação ao pistão de carga. Mesmo assim, esta amostra sofreu *squeezing*.

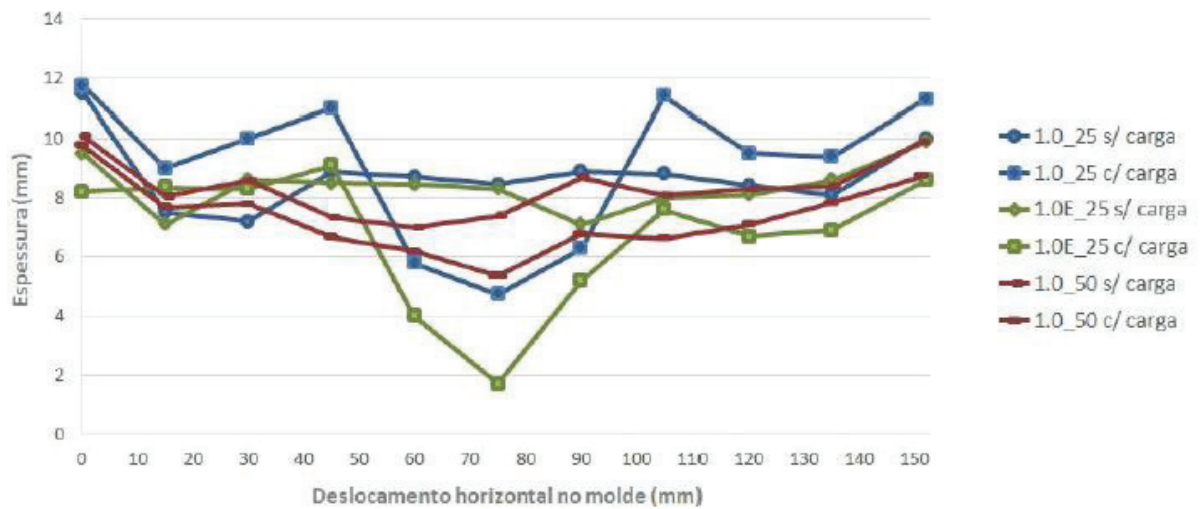
Miguel *et al.* (2017) também constataram as deformações causadas pelos diferentes pistões utilizados, como mostra na Figura 27. É perceptível o maior dano gerado quando se trata da razão de cobertura 1.0.

Figura 26: Deformação GCL H/B=1,0



Fonte: Autor (2022).

Figura 27: Comparação das deformações desenvolvidas pelos pistões H/B=1,0

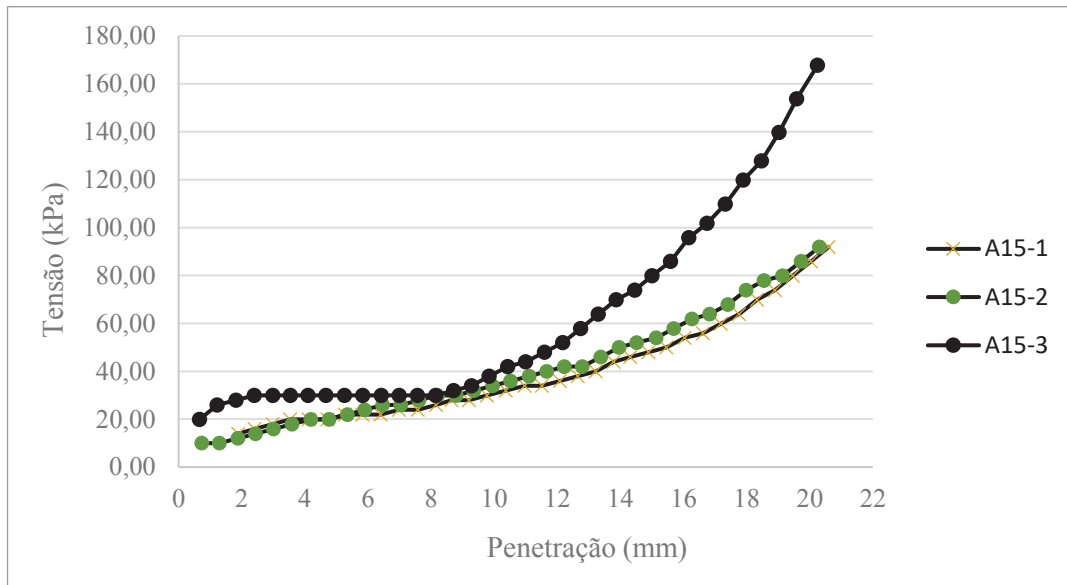


Fonte: Miguel *et al* (2017).

4.1.2. Razão solo de cobertura H/B=1.5

A tensão desenvolvida pelo pistão de 25 mm face reta é mostrada na Figura 28 para os ensaios A15-1, A15-2 e A15-3. Os valores baixos de Tensão demonstram que o pistão não atravessou toda a camada de solo e nem da amostra de GCL, sendo assim, não danificando o GCL.

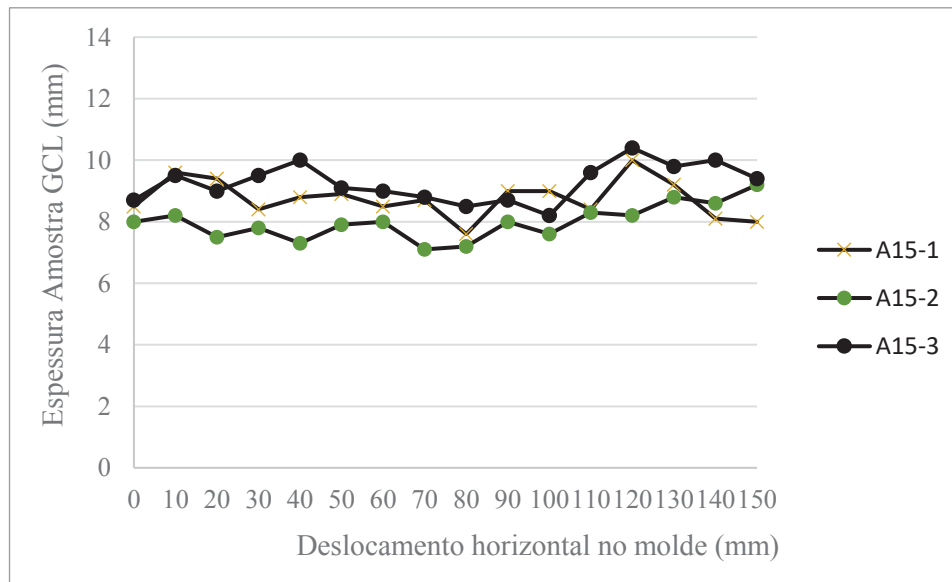
Figura 28: Curva tensão-penetração H/B=1,5



Fonte: Autor (2022).

A Figura 29 apresenta o gráfico das medições do perfil do GCL após a aplicação da carga. Concluiu-se que não houve o fenômeno de *squeezing* e o composto bentonítico apresentou espessuras próximas aos 9 mm após hidratado.

