

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CCET

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Avaliação dos fatores que influenciam a hidratação de GCLs em subleitos
lateríticos**

JOSÉ WILSON BATISTA DA SILVA

São Carlos
Abril de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CCET

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Avaliação dos fatores que influenciam a hidratação de GCLs em subleitos lateríticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:

Estruturas e Geotecnia

Orientadora:

Profa. Dra. Natália de Souza Correia

Coorientador:

Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha

São Carlos
Abril de 2021

Silva, José Wilson Batista da

Avaliação dos fatores que influenciam a hidratação de
GCLs em subleitos lateríticos / José Wilson Batista da
Silva -- 2021.

111f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São
Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Profa. Dra. Natália de Souza Correia

Banca Examinadora: Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira,

Prof. Dr. Jorge Gabriel Zornberg

Bibliografia

1. Engenharia civil. 2. Geotecnia . 3. Geossintéticos . I.

Silva, José Wilson Batista da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato José Wilson Batista da Silva, realizada em 06/04/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Natália de Souza Correia (UFSCar)

Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira (UnB)

Prof. Dr. Jorge Gabriel Zornberg (UT)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Dedico este trabalho ao meus pais: Maria da Conceição da Silva e Joaquim Batista da Silva, e a meus amados irmãos. Essências do meu ser!

AGRADECIMENTOS

Aqui coloco um pequeno reconhecimento de tudo que foi vivido nestes dois anos de mestrado. Primeiro agradeço a Deus por ter me agraciado com o dom da vida e com a melhor família que poderia existir. Agradeço também a Nossa Senhora no título de Conceição Aparecida pela intercessão e proteção em toda minha vida.

Agradeço aos meus pais, Maria da Conceição da Silva e Joaquim Batista da Silva de quem recebi o mais puro amor. Obrigado por me apoiarem em todos os sonhos e jornadas que segui até aqui. Em especial a você mãe que me sustentou através das suas orações e carinho, nos dias mais difíceis sempre busquei pelo seu rosto.

Agradeço também aos meus irmãos, Quitéria, Reginaldo, Ronaldo,IVALDO, Aucilene, Ana, Quelândia, Aldilene e Maria, caminhar com vocês é mais fácil. Ao meu irmão de coração Leonardo, também estendo minha gratidão pelo apoio diário e paciência. A minha irmã oriental Marcela obrigado pelo carinho e incentivo.

À minha namorada Laís agradeço por me apoiar nos momentos mais difíceis, com quem agora partilho a alegria desta conquista.

Aos amigos Renato Nicoletti, João Boff, Camila Lacerda, Nathália Von Ancken, Mayara Vieira, Mayara Simões, Flávio Morais e Luciano Queiroz pelo companheirismo.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento e incentivo desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e à Universidade Federal de São Carlos, por todo apoio institucional e material que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Prof. Dra. Natália de Souza Correia, pela orientação, dedicação e confiança durante a realização dessa pesquisa. Ao Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha coorientador desta pesquisa, por todas as sugestões, instruções e visões partilhadas durante este trabalho.

Agradeço ao grupo de pesquisa de Geotecnia e Geossintéticos da UFSCar (GEGeos/UFSCar) e ao Laboratório de Geotecnia da UFSCar (LabGEO/UFSCar).

Agradeço à Huesker do Brasil, Ober geossintéticos e CETCO Brasil pela disponibilização de amostras para a realização deste estudo.

Não posso deixar de agradecer de forma especial ao Ministério Universidades Renovadas (MUR) onde encontrei a Verdade. Com vocês aprendi que antes de tudo vem Ele, e que o Sonho de Amor é cada dia mais realidade.

“Nenhum homem é uma ilha, inteiramente isolado, todo homem é um pedaço de um continente, uma parte de um todo. Se um torrão de terra for levado pelas águas até o mar, a Europa fica diminuída, como se fosse um promontório, como se fosse o solar de teus amigos ou o teu próprio; a morte de qualquer homem me diminui, porque sou parte do gênero humano. E por isso não perguntai: Por quem os sinos dobram; eles dobram por vós”

“meditação XVII” John Donne (1572-1631)

RESUMO

Silva, J. W. B. **Avaliação dos fatores que influenciam a hidratação de GCLs em subleitos lateríticos**. 2021. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

Atualmente, a maior preocupação no desempenho dos geocompostos bentônicos (GCLs) aplicados em aterros de resíduos sólidos está no comportamento de hidratação deste material. Trabalhos recentes têm mostrado que o processo de hidratação dos GCLs pelo subleito é influenciado por uma série de variáveis, tais como as características dos GCLs, o teor de umidade inicial do subleito e a dinâmica de hidratação e reidratação do *liner* pela exposição climática em campo. Como consequência da insuficiente hidratação, o GCL pode apresentar desempenho inferior como barreira hidráulica. Estes aspectos, no entanto, ainda não foram avaliados em condições de clima tropical, como no Brasil, onde os solos lateríticos tendem a apresentar teores de umidade ótima mais elevados que o observado em países de clima temperado, mineralogia diferenciada e uma grande parcela de finos. Diante do exposto, foi avaliada neste trabalho a influência de dois subleitos lateríticos no processo de hidratação de GCLs em condições isotérmicas (colunas de hidratação) e térmicas (modelo físico). Os resultados mostraram que o teor de umidade do subleito impactou significativamente a hidratação do GCL nas duas condições analisadas. A exposição à ciclos térmicos reduziu drasticamente a capacidade dos subleitos lateríticos de hidratar os GCLs. A retração dos painéis de GCLs teve relação com o teor de umidade do GCL e o número de ciclos térmicos aplicados. De maneira geral, os subleitos lateríticos apresentaram uma capacidade limitada de hidratar os GCLs, com valores de saturação inferiores ao esperado para o correto desempenho destes. O entendimento do comportamento de hidratação do GCL requer a análise não saturada do subleito e dos GCLs e da magnitude do diferencial de sucção entre os materiais. A caracterização dos GCLs pós-hidratação mostrou que os parâmetros de CTC, SI e condutividade hidráulica sofreram pouca variação, com uma tendência de diminuição. A pesquisa mostrou a importância da investigação dos GCLs sob condições práticas de instalação e a influência de importantes variáveis presentes nesta aplicação.

Palavras chave: Geossintéticos; GCLs; Solos lateríticos; Ciclos térmicos; Aterro de resíduos sólidos; Hidratação.

ABSTRACT

Silva, J. W. B. **Evaluation of the factors that influence the hydration of GCLs in lateritic subgrade.** 2021. 111f. Thesis (Master in Civil Engineering) – Federal University of Sao Carlos, Sao Carlos, 2021.

Currently, the biggest concern in the performance of geosynthetic clay liners (GCLs) applied in municipal solid waste landfills is in the hydration behavior of this material. Recent studies have shown that the GCLs hydration process from subgrade is influenced by several variables, such as the characteristics of the GCLs, the subgrade initial moisture content, and the dynamics of hydration and rehydration of the liner due to exposure field conditions. As a consequence of insufficient hydration, the GCL may present inferior behavior as barrier. These aspects, however, have not yet been evaluated in tropical climate conditions, as in Brazil, where lateritic soils tend to have higher levels of optimum moisture content than those observed in countries with temperate climates, different mineralogy, and a large portion of fine particles. The present research evaluated the influence of two different lateritic subgrades in the hydration process of GCLs in isothermal (hydration columns) and thermal conditions (physical model). Results showed that the subgrade moisture content significantly impacted the GCL hydration in the two analyzed conditions. The exposure to thermal cycles drastically reduced the ability of the lateritic subgrades to hydrate the GCLs. The shrinkage of the GCL panels was related to the GCL moisture content and the number of thermal cycles applied. In general, the lateritic subgrades showed a limited capacity to hydrate the GCLs, with saturation values lower than expected for the correct performance of these materials. The understanding the GCL hydration behavior requires unsaturated analysis of the subgrade and GCLs and the magnitude of the differential suction between these materials. The characterization of the GCLs after hydration tests showed that the parameters of CEC, SI, and hydraulic conductivity suffered slight variation, with a trend of decrease. The research showed the importance of investigating GCLs under practical installation conditions and the influence of important variables present in this application.

Keywords: Geosynthetics; GCLs; Lateritic soils; Thermal Cycles; Solid waste landfills; Hydration.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Tipos de barreiras hidráulicas de aterros de resíduos sólidos: (a) simples; (b) composto com camada de argila (c) composto com GCL; (d) composto duplo..... | 19 |
| Figura 3.2 - Estrutura tri-modal do GCL. Fonte: Adaptado de Acikel et al. (2020). | 24 |
| Figura 3.3 - Representação hipotética do umedecimento do GCL: valor de entrada de água (VEA); Características secagem do subleito: valor de entrada de ar (VEar); Zona residual. Fonte: Adaptado de Acikel et al. (2018). | 25 |
| Figura 3.4 - Influência da mineralogia do subleito na hidratação dos GCLs: (a) Umidade gravimétrica do GCL; (b) Valores máximos de umidade. Adaptado de Bouazza et al. (2017b). | 31 |
| Figura 3.5 - Hidratação do GCL por um subleito argiloso: (a) solo QC ($w_{ót}=22\%$); (b) solo QC ($w_{ót}+2\% =24\%$). Adaptado de Acikel et al. (2018b). | 32 |
| Figura 3.6 - Hidratação do GCL por um subleito argiloso: (a) solo KC ($w_{ót} =28,5\%$); (b) solo KC ($w_{ót}+2\% =30,5\%$). Adaptado de Acikel et al. (2018b). | 33 |
| Figura 3.7 - Hidratação do GCL por um subleito arenoso (FS). Fonte: Adaptado de Acikel et al. (2018a). | 33 |
| Figura 3.8 - Efeito dos ciclos térmicos no liner: (a) exposição durante a instalação; (b) liner com camada de proteção (diminuição das dobras na geomembrana); (c) exposição prolongada sem camada de proteção; (d) escoamento da condensação de água. Fonte: Adaptado de Take et al. (2012). | 36 |
| Figura 3.9 – Coluna de Hidratação. Fonte: Adaptado de Rowe et al. (2011)..... | 37 |
| Figura 3.10 - Hidratação de GCLs em condições isotérmicas e ciclos térmicos: (a) GCL2; (b) GCL3. Fonte: Anderson et al. (2012). | 39 |
| Figura 3.11 - Modelo físico utilizado na simulação da célula. Adaptado de Rowe et al. (2013)... | 42 |
| Figura 4.1 – Aspectos estruturais dos GCLs e respectivas bentonitas utilizados nesta pesquisa... | 44 |
| Figura 4.2 – Ensaio de caracterização da bentonita: (a) massas por unidade de área e teor de umidade; (b) ensaio de plasticidade; (c) limite de liquidez; (d) sedimentação. | 45 |
| Figura 4.3 - Ensaio de capacidade de troca catiônica: (a) amostra seca; (b) homogeneização da amostra; (c) seringa, pipeta e papel filtro; (d) início do ensaio; (e) amostra ao fim do ensaio; (f) papel filtro com as gotas da solução. | 46 |
| Figura 4.4 - Ensaio de caracterização da bentonita para compor GCLs: (a) moagem da bentonita; (b) lama de bentonita; (c) lama de bentonita hidratada; (d) lama no filtro de pressão; (e) ensaio de perda de fluido; (f) perda de fluido (ml); (g) ensaio de inchamento. | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.5 – Ensaio de caracterização mecânica (GCL1): (a) ensaio de descolamento; (b) ruptura por descolamento; (c) ensaio de tração e (d) ruptura por tração. | 48 |
| Figura 4.6 - Ensaio de índice de fluxo: (a) corte e vedação lateral com bentonita; (b) amostra entre pedras porosas; (c) corpo de prova montado na câmara; (d) detalhe vedação; (e) ensaio em andamento na câmara triaxial; (f) painel de pressão. | 48 |
| Figura 4.7 - Ensaio de curva de retenção: (a) pedra porosa e papel filtro; (b) GCL e anel; (c) papel filtro superior; (d) sobrecarga de 1kPa; (e) processo de hidratação; (f) amostra hidratada; (g) detalhe do papel filtro e de sacrifício. | 50 |
| Figura 4.8 - Solos: (a) solo arenoso SC; (b) solo argiloso CH. | 51 |
| Figura 4.9 – Caracterização: (a) Curvas de compactação; (b) Curvas Granulométricas. | 52 |
| Figura 4.10 - Mineralogia dos solos: (a) SC; (b) CH. | 53 |
| Figura 4.11 - Curva de retenção de água dos solos por secagem: (a) solo SC; (b) solo CH. | 54 |
| Figura 4.12 - Detalhe da geomembrana lisa usada nessa pesquisa. | 56 |
| Figura 4.13 - Procedimento experimental do ensaio de hidratação: (a) processo de compactação do solo; (b) última camada de solo compactado; (c) instalação do GCL1; (d) instalação do GCL2; (e) instalação do GCL3; (f) instalação da geomembrana; (g) colunas; (h) sensores de umidade. | 57 |
| Figura 4.14 – Configuração final das colunas utilizadas nos ensaios para ensaios Isotérmicos. ... | 58 |
| Figura 4.15 – Metodologia usada nos ensaios em condições isotérmicas. | 59 |
| Figura 4.16 - Modelo esquemático da caixa de ensaios utilizada nesta pesquisa. | 60 |
| Figura 4.17 - Montagem da Caixa: (a) camada de isolamento; (b) caixa de ensaios; (c) detalhe das medidas; (d) marcação das camadas; (e) solo compactado; (f) última camada compactada. | 61 |
| Figura 4.18 - Instrumentação: (a) sensor de umidade EC-5 e <i>datalogger</i> Em50; (b) sensor de umidade EC-5; (c) sensor de temperatura – Arduino. | 61 |
| Figura 4.19 – Ancoragem dos geossintéticos: (a) corpo de prova de GCL; (b) geomembrana ancorada (vista superior); (c) GCL e Geomembrana ancorados no sistema (vista inferior).. | 62 |
| Figura 4.20 – Etapa final de montagem da caixa: (a) ancoragem com GCL e geomembrana; (b) sobrecarga com brita; (c) sistema de aquecimento; (d) vedação e fechamento. | 63 |
| Figura 4.21 - Ciclo de aquecimento e resfriamento: (a) Perfil padrão de temperatura diária; (b) Perfil de temperatura no tempo. | 64 |
| Figura 4.22 - Medição da retração no corpo de prova de GCL. | 65 |
| Figura 4.23 – Metodologia usada nos ensaios em condições térmicas. | 65 |
| Figura 5.1 - Granulometria da bentonita dos GCLs. | 67 |
| Figura 5.2 – Difração de Raio X - Bentonita do GCL1. | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.3 – Difração de Raio X – Bentonita do GCL2. | 68 |
| Figura 5.4 – Difração de Raio X – Bentonita do GCL3. | 69 |
| Figura 5.5 - Curvas de retenção de água dos GCLs (umedecimento). | 70 |
| Figura 5.6 - Teores de umidade de GCL1 e subleitos ao longo da hidratação em condições isotérmicas em contato com: (a) o solo SC; (b) o solo CH. | 71 |
| Figura 5.7 - Comparação da hidratação de GCL1 por diferentes subleitos: (a) Hidratação de GCL por subleitos granulares; (b) CRA dos subleitos granulares; (c) hidratação de GCL de subleitos argilosos; (d) CRA dos subleitos argilosos. | 74 |
| Figura 5.8 - Efeito do tipo de GCLs na hidratação: (a) GCLs em contato com o solo SC, (b) GCLs em contato com o solo CH. | 77 |
| Figura 5.9 - Perfis de teor de umidade do subleito após o término da hidratação dos GCLs: (a) GCL1 no subleito SC; (b) GCL 2 no subleito SC; (c) GCL3 no subleito SC; (d) GCL1 no subleito CH; (e) GCL2 no subleito CH; (f) GCL3 no subleito CH. | 78 |
| Figura 5.10 - Redistribuição da água entre o GCL e o subleito SC durante a hidratação: (a) sucção do GCL1 e do subleito; (b) caminho de sucção nas CRAs de GCL1 e subleito; (c) valores de sucção de GCL2 e do subleito; (d) caminho de sucção nas CRAs do GCL2 e subleito; (e) valores de sucção de GCL3 e do subleito; (f) caminho de sucção nas CRAs do GCL3 e subleito. | 79 |
| Figura 5.11 - Redistribuição da água entre o GCL e subleito CH durante a hidratação do GCL: (a) valores de sucção do GCL1 e do subleito; (b) caminho de sucção nas CRAs do GCL1 e solo; (c) valores de sucção de GCL2 e do subleito; (d) caminho de sucção nas CRAs do GCL2 e subleito; (e) valores de sucção do GCL3 e do subleito; (f) caminho de sucção nas CRAs do GCL3 e subleito. | 81 |
| Figura 5.12 – Imposição dos ciclos térmicos: (a) $CH_{wót}$; (b) $CH_{wót+2\%}$; (c) $SC_{wót+2\%}$ | 83 |
| Figura 5.13 – Perfil térmico no subleito com a variação da umidade: (a) temperatura $CH_{wót}$; (b) umidade $CH_{wót}$; (c) temperatura $CH_{wót+2\%}$; (d) umidade $CH_{wót+2\%}$; (e) temperatura $SC_{wót+2\%}$; (f) umidade $SC_{wót+2\%}$ | 84 |
| Figura 5.14 - Teores de umidade de GCL1 ao longo da hidratação em condições térmicas em contato com o solo SC: (a) comparação com as condições isotérmicas; (b) comparação com teor de umidade do subleito. | 86 |
| Figura 5.15 - Teores de umidade de GCL1 ao longo da hidratação em condições térmicas em contato com o solo CH: (a) comparação com as condições isotérmicas; (b) comparação com teor de umidade do subleito. | 87 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.16 - Comparação da hidratação de GCL1 em condições térmicas: (a) Hidratação de GCL por subleitos argilosos; (b) CRA dos subleitos argilosos; (c) hidratação de GCL de subleitos granulares; (d) CRA dos subleitos granulares..... | 88 |
| Figura 5.17 - Perfis de teor de umidade do subleito após hidratação do GCL1 em condições térmicas e isotérmicas: (a) GCL1 no subleito $CH_{wót}$; (b) GCL1 no subleito $CH_{wót+2\%}$; (c) GCL1 no subleito $SC_{wót+2\%}$ | 90 |
| Figura 5.18 - Transferência de água entre o GCL e o subleito SC durante a hidratação: (a) caminho de sucção do GCL1 e do subleito $SC_{wót+2\%}$; (b) caminho de sucção nas CRAs de GCL1 e subleito $SC_{wót+2\%}$; (c) sucção de GCL1 e do subleito $CH_{wót}$; (d) caminho de sucção nas CRAs do GCL2 e subleito $CH_{wót}$; (e) sucção de GCL3 e do subleito $CH_{wót+2\%}$; (f) sucção nas CRAs do GCL3 e subleito $CH_{wót+2\%}$ | 91 |
| Figura 5.19 – Resultados de retração dos GCLs em condições térmicas. | 93 |
| Figura 5.20 – Relação entre W_{GCL} e a retração: (a) subleito CH; (b) subleito SC. | 94 |
| Figura 5.21 – GCL1 após a hidratação pelo subleito $SC_{wót+2\%}$ (a) condições isotérmicas; (b) condições térmicas. | 94 |
| Figura 5.22 – GCL1 após a hidratação em condições isotérmicas: (a) $SC_{wót}$, (b) $SC_{wót+2\%}$, (c) $CH_{wót}$; (d) $CH_{wót+2\%}$ | 96 |
| Figura 5.23 – GCLs após a hidratação em condições isotérmicas: (a) GCL1 no subleito $SC_{wót+2\%}$ (b) GCL2 no subleito $SC_{wót+2\%}$, (c) GCL3 no subleito $SC_{wót+2\%}$; (d) GCL1 no subleito $CH_{wót+2\%}$; (b) GCL2 no subleito $CH_{wót+2\%}$, (c) GCL3 no subleito $CH_{wót+2\%}$ | 96 |
| Figura 5.24 - Comparativo das condutividades hidráulicas medidas em amostras virgens e exumadas após os testes de hidratação: (a) solo SC; (b) solo CH. | 97 |
| Figura 5.25 – Influência da propriedade do GCL na condutividade hidráulica após ensaios: (a) CTC; (b) SI. | 98 |
| Figura 5.26 - Condutividade hidráulica após hidratação versus teor de umidade gravimétrica..... | 99 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Influência do teor de umidade do subleito na hidratação do GCL. Adaptado de Rayhani et al. (2011). | 21 |
| Tabela 3.2 - Hidratação de GCL por solos finos. Adaptado de Sarabian e Rayhani (2013). | 22 |
| Tabela 3.3 - Características das bentonitas e hidratação do GCL. | 27 |
| Tabela 3.4 - Indicadores de desempenho para os GCLs propostos por Guyonnet <i>et al</i> , (2009). Fonte: Adaptado de Guyonnet <i>et al</i> , (2009). | 28 |
| Tabela 3.5 – Resultados de hidratação de GCLs por diferentes subleitos estudados por Bouazza et al. (2017) e Acikel <i>et al</i> . (2018)..... | 34 |
| Tabela 3.6 - Hidratação do GCL em condições isotérmicas e ciclos térmicos. Fonte: Adaptado de Rowe et al. (2011)..... | 38 |
| Tabela 3.7 - Estudos de Caso. Fonte: Adaptado de Thiel et al. (2006). | 41 |
| Tabela 4.1 – Características dos solos. | 52 |
| Tabela 4.2 - Propriedades da Geomembrana..... | 56 |
| Tabela 5.1 - Caracterização GCLs utilizados na pesquisa..... | 66 |
| Tabela 5.2 - Parâmetros de ajuste da curva de retenção dos GCLs (umedecimento)..... | 70 |
| Tabela 5.3 - Propriedades das amostras de GCLs exumadas dos ensaios de laboratório. | 95 |

Sumário

| | | |
|-------|--|-----|
| 1. | Introdução | 15 |
| 2. | Objetivos..... | 18 |
| 3. | Revisão Bibliográfica | 19 |
| 3.1 | Liners compostos com GCL | 19 |
| 3.2 | Importância da hidratação dos GCLs..... | 20 |
| 3.3 | Propriedades da bentonita e geotêxteis na hidratação de GCLs | 26 |
| 3.4 | Propriedades do subleito na hidratação de GCLs | 30 |
| 3.5 | Ciclos térmicos e a hidratação dos GCLs | 35 |
| 3.6 | Hidratação e a retração dos GCLs | 40 |
| 4. | Programa Experimental | 44 |
| 4.1 | Materiais | 44 |
| 4.1.1 | Geossintético bentonítico (GCL)..... | 44 |
| 4.1.2 | Solos de subleito | 51 |
| 4.2 | Geomembrana..... | 55 |
| 4.3 | Colunas de Hidratação Isotérmicas..... | 56 |
| 4.4 | Modelos físicos de <i>liners</i> com imposição de temperatura | 59 |
| 5. | Resultados..... | 66 |
| 5.1 | Propriedades dos GCLs | 66 |
| 5.2 | Resultados dos ensaios isotérmicos de hidratação..... | 70 |
| 5.2.1 | Efeito do teor de umidade e do tipo de subleito na hidratação de GCL..... | 70 |
| 5.2.2 | Efeito do tipo de GCL na hidratação | 74 |
| 5.2.3 | Avaliação da transferência de umidade entre GCLs e subleitos baseada em análises da sucção durante hidratação | 79 |
| 5.3 | Resultados dos ensaios de hidratação em condições térmicas | 82 |
| 5.3.1 | Perfil de temperatura..... | 82 |
| 5.3.2 | Efeito do teor de umidade e do tipo de subleito na hidratação de GCL em condições térmicas..... | 85 |
| 5.3.3 | Avaliação da troca de umidade entre GCLs e subleitos baseada em análises da sucção durante a hidratação em condições térmicas..... | 90 |
| 5.3.4 | Análise da retração do GCL submetido a ciclos térmicos | 92 |
| 5.4 | Efeito da hidratação insuficiente nas propriedades do GCL..... | 95 |
| 6 | Conclusões..... | 101 |
| | Sugestões de Pesquisa | 103 |
| | Referências Bibliográficas..... | 104 |

1. Introdução

Liners têm sido frequentemente compostos com geomembranas e geocompostos bentoníticos (GCLs) colocadas sobre subleitos compactados para garantir a impermeabilidade dos aterros de resíduos (Touze-Foltz et al., 2021). Ambos os materiais apresentam baixa condutividade hidráulica e desempenho mecânico suficiente, bem como alta adsorção e retenção de compostos químicos de lixiviados (Bouazza, 2002; Rowe et al., 2019). Especificamente no caso dos GCLs, essa baixa condutividade hidráulica é dada principalmente devido ao inchamento osmótico de bentonita sódica, que cria caminhos de fluxo difíceis para líquidos e gases (Bradshaw e Benson, 2014). Os GCLs, no entanto, tem sido submetido à diferentes condições ambientais, tal como para barrar lixiviados de resíduos de mineração (Hosney e Rowe, 2014; Liu et al., 2015) ou mesmo condições de extrema variação de temperatura nos aterros (Take et al., 2015; Brachman et al., 2018; Yesiller et al., 2019). Seu desempenho hidráulico tem sido uma preocupação no meio técnico (Liu et al., 2015), principalmente quanto à insuficiente hidratação pelo subleito (Acikel et al., 2018a).

Vários autores sugerem que o GCL deve hidratar a valores de umidade acima de 80% para efetivamente atuar como uma barreira de fluidos, condição que depende do tipo do GCL e das propriedades do solo de subleito (Chevrier et al., 2012; Rowe, 2020). No entanto, a literatura atual mostra que o GCL não é automaticamente hidratado quando em contato com o subleito. A hidratação e velocidade de hidratação do GCL pelo solo de subleito envolve uma série de variáveis, como mineralogia do solo do subleito, tipo de bentonita, tipo de geotêxteis, comportamento de retenção de água do solo do subleito e GCL, bem como o teor de umidade inicial do solo e GCL (Kerry Rowe et al., 2011; Bouazza et al., 2017a; Acikel et al., 2018a; Rowe, 2020).

Bouazza et al. (2017a) indicaram que a hidratação dos GCLs é inversamente dependente da porcentagem de argila esmectita presente no subleito. Evidenciando que uma pequena porção de esmectita (3%) reduz a capacidade de hidratação do GCL, seja o solo do subleito argiloso ou não. Acikel et al. (2018a) identificaram que a hidratação insuficiente dos GCLs pelos subleitos é influenciada pela granulometria e mineralogia do subleito, do tipo de geotêxtil de suporte e da massa de bentonita por área do GCL. Rowe (2020) destaca a estrutura do GCL como um fator importante na sua hidratação. Um GCL agulhado com *scrim* tem maior chance de alcançar uma melhor hidratação devido à redução do índice de vazios e consequentemente da quantidade de água para uma correta hidratação. Da mesma forma que os GCLs agulhados

com excessiva resistência à ancoragem diminuem a capacidade de hidratação. Rayhani et al. (2011) comprovaram uma dependência direta do teor de umidade do subleito nos teores de umidade do GCL, que a ancoragem e sua relação com o índice de vazios também se mostraram importantes, e que altos valores de ancoragem apresentaram maiores valores de saturação e inchamento durante a hidratação. Anderson et al. (2012) avaliaram a hidratação do GCL revelando suscetibilidade à perda de umidade devido aos ciclos térmicos e confirmaram a relação entre a hidratação e a força de ancoragem dos geotêxteis, influenciada pela taxa de bentonita por área. Sarabian e Rayhani (2013) avaliaram a hidratação de um GCL composto por uma bentonita com menos de 30% de montmorilonita e dificuldade de hidratação deste GCL quando em contato com solos argilosos.

A hidratação insuficiente afeta as propriedades do GCL, que são essencialmente proporcionadas pelas alterações nas características da bentonita. As bentonitas são ativadas quando bem hidratadas e sua permeabilidade para líquidos e gases é significativamente reduzida quando o nível adequado de hidratação não é alcançado. Essa hidratação insuficiente afeta o processo de inchamento, as características de auto cicatrização, a perda de fluido e a condutividade hidráulica (McWatters et al., 2016; Bouazza et al., 2017a; Acikel et al., 2018a; Rowe, 2020). Rowe et al. (2019) mostraram o efeito do teor de umidade do subleito no desempenho hidráulico dos GCLs sendo bastante dependente da granularidade da bentonita, da estrutura do GCL e do tipo de percolante. Rowe (2020) afirma que a correta hidratação do GCL é importante uma vez que tem influência sobre a capacidade do GCL de conter hidrocarbonetos, gases, interação com lixiviados e a retração dos painéis de GCL em campo.

Diversos estudos avaliaram a hidratação de GCL por diferentes solos de subleito (Rayhani et al., 2011; Anderson et al., 2012; Sarabian e Rayhani, 2013; Bouazza et al., 2017a; Acikel et al., 2018a; Rowe et al., 2019; Yu e El-Zein, 2020). No entanto, estes estudos envolvem principalmente o uso de solos formados em climas temperados, nos quais predomina uma quantidade significativa de esmectita em sua mineralogia. Faltam, portanto, estudos que forneçam a compreensão do processo de hidratação de GCLs por solos formados em climas tropicais. Os solos lateríticos, devido à sua formação, sofrem um processo de lixiviação e apresentam uma concentração residual de óxidos de ferro e alumínio. A fração argilosa desses solos é essencialmente composta de argilominerais do grupo caulinita e hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio (Santos e Martínez, 2003), que favorecem a formação de agregados com as partículas mais finas do solo, característica que explica a heterogeneidade dos poros e o comportamento bimodal nas curvas de retenção de água desses solos, tal como

nos trabalhos de Portelinha e Zornberg (2017) e Marçal et al. (2020). Solos lateríticos apresentam, em sua estrutura, uma parcela de finos suficiente para a retenção de água, ao mesmo tempo que também possuem uma parcela de grãos maiores que atenuam as forças de sucção (Miguel et al., 2014). Essa característica pode representar um grande potencial na hidratação de GCLs. No Brasil, a aplicação desses solos em aterros sanitários é amplamente realizada devido a estes serem encontrados em grande parte do território e, portanto, estudos sobre o comportamento dos GCLs hidratados por subleitos com solos lateríticos requerem um maior conhecimento. Esta lacuna também existe para estudos relacionadas à retração dos GCLs expostos em condições climáticas tropicais.

Nesse sentido, o presente estudo avalia o comportamento de hidratação de três GCLs em contato com dois solos lateríticos, submetidos às condições térmicas e isotérmicas. Por meio de colunas de hidratação, pretende-se compreender a influência dos solos lateríticos na hidratação dos GCLs. Simultaneamente, por meio de um modelo físico, pretende-se avaliar a hidratação dos GCLs em condições térmicas e consequente efeito na retração dos GCLs. Em ambas análises, serão avaliadas propriedades físico-químicas e hidráulicas dos GCLs pós-hidratação.

2. Objetivos

Visando a preocupação quanto ao desempenho de GCLs em solos e regiões de clima tropical, este trabalho tem como objetivo avaliar a hidratação de diferentes GCLs por subleitos de solos lateríticos sob condições térmicas e isotérmicas, e seu impacto nas propriedades físico-químicas, hidráulicas e de retração. São objetivos específicos desta pesquisa:

- Analisar a influência do teor de umidade inicial de dois solos lateríticos na hidratação de diferentes GCLs por meio de colunas isotérmicas;
- Analisar a influência dos tipos e bentonitas dos GCLs no comportamento de hidratação quando em contato com solos lateríticos e consequência nas propriedades de desempenho dos GCLs;
- Analisar a influência do tipo de geotêxtil em contato com o subleito no comportamento de hidratação de três GCLs por solos lateríticos;
- Compreender os efeitos da imposição de ciclos de variação térmica (condições climáticas brasileiras) na dinâmica de hidratação/reidratação de GCLs e consequência nas propriedades de desempenho e de retração;

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Liners compostos com GCL

Os *liners* são camadas de impermeabilização cuja aplicação se entende por várias obras de engenharia. Aterros de resíduos sólidos, lagoas de disposição de rejeitos, canais entre outros. Existem diversos tipos e combinações de *liners*, tendo maior aplicação os *liners* compostos que podem apresentar configurações simples como uma camada de argila compactada sobre a qual se coloca uma camada de geomembrana ou combinações diversas de geossintéticos e camadas argilosas dupla, triplas, entre outras.

Desde a década de 90, os GCLs foram incluídos na construção dos *liners*. Este material tipicamente é composto por dois geotêxteis com uma fina camada de bentonita em seu núcleo. Quando aplicados em *liners* de aterros de resíduos sólidos, os GCLs podem compor diferentes combinações. A Figura 3.1 apresenta os tipos de barreiras hidráulicas usando GCLs com camadas simples ou duplas, e logo abaixo da geomembrana. Quando empregados como uma segunda camada de retenção de lixiviados, os GCLs têm a função de minimizar os efeitos da percolação em virtude de furos ou danos causados na geomembrana (Rowe, 2005, 2020). A aplicação do GCL aumenta a potencialidade de desempenho da barreira hidráulica, quando o GCL é instalado abaixo da camada de geomembrana, ele mitiga o risco de falhas e consequentes vazamentos (Kerry Rowe et al., 2011). Com os avanços nas pesquisas e consequentemente na produção de GCLs com melhores propriedades. Nas últimas duas décadas, a condutividade hidráulica dos GCLs melhorou de aproximadamente 1×10^{-7} m/s para 1×10^{-12} m/s (Weerasinghe et al., 2020).