Figura 29: Deformação GCL H/B=1,5

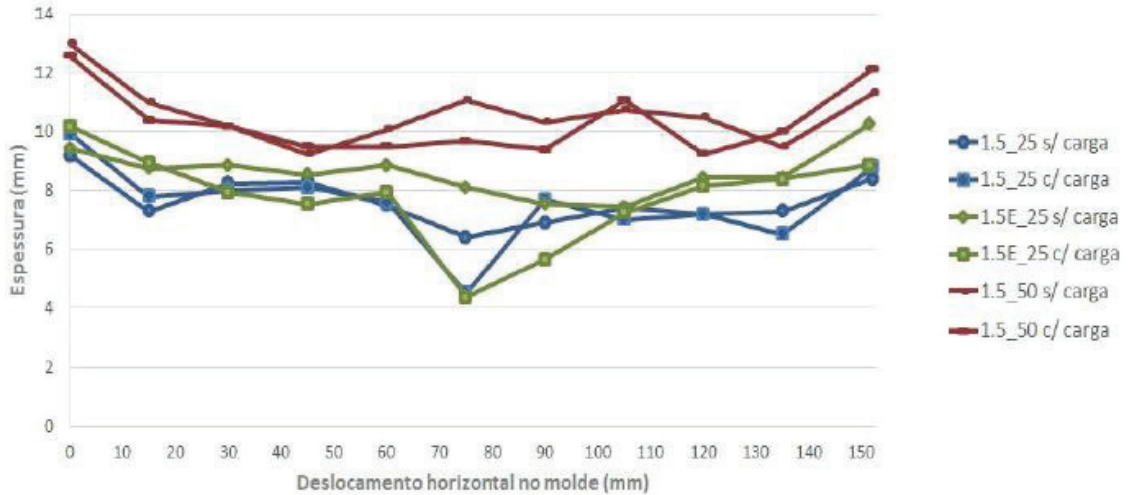


Fonte: Autor (2022).

Miguel *et al.* (2017) constataram uma diminuição na deformação com o aumento da razão de cobertura para os pistões de 25mm. Em comparação com o presente trabalho (ver

Figura 30), conclui-se que o tipo de material utilizado como solo de cobertura pode vir a interferir nesse resultado.

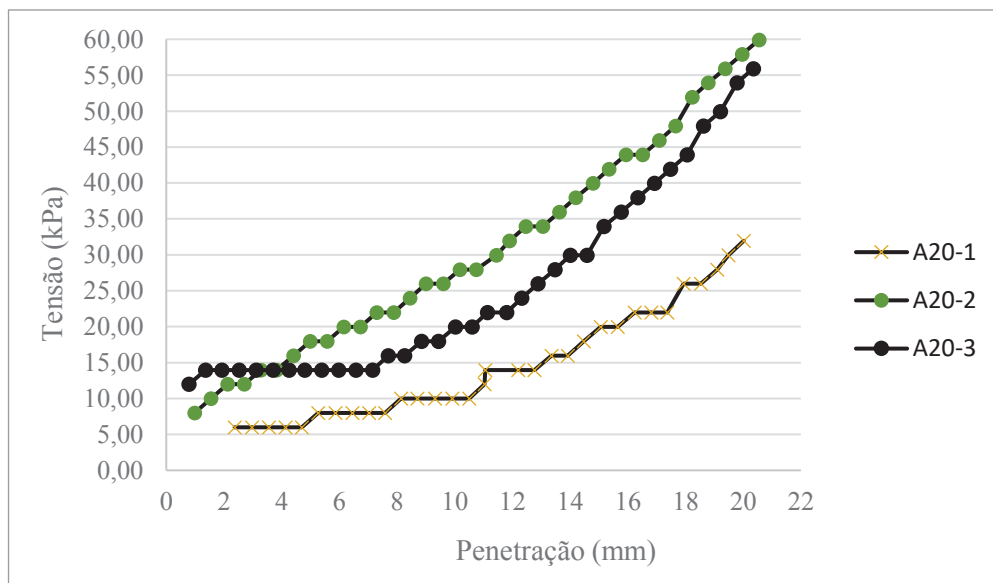
Figura 30: Comparação das deformações desenvolvidas pelos pistões H/B=1.5



4.1.3. Razão solo de cobertura H/B=2.0

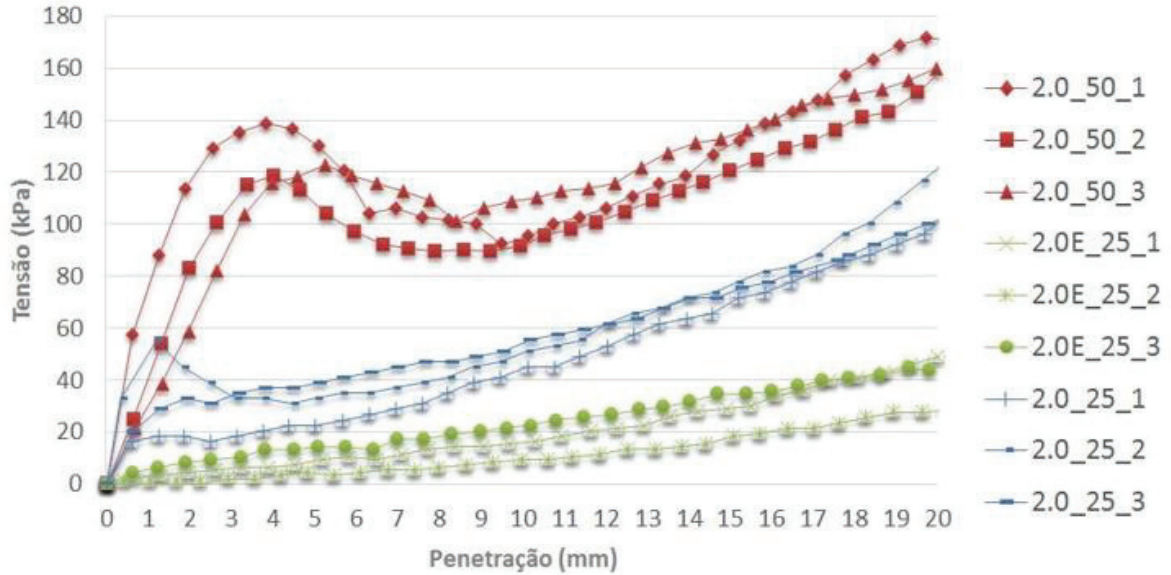
A tensão desenvolvida pelo pistão de 25 mm face reta é mostrada na Figura 31 para os ensaios A20-1, A20-2 e A20-3. Os valores baixos de Tensão demonstram que o pistão não atravessou toda a camada de solo e nem da amostra de GCL, sendo assim, não danificando o GCL.

Figura 31: Curva tensão-penetração H/B=2,0



A Figura 32 mostra as curvas tensão-penetração encontradas por Miguel et al (2017) para a mesma razão H/B, nas quais os valores de tensão atingidos também foram baixos.

Figura 32: Curva tensão-penetração H/B=2,0

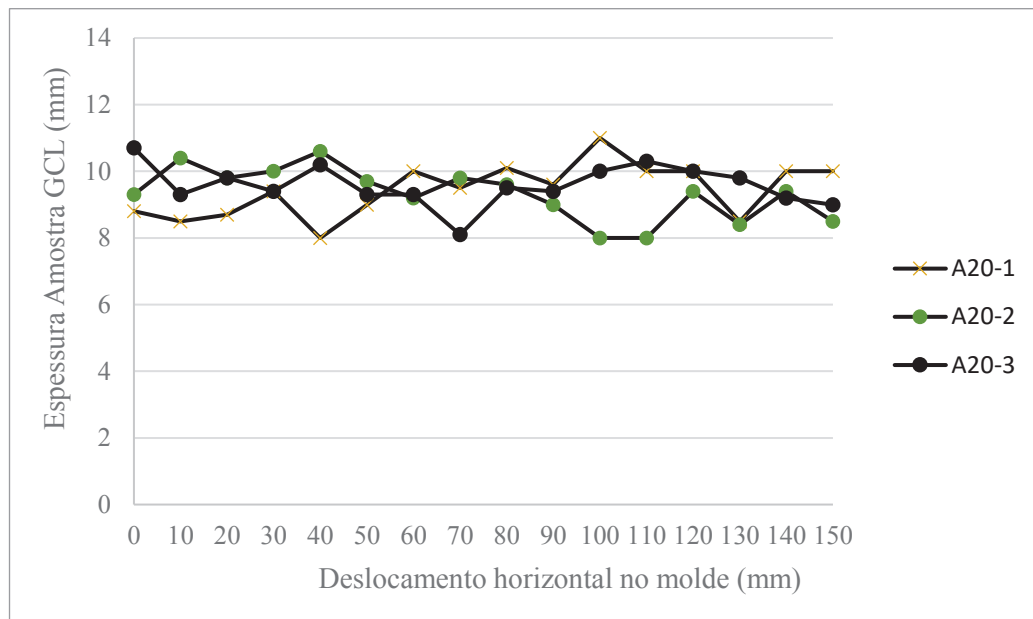


Fonte: Miguel et al (2017).

A Figura 33 apresenta o gráfico das medições do perfil do GCL após a aplicação da carga. Novamente, conclui-se que não houve *squeezing*. O composto bentonítico apresentou espessuras próximas aos 9 mm após hidratado.

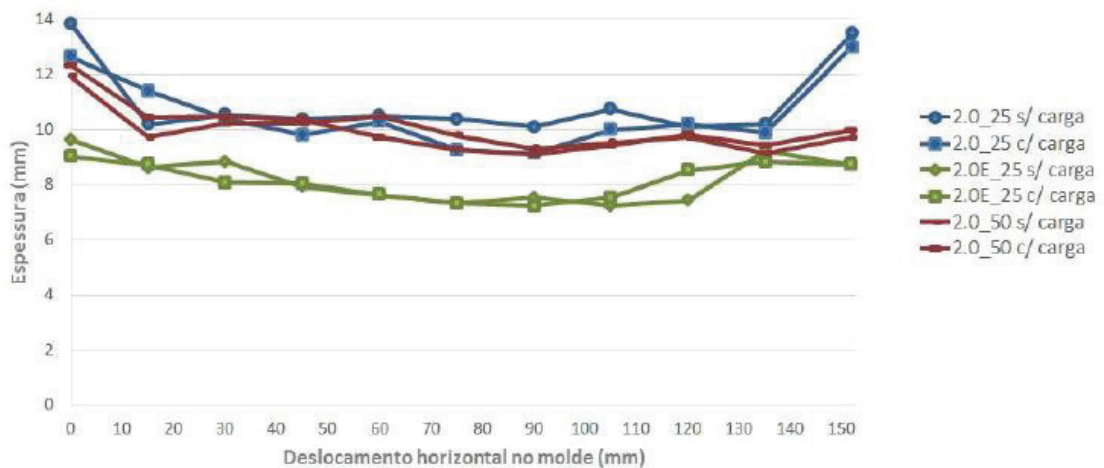
Para razões de cobertura 2.0, Miguel *et al.* (2017), da mesma forma que no presente trabalho, concluiu que não houve *squeezing* nas amostras de GCL (ver Figura 34).

Figura 33: Deformação GCL H/B=2,0



Fonte: Autor (2022).

Figura 34: Comparação das deformações desenvolvidas pelos pistões H/B=2,0



Fonte: Miguel *et al* (2017).

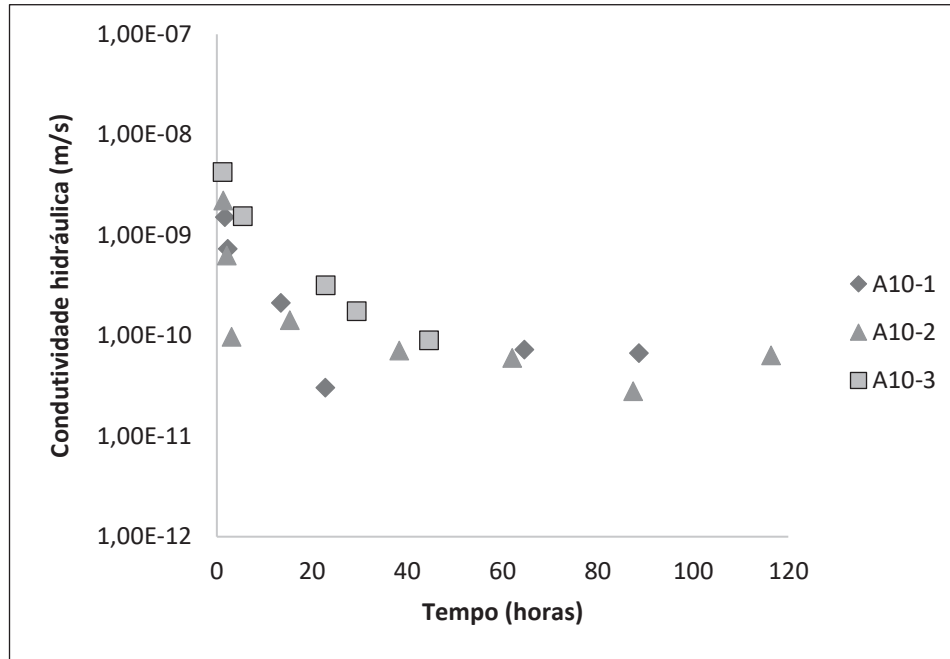
4.2. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO GCL PERMEADO COM ÁGUA – APÓS ENSAIO DE *SQUEEZING*

4.2.1. Condutividade hidráulica (H/B = 1,0)

Observa-se que os ensaios A10-1, A10-2 e A10-3 no início apresentaram uma maior permeabilidade, na casa de 10^{-09} , resultado da deformação causada na amostra do GCL que possibilitou um maior fluxo no local, porém no decorrer do ensaio a condutividade hidráulica voltou a apresentar valores dentro de uma faixa próxima à informada pelo fabricante, ou seja,

igual a 5×10^{-11} m/s, como apresentado na Figura 35 e Tabela 7. Desde o tempo inicial do ensaio, a condutividade hidráulica foi calculada em termos de variação de volume.

Figura 35: Condutividade hidráulica H/B=1,0



Fonte: Autor (2022).