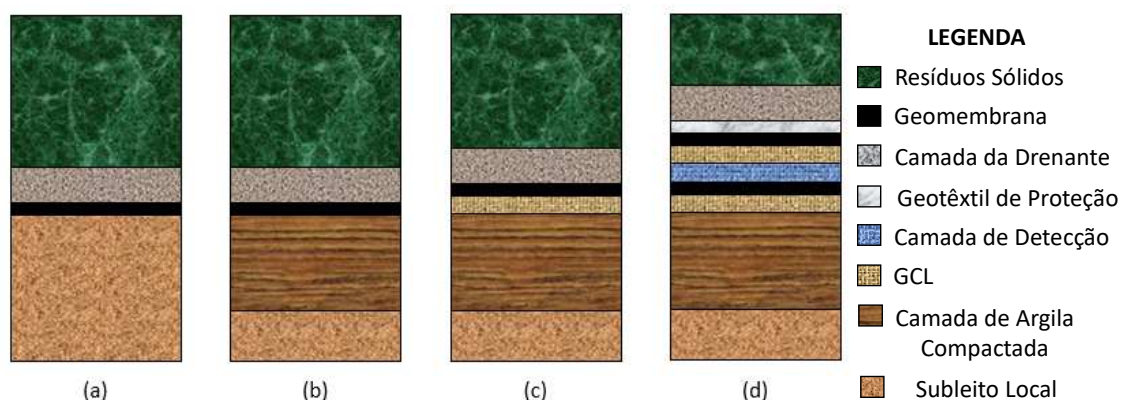


Figura 3.1 - Tipos de barreiras hidráulicas de aterros de resíduos sólidos: (a) simples; (b) composto com camada de argila (c) composto com GCL; (d) composto duplo.

A utilização dos *liners* compostos tem demonstrado eficácia e segurança nas obras geotécnicas. A combinação de um *liner* composto por geomembrana, GCL e uma camada de argila compactada mostra-se como a solução mais aplicada neste contexto. Touze e Bannour (2021) estudaram esta combinação demonstrando que, mesmo em situações onde a camada de impermeabilização primária (geomembrana) venha a sofrer danos graves como furos, o GCL tem significativa capacidade de atenuar esses danos.

Muito frequentemente, é implicitamente assumido que os GCLs irão se hidratar rapidamente pelo subleito atingindo um teor de umidade suficiente para sua saturação, expansão e estanqueidade. A consideração de que o GCL se encontrará hidratado garante o máximo desempenho deste material. No entanto diversos trabalhos da literatura sobre GCLs apontam que essa hidratação não é, na maioria das vezes, alcançada em condições reais (Daniel e Koener, 1993; Anderson et al., 2012; Sarabian e Rayhani, 2013; Rowe, 2020). Recentes evidências indicam que os GCLs podem estar submetidos a ciclos térmicos ou a propriedades de subleitos que causem insuficiente hidratação (Benson, 2013a; Bouazza et al., 2017a). Neste sentido, a dinâmica de hidratação/reidratação dos GCLs pelos solos de subleito, e consequente influência em parâmetros alterados por esta dinâmica são temas de interesse em estudos atuais.

3.2 Importância da hidratação dos GCLs

A correta hidratação do GCL a partir do solo do subleito é essencial para assegurar seu desempenho hidráulico. Diversos autores sugerem que o teor de umidade do GCL precisa estar entre 80 e 100%, dependendo das concentrações de solutos, para efetivamente funcionar com uma barreira de fluidos (Bostwick et al., 2007; Chevrier et al., 2012; Bouazza et al., 2013). Chevrier et al. (2012) aponta que segundo o comitê francês de geossintéticos a hidratação do GCL pelo do subleito a valores abaixo de 100% compromete o desempenho do GCL frente às demandas de desempenho que este geossintético é submetido, com destaque para a permeabilidade. Na década de 90, apareceram as primeiras constatações na literatura, tal como a pesquisa de Daniel e Koener (1993) que mostra que para um determinado solo arenoso compactado com uma umidade inicial de 3%, houve hidratação parcial do GCL, que atingiu umidade gravimétrica de 88%. Após o trabalho de Daniel e Koener (1993), outros estudos começaram a apresentar novas análises sobre insuficiente hidratação dos GCLs em condições operacionais.

Rayhani et al. (2011) analisaram três diferentes GCLs hidratados para dois solos, um areno siltoso (SM) com 35% de finos e uma areia mal graduada (SP) com 5% de finos. Essa análise foi por meio de colunas (células de PVC) com diâmetro de 150 mm com uma altura de solo 450 mm de hidratação em condições isotérmicas. Os três GCLs analisados apresentam bentonita sódica e granular (fina e grossa) com umidade de recebimento entre 7 e 8%. Os geotêxteis de suporte e a capacidade de troca catiônica (CTC) dos GCLs variaram entre as amostras analisadas. O trabalho analisou a hidratação destes GCLs por dois subleitos diferentes que foram compactados com um teor de umidade que variou entre 5 e 21%. Os resultados mostraram que o teor de umidade inicial do subleito exerce grande influência nos valores finais de umidade gravimétrica do GCL. A Tabela 3.1 apresenta os resultados deste estudo onde observa-se também o grau de saturação dessas amostras quando comparado com o teor de umidade de referência, valor de umidade no qual o GCL se encontra saturado. Verifica-se ainda que o desempenho das amostras de GCL foi semelhante, embora o GCL3 tenha apresentado o maior teor de umidade gravimétrica.

Tabela 3.1 - Influência do teor de umidade do subleito na hidratação do GCL. Adaptado de Rayhani et al. (2011).

| GCL | Teor de umidade do Subleito | Teor de umidade inicial do GCL (%) | Teor de umidade do GCL (%) | | | Grau de Saturação (%) | | |
|------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----|-----|-----------------------|-----|-----|
| | | | Tempo em semanas | | | Tempo em semanas | | |
| | | | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| | 5% | 7,5 | 35 | 34 | 34 | 25 | 24 | 24 |
| GCL1 | 10% | 7,5 | 80 | 86 | 86 | 57 | 62 | 62 |
| | 16% | 7 | 95 | 101 | 102 | 68 | 72 | 73 |
| | 21% | 6 | 141 | 141 | 141 | 100 | 100 | 100 |
| GCL2 | 5% | 5,8 | 38 | 39 | 40 | 33 | 34 | 34 |
| | 10% | 5,8 | 79 | 85 | 85 | 69 | 74 | 74 |
| | 16% | 8,8 | 81 | 86 | 88 | 70 | 75 | 77 |
| | 21% | 8,1 | 116 | 116 | 116 | 100 | 100 | 100 |
| GCL3 | 5% | 5 | 62 | 76 | 83 | 41 | 50 | 55 |
| | 10% | 8,3 | 91 | 99 | 102 | 61 | 66 | 68 |
| | 16% | 9 | 102 | 109 | 114 | 68 | 73 | 76 |
| | 21% | 8,3 | 141 | 149 | 149 | 94 | 99 | 99 |

Anderson et al. (2012) complementaram as análises de Rayhani et al. (2011) inserindo nas análises um solo areno-argiloso (SC) com 21% de finos, sendo 12% de argila. Foram utilizadas colunas com diâmetro de 150 mm e uma altura de solo de 250 mm, com processo de hidratação em condições simuladas de ciclos térmicos. Os resultados para as análises em condições isotérmicas confirmaram o que foi encontrado no trabalho de Rayhani et al. (2011). Já as análises com a exposição a ciclos de aquecimento e resfriamento, mostraram uma grande redução na capacidade do GCL se hidratar nestas condições, com as amostras atingido umidade

gravimétrica máxima de 30%, valor cinco vezes menor do que os encontrados para a condição isotérmica.

Sarabian e Rayhani (2013) inserem nesse contexto os solos argilosos e dois GCLs de qualidade inferior, uma vez que eles contêm menos de 30% de montmorilonita na composição da bentonita. Esta característica compromete a capacidade de hidratação e inchamento do GCL (Guyonnet et al., 2009). As duas amostras de GCL foram submetidas a hidratação em condições isotérmicas e ciclos térmicos, por meio de colunas de hidratação com quatro tipos de solos, sendo uma argila de baixa plasticidade (CL), um solo areno-siltoso (SM), um solo areno-argiloso (SC) e um solo arenoso mal graduado (SP). A metodologia de análise, colunas de hidratação com diâmetro de 150 mm e 250 mm de altura de solo, foi a mesma utilizada por Rayhani et al. (2011) e Anderson et al. (2012). Os resultados do trabalho de Sarabian e Rayhani (2013) mostraram uma maior dificuldade do GCL se hidratar quando em contato com um solo argiloso. As análises apontam que para que estes GCLs se hidratassem a valores semelhantes aos trabalhos anteriormente citados, o solo precisaria contar com um teor de umidade inicial de 65%, considerado impraticável na realidade de campo. A

Tabela 3.2 apresenta os resultados do trabalho de Sarabian e Rayhani (2013).

Tabela 3.2 - Hidratação de GCL por solos finos. Adaptado de Sarabian e Rayhani (2013).

| GCL | Teor de umidade do Subleito | Teor de umidade Inicial do GCL (%) | Teor de umidade do GCL (%) | | Teor de umidade inicial do GCL (%) | Saturação (%) | |
|------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------|------------------------------------|-------------------------------|------|
| | | | Tempo de hidratação (semanas) | | | Tempo de hidratação (semanas) | |
| | | | 1 | 6 | | 1 | 6 |
| | 10% | 5,6 | 7,5 | 8,9 | 4,7 | 6,3 | 7,5 |
| GCL1 | 30% | 5,6 | 10,9 | 14,2 | 4,7 | 9,2 | 12,0 |
| | 45% | 5,6 | 14 | 20,3 | 4,7 | 11,9 | 17,2 |
| | 65% | 5,6 | 15,6 | 21,5 | 4,7 | 13,2 | 18,2 |
| GCL2 | 10% | 5,2 | 7,0 | 7,8 | 2,7 | 3,7 | 4,1 |
| | 30% | 5,2 | 8,4 | 9,4 | 2,7 | 4,4 | 4,9 |
| | 45% | 5,2 | 9,3 | 13,5 | 2,7 | 4,9 | 7,1 |
| | 65% | 5,2 | 10,7 | 13 | 2,7 | 5,6 | 6,8 |

Estes estudos revelam que o nível de hidratação obtido inicialmente pelo GCL é altamente dependente não somente do teor de umidade gravimétrica do solo no momento de contato (Rayhani et al., 2011; Benson, 2013a), mas também da distribuição dos poros (Anderson et al., 2012; Sarabian e Rayhani, 2013). Estudos apontam que existe uma influência da mineralogia do GCL (Sarabian e Rayhani, 2013) e do subleito (Bouazza et al., 2017a) neste processo, bem como da condutividade hidráulica do solo do subleito (Chevrier et al., 2012). Neste sentido, estes estudos demonstram ao meio técnico que a hidratação do GCL pelo subleito

pode ser mais complexa do que considerada no passado, implicando na necessidade de conhecer esta interação e estabelecer novos parâmetros de projeto que garantam a hidratação e o desempenho adequado do GCL. A insuficiente hidratação do GCL impacta diretamente em suas características de inchamento, cicatrização e principalmente sua condutividade hidráulica.

Um dos trabalhos mais completos sobre o comportamento de hidratação de GCLs pelo subleito é o de Acikel et al. (2018a). Neste estudo, uma profunda compreensão da dinâmica de hidratação dos GCLs é estabelecida, bem como as causas de uma hidratação insuficiente. O primeiro aspecto discutido no estudo é a estrutura da bentonita, principal componente do GCL. As bentonitas tem um desempenho relativamente similar em razão da normatização dos parâmetros de desempenho (físicos e hidráulicos) para compor GCLs, a exemplo: índice de inchamento, perda de fluído, conteúdo de Montmorilonita (esmectita) entre outros. As bentonitas, no entanto, diferem significativamente no tamanho dos grãos e conseqüentemente dos poros, o que acarreta e uma estrutura bimodal de poros. Esta estrutura bimodal de poros, consistindo tanto de poros inter-agregados como intra-agregados, é amplamente aceita para bentonitas (Delage, 2007; Navarro et al., 2015; Sánchez et al., 2016; Cui, 2017). Acikel *et al.* (2018a) relataram que a estrutura bimodal da bentonita pode ser estendida para uma estrutura de poros tri-modal para GCLs com a adicional consideração de poros associados com componentes do geotêxtil. A Figura 3.2 apresenta a estrutura de poros tri-modal do GCL, proposta por Acikel et al. (2018a). A estrutura tri-modal tem os poros do geotêxtil como macro poros, os poros inter-agregados da bentonita como meso-poros e os poros intra-agregados e qualquer outro poro da bentonita menor do que intra-agregados como micro poros. Ainda de acordo com Acikel et al. (2018a), essa variação de diferentes tamanhos de poros, que vem da própria bentonita (estrutura bi-modal) e do geotêxtil (macro poros), e que dá ao GCL a estrutura tri-modal, pode dar origem a comportamentos de hidratação substancialmente diferentes.

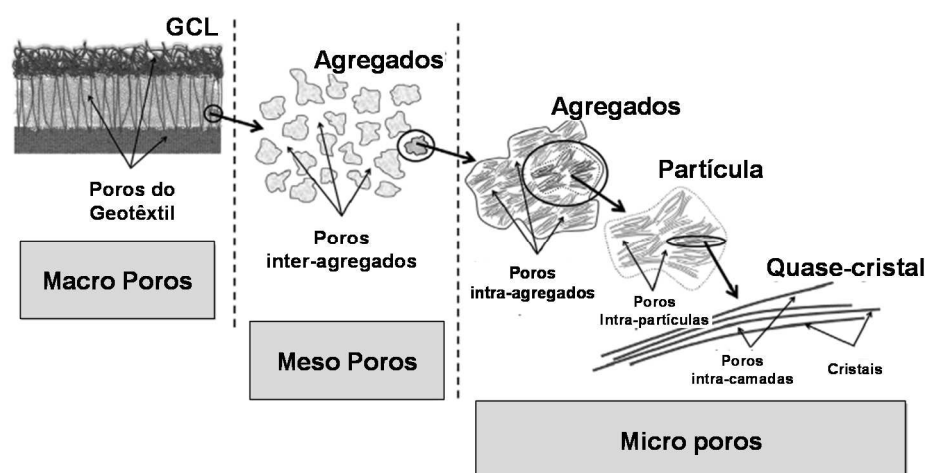


Figura 3.2 - Estrutura tri-modal do GCL. Fonte: Adaptado de Acikel et al. (2020).

Adicionalmente a esta complexa estrutura, a bentonita e o os geotêxteis utilizados na fabricação do GCL tem comportamentos de umedecimento opostos, uma vez que a bentonita tem comportamento altamente hidrofílico e a superfície do geotêxtil tem, pelo menos inicialmente (baixos valores de umidade), comportamento hidrofóbico (Bouazza et al., 2006, 2014; Zornberg et al., 2010). Os macroporos e o comportamento hidrofóbico do geotêxtil podem resultar em barreiras capilares entre GCL e o solo de subleito durante a hidratação, se o geotêxtil tiver insuficiente bentonita hidrofílica em sua estrutura no contato GCL-subleito. (Acikel et al., 2018a). Ainda, os geotêxteis dos GCLs usualmente têm bentonitas em seus poros, e assim, também tem poros tri-modais associados com o geotêxtil e filamentos agulhados perfurados e a variação de poros (meso e micro) associados com a bentonita dentro do GCL. Assim, é possível estabelecer que, como os tamanhos dos poros diferem em várias ordens de magnitude, o potencial de hidratação do GCL será variável e corresponderá a entrada de água nesses poros.

O GCL, no campo, em razão de ser sobreposto por uma geomembrana, normalmente se hidrata unicamente por meio do teor de umidade do solo de subleito. Esse processo de hidratação é então governado pela compatibilidade entre as curvas de retenção de água do GCL e do solo do subleito. A Figura 3.3 apresenta um modelo hipotético proposto por Acikel et al. (2018a) do comportamento de hidratação explicado pelas curvas de retenção de água. Este modelo é baseado na análise da curva de retenção de água do GCL e o do solo. Quando o GCL seco é colocado em contato com o subleito, este se hidrata ao longo da curva de umedecimento, aumentando o teor de umidade enquanto diminui a sucção. Já o solo do subleito, como fonte de

umidade, responde com sua curva de secagem, diminuindo o teor de umidade enquanto aumenta a sucção.

A Figura 3.3 apresenta três zonas de sucção. A Zona 1 é delimitada pelo valor de entrada de água do GCL (VEA) e os valores de saturação do subleito e GCL. Nesta zona, tanto o GCL quanto o solo têm capilaridade (água capilar). A Zona 2 é delimitada entre o valor de entrada de água do GCL e a umidade residual do solo. Essa zona apresenta um comportamento onde existe água capilar no solo; no entanto, o GCL não consegue se hidratar. As linhas tracejadas na Figura 3.3 representam este momento, onde ocorre o fenômeno da barreira capilar. A Zona 3 é a zona residual do subleito e do GCL. Para estes valores de umidade, não existem ligações capilares no solo ou GCL, assim, a água só pode ser transferida do subleito através de vapor de água.