Tabela 7: Valores condutividade hidráulica H/B=1,0

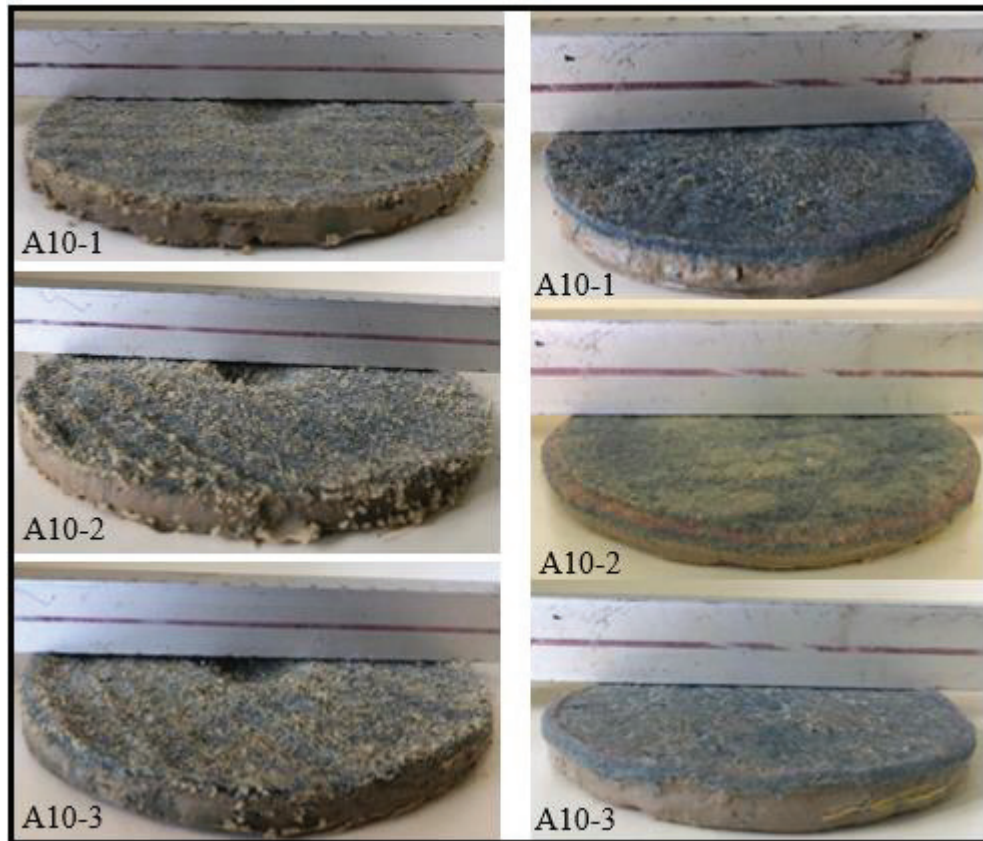
Tempo (horas)	Condutividade hidráulica (m/s)
A10-1	
2	1,51E-09
2	7,38E-10
13	2,13E-10
23	3,06E-11
65	7,29E-11
89	6,75E-11
A10-2	
1	2,23E-09
2	6,33E-10
3	9,81E-11
15	1,44E-10
38	7,17E-11
62	6,06E-11
87	2,81E-11
116	6,40E-11
A10-3	
1	4,26E-09
5	1,56E-09
23	3,20E-10
29	1,76E-10
45	9,05E-11

Fonte: Autor (2022).

O ensaio A10-3 precisou ser encerrado após 45 horas, em decorrência do desligamento do compressor (queda de energia), mesmo assim, respeitou o tempo mínimo de 40 horas de ensaio e atingiu a condutividade hidráulica desejada.

Ao final do ensaio, as amostras de GCL se apresentaram visualmente sem a deformação causada pelo fenômeno de *squeezing*, como mostra na Figura 36, na coluna da direita. A coluna da esquerda mostra as amostras logo após o ensaio de *squeezing*. A hipótese é de que quando a percolação iniciou, o fluxo carregou as partículas no local de maior fluxo, ocasionando a cicatrização, característica do GCL.

Figura 36: Amostras A10-* após *squeezing* e ensaio de condutividade hidráulica

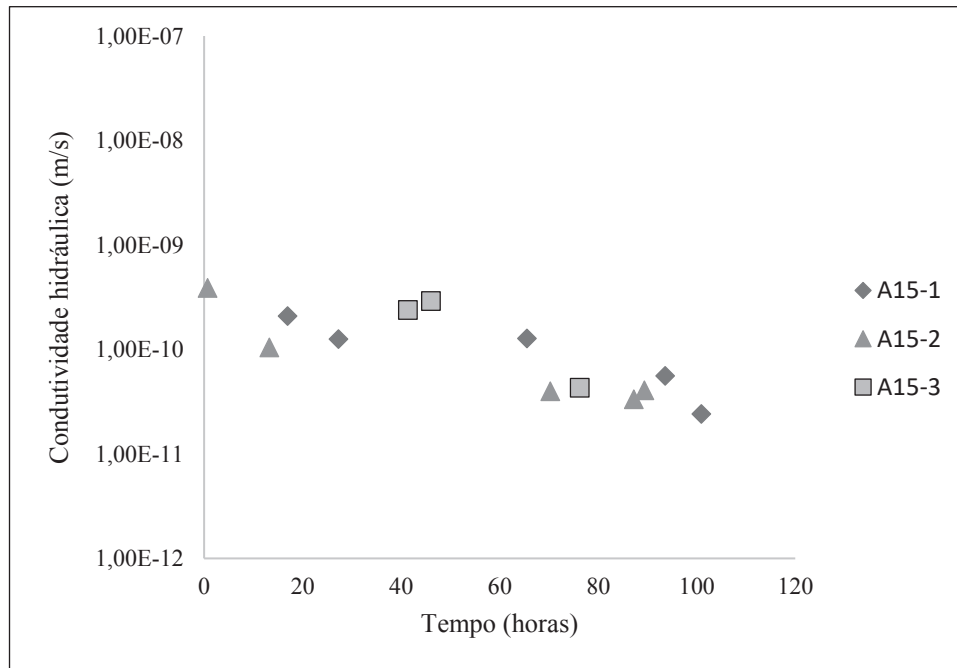


Fonte: Autor (2022).

4.2.2. Condutividade hidráulica ($H/B = 1,5$)

Da mesma forma que para os ensaios anteriores, observa-se que os ensaios A15-1, A15-2 e A15-3 no início apresentaram uma maior permeabilidade, na casa de 10^{-10} , mas no decorrer do ensaio a condutividade hidráulica voltou a apresentar valores dentro de uma faixa próxima à informada pelo fabricante, ou seja, igual a 5×10^{-11} m/s, como apresentado na Figura 38 e na Tabela 8.

Figura 37: Condutividade hidráulica H/B=1,5



Fonte: Autor (2022).

Tabela 8: Valores condutividade hidráulica H/B=1.5

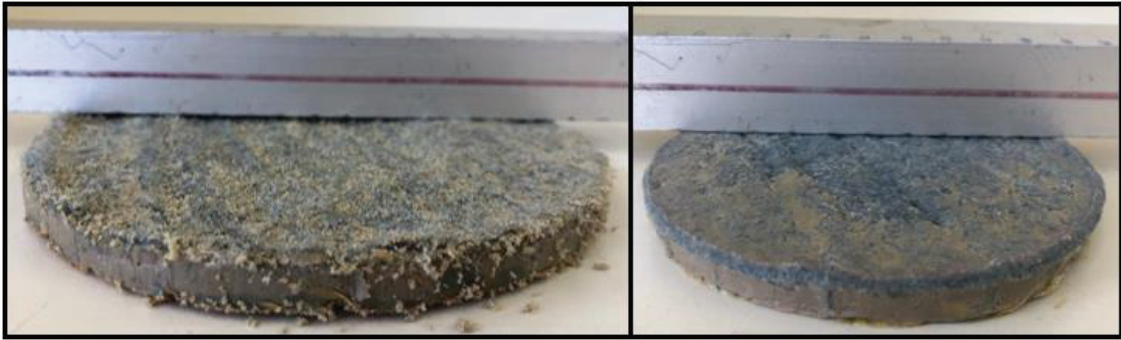
Tempo (horas)	Condutividade hidráulica (m/s)
A15-1	
17	2,09E-10
27	1,26E-10
66	1,28E-10
94	5,57E-11
101	2,42E-11
A15-2	
1	3,87E-10
13	1,05E-10
70	4,00E-11
87	3,33E-11
89	4,06E-11
A15-3	
41	2,39E-10
46	2,90E-10
76	4,31E-11

Fonte: Autor (2022).

O ensaio A15-3 precisou ser encerrado em 76 horas, em decorrência de problemas com o compressor (queda de energia), resultando em menos leituras em comparação com os demais ensaios, mas respeitando o tempo mínimo de 40 horas de ensaio e alcançando a condutividade hidráulica na ordem de grandeza de 10^{-11} m/s.

A Figura 38 apresenta a amostra A15-3 após o ensaio de *squeezing* (esquerda) e a após o ensaio de condutividade hidráulica (direita). As demais amostras A15-1 e A15-2 apresentaram comportamento semelhante.

Figura 38: Amostra A15-3 após *squeezing* e condutividade hidráulica

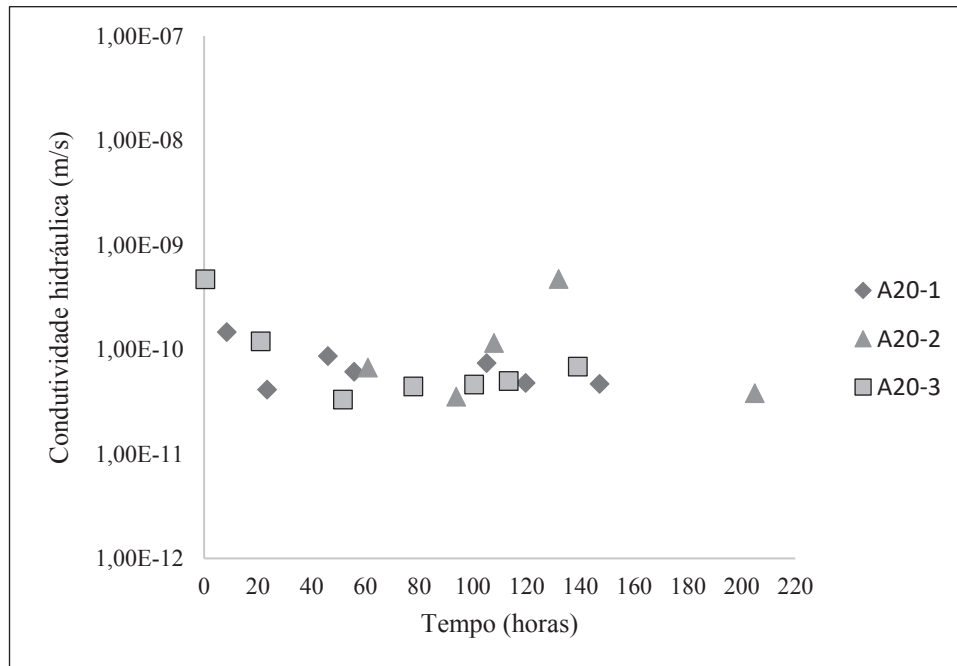


Fonte: Autor (2022).

4.2.3. Condutividade hidráulica ($H/B = 2,0$)

Da mesma forma que para os ensaios anteriores, observa-se que os ensaios A20-1, A20-2 e A20-3 no início apresentaram uma maior permeabilidade, na casa de 10^{-10} , mas no decorrer do ensaio a condutividade hidráulica voltou a apresentar valores dentro de uma faixa próxima à informada pelo fabricante, ou seja, igual a 5×10^{-11} m/s, como apresentado na Figura 39 e na Tabela 9.

Figura 39: Condutividade hidráulica H/B=2.0



Fonte: Autor (2022).

Com relação à amostra A20-2, nota-se que entre o tempo 108 e 132 horas esta apresentou uma condutividade hidráulica da ordem de 10^{-10} m/s. Isso deve-se ao fato que nesse período houve novamente problemas com o compressor, mas ao final (tempo igual a 205 horas), quando o problema foi solucionado, a amostra voltou com a apresentar condutividade hidráulica próxima a 10^{-11} m/s.

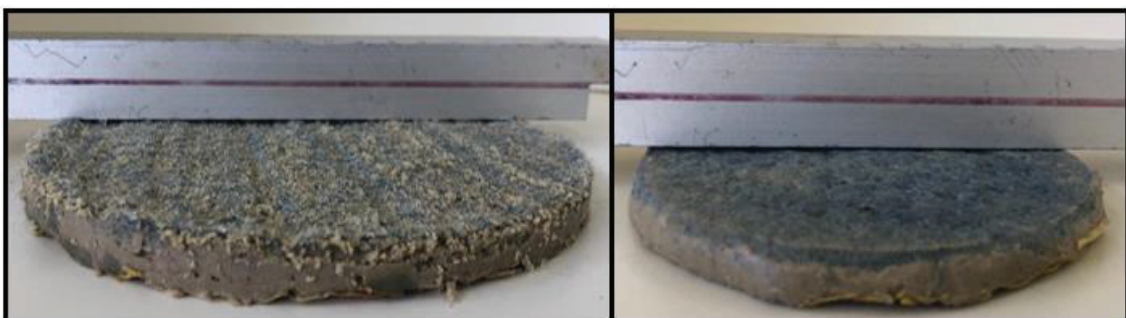
A Figura 40 apresenta a amostra A20-3 após o ensaio de *squeezing* (esquerda) e após o ensaio de condutividade hidráulica (direita). Para as demais amostras A20-1 e A20-2 o comportamento observado foi semelhante.

Tabela 9: Valores condutividade hidráulica H/B=2,0

Tempo (horas)	Condutividade hidráulica (m/s)
A20-1	
9	1,47E-10
23	4,13E-11
46	8,68E-11
56	6,12E-11
105	7,42E-11
120	4,78E-11
147	4,70E-11
A20-2	
61	6,73E-11
94	3,52E-11
108	1,15E-10
132	4,73E-10
205	3,80E-11
A20-3	
1	4,69E-10
21	1,19E-10
52	3,31E-11
78	4,44E-11
101	4,63E-11
113	4,98E-11
139	6,86E-11

Fonte: Autor (2022).

Figura 40: Amostra A20-3 após *squeezing* e condutividade hidráulica



Fonte: Autor (2022).

Favretto *et al.* (2020) realizaram quatro ensaios de condutividade hidráulica em amostras de GCL, percoladas com água para validação do permeâmetro de parede flexível, respeitando um tempo mínimo de ensaio de 40 horas e máximo de 212 horas. As amostras não foram submetidas a carregamentos como as da presente pesquisa. Observaram uma pequena variação dos resultados de condutividade hidráulica no decorrer dos ensaios, em função do manuseio e pesagem dos acumuladores das linhas de influente e efluente, uma vez que as linhas

de fluxo (tubulações) acabam exercendo variações de massa no momento da pesagem. Entretanto, tais oscilações não comprometeram o comportamento da condutividade hidráulica do GCL que seguiu uma tendência de valores da ordem de 10^{-11} m/s, conforme mostrado na Tabela 10 e preconizado por Koerner (2005), atendendo, também, às informações do fabricante.