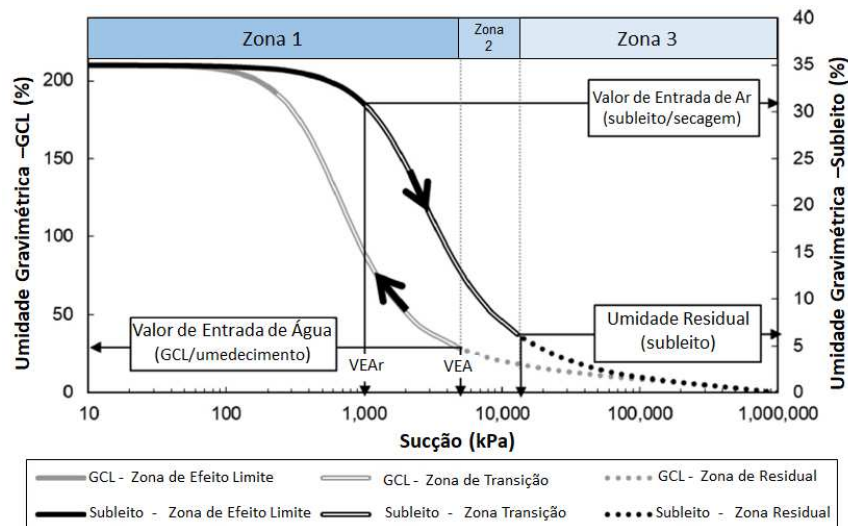


Figura 3.3 - Representação hipotética do umedecimento do GCL: valor de entrada de água (VEA); Características secagem do subleito: valor de entrada de ar (VEAr); Zona residual. Fonte: Adaptado de Acikel et al. (2018).

Todas essas observações expostas por Acikel et al. (2018a) revelam um complexo processo de hidratação, muito além da consideração prática de que o GCL se hidrataria suficientemente pelo simples contato com o subleito. Neste sentido, são colocados como também essenciais ao entendimento deste processo parâmetros como: zonas limites e residuais da curva de retenção, formação de barreira capilar e valor de entrada de água. Estes parâmetros estão diretamente ligados ao tipo de solo do subleito, a bentonita e ao geotêxtil do GCL, como apontado por Rouf et al. (2016), Gates et al. (2017) e Carnero-Guzman et al. (2019). Esta gama de variáveis, necessita de estudos individuais mais detalhados e que apontem as melhores

condições e combinações desta dinâmica, de forma a equilibrar todo este processo, facilitando e acelerando a hidratação do GCL pelo solo de subleito.

3.3 Propriedades da bentonita e geotêxteis na hidratação de GCLs

Não há um consenso na literatura sobre os reais impactos de algumas características das bentonitas no processo de hidratação dos GCLs. Duas características são levantadas como as de maior impacto: a granulometria e a taxa de bentonita por área (kg/m^2). Esses são fatores diretamente ligados à estrutura dos poros da bentonita. A alteração no tamanho dos grãos e na proporção de bentonita (massa/m^2) altera o índice de vazios, mudando o comportamento hidráulico do GCL e, conseqüentemente, o processo de hidratação (Petrov et al., 1997; Beddoe et al., 2011; Liu et al., 2015; Yesiller et al., 2019; Rowe et al., 2019). A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos estudos acerca da influência das características das bentonitas no processo de hidratação dos GCLs.

Na Tabela 3.3 observam-se os estudos acerca da hidratação de GCLs em condições diversas. Rayhani et al. (2011) analisou esse comportamento por meio de colunas de hidratação em condições isotérmicas, técnica também utilizada por Anderson et al. (2012), Bouazza et al. (2017a) e Acikel et al. (2018b). Yu et al. (2018) também utilizaram colunas no estudo da hidratação dos GCLs com o adicional da influência da temperatura e de altas tensões de confinamento. Análises de campo também foram realizadas por meio de exumação de *liners* nos trabalhos de Rowe e Hosney (2015) e Azad et al. (2011). Todos esses estudos contribuem com a ideia de que a análise de todos estes parâmetros envolvendo os GCLs deve ser levada em consideração, bem como a interdependência das características da bentonita com outros aspectos do GCL, tal como geotêxteis e as características do solo de subleito. Essa interdependência é observada quando observamos que GCLs que apresentam as mesmas características de bentonita, tal como granulometria e gramatura, atingem valores de hidratação diferentes.

Um terceiro aspecto ainda pouco relatado na literatura é a mineralogia da bentonita e suas implicações. Os GCLs geralmente empregam em sua composição as bentonitas do tipo sódica. Esta bentonita pode ser naturalmente sódica ou resultante de um processo químico que adicionam carbonato de sódio ou polímeros à bentonita do tipo cálcica para melhorar as propriedades de inchamento principalmente (Wireko e Abichou, 2021). Esse aspecto é considerado fundamental na avaliação do desempenho de um GCL, uma vez que o tipo de

mineral dominante indica qual íon fará a troca com os fluídos que percolam pela bentonita. A influência dos mecanismos de troca catiônica foi estudada nos trabalhos de Rowe (2007) com base nas concentrações de eletrólitos em soluções de NaCl na condutividade hidráulica. Petrov e Rowe (1997), Rowe et al. (2004) observam que a pré-hidratação da GCL com um fluido quimicamente não agressivo, antes do contato com fluidos ricos em cátions divalentes, ajuda a manter baixos valores de condutividade hidráulica. Guyonnet et al. (2005) investigaram a correlação entre a química da superfície, microestrutura e permeabilidade, em um GCL natural de bentonita sódica e um GCL de bentonita cálcica ativada por sódio. Os resultados mostraram que o GCL natural de bentonita sódica apresentou desempenho hidráulico superior em comparação com o GCL de bentonita cálcica ativada. Os mesmos autores também observaram que a bentonita ativada tinha um conteúdo de carbonato de cálcio de 10,3% em peso, em comparação com apenas 3,4% em peso na bentonita de sódio natural.

Tabela 3.3 - Características das bentonitas e hidratação do GCL.

| Autor | GCL | Geotêxtil (Suporte) | Subleito/ Umidade | Bentonita (granulometria) | Taxa de Bentonita (g/m ²) | Tensão Confinamento | Umidade GCL | Umidade de Referência | Grau de Saturação |
|------------------------|-------|---------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------|-----------------------|-------------------|
| Rayhani et al. (2011) | GCL2 | GNTR* | SM/16% | Fina | 3486-5068 | 2 kPa | 99% | 120% | 83% |
| | GCL3 | GNT | SM/16% | Grossa | 4307-5145 | 2 kPa | 114% | 195% | 58% |
| | GCL1 | GT* | SM/16% | Fina | 4628-5650 | 2 kPa | 102% | 150% | 68% |
| | GCL3 | GNT | SM/5% | Grossa | 4307-5145 | 2 kPa | 83% | 195% | 42% |
| | GCL3 | GNT | SM/10% | Grossa | 4307-5145 | 2 kPa | 102% | 195% | 53% |
| | GCL3 | GNT | SM/16% | Grossa | 4307-5145 | 2 kPa | 114% | 195% | 58% |
| | GCL3 | GNTR* | SM/21% | Grossa | 4307-5145 | 2 kPa | 149% | 195% | 76% |
| | GCL1 | GT* | SM/10% | Fina | 4628-5650 | 2 kPa | 86% | 150% | 57% |
| | GCL2 | GNTR* | SM/10% | Fina | 3486-5068 | 2 kPa | 86% | 120% | 71% |
| Anderson et al. (2011) | GCL3 | GNT | SM/10% | Grossa | 4307-5145 | 2 kPa | 102% | 195% | 53% |
| | GCL1 | GT* | SC/20% | Fina | 4506 | 1 kPa | 130% | 145±8% | 90% |
| | GCL2 | GNTR* | SC/20% | Fina | 3788 | 1 kPa | 106% | 118±5% | 90,1% |
| Azad et al. (2011) | GCL3 | GT | SC/20% | Grossa | 5384 | 1 kPa | 174% | 190±10% | 91,5% |
| | GCL | GNTR* | SM/11% | Pó | 4155 | 1,7 kPa | 138% | 202% | 69% |
| Hosney et al. (2016) | GCL6 | GT* | SM/16% | Pó | - | 2 kPa | 125% | 225% | 55% |
| | GCL6 | GT* | SM/10% | Pó | - | 2 kPa | 92% | 225% | 41% |
| Bouazza et al. (2017) | GCL9 | GTR* | SM/17% | Pó | 4500-5900 | 2,5 kPa | 122% | 225% | 55% |
| | GCL2 | GT* | SP/10% | Pó | 4745 | 1 kPa | 67% | 202% | 33% |
| Acikel et al. (2018b) | GCL3 | GT | SP/10% | Grossa | 4273 | 1 kPa | 63% | 206% | 30% |
| | GCL1 | GT* | KC/30,5% | Pó | 4159 | 1 kPa | 40,9% | 205% | 20% |
| | GCL2 | GT* | KC/30,5% | Pó | 4745 | 1 kPa | 43,9% | 202% | 22% |
| | GCL3 | GT | KC/30,5% | Grossa | 4273 | 1 kPa | 58,2% | 206% | 28% |
| Yu et al. (2018) | GCL_B | GNTR* | SW/11% | Pó | 4700 | 20 kPa | 115% | 175% | 63% |
| | GCL_A | GTR* | SW/11% | Pó | 4250 | 20 kPa | 131% | 183% | 75% |

GNTR=Geotêxtil Não Tecido Reforçado; *Tratamento Térmico; Umidade de referência= Teor de umidade de saturação.

A influência negativa de uma baixa capacidade de troca catiônica no desempenho hidráulico também foi documentada por investigações de campo que, por razões de facilidade de acesso, se referem quase que exclusivamente a GCLs em coberturas de aterros sanitários em relação aos *liners* (Melchior et al., 2002; Meer e Benson, 2007) ou para GCLs em lagoas de tratamento (Kolstad et al., 2004). De acordo com Meer e Benson (2007), que também investigou uma cobertura final do aterro, é improvável que uma camada superficial de 0,75 m proteja as GCLs convencionais dos danos causados pela troca de cátions e desidratação. Esses autores recomendam o uso de geomembranas ou geofilmes para proteger os GCLs da água da chuva infiltrada rica em cátions. Neste contexto, Guyonnet et al. (2009) realizou um amplo estudo com oito GCLs amplamente utilizados em aterros de resíduos sólidos, por meio de ensaios de permeâmetros edométricos, estabelecendo correlações práticas para a avaliação da qualidade dos GCLs. Esses parâmetros são expostos na Tabela 3.4, que apresenta os indicadores de desempenho propostos por Guyonnet et al. (2009).

Tabela 3.4 - Indicadores de desempenho para os GCLs propostos por Guyonnet *et al.*, (2009). Fonte: Adaptado de Guyonnet *et al.*, (2009).

| Indicador | Valor | Observações |
|---|---------------------|--|
| Índice de Inchamento (livre) | ≥ 24 cm/2g | Valor típico de catálogo |
| Capacidade de Troca Catiônica (CTC) | ≥ 70 meq/100 g | Relacionado com o teor de esmectita |
| Teor de CaCO ₃ | $\leq 5\%$ peso | Esse teor de CaCO ₃ tem o potencial para a dissolução suficientes e para saturar um CTC de 75 meq/100 g com íons Ca ²⁺ |
| Análise de Isótopos de Oxigênio e Carbono | - | Necessário para a determinação da origem da bentonita (aditivada ou natural) |

Dentro deste contexto, alguns estudos já demonstram que parâmetros como a CTC, índice de inchamento ou *swell index* (SI) e condutividade hidráulica são afetados por uma hidratação insuficiente dos GCLs e pelos líquidos percolantes. Jo et al. (2001), em um estudo sobre o inchamento de GCLs quando percolado por agentes agressivos, estabeleceram uma relação direta entre os valores de inchamento das amostras e a condutividade hidráulica. Os resultados desta pesquisa mostraram que valores de inchamento menores que 20 ml/g afetam a condutividade hidráulica. Scalia e Benson (2019) confirmaram estes resultados em um amplo estudo sobre métodos alternativos para determinação dos valores do índice de inchamento, apontando que valores de SI ≥ 14 mL/2 g acarretam em valores de condutividade hidráulica menores que 3×10^{-10} m/s, enquanto que valores de SI menores que 14 ml/2g correspondem a altos valores de condutividade hidráulica (10^{-5} a 10^{-10} m/s). Suits et al. (2010), ao estudarem a

condutividade hidráulica de amostras exumadas de camadas de coberturas de aterros encontraram uma relação direta dos valores de condutividade hidráulica e o grau de saturação das amostras, tal como em Meer e Benson (2007). Estes trabalhos mostram que um controle prévio da qualidade da bentonita, baseado na proposta de Guyonnet et al. (2009), é essencial para minimizar os efeitos de uma hidratação pouco efetiva dos GCLs. Rowe (2019), em um estudo sobre a performance de GCLs quando percolado por diferentes lixiviados sintéticos e naturais mostrou relação direta do grau de hidratação dos GCLs com a obtenção de baixos valores de condutividade hidráulica, demonstrando que a mera consideração dos valores de condutividade e índice de inchamento fornecidos pelo fabricante não são suficientes para o projeto de *liners*, principalmente em grandes projetos onde os danos de um eventual vazamento podem ser significativos.

Os diferentes tipos de geotêxteis que envelopam a bentonita como suporte e cobertura também influenciam no processo de hidratação do GCL. A influência destes geossintéticos se dá em razão do mecanismo de ligação entre estas duas camadas de geotêxteis e a resistência ao descolamento dos geotêxteis durante o processo de hidratação. Um dos estudos mais completos nesta análise é o de Beddoe et al. (2011), que analisou a histerese nas curvas de retenção de quatro GCLs fabricados com diferentes mecanismos de ligação entre os geotêxteis. Os resultados mostraram que a forma da curva de retenção é dependente da força de ancoragem dos GCLs, consequência do tipo de ligação dos geotêxteis empregados na fase de fabricação. Este aspecto influencia diretamente no índice de vazios do GCL durante o processo de hidratação e secagem. Essa variação no índice de vazios é diretamente relacionada ao inchamento do GCL, alterando as forças de sucção e capacidade de hidratação. No estudo de Beddoe et al. (2011), a quantidade de histerese foi mínima no GCL com a melhor ancoragem, e foi significativa nos GCLs que sofreram arrancamento das fibras durante o inchamento. Essa diminuição da histerese implica que a variação do índice de vazios é mais controlada e constante quando os geotêxteis se encontram bem ligados. As amostras que sofreram arrancamento de fibras sofrem um processo inverso e uma consequente diminuição nas forças de sucção durante o processo de hidratação. Esse comportamento foi confirmado de uma forma mais direta no trabalho de Anderson et al. (2012), que analisou por meio de colunas de hidratação três GCL de um mesmo fabricante com mecanismos de ligação diferentes (agulhamento e agulhamento com tratamento térmico). Os resultados mostraram que o GCL com menor taxa de bentonita (g/m^2), e conseqüentemente maior índice de vazios alinhado a uma ancoragem (resistência ao rasgo) muito excessiva, leva a um déficit na condutividade hidráulica e *menor* hidratação do

GCL (Petrov et al., 1997; Beddoe et al., 2011). De acordo com Beddoe et al. (2011), o GCL com uma maior taxa de bentonita e uma resistência à tração não tão elevada equilibrou a relação entre o índice de vazios e o inchamento, o que proporcionou uma melhor hidratação entre as amostras analisadas. Estes resultados são também observados nas análises de Rayhani et al. (2011) e Sarabian e Rayhani (2013).

Outro aspecto da influência das características dos geotêxteis utilizados na fabricação do GCL no processo de hidratação foi apontado no trabalho de Acikel et al. (2018a). Neste estudo, foi analisado o comportamento de hidratação de três GCLs diferentes hidratados por três solos também diferentes (argilosos e arenosos). As configurações dos ensaios e os resultados encontrados por Acikel et al. (2018a) são apresentados na Tabela 3.5. Os resultados mostraram que o GCL1 apresentou desempenho inferior em termos de hidratação entre as três amostras de GCL analisadas para todas as configurações de ensaio. Acikel et al. (2018a) identificaram que este resultado seria consequência do tipo de geotêxtil utilizado como suporte no GCL 1, este geotêxtil de suporte é do tipo tecido reforçado. Essa configuração dos geotêxteis de suporte pode ter causado dificuldade na absorção de água do subleito e resultado na formação de barreira capilar. Essa afirmação dos autores se baseia no baixo teor de umidade encontrado para o GCL 1 (34,7%) quando colocado em contato com um solo arenoso com teor de umidade inicial do subleito de 10%. Nessa mesma combinação, o GCL2, que contém o mesmo tipo de bentonita do GCL1 com um geotêxtil de suporte não tecido sem reforço, atingiu um teor de umidade de 67,3%.

3.4 Propriedades do subleito na hidratação de GCLs

Estudos recentes mostram que a granulometria do solo de subleito interfere diretamente no processo de hidratação dos GCLs, revelando que solos de granulometria mais grossa hidratam mais facilmente os GCLs (Rayhani et al., 2011; Chevrier et al., 2012; Anderson et al., 2012; Sarabian e Rayhani, 2013; Bouazza et al., 2017b). Com exceção do trabalho de Sarabian e Rayhani (2013) que avaliou com um solo argiloso de baixa plasticidade, os demais trabalharam com solos com baixos teores de argilas. Solos arenosos, em razão do tamanho dos poros da estrutura, apresentam forças de sucção menores do que a do GCL (Santos e Martínez, 2003), o que facilita a transferência de água do subleito para o GCL.

Estudos com solos argilosos foram recentemente apresentados nos trabalhos de Bouazza et al. (2017a) e Acikel et al. (2018a), onde as pesquisas evidenciam o impacto da mineralogia

do solo no processo de hidratação de um GCL. Bouazza et al. (2017b) analisaram a hidratação de um GCL comercial com bentonita sódica em pó. O estudo foi realizado por meio de colunas de hidratação com quatro tipos de solos, sendo um areno-siltoso sem nenhuma parcela de esmectita (S1), um areno-argiloso com 3% de esmectita (S2), um argiloso de baixa plasticidade com 10% de esmectita (S3) e um argiloso de alta plasticidade com 29% de esmectita (S4). A Figura 3.4 apresenta os principais resultados em termos de influência no teor de umidade gravimétrica dos GCLs.

Verifica-se na Figura 3.4a que, quando em contato com o solo areno-siltoso (S1), o GCL atingiu um teor de umidade gravimétrica de 122% após 150 dias de hidratação, enquanto o GCL em contato com o solo de alta plasticidade (S4) apresentou um teor de umidade gravimétrica de 28%. Os resultados evidenciaram que a hidratação do GCL foi inversamente dependente da porcentagem de argila esmectita presente no subleito. No entanto, de acordo com Bouazza et al. (2017b), mesmo solos arenosos ou argilas de baixa plasticidade podem sofrer uma redução na capacidade de hidratação do GCL em função de uma pequena parcela de esmectita em sua composição, como é o caso do solo areno-argiloso (S2) com apenas 3% de esmectita. O GCL em contato com o solo (S2) atingiu um teor de umidade gravimétrica de 87% após 100 dias de hidratação, ou seja, uma queda de aproximadamente 35% quando comparada ao mesmo GCL em contato com o solo areno-siltoso sem nenhuma parcela de esmectita.

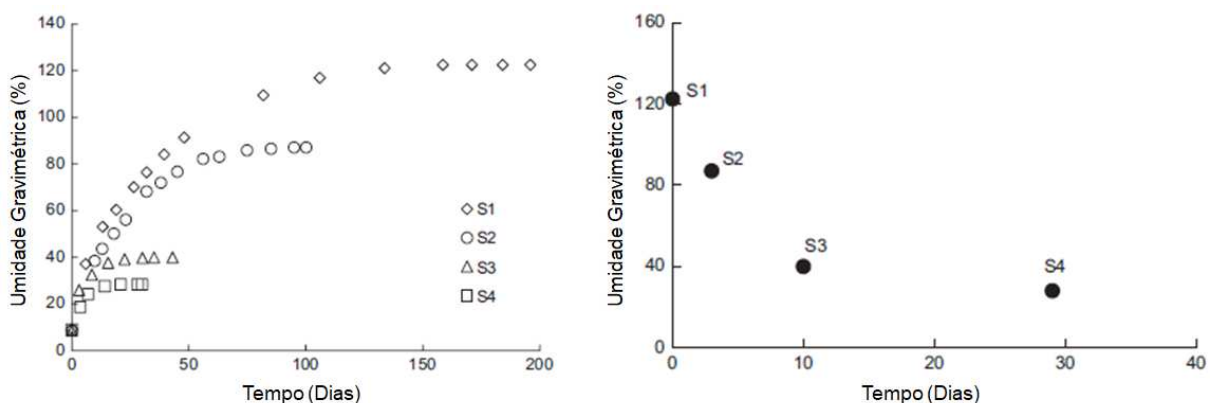


Figura 3.4 - Influência da mineralogia do subleito na hidratação dos GCLs: (a) Umidade gravimétrica do GCL; (b) Valores máximos de umidade. Adaptado de Bouazza et al. (2017b).

Acikel et al. (2018a) também estudaram o comportamento de hidratação de diferentes GCLs e subleitos com diferentes características e teores de umidade de compactação. O estudo, realizado com três tipos de GCLs com bentonita sódica, sendo GCL1 e GCL2 com bentonita

em pó e GCL3 com bentonita granular, foi conduzido por meio de duas análises. Na primeira, buscou-se encontrar os teores de umidade de saturação de cada um dos GCLs por meio da hidratação livre (contato direto com a água), de forma a estabelecer um teor de umidade de referência. Na segunda análise, mais representativa das condições reais de campo, utilizou-se de colunas de hidratação com diâmetro de 53 mm e altura de solo de 150 mm. O estudo da hidratação com colunas foi realizado com três tipos de solos: uma areia fina (FS) e dois solos argilosos, um com 34% de esmectita (QC) e o outro caolinítico (KC) sem presença de esmectita.

A Figura 3.5 e a Figura 3.6 apresentam os principais resultados da pesquisa de Acikel et al. (2018a) para os dois solos argilosos estudados. O maior valor de hidratação encontrado para os GCLs no solo QC foi de 27,4%, enquanto para o solo KC foi de 58,2%. Deste modo, a presença de esmectita no solo novamente mostrou menor capacidade de hidratação dos GCLs. Observa-se ainda que a presença do subleito QC com maior teor de umidade não aumentou a capacidade de hidratação dos GCLs, enquanto que para o subleito KC foi mais significativa apenas para a hidratação do GCL1 (bentonita em pó).

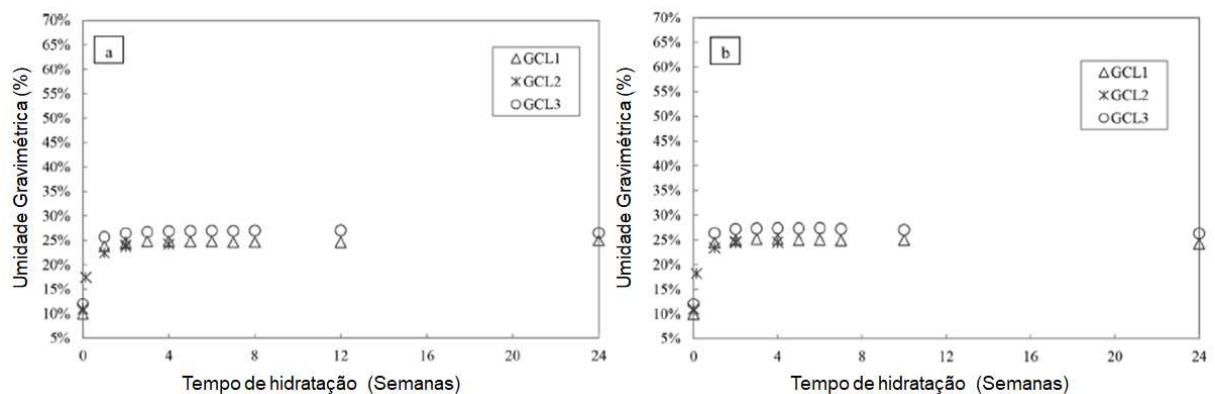


Figura 3.5 - Hidratação do GCL por um subleito argiloso: (a) solo QC ($w_{ót}=22\%$); (b) solo QC ($w_{ót}+2\% =24\%$). Adaptado de Acikel et al. (2018b).

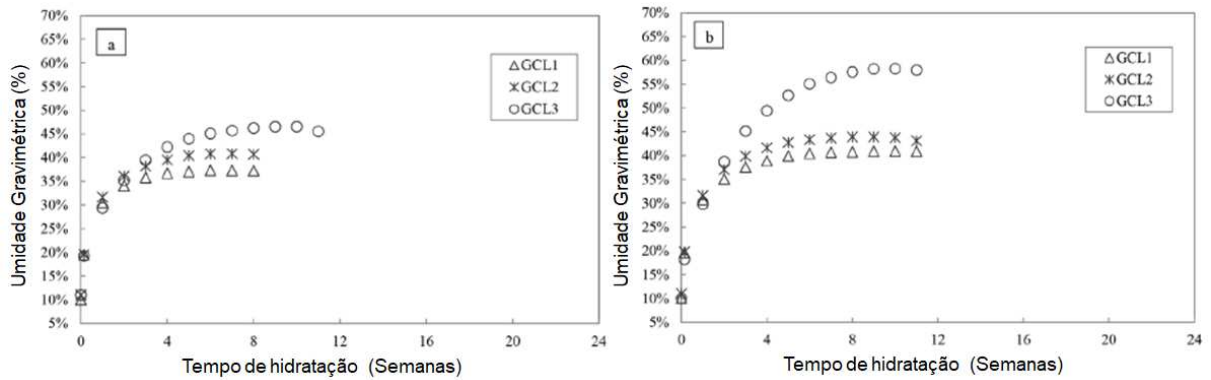


Figura 3.6 - Hidratação do GCL por um subleito argiloso: (a) solo KC (wót =28,5%); (b) solo KC (wót+2% =30,5%). Adaptado de Acikel et al. (2018b).

Os resultados com o solo arenoso de Acikel et al. (2018a) são apresentados na Figura 3.7. Verifica-se que o GCL 2 em contato com o solo FS apresentou teor de umidade de 67,3%. No caso do solo arenoso (FS), não houve características que diminuíssem a capacidade de hidratação dos GCLs, mostrando uma possível facilidade dos solos arenosos “puros” na hidratação de GCLs. Os resultados mostram também que a granulometria da bentonita (pó ou granular), isoladamente não é um fator que influencia na capacidade de hidratação.

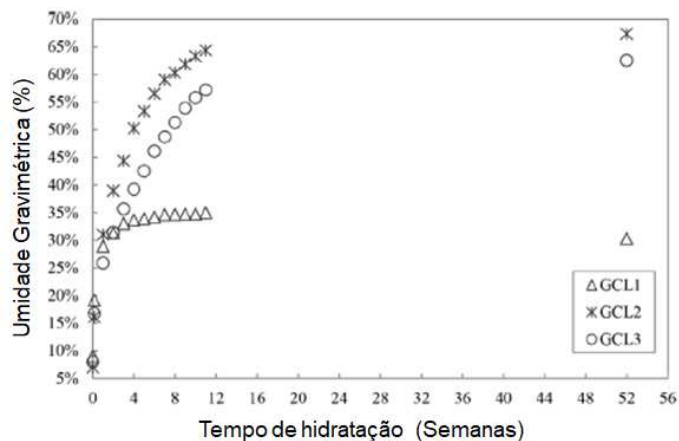


Figura 3.7 - Hidratação do GCL por um subleito arenoso (FS). Fonte: Adaptado de Acikel et al. (2018a).

Ao analisarmos os resultados para os solos argilosos estudados por Acikel et al. (2018), algumas considerações do trabalho merecem destaque. No caso do solo QC, que apresenta uma parcela significativa de esmectita (34%), os autores apontam que a hidratação dos GCLs por esse solo aconteceu pela transferência de vapor, e que a água disponível não se redistribuiu de forma a criar ligação capilar entre o subleito e o GCL, enquanto para o solo também argiloso, mais sem esmectita, os valores de hidratação se encontram próximos aos do solo arenoso. Desta

forma, os resultados de Acikel et al. (2018a) confirmam os apontamentos de Bouazza et al. (2017a) quanto à influência do teor de esmectita na hidratação de GCLs. Para Acikel et al. (2018a), a presença da esmectita no subleito provavelmente contribuiu para a formação de barreira capilar ou uma difícil hidratação na interface entre o GCL e o solo QC.

A Tabela 3.5 a seguir, apresenta um resumo dos resultados obtidos nas pesquisas de Bouazza et al. (2017a) e Acikel et al. (2018a), e confirmam um outro fator importante abordado anteriormente, que é a influência do teor de umidade inicial do subleito na hidratação dos GCLs. Na Tabela 3.5, é possível observar que um acréscimo de 2% no teor de umidade do subleito representou, de modo geral, incrementos significativos nos valores de hidratação do GCL. No entanto, esta influência foi menor no caso do solo argiloso QC (34% de esmectita), confirmando a possível influência da formação de uma barreira capilar como sugerido por Acikel et al. (2018a). Para o solo KC, observa-se que a influência do teor de umidade foi significativa no aumento da capacidade de hidratação do GCL pelo subleito, resultando em uma diferença de 18,2% entre as duas configurações de teor de umidade do solo de subleito. Este comportamento foi visto também em outros estudos com os solos arenosos (Rayhani et al., 2011; Chevrier et al., 2012; Anderson et al., 2012; Sarabian e Rayhani, 2013).

Tabela 3.5 – Resultados de hidratação de GCLs por diferentes subleitos estudados por Bouazza et al. (2017) e Acikel *et al.* (2018).

| Autor | Subleito | Parcela de Esmectita | Umidade Inicial do Subleito | GCL | Umidade Inicial do GCL | Umidade máxima do GCL |
|------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|------|------------------------|-----------------------|
| Bouazza et al. (2017b) | S1 | 0% | 17% | GCL1 | 9,2% | 122,4% |
| | S2 | 3% | 20% | GCL1 | 8,6% | 87% |
| | S3 | 10% | 20% | GCL1 | 8,6% | 39,9% |
| | S4 | 29% | 22% | GCL1 | 9% | 28% |
| Acikel et al. (2018) | QC Argila muito plástica | 34% | 22% | GCL1 | 10% | 24,8 |
| | | | 22% | GCL2 | 11% | 25,2 |
| | | | 22% | GCL3 | 12% | 27,1 |
| | | | 24% | GCL1 | 10% | 25,1 |
| | | | 24% | GCL2 | 11% | 24,6 |
| | | | 24% | GCL3 | 12% | 27,4 |
| | KC Argila muito plástica | 0% | 28,5% | GCL1 | 10% | 37,3 |
| | | | 28,5% | GCL2 | 11% | 40,8 |
| | | | 28,5% | GCL3 | 12% | 45,7 |
| | | | 30,5% | GCL1 | 10% | 40,9 |
| 30,5% | | | GCL2 | 11% | 43,9 | |
| FS Areia fina | 0% | 10% | GCL1 | 10% | 34,7 | |
| | | 10% | GCL2 | 11% | 67,3 | |
| | | 10% | GCL3 | 12% | 62,5 | |

Todas as constatações mencionadas acerca da influência do tipo de subleito (mineralogia e teor de umidade de compactação) na hidratação de GCLs foram realizadas com solos formados em regiões temperadas, com exceção do trabalho de Bouazza et al. (2017a) que analisou solos formados em regiões de clima subtropical e mediterrânico temperado. Deste modo, o comportamento de hidratação de GCLs que são instalados em solos de países tropicais não tem sido objeto de estudo na literatura. Em países tropicais, em razão das altas temperaturas e do clima úmido, predominam os solos também ditos tropicais (Nogami e Villibor, 1995), os quais se dividem em lateríticos e saprolíticos. Os solos lateríticos, em razão da sua formação, sofrem um processo de lixiviação e uma consequente concentração residual de óxidos de ferro e de alumínio. Também, em razão desse processo, a fração argila do solo é constituída essencialmente de argilo-minerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e ou alumínio (Santos e Martínez, 2003). Estes hidróxidos favorecem a formação de agregados de partículas mais finas do solo, característica que explica a heterogeneidade de poros e o comportamento bimodal nas curvas de retenção de água dos solos lateríticos. No caso do Brasil, os solos lateríticos são encontrados na maioria dos estados e na superfície, sendo em sua maioria finos, com diâmetro das partículas menores que 2 mm (Nogami e Villibor, 1995). Assim, o fato dos solos tropicais possuírem finos e serem amplamente encontrados em território nacional, além de sua fácil obtenção, ampliam sua aplicação em *liners* de aterro sanitários.

As características dos solos tropicais, em uma primeira análise, apontam para um grande potencial de hidratação de GCLs, uma vez que apresentam mineralogia favorável (caulinita) e uma distribuição granulométrica bem distribuída. Os solos lateríticos apresentam, em sua estrutura, uma parcela de finos suficiente para retenção de água, ao mesmo tempo que conta também com uma parcela de grãos maiores que atenuam as forças de sucção, resultado do comportamento bimodal dos solos lateríticos como apontado por Miguel et al. (2014). No Brasil a aplicação destes solos nos *liners* de aterros sanitário é amplamente realizada e, portanto, estudos acerca do comportamento dos GCLs nestes subleitos necessitam análises mais aprofundadas.

3.5 Ciclos térmicos e a hidratação dos GCLs

A variação da amplitude térmica diária em aterros sanitários pode influenciar significativamente no desempenho de *liners* compostos por geomembranas e GCLs (Rowe et al., 2013; Bouazza et al., 2014; Ali et al., 2016; Gates et al., 2018; AbdelRazek e Rowe, 2019).

A exposição diária desta barreira hidráulica a ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento apresenta consequências significativas para o processo de hidratação dos GCLs. A Figura 3.8 apresenta um modelo dos efeitos da exposição de um *liner* composto e os efeitos desta exposição às condições climáticas nos componentes deste sistema. A exposição do *liner* ao calor durante a fase de instalação causa dobras nas geomembranas, como mostrado na Figura 3.8a (Rowe et al., 2004; Giroud, 2005; Take et al., 2012). Usualmente, os fabricantes de GCL colocam como especificação de instalação a necessidade de uma camada de solo de proteção (Figura 3.8b) de forma a minimizar esses efeitos de dobra e exposição térmica. Mesmo com a aplicação desta camada, as dobras nas geomembranas não desaparecem totalmente da estrutura (Giroud et al., 1997; Take et al., 2012).