Tabela 10: Valores de condutividade hidráulica dos ensaios de validação

Ensaio	Tempo (horas)	Condutividade hidráulica (m/s)
A	5	5,87E-11
	21	7,31E-11
	46	5,21E-11
B	12	8,77E-11
	24	6,61E-11
	48	5,68E-11
C	16	1,10E-11
	49	5,04E-11
	118	2,06E-10
D	19	6,83E-11
	40	2,10E-11
	48	5,50E-11
	64	5,19E-11
	94	4,38E-11
	162	3,85E-11
	212	2,62E-11

Fonte: Favretto et al (2020).

4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O programa experimental cujos resultados são apresentados nos itens anteriores apresenta uma única variável de controle (H/B), testada a três níveis (1,0; 1,5 e 2,0), com três repetições (triplicatas). Esses níveis foram representados de forma codificada por níveis Alto (+1), Baixo (-1) e Central (0). Com o intuito de diminuir o ruído dos resultados laboratoriais, os ensaios foram realizados de forma aleatorizada.

A primeira variável de resposta analisada foi a deflexão média na região central da amostra de GCL causada pelo pistão de 25mm face reta no ensaio de *squeezing*. A Tabela 11 apresenta os valores da espessura média das amostras ensaiadas. Estes valores foram calculados

a partir da média das três medições mais próximas ao centro da amostra e, todas as amostras de GCL possuíam a mesma altura.

Tabela 11: Valores médios da espessura final das amostras ensaiadas

H/B (codificado)	Espessura da amostra de GCL (mm)
-1	4
-1	2
-1	5
-1	6
-1	3
-1	4
-1	5
-1	3
-1	5
0	9
0	8
0	9
0	8
0	7
0	7
0	9
0	8
0	10
1	9
1	8
1	9
1	9
1	8
1	8
1	9
1	8
1	10

Fonte: Autor (2022).

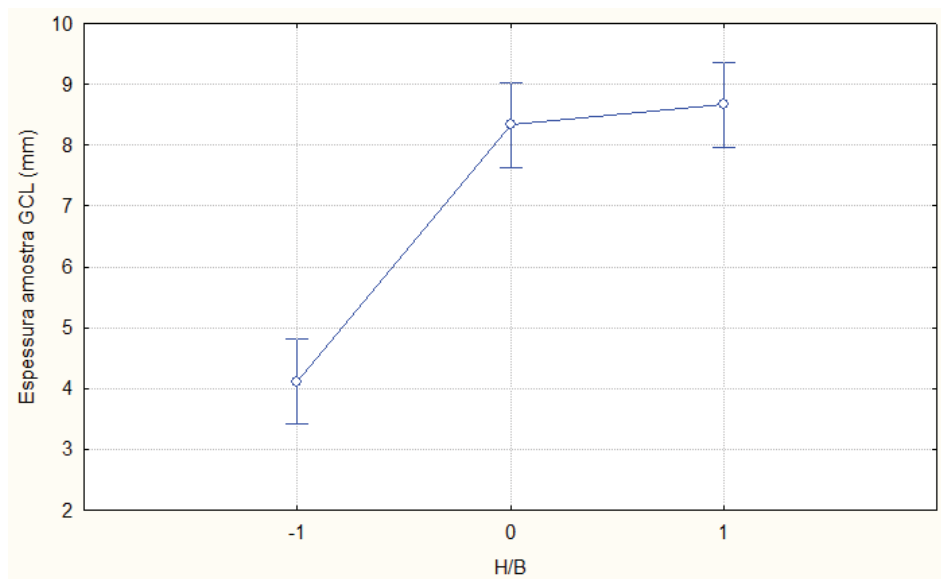
A Tabela 13 apresenta uma análise de variância (ANOVA) com o intuito de verificar o efeito da razão do solo de cobertura (H/B) sobre a deflexão da amostra do GCL, ou seja, se ocorre ou não o fenômeno de *squeezing*. O nível de confiança mínimo para esta análise foi fixado em 95%. Ao analisar o valor P (< 5%) (segunda linha e última coluna da Tabela 12, é possível verificar que H/B possui influência significativa em relação ao *squeezing*.

Tabela 12: ANOVA para a resposta da deformação do GCL

Efeitos	SS (Soma de Quadrados)	DF (Graus de Liberdade)	MS (Média de Quadrados)	F	P (Nível de Confiança)
Interc.	1337,037	1	1337,037	1289,286	0,00E-01
H/B	116,074	2	58,037	55,964	9,18E-10
Erro	24,889	24	1,037		

Fonte: Autor (2022).

Figura 41: Gráfico do efeito de H/B em relação a deformação do GCL



Fonte: Autor (2022).

Pode-se notar na Figura 41 que a deflexão do GCL é fortemente influenciada pela relação H/B, pois há uma diferença muito visível entre o resultado obtido para H/B=1,0 e os demais. Isto reflete o fato de esta condição foi a única a apresentar o fenômeno de *squeezing*.

A Tabela 13 apresenta o teste de *Tukey*, no qual pode-se verificar a diferença significativa da relação H/B=1,0 em comparação com as demais relações (nesta tabela são apresentados os valores P correspondentes as comparações pareadas das condições testadas).

Tabela 13: Teste de *Tukey* para a deflexão do GCL

H/B	-1	0	1
-1		5,67E-09	1,35E-09
0	5,67E-09		0,494121
1	1,35E-09	0,494121	

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 14 apresenta os valores de condutividade hidráulica utilizados para a análise, optou-se em selecionar uma condutividade inicial e uma final de cada ensaio, respeitando uma semelhança nas horas (Tempo).

Tabela 14: Valores finais de Condutividade Hidráulica para as amostras ensaiadas

H/B	Condutividade Hidráulica (m/s)	Tempo (h)
-1	1,51E-09	2
-1	7,29E-11	65
-1	6,33E-10	2
-1	6,06E-11	62
-1	4,26E-09	1
-1	9,05E-11	45
0	2,06E-10	17
0	5,57E-11	94
0	1,05E-10	13
0	4,06E-11	89
0	2,39E-10	41
0	4,31E-11	76
1	6,12E-11	56
1	4,70E-11	147
1	6,73E-11	61
1	3,80E-11	205
1	3,31E-11	52
1	6,86E-11	139

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 15 apresenta uma análise de variância (ANOVA) com o intuito de verificar o efeito da razão H/B sobre a condutividade hidráulica das amostras de GCL ensaiadas. O nível de confiança mínimo para esta análise foi fixado em 95%. É possível verificar que a variável H/B não apresentou influência estatisticamente significativa sobre a condutividade hidráulica ($P > 5\%$), mesmo tendo ocorrido o fenômeno de *squeezing* para a relação H/B=1,0.

Tabela 15: ANOVA para a resposta da condutividade hidráulica

Efeitos	SS (Soma de Quadrados)	DF (Graus de Liberdade)	MS (Média de Quadrados)	F	P (Nível de Confiança)
Interc.	3,24E-18	1	3,24E-18	3,577865	0,078024
H/B	4,18E-18	2	2,09E-18	2,310876	0,133399
Erro	1,36E-17	15	9,04E-19		

Fonte: Autor (2022).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais em relação aos ensaios de *squeezing* e ao ensaio de condutividade hidráulica da amostra de GCL permeado com água – após *squeezing*. Para finalizar são propostas sugestões para trabalhos futuros neste seguimento.