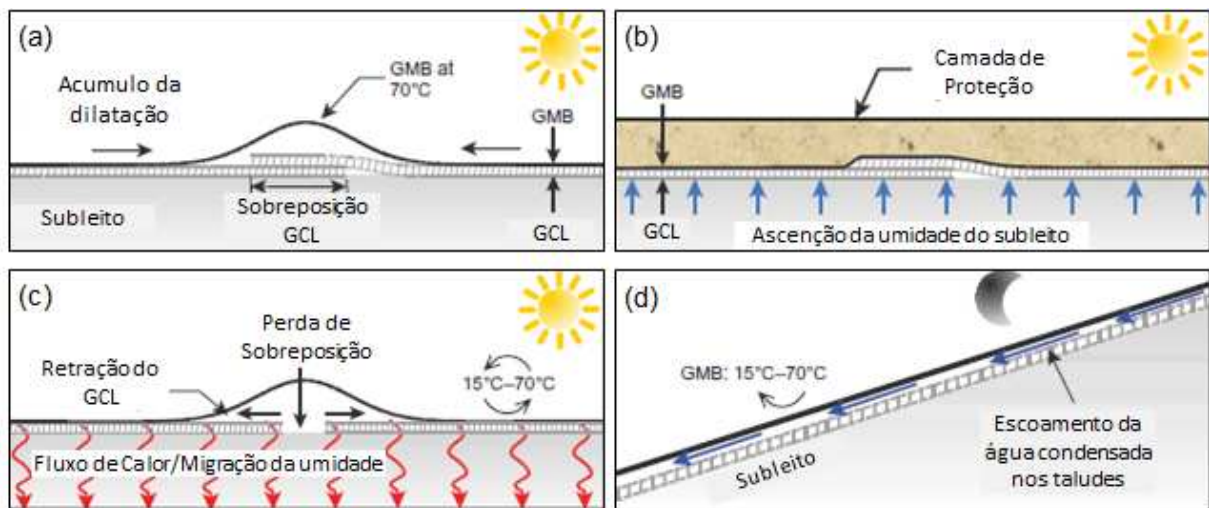


Figura 3.8 - Efeito dos ciclos térmicos no liner: (a) exposição durante a instalação; (b) liner com camada de proteção (diminuição das dobras na geomembrana); (c) exposição prolongada sem camada de proteção; (d) escoamento da condensação de água. Fonte: Adaptado de Take et al. (2012).

A Figura 3.8c evidencia o efeito da exposição térmica no processo de umedecimento do GCL e a perda de sobreposição na emenda dos painéis (Rayhani et al., 2011; Anderson et al., 2012; Sarabian e Rayhani, 2013; Rowe et al., 2013). Essa perda de sobreposição, como mostrado por Weerasingle et al. (2020), é principalmente causada pela largura insuficiente da emenda e pelas condições climáticas, comprometendo significativamente a condutividade hidráulica do sistema. No caso dos GCLs localizados nos taludes laterais dos aterros, um efeito adicional de erosão da bentonita é encontrado (Figura 3.8d). A umidade presente no ar dos bolsões das dobras das geomembranas se condensa com o declínio da temperatura externa e flui pela parte inferior da geomembrana, carreando parte da bentonita existente no núcleo do

GCL (Take et al., 2015). Todos esses fatores demonstram o caráter potencializador da exposição térmica no processo de hidratação do GCL. Esses indicativos são confirmados em alguns trabalhos que estudaram a hidratação de GCLs submetidos a ciclos térmicos em análises de laboratório.

Rowe et al. (2011) estudaram a hidratação de GCLs em condições simuladas de ciclos térmicos diários. A temperatura variou de 20 a 60° com 12 horas de exposição ao aquecimento e 12 de resfriamento, totalizando as 24 horas (um dia). Neste estudo, foram analisados três GCLs diferentes fabricados com bentonita sódica granular (fina e grossa) quando hidratados por um solo areno-siltoso. As análises foram feitas por meio de colunas de hidratação de PVC com diâmetro de 150 mm e altura de solo de 450 mm. Essas colunas foram monitoradas para aferir a dissipação de calor com a profundidade e o teor de umidade do solo. Os ciclos térmicos foram simulados por um cobertor térmico colocado no topo das colunas de hidratação. A Figura 3.9 apresenta o modelo esquemático das colunas utilizadas e o monitoramento. Os resultados deste estudo revelaram uma grande influência dos ciclos térmicos no processo de hidratação, com impactos diferentes para cada um dos GCLs analisados.

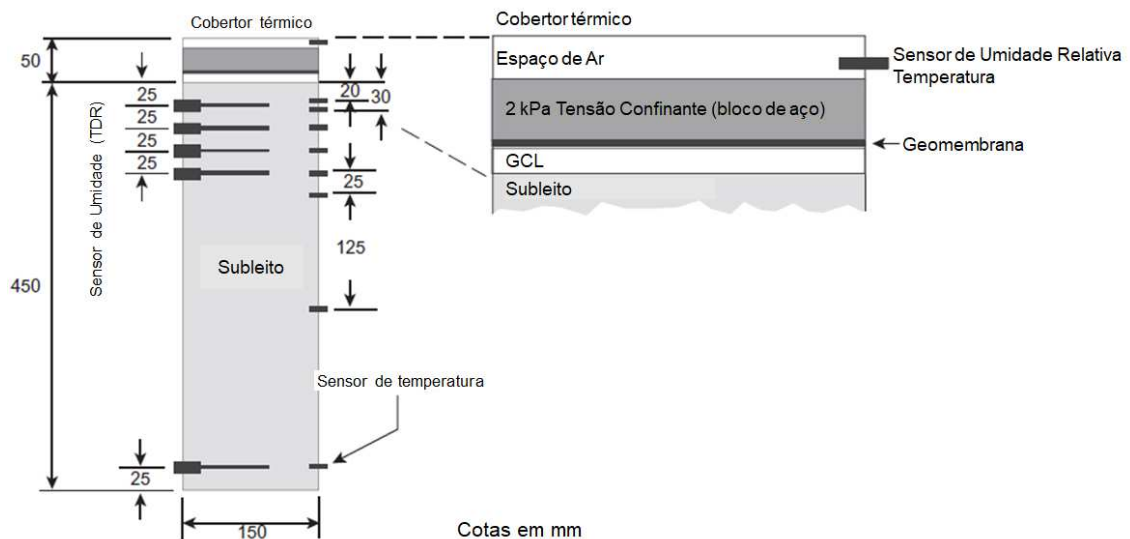


Figura 3.9 – Coluna de Hidratação. Fonte: Adaptado de Rowe et al. (2011)

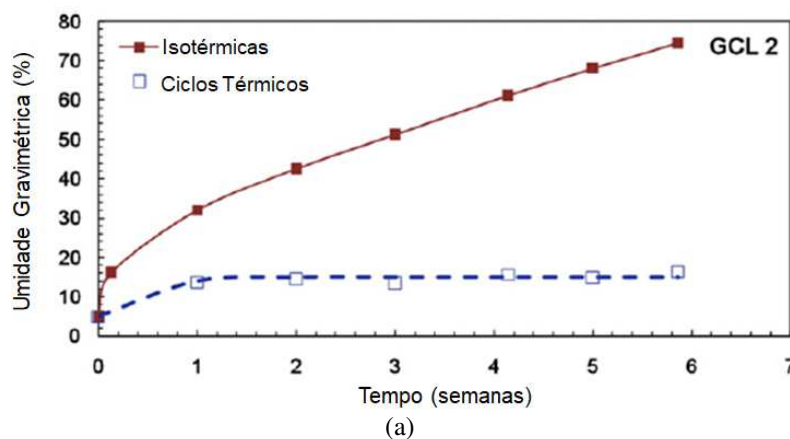
A Tabela 3.6 apresenta uma comparação do estudo de Rowe et al. (2011) com o de Rayhani et al. (2011), onde os mesmos GCLs foram hidratados pelo mesmo solo areno-siltoso com umidade de compactação de 16%, porém em condições isotérmicas. Os resultados mostram uma redução de até 30% na comparação dos teores de umidade encontrados na

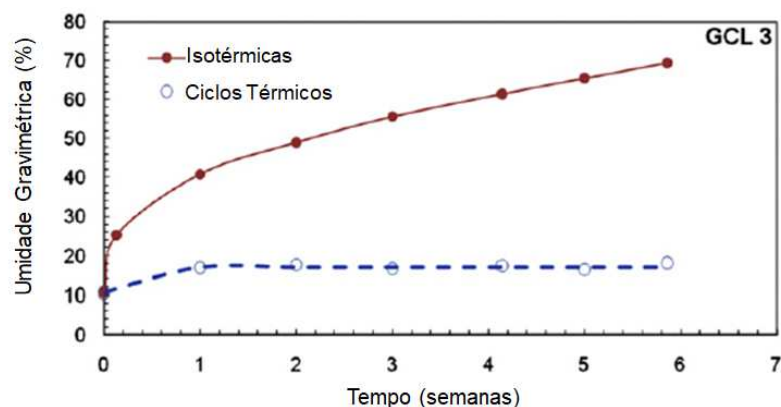
condição isotérmica com as amostras expostas aos ciclos térmicos diários. Os resultados também se mostraram distantes do teor de umidade saturado determinado por ascensão livre de água (w_{ref}). Este teor é considerado como a principal referência de adequação em termos de hidratação para o GCL.

Tabela 3.6 - Hidratação do GCL em condições isotérmicas e ciclos térmicos. Fonte: Adaptado de Rowe et al. (2011).

| GCL | Umidade Gravimétrica do GCL | | | Umidade do GCL normalizada (w/wref) | | |
|------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | Ciclos Térmicos | Condições Isotérmicas | | Ciclos Térmicos | Condições Isotérmicas | |
| | 7 semanas (equilíbrio) | 10 semanas | 30 semanas (equilíbrio) | 7 semanas (equilíbrio) | 10 semanas | 30 semanas (equilíbrio) |
| GCL1 | 30,4 | 90 | 102 | 22 | 64 | 73 |
| GCL2 | 27,4 | 78 | 88 | 24 | 68 | 77 |
| GCL3 | 16,8 | 95 | 114 | 11 | 63 | 76 |

Anderson et al. (2012) analisou o efeito dos ciclos térmicos na hidratação de dois GCLs (GCL 2 e GCL3), em colunas de hidratação submetidas a ciclos de aquecimento e resfriamento. O GCL 1 é composto de bentonita granular fina com um geotêxtil de suporte do tipo não tecido reforçado de suporte, o GCL 2 é composto de bentonita granular grossa com um geotêxtil de suporte do tipo tecido. Os ciclos foram de 12 horas de aquecimento com um gradiente térmico de 20 a 60°C e 12 horas de resfriamento, tal como realizado no estudo de Rowe et al. (2011). Como resultado, as amostras de GCLs submetidas a esse gradiente térmico atingiram valores de umidade significativamente inferiores aos observados para uma hidratação em condições isotérmicas. O equipamento utilizado por Anderson et al. (2012) é semelhante ao utilizado por Rowe et al. (2011), porém com uma altura de solo compactado de 250 mm. A Figura 3.10 apresenta os principais resultados obtidos no estudo de Anderson et al. (2012).





(b)

Figura 3.10 - Hidratação de GCLs em condições isotérmicas e ciclos térmicos: (a) GCL2; (b) GCL3. Fonte: Anderson et al. (2012).

Na Figura 3.10, os resultados mostram que, em condições isotérmicas, os GCLs atingem teores de umidade (por hidratação do subleito) que superam 60% ou mais em relação aos valores encontrados no estudo com ciclos térmicos. A pesquisa de Anderson et al. (2012) foi realizada com solos arenosos utilizados como subleito e compactados com um teor de umidade inicial de 15%. Quando se compara os resultados obtidos com os solos argilosos, a capacidade desse subleito hidratar o GCL em condições de ciclos térmicos diários é ainda mais comprometida, além do fato de solos argilosos naturalmente servirem como subleito nos *liners*.

Sarabian e Rayhani (2013) analisaram a hidratação pelo subleito de dois GCLs (GCL1 e GCL2) por meio de colunas de hidratação, tendo como subleito um solo argiloso de baixa plasticidade (IP=22%) para diferentes teores iniciais de umidade (10 a 65%). A configuração de ciclos térmicos foi a mesma à aplicada nas pesquisas de Rowe et al. (2011) e Anderson et al. (2012), e comparada com a condição isotérmica. Os resultados confirmaram os estudos anteriores e mostraram um grande comprometimento do processo de hidratação dos GCLs por subleito argiloso na presença de ciclos térmicos. Para o teor de umidade de campo do solo de 65%, em condições isotérmicas, houve uma significativa absorção de umidade por ambos GCLs, e após 20 semanas, o GCL1 e o GCL2 atingiram o equilíbrio nos teores de umidade de 86 e 106%, respectivamente. Ainda para esse mesmo teor de umidade de subleito, em condições de ciclos térmicos, houve menor absorção de umidade, sendo que o GCL1 e o GCL2 atingiram teores de umidade de 21,5 e 13,0%, respectivamente, após 6 semanas. Além disso, para o solo com teor inicial de umidade de 10%, os GCLs apresentaram teores de umidade de 13 a 15% após 1 semana, o que foi muito menor do que o alcançado quando colocados no subleito com teor de umidade de 65% (35–36%) após este mesmo período.

Desta forma, a garantia da hidratação dos GCLs em condições não isotérmicas ainda é pouco clara na literatura quanto à qual solução pode ser aplicada para mitigar esses efeitos na capacidade de hidratação do GCL. Atualmente, os indicativos são de que os subleitos com capacidade de reter água nos períodos de maior estresse deste gradiente térmico podem ser a chave para amenizar os efeitos da perda de umidade e garantir a hidratação dos GCLs nos períodos de resfriamento do *liner* (Rowe, 2020). Deste modo, solos lateríticos podem vir apresentar essa capacidade de retenção de água, em razão da distribuição granulométrica desses solos (bimodal). Os solos lateríticos apresentam ainda um comportamento hidráulico que se assemelha ao dos solos arenosos em razão da estrutura agregada (Miguel et al., 2014), permitindo a hidratação rápida do GCL. Esse comportamento, no entanto, é delimitado a uma faixa de valores de forças de sucção. Para valores mais elevados de sucção, o comportamento dos solos lateríticos é de um solo fino que retém uma umidade residual no solo (Miguel et al., 2014).

3.6 Hidratação e a retração dos GCLs

A aplicação de *liners* compostos (CCL+Geomembrana) vem sendo estudada desde os anos 80, quando a técnica foi adotada em aterros de resíduos sólidos pelas agências ambientais dos Estados Unidos e Alemanha. Este tipo de *liner* é usado até hoje em razão da redução de danos ambientais que ele proporciona ao mitigar a percolação de lixiviados no solo. A inserção da geomembrana representou uma redução significativa nas taxas de vazamentos de lixiviados em aterros de resíduos sólidos, e a aplicação dos GCLs complementou este sistema atuando como uma camada de segurança adicional. Recentes exumações de camadas de cobertura de aterros sanitários, no entanto, revelaram um grave problema de desempenho nos *liners* compostos com GCL. Aterros onde o sistema de cobertura era composto por geomembranas e GCLs apresentaram retração nas regiões de emenda (sobreposição) dos painéis de GCL localizados abaixo da geomembrana (Bostwick, 2009; Bostwick et al., 2010; Brachman et al., 2014; Hosney e Rowe, 2014).

Um dos primeiros estudos referentes a este problema é o de Koerner e Koerner (2005), onde valores de retrações de painéis de GCL da ordem de 0 a 120 cm foram encontradas em exumações do sistema de cobertura em cinco aterros de resíduos sólidos diferentes. Este estudo contemplou aterros de resíduos sólidos com diferentes tipos de GCLs, fabricados com geotêxteis tecidos e não tecidos, e amostras de GCL e geomembranas expostas às intempéries

por um período de 2 meses a 5 anos. As únicas características comuns aos cinco casos estudados neste estudo foram a presença da geomembrana sobre os GCLs, e que todos os casos estavam expostos as intempéries. A Tabela 3.7 apresenta os cinco casos estudados e aos valores de retração encontrados nos GCLs.

Tabela 3.7 - Estudos de Caso. Fonte: Adaptado de Thiel et al. (2006).

| Tempo de Exposição | Localização | Inclinação (Talude) | Tipo de GCL (geotêxteis) | Geotêxteis (orientação) | Umidade (%) | Separação máximas (cm) |
|--------------------|----------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------|------------------------|
| 1993 (5 anos) | Massachusetts | 2,5:1 | Sem reforço (duplo tecido) | T-Topo T-Base | 20 | 30 |
| 2000 (5 meses) | Virgínia | 3,0:1 | Reforçado (duplo não tecido) | NT-Topo NT-Base | 24-31 | 30 |
| 2001 (15 meses) | Confidencial | 3,0:1 | Reforçado (não tecido/tecido) | NT-Topo T-Base | 25-30 | 20 |
| 2004 (2 meses) | América do Sul | 2 – 4° | Reforçado (duplo não tecido) | NT-Topo NT-Base | 29-44 | 15 |
| 2004 (3 anos) | Califórnia | 1,5:1 | Reforçado (duplo não tecido) | NT-Topo NT-Base | 25-29 | 120 |

Thiel et al. (2006) resgataram os estudos de caso relatados por Koener e Koener (2005) e iniciam os estudos comparativos deste comportamento em laboratório por meio de painéis de GCL ancorados em bandejas metálicas submetidos a ciclos de umedecimento e secagem. Neste trabalho, Thiel et al. (2006) apresentam as hipóteses que explicariam o efeito de retração em painéis de GCL: (1) Ciclos de umedecimento e secagem, causados pela exposição a variação de temperatura; (2) calor durante o dia e temperaturas amenas a noite e na madrugada; (3) Tensões impostas pelas inclinações dos GCL; (4) Contração do GCL em taludes pouco inclinados; (5) Encolhimento dos materiais de fabricação do GCL. Deste modo, para analisar o papel da hidratação no comportamento e retração do GCL, sete amostras de GCLs com diferentes combinações de geotêxteis de suporte e cobertura foram estudados. O processo utilizado na pesquisa para simular os ciclos de hidratação e secagem foi dividido em duas etapas. A etapa de hidratação consistiu na adição de água destilada (300 e 500 ml), de forma que as amostras de GCL tivessem teores de umidade iniciais diferentes. Na etapa de secagem, as amostras eram hidratadas e homogeneizadas e levadas à estufa com ventilação e temperatura de 60°C. O ciclo de ensaio, contemplando essas duas etapas, tinha duração de 24 horas (8 de hidratação e homogeneização e 15 horas de secagem), e o restante do tempo era despendido nos processos de preparação das amostras. Os resultados mostram que após a realização de 40 ciclos algumas das amostras de GCL apresentaram retração da ordem de 23%. O trabalho ainda

apontou uma menor influência da retração dos geotêxteis nos valores totais de retração do geocomposto e uma compatibilidade dos valores encontrados com os observados em campo.