Nos ensaios de *squeezing*, somente a razão de cobertura $H/B = 1,0$ apresentou a deformação na região central da amostra de GCL, ou seja, local aonde o pistão de 25mm de face reta aplicou o carregamento. Portanto a deformação no GCL decresce ao passo em que se acresce a razão de cobertura, onde recomenda-se um H/B mínimo de 1,5, para evitar que ocorra o fenômeno de *squeezing*.

Nos ensaios de condutividade hidráulica as amostras com razão de cobertura $H/B = 1,5$ e $2,0$ no início apresentaram uma maior permeabilidade, na casa de 10^{-10} , mas no decorrer do ensaio a condutividade hidráulica voltou a apresentar valores dentro de uma faixa próxima à informada pelo fabricante, ou seja, igual a 5×10^{-11} m/s.

As amostras com razão de cobertura $H/B = 1,0$ foram as únicas a apresentarem o fenômeno de *squeezing*, e no início apresentaram uma maior permeabilidade, na casa de 10^{-09} , resultado da deformação causada na amostra do GCL que possibilitou um maior fluxo no local. Ao final do ensaio, as amostras de GCL se apresentaram visualmente sem a deformação. Podemos concluir que quando a percolação iniciou, o fluxo carregou as partículas no local de maior fluxo, ocasionando a cicatrização, característica do GCL.

Ao final da pesquisa foi possível concluir que o GCL, mesmo sofrendo o fenômeno de *squeezing*, pode garantir um adequado funcionamento por possuir características de cicatrização ou regeneração.

Este trabalho faz parte da linha de pesquisa sobre a condutividade hidráulica do GCL no PPGEng/UPF onde, recomenda-se a continuidade. Para futuros trabalhos, sugere-se: utilização de outros líquidos de diferentes concentrações ou lixiviado, analisando desde a hidratação do geocomposto bentonítico até a sua percolação; outro tipo de solo de cobertura; análise numérica para verificar os caminhos preferencias do fluxo no local onde ocorreu o *squeezing*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, T. P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.
- 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 D5890:2019**. Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners. West Conshohocken, PA, 2002.
- _____. American Society for Testing and Materials. **ASTM D5887:2016**. Standard test method for measurement of index flux through saturated geosynthetic clay liner specimens using a flexible wall permeameter. West Conshohocken, PA, 2016.
- BARROSO, M., TOUZE-FOLTZ, N., VON MAUBEUGE, K.; PIERSON, P. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. **Geotextiles and Geomembranes**. 24(3): 139–155, 2006.
- BENSON, C. H., KUCUKKIRCA, I. E.; SCALIA, J. Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill. **Geotext. Geomembr.** 28 (6): 536–546, 2010.
- BOUAZZA, A. Geosynthetic Clay Liners. **Geotextiles and Geomembranes**, 20 (1): 3-17, 2002.
- BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J.; MCCARTNEY, J. S.; SINGH, R. M. Unsaturated geotechnics applied to geoenvironmental engineering problems involving geosynthetics. **Eng. Geol.** 165: 143-153, 2013.
- BOUAZZA, A.; M. A. ALI; W. P. GATES; R. K. ROWE. New insight on geosynthetic clay liner hydration: the key role of subsoils mineralogy. **Geosynth. Int.** 24 (2): 139–150, 2017.
- BOYNTON, S. S.; DANIEL, D. E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. **Journal of Geotechnical Engineering**. 111(4): 465-478, 1985.
- BRADSHAW, S. L.; C. H. BENSON. Effect of municipal solid waste leachate on hydraulic conductivity and exchange complex of geosynthetic clay liners. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.** 140 (4), 2014.
- CHAI, J.; K. SARI, L. SHEN; Y. CAI. Predicting self-healing ratio of GCL with a damage hole. **Geotext. Geomembranes**. 44 (5): 761–769, 2016.
- CHEN, Y.; LIN, W.; ZHAN, T. L. T. Investigation of mechanisms of bentonite extrusion from GCL and related effects on the shear strength of GCL/GM interfaces. **Geotextile and Geomembranes**. 28 (1): 63-71, 2010.
- CONSOLI, N.; CRUZ, R.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 136 (5): 759-763, 2010.

CONSOLI, N.; MORAES, R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. **Journal of Material in Civil Engineering**. 25 (10): 1568-1573, 2013.

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: 30-78, 1994.

DANIEL, D. E.; TRAUTWEIN, S. J.; BOYNTON, S. S.; FOREMAM, D. E. Permeability testing with flexible-wall permeameters. **Geotechnical Testing Journal**. 7 (3): 113-122, 1984.

DANIEL, D.; BOWDERS, J.; GILBERT, R. Laboratory Hydraulic Conductivity Testing of GCLs in Flexible-Wall Permeameters. **Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners**, edited by WELL, L. (West Conshohocken, PA: ASTM International): 208-229, 1997

DI CREDDO. **Estudo para erradicação dos lixões no Brasil 2016**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/>. Acessado em: 09 set. 2020.

DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. 2007. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

EGLOFFSTEIN, T. Geosynthetic clay liners, part six: Ion exchange. **Geotechnical Fabrics Report**, 15 (5), 1997.

EGLOFFSTEIN, T.A. Natural bentonites - influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. **Geotextiles and Geomembranes** 19(7): 427-444, 2001.

EGLOFFSTEIN, T.A. Bentonite as sealing material in geosynthetic clay liners – Influence of the electrolytic concentration, the ion exchange and ion exchange with simultaneous partial desiccation on permeability. **Clay Geosynthetic Barriers**, Zanzinger, Koerner & Gartung (eds). Swets & Zeitlinger, Lisse, p. 141-153, 2002.

ESTORNELL, P.; DANIEL, D. E. Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, 118 (10): 1592-1606, 1992.

FAVRETTO, J.; ZANELLA, P.N.; SILVA, M. C.; FLOSS, M.F. Montagem e validação de um permeâmetro de parede flexível para avaliação da condutividade hidráulica de GCLs. **XX Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica**, COBRAMSEG, 2020.

FOX, P. J.; DE BATTISTA, D. J.; CHEN, S. H. A Study of the CBR Bearing Capacity Test for Hydrated Geosynthetic Clay Liners, Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners, ASTM STP 1308, Larry W. Well, Ed., **American Society for Testing and Materials**, 1997.

FOX, P. J.; DE BATTISTA, D. J.; CHEN, S. H. Bearing capacity of geosynthetic clay liners for cover soils of varying particle size. **Geosynthetics International**, 3 (4): 447-461, 1996.

GARDONI, M.G.; PALMEIRA, E.M. Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement. **Geotechnique**, 52(6): 405-418, 2002.

GATES, W. P.; LIU, Y.; SINGH, R. M.; BOUAZZA, A., Improving the swell index and fluid loss methods for compatibility testing of bentonites. **Australian Regolith and Clays Conference Mildura**, p. 69-74, 2012.

GLEASON, M. H.; DANIEL, D. E.; EYKHOLT, G. R. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, 123 (5): 438-445, 1997.

GRIM, R.E.; GÜVEN, N. Bentonites. Geology, Mineralogy, Property and Uses. **Developments in Sedimentology**, Elsevier, Amsterdam, 24, 1978.

GRIM, R.E. **Clay Mineralogy**. 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 1968.

GUYONNET, D.; TOUZE-FOLTZ, N.; NOROTTE, V.; POTHIER, C.; DIDIER, G.; GAILHANOU H.; BLANC, P.; WARMONT, F. Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications. **Geotextiles and Geomembranes**, 27 (5): 321-331, 2009.