O contexto dos trabalhos existentes sobre a retração de GCLs é, em sua grande maioria, restrito a análises realizadas em laboratório como exposto anteriormente. Análises em condições de campo, ou mesmo condições simuladas de campo, se mostram de difícil realização, seja por questões práticas, como na exumação de um aterro que só permite acesso a camada de cobertura ou pela escala necessária para simular tal condição em laboratório.

Rowe et al. (2013), por meio de um modelo físico, analisaram três amostras de GCLs submetidos a ciclos de aquecimento e resfriamento em uma célula simulada de aterro sanitário com um solo siltoso como subleito. O estudo utilizou uma célula de aterro simulada para esta análise a qual apresentava dimensões de 550x390x500 mm e contava com uma camada de 450 mm de solo compactado, o qual hidratava um GCL ancorado. A Figura 3.11 apresenta os detalhes do modelo físico utilizado na pesquisa de Rowe et al. (2013).

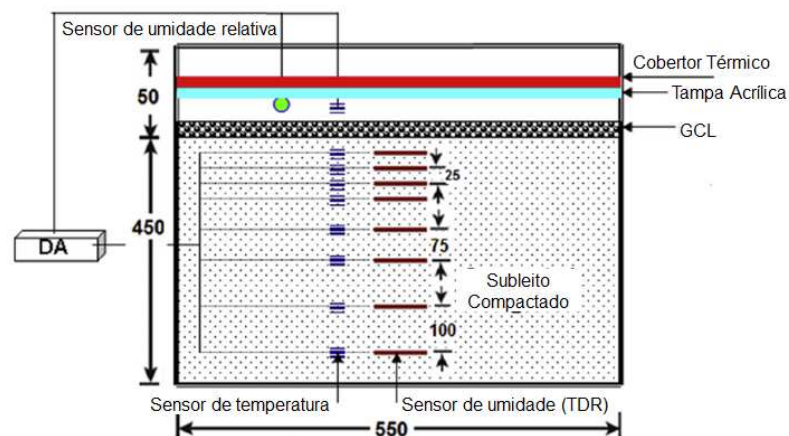


Figura 3.11 - Modelo físico utilizado na simulação da célula. Adaptado de Rowe et al. (2013).

O modelo físico de Rowe et al. (2013) permitiu o monitoramento da temperatura e do teor de umidade do subleito por meio de sensores instalados, e de forma simultânea, a análise do comportamento de retração e sua relação com a hidratação. Foram avaliadas, no estudo, a influência dos teores de umidade inicial dos GCLs (8%, 56% e 110%) e dos períodos (30, 50 e 60 dias) de resfriamento nos valores de retração. Os resultados revelaram que a amostra umedecida inicialmente com o teor 110% sofreu uma retração 300% maior do que a amostra umedecida a 56%, e retração 450% maior quando comparada a amostra de com 8% de umidade

inicial. Já os longos períodos de resfriamento mostraram uma alta capacidade de reidratação do GCL pelo solo de subleito, a qual interferiu nos valores de retração.

Brachman (2014) analisou o comportamento de retração de dois GCLs por meio de análises em laboratório, tal como em Koerner e Koerner (2005) e Thiel et al. (2006), e em campo, no *liner* de estudos da Universidade Queen's no Canadá. Os dois estudos utilizaram os mesmos GCLs, no entanto, uma condição impunha ciclos de umedecimento e secagem e a outra expunha o GCL a ciclos de aquecimento e resfriamento com amplitudes térmicas características desta região. Os resultados de Brachman et al. (2014) mostraram que enquanto as amostras que foram analisadas em laboratório apresentaram retração entre 10 e 25%, as amostras de campo retraíram significativamente menos, entre 0,2% e 5,3%. Os autores apontam dois prováveis fatores para explicar estes resultados, sendo que o primeiro é a capacidade do subleito de manter a umidade mediante ciclos térmicos, e o segundo é a diferença entre as taxas de secagem entre as duas análises. As amostras de laboratório sofreram uma secagem brusca em um curto intervalo de tempo quando colocadas em estufas, e tal processo acelera a dessecação, o que facilita a perda de umidade. No campo, as amostras sofrem uma perda gradual de umidade mais lenta, com um menor índice de dessecação e, conseqüentemente, uma movimentação menor de umidade no sistema. Esta relação entre tempo de hidratação ou secagem e a retração já havia sido apontada no trabalho de Scalia e Benson (2011), onde os resultados mostram que uma absorção rápida de umidade pelo GCL é benéfica para o solo, uma vez que diminui o impacto da troca de cátions e dessecação do GCL.

As observações encontradas na literatura, até o momento, permitem uma conclusão parcial da problemática de hidratação e retração de GCLs, apontando a existência do comportamento de retração nos GCLs e o risco desta falha para o correto desempenho de *liners* compostos. Ainda, os estudos mostram uma relação entre características inerentes à dinâmica Geomembranas x GCLs x Subleito x Mecanismo de Hidratação, como fatores chave para compreensão do processo de retração. A análise de todos esses fatores, abordada anteriormente de forma isolada, aqui se agrupam no entendimento do problema da retração dos GCLs. A falta de hidratação ou falhas nesse processo implicam em um não funcionamento adequado do *liner*, uma vez que o GCL não atinge a saturação e, portanto, pode não atingir as propriedades necessárias ao seu desempenho como barreira. Tudo isso corrobora com o comportamento mecânico dos GCLs, que pode estar associado a retração e aos ciclos térmicos a que estão expostos.

4. Programa Experimental

4.1 Materiais

4.1.1 Geossintético bentonítico (GCL)

Três tipos de GCLs de diferentes fabricantes foram usados nesta pesquisa, denominados GCL1, GCL2 e GCL3. O GCL1 é composto por um núcleo de bentonita granular naturalmente sódica, um geotêxtil de suporte tecido (GTT) e geotêxtil de cobertura não tecido (GTNT). O GCL2 tem a mesma estrutura do GCL1, mas com um núcleo de bentonita em pó, aditivada, com sódio. O GCL3 é composto por geotêxteis de cobertura e de suporte do tipo tecido (GT), um geotêxtil de revestimento ultraleve de poliéster (PET) e um núcleo de bentonita em pó naturalmente sódica. As bentonitas presentes em todos os GCLs contêm ao menos 80% de esmectita em todos os GCLs. A Figura 4.1 apresenta os GCLs utilizados nesta pesquisa.



Figura 4.1 – Aspectos estruturais dos GCLs e respectivas bentonitas utilizados nesta pesquisa.

A caracterização geotécnica das bentonitas dos GCLs foi realizada no Laboratório de Geotecnia da UFSCar. Foram realizados ensaios para a determinação dos seguintes parâmetros: teor de umidade de recebimento; massa de bentonita por unidade de área dos geotêxteis (ASTM D5261), limite de plasticidade (NBR 7180) limite de liquidez (NBR 6459) e análise

granulométrica (NBR 7181). A Figura 4.2 apresenta parte dos procedimentos dos ensaios de caracterização.

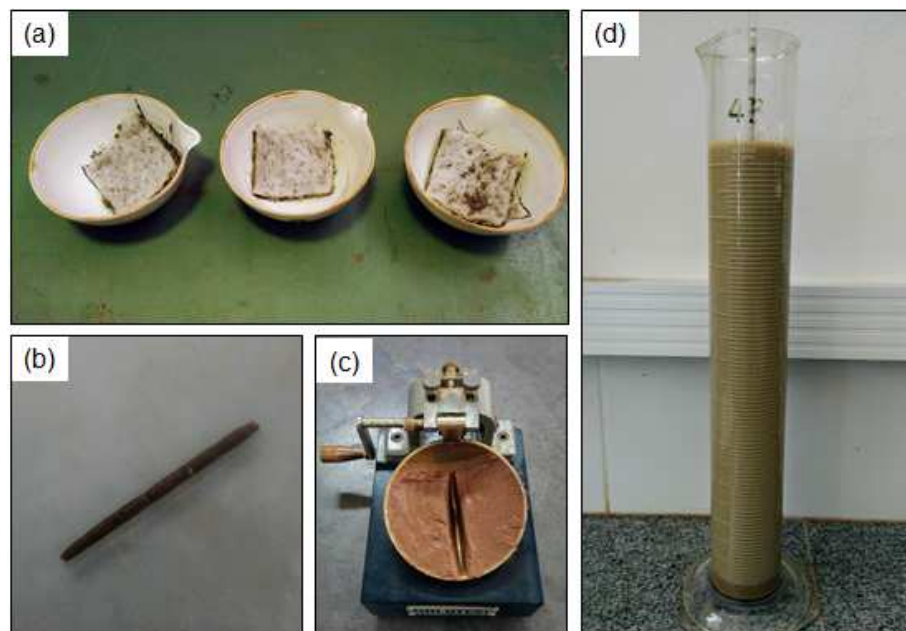


Figura 4.2 – Ensaios de caracterização da bentonita: (a) massas por unidade de área e teor de umidade; (b) ensaio de plasticidade; (c) limite de liquidez; (d) sedimentação.

A caracterização mineralógica das bentonitas foi realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural – LCE (DEMA). Complementou as análises mineralógicas a determinação da capacidade de troca catiônica das bentonitas utilizadas nos GCLs. Esta determinação seguiu o Método de Pejon (1992), a preparação da amostra consistiu em secar a amostra analisada em estufa por 24 horas, esta amostra foi então passada na peneira de 2,00mm (#10). Em seguida, preparou-se a solução de azul de metileno, na proporção de 1,5g de azul de metileno seco para 1 litro de água deionizada. Em um becker de 500 ml adicionou-se 1 g da amostra analisada já preparada em 50 ml de água destilada e levou-se o conjunto para o agitador magnético para homogeneização por 15 minutos. Após o período de homogeneização da amostra adicionou-se 1 ml de solução de azul de metileno com o auxílio de uma seringa graduada, e decorridos 1 minutos pingou-se uma gota da solução em um papel filtro quantitativo (Whatmann's 42) com o auxílio de uma pipeta de vidro. Esta adição de azul de metileno em ml é feita até que o contorno da última gota pingada no papel filtro apresente uma auréola de coloração azul esverdeada, indicando que o solo atingiu sua capacidade máxima de adsorção de azul de metileno. A Figura 4.3 apresenta o equipamento utilizado na realização do ensaio de CTC.

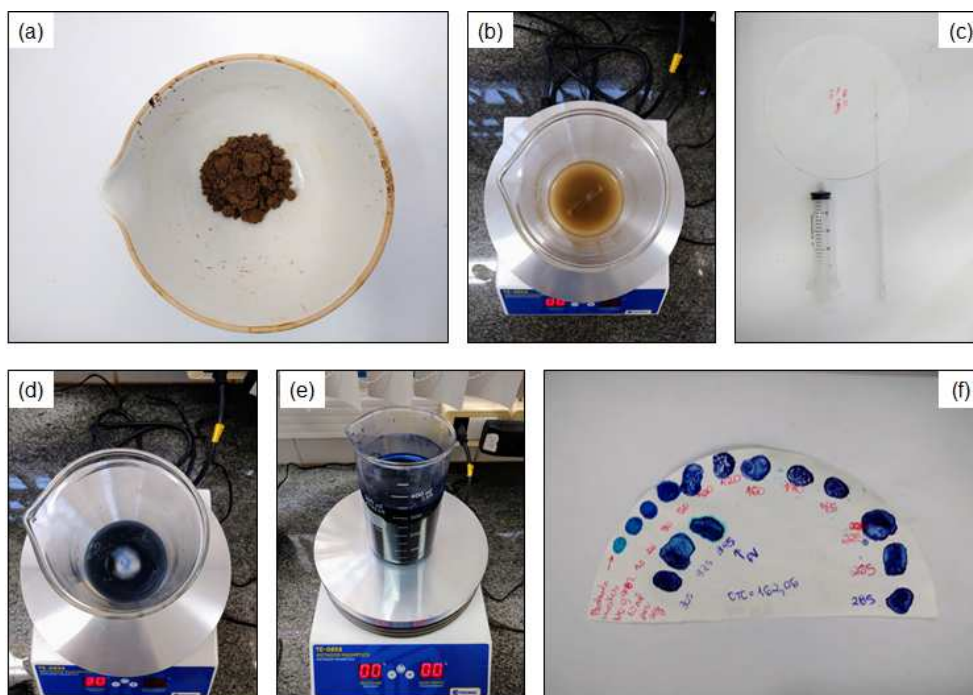


Figura 4.3 - Ensaio de capacidade de troca catiônica: (a) amostra seca; (b) homogeneização da amostra; (c) seringa, pipeta e papel filtro; (d) início do ensaio; (e) amostra ao fim do ensaio; (f) papel filtro com as gotas da solução.

Encontrado a quantidade de azul de metileno adicionada a solução para o equilíbrio, o valor da CTC da amostra é determinado pela Equação 4.1:

$$CTC \left(\frac{meq}{100g} \right) = C_{AM} \times V_{AM} \times \frac{100}{M_S} \quad (4.1)$$

sendo: V_{AM} – volume da solução de azul de metileno gasta (ml); M_S – massa de solo seco (g); e C – concentração da solução de azul de metileno (normalidade) = 0,0046889.

Complementando a caracterização das bentonitas que compõem os GCLs, foram realizados ensaios de índice de inchamento (ASTM D5890) e perda de fluído (ASTM D5891). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UFSCar (LabGeo/UFSCar). Nestes dois ensaios, a preparação da amostra de bentonita é rigorosa. A bentonita deve ser moída até obter 100% da amostra passando na peneira #100 e 65% passando na peneira #200. O índice de inchamento/expansão livre é calculado com base em duas gramas de bentonita preparada, imersa em 100 ml de água deionizada, a qual é adicionada de 0,1g em 200 minutos, sendo a medição feita com a leitura do valor atingindo na proveta após 16 horas após a última adição de solo. O valor mínimo esperado para o índice de inchamento/expansão de bentonitas

para compor GCLs é de 24ml/2g (ASTM D5890). A perda de fluído também é um parâmetro de caracterização da bentonita para compor GCLs. Neste ensaio, especificado pela ASTM D5891, utiliza-se 100 g de bentonita (preparada) na fabricação de uma lama que é filtrada com um papel filtro Whatman N°42, sobre uma pressão de 700 kPa. A perda de água neste processo de filtração, multiplicada por dois, deve ser menor do que 18 ml, em um intervalo de tempo de 22,5 min. A Figura 4.4 apresenta parte dos procedimentos dos ensaios de perda de fluído e inchamento.

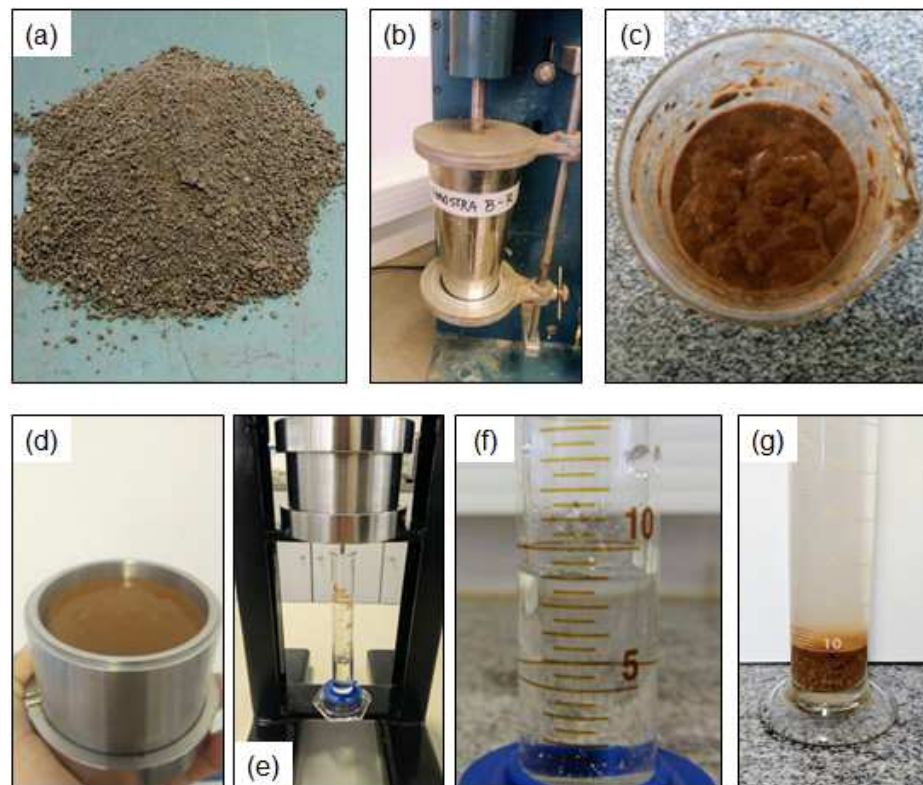


Figura 4.4 - Ensaios de caracterização da bentonita para compor GCLs: (a) moagem da bentonita; (b) lama de bentonita; (c) lama de bentonita hidratada; (d) lama no filtro de pressão; (e) ensaio de perda de fluído; (f) perda de fluído (ml); (g) ensaio de inchamento.

Os ensaios para determinação dos parâmetros de resistência mecânica dos GCLs foram realizados em uma prensa mecânica Universal EMIC no Laboratório de Geotecnia da UFSCar. As análises seguiram os procedimentos de ensaio descritos na ASTM D6768 para o ensaio de resistência à tração e ASTM D6496 para o ensaio de resistência ao descolamento (*Peel test*). Os ensaios foram realizados em amostras de 10 cm de largura por 20 cm de comprimento, e velocidade de ensaio de 300 mm/min. A Figura 4.5 apresenta os ensaios de caracterização mecânicos do GCL.

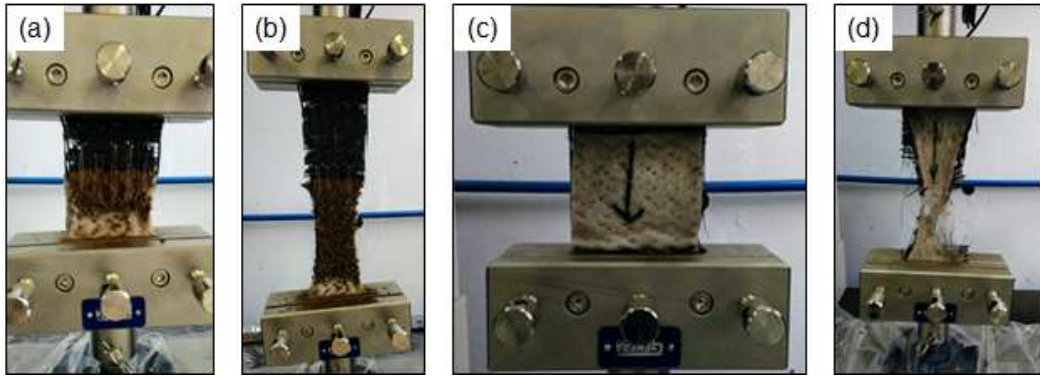


Figura 4.5 – Ensaio de caracterização mecânica (GCL1): (a) ensaio de descolamento; (b) ruptura por descolamento; (c) ensaio de tração e (d) ruptura por tração.

Ainda de acordo com as características esperadas para um GCL, a condutividade hidráulica é o principal parâmetro de desempenho. O ensaio de índice de fluxo (ASTM D5887) é com uso de um permeâmetro de parede flexível no qual o GCL é saturado por contrapressão e posteriormente é permeado sob elevados níveis de carga hidráulica. O índice de fluxo é utilizado para quantificar a condutividade hidráulica do GCL. A Figura 4.6 apresenta os procedimentos do ensaio de índice de fluxo do GCL, bem como o equipamento desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da UFSCar (LabGeo/UFSCar) para a realização deste ensaio.

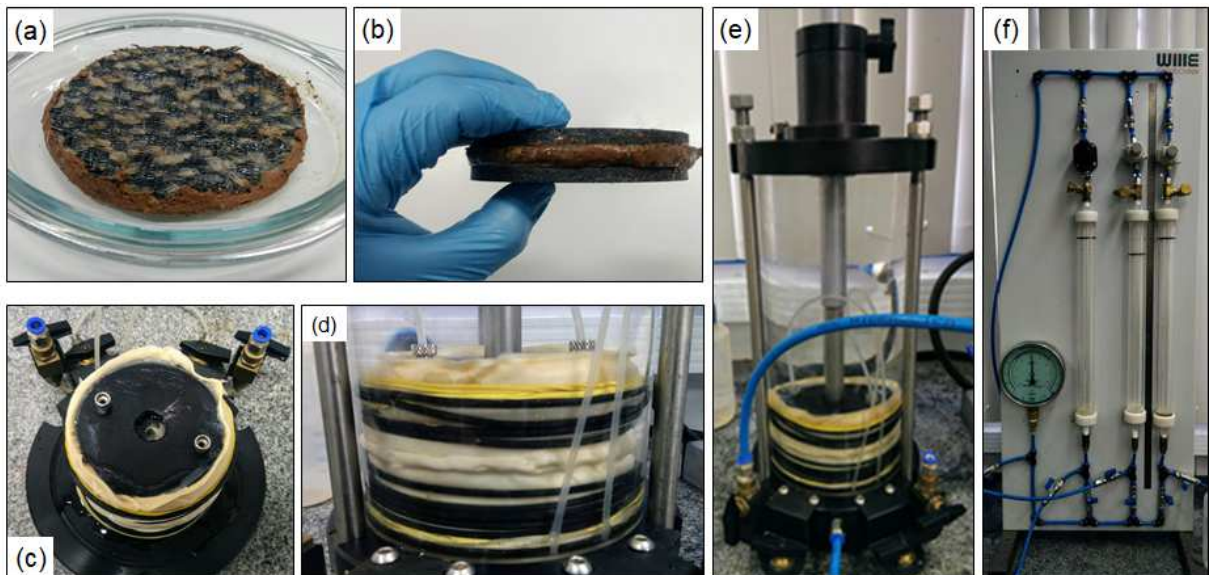


Figura 4.6 - Ensaio de índice de fluxo: (a) corte e vedação lateral com bentonita; (b) amostra entre pedras porosas; (c) corpo de prova montado na câmara; (d) detalhe vedação; (e) ensaio em andamento na câmara triaxial; (f) painel de pressão.

Neste ensaio, a amostra de GCL saturada (Figura 4.6a) é colocada entre duas pedras porosas (Figura 4.6b) em uma célula de testes com pressão confinante de 400 kPa e uma

contrapressão de 365 kPa até a saturação da amostra (Figura 4.6d). Com a saturação da amostra, é imposto um fluxo de entrada de água (*inflow*) com pressão de 370 kPa e um fluxo de saída (*outflow*) com pressão de 360 kPa, o fluxo de entrada e saída de água é então aferido. O valor de fluxo de cálculo é determinado quando, em um intervalo de tempo de 8 horas, a relação entre entrada e saída de água (fluxo) variar entre 0,75 e 1,25 em três determinações consecutivas. Com o valor de fluxo e a medição da espessura do GCL saturado após o ensaio, é possível obter a condutividade hidráulica saturada do GCL.

As curvas de retenção de água dos GCLs foram obtidas usando a técnica do papel filtro, segundo a ASTM D5298, e a metodologia de Acikel et al. (2015). Esta metodologia foi utilizada nos trabalhos de Acikel et al. (2015) e por Touze-Foltz et al. (2021). A Figura 4.7 apresenta a montagem dos corpos de prova para a construção da curva de retenção de água do GCL por umedecimento. Neste ensaio, 26 anéis de GCLs foram cortados em uma prensa hidráulica, em formato circular, com diâmetro de 5,0 cm. Os corpos de prova usados para obtenção de pontos da curva de retenção são compostos por pares de amostras circulares de GCL, colocados um sobre o outro. Os corpos de prova foram então colocados sobre uma pedra porosa e um papel filtro (Figura 4.5a), em anéis acrílicos de diâmetro interno e altura de 2,0 cm de forma a confiná-los (Figura 4.7b), evitando assim a perda de bentonita pela borda dos anéis de GCLs. Foi adicionado um papel de sacrifício e mais um papel filtro sobre os corpos de prova de GCL (Figura 4.7c). Um confinamento vertical de magnitude de 1kPa (Figura 4.7d) foi imposto de forma a manter o contato entre os anéis de GCL, e desses com a pedra porosa da base, e controlar a expansão da bentonita de forma a manter o mesmo índice de vazios. Esta sobrecarga de 1 kPa baseou-se na sobrecarga indicada no estudo de Acikel et al. (2015), e foi feita com um béquer de vidro preenchido com areia. Os corpos de prova foram hidratados por absorção de água destilada por um período de 14 dias, sendo posicionados sobre pedras porosas imersas em água (Figura 4.7e). A Figura 4.7f apresenta o aspecto da amostra de GCL hidratada após o ensaio, e o detalhe do papel de sacrifício e papel filtro usados no ensaio é apresentado na Figura 4.7g.

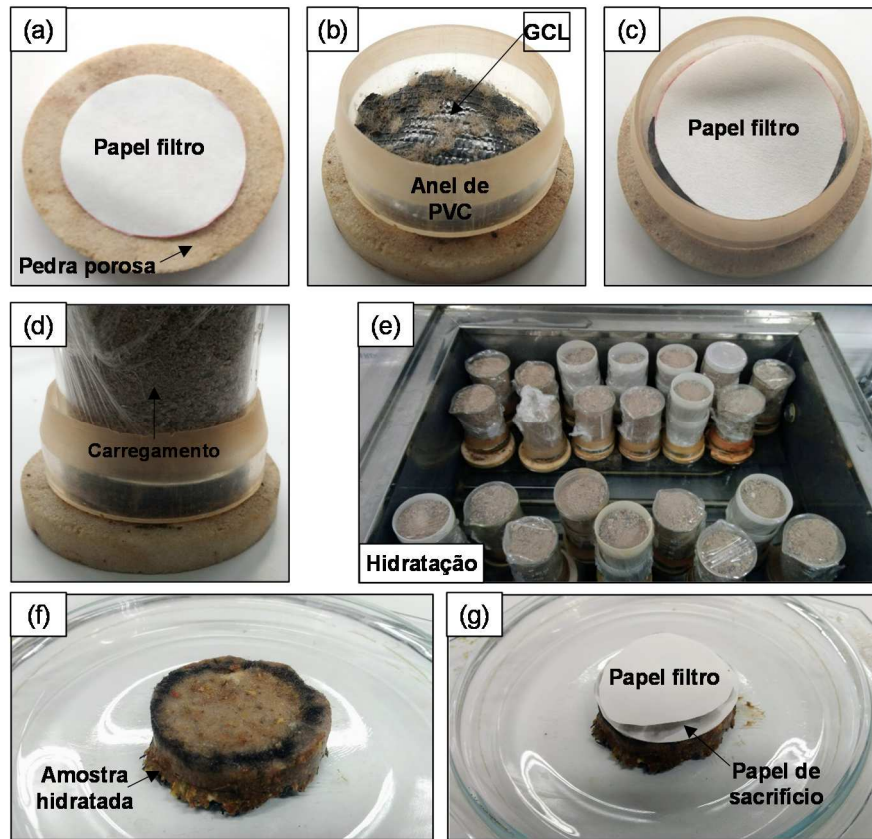


Figura 4.7 - Ensaio de curva de retenção: (a) pedra porosa e papel filtro; (b) GCL e anel; (c) papel filtro superior; (d) sobrecarga de 1kPa; (e) processo de hidratação; (f) amostra hidratada; (g) detalhe do papel filtro e de sacrifício.

A curva de retenção de água foi obtida com o ajuste proposto por Fredlund and Xing (1994), explicitado na Equação 4.2. E Durner (1994) dada na Equação 4.3. Os valores de sucção dos pontos experimentais foram determinados pelo método do papel filtro, como explicado anteriormente.

$$w(\Psi) = w_s \cdot \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (4.2)$$

onde: Ψ é a sucção (kPa); w é o teor de umidade (g/g ou m³/m³), w_s é o teor de umidade saturado do GCL; a , n , m (kPa) são parâmetros de ajuste da curva.

$$w(\Psi) = w_r \cdot (w_s - w_r) \cdot \left(w_1 \cdot \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 \cdot \Psi)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \cdot \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 \cdot \Psi)^{n_2}} \right]^{m_2} \right) \quad (4.3)$$

onde: Ψ é a sucção (kPa); w é o teor de umidade (g/g ou m^3/m^3), w_s é o teor de umidade saturado do solo; w_r é o teor de umidade residual do solo; α , n , m (kPa) são parâmetros de ajuste da curva.

4.1.2 Solos de subleito

Dois solos lateríticos diferentes foram utilizados para investigar o efeito da distribuição do tamanho das partículas do solo, teor de umidade da fundação (w_{sub}) e mineralogia na hidratação de GCLs. Uma areia argilosa e uma argila arenosa foram selecionadas por representarem solos lateríticos típicos do território brasileiro e de outros países tropicais. Ambos os solos foram coletados no Estado de São Paulo. De acordo com a SUCS (ASTM D 2487), o solo arenoso argiloso é classificado como SC, e o solo argiloso arenoso é classificado como argila de alta plasticidade (CH). Embora este solo CH apresente alta plasticidade, ele possui um percentual significativo de areia fina (36%). De acordo com o método MCT de classificação de solos (Nogami e Villibor, 1995), o solo SC é classificado como LA' e o solo CH como LG'. A Figura 4.8 apresenta uma imagem dos solos utilizados nesta pesquisa.

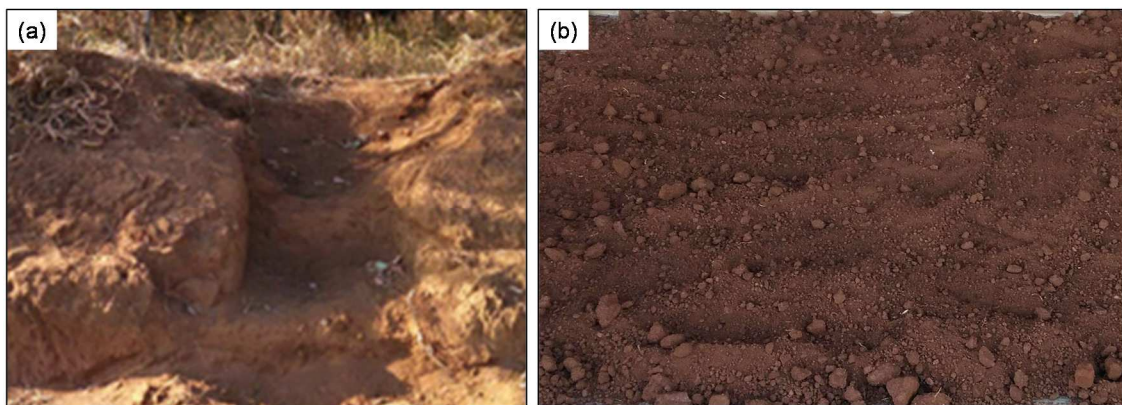


Figura 4.8 - Solos: (a) solo arenoso SC; (b) solo argiloso CH.

A caracterização geotécnica dos solos foi realizada no laboratório de Geotecnia da UFSCar. Foram realizados ensaios para a determinação dos seguintes parâmetros: análise granulométrica (NBR 7181), massa específica dos sólidos (NBR 9813), limite de plasticidade (NBR 7180) limite de liquidez (NBR 6459), parâmetros de compactação (NBR 7182) e permeabilidade sob carga variável. A Tabela 4.1 apresenta as características geotécnicas dos solos utilizados nesta pesquisa. A Figura 4.9 apresenta as curvas de compactação dos solos e as curvas granulométricas.

Tabela 4.1 – Características dos solos.

| Propriedades | Solo Arenoso | Solo Argiloso | Referência |
|--|----------------------|----------------------|--|
| Fração areia (%) | 70 | 36 | ABNT NBR 7181 (2016) |
| Fração silte (%) | 3 | 14 | |
| Fração argila (%) | 30 | 50 | |
| Classificação SUCS | SC | CH | ASTM D2487 (2017) |
| Peso específico dos sólidos (kN/m ³) | 28,4 | 30,2 | ABNT NBR 6508 (1984) |
| Limite de liquidez (%) | 33,4 | 51 | ABNT NBR 6459 (2016) ABNT NBR 7180 (2016) |
| Limite de plasticidade (%) | 21,5 | 27 | |
| Índice de plasticidade (%) | 11,9 | 24 | |
| Peso específico seco máximo (kN /m ³) | 17,7 | 16,8 | ABNT NBR 7182 (2016) |
| Teor de umidade ótimo (%) | 14,8 | 24,0 | |
| Capacidade de Troca Catiônica – CTC (meq/100g) | 3,28 | 8,44 | Pejon (1992) |
| Permeabilidade sob carga variável (m/s) ^(a) | 5,6x10 ⁻⁶ | 3,4x10 ⁻⁷ | ABNT NBR 14545 (2000) |
| Permeabilidade sob carga variável (m/s) ^(b) | 4,2x10 ⁻⁷ | 1,6x10 ⁻⁸ | ABNT NBR 14545 (2000) |

(a) Compactado no wot e grau