HSUAN, Y. G.; KOERNER, R. M. Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 124 (6): 532-541, 1998.

IGS. International Geosynthetics Society. **Classificação dos geossintéticos**. Elaborado por BATHURST, R. J.; Tradução de MENDES, M. J. A. 2020. Disponível em: <https://www.geosyntheticssociety.org/wpcontent/plugins/resources/documents/Classification/Portuguese.pdf>. Acessado em: 17 out. 2020.

KOERNER, G. R. Comparing GCL Performance Using Rigid Versus Flexible Wall Permeameters. In: **Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology: 2nd Symposium**. ASTM International, 2004.

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

KOERNER, R. M., CARSON, D. A., DANIEL, D. E., BONAPARTE, R. Update of the Cincinnati GCL test plots. In: **Proceedings of Geo-Bento 1998**. Insatec Publications, France, 291-315, 1998a.

KOERNER, R. M., SOONG, T. Y., GONTAR, A. Selected aspects of GCL shear strength testing. In: **Proceedings of Geo-Bento 1998**, Insatec Publications, France, 97-110, 1998b.

LEWIS, B. G. Environmental and Ecological Chemistry, Encyclopedia of life support systems. In: **Soil Chemistry**, 2: 78-114, 2009.

LU, Y., H. A. NAGA, E. C. LEONG, A. M. BOUAZZA, AND P. LOCK. Effect of water salinity on the water retention curve of geosynthetic clay liners. **Geotext. Geomembranes**. 46 (6): 707-714, 2018.

LU, Y., H. ABUEL-NAGA, AND A. BOUAZZA. Water retention curve of GCLs using a modified sample holder in a chilled-mirror dew-point device. **Geotext. Geomembranes**. 45 (1): 23-28, 2017.

- MACCAFERRI. **Catálogo MacLine GCL W 40 Geocomposto Bentonítico**. Maccaferri, 2010.
- MAZZIERI, F.; DI EMIDIO, G.; PASQUALINI, E., Effect of wet-and-dry ageing in seawater on the swelling properties and hydraulic conductivity of two amended bentonites, **Applied Clay Science**, 142: 40-51, 2017.
- MEER, S.; BENSON, C. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final cover. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 133 (5): 550-563, 2007.
- MENDES, M. J. A. **Alguns Fatores que Influenciam o Desempenho de Geocompostos Bentoníticos sob Fluxo de Gases e Líquidos em Barreiras de Aterros Sanitários**. 2010, 180p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2010.
- MIGUEL, G. D. **Avaliação do desempenho de geocélulas expostas a cargas axiais através de provas de carga**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.
- MIGUEL, G. D.; ENDLER, R. R.; FLOSS, M. F. Um Estudo da Mínima Razão de Cobrimento Adequada a Proteger Geocompostos Argilosos. **Revista de Ciências Exatas Aplicadas e Tecnológicas da Universidade de Passo Fundo - CIATEC-UPF**, 9(2): 1-15, 2017.
- MIGUEL, G. D.; BENETTI, M.; HEINECK, K. S. Uma abordagem geral dos principais fatores influenciadores no desempenho de geocompostos argilosos. **Holos Environment**. Rio Claro, SP. 20 (2): 251-271, 2020.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- NOSKO, V.; TOUZE-FOLTZ, N. Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer. **Proceedings of the Second European Conference on Geosynthetics**, Bologna, Italia, 2: 557-560, 2000.
- ÖREN, A. H.; AKAR, R. Ç., Swelling and hydraulic conductivity of bentonites permeated with landfill leachates, **Applied Clay Science**, 142: 81-89, 2017.
- PALMEIRA, E.M.; GARDONI, M.G. Drainage and filtration Properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. **Geotextiles and Geomembranes**, 20(2): 97-115, 2002.
- PALMEIRA, E.M.; GARDONI, M.G. The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. **Geosynthetics International**, 7(4-6): 406-431, 2000.
- PETROV, R. J.; ROWE, R. K. Geosynthetic clay liner compatibility by hydraulic conductivity testing: Factors impacting performance. **Can. Geotech. J.** 34 (6): 863–885, 1997.
- 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**, Recife, CD-ROM, 2007.

- ROLLIN, A.L., MARCOTTE, M.; CHAPUT, L. Lessons Learned from Geo-electrical Leaks Surveys, **Proceedings of Seventh International Conference on Geosynthetics**, Nice, France, 2: 527-530, 2002.
- ROUF, M. A., A. BOUAZZA, R. M. SINGH, W. P. GATES; R. K. ROWE. Water vapour adsorption and desorption in GCLs. **Geosynth. Int.** 23 (2): 86–99, 2016.
- ROWE, R. K. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. In Vol. 1 of Proc., **6th Int. Conf. on Geosynthetics**, 27–103. St. Paul, MN: Industrial Fabrics Association International, 1998.
- ROWE, R. K. Short and long-term leakage through composite liners, 7th Arthur Casagrande lecture. **Can. Geotech. J.** 49 (2): 141–169, 2005a.
- ROWE, R. K. Performance of GCLs in liners for landfill and mining applications. **Environ. Geotech.** 1 (1): 3–21. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00031>, 2014a.
- ROWE, R. K. Some consideration with respect to the long term performance of multicomponent GCLs. In **Proc., GeoAmericas 2016**. Austin, TX: International Geosynthetics Society, 2016.
- ROWE, R. K. Long-term performance of contaminant barrier systems. **Géotechnique**, 55(9): 631–678, 2005b.
- ROWE, R. K. Performance of GCLs in liners for landfill and mining applications*. **Environmental Geotechnics**, 1(1): 3–21, 2014b.
- ROWE, R. K.; A. Y. ABDELRAZEK. Effect of interface transmissivity and hydraulic conductivity on contaminant migration through composite liners with wrinkles or failed seams. **Can. Geotech. J.** 56 (11): 1650–1667, 2019.
- ROWE, R. K.; HOOR, A. Predicted temperatures and service lives of secondary geomembrane landfill liners. **Geosynthetics International**, 16 (2): 71-82, 2009.
- ROWE, R. Kerry. Protecting the Environment with Geosynthetics: 53rd Karl Terzaghi Lecture. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 146 (9): 04020081, 2020.
- ROWE, R. K.; BOSTWICK, L.; THIEL, R. Shrinkage characteristics of heat-tacked GCL seams. **Geotextiles and Geomembranes**, 28(4): 352-359, 2010.
- SCALIA, J., G. L. BOHNHOFF, C. D. SHACKELFORD, C. H. BENSON; K. M. SAMPLE-LORD. Enhanced bentonites for containment of inorganic waste leachates by GCLs. **Geosynth. Int.** 25 (4): 392–411, 2018.
- SETZ, M. C., K. TIAN, C. H. BENSON; S. L. BRADSHAW. Effect of ammonium on the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. **Geotext. Geomembr.** 45 (6): 665–673, 2017.
- SNIS-SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Panorama do saneamento básico no brasil SNIS 2021. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acessado em: 15 mai. 2022.

YANG Y. L.; REDDY K. R.; DU, Y. J.; FAN, R. D., Short-Term Hydraulic Conductivity and Consolidation Properties of Soil-Bentonite Backfills Exposed to CCR Impacted Groundwater, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 144 (6), 2018.

ZANELLA, N. P. **Comportamento do GCL permeado com Biodiesel**. 2019. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, RS, 2019.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

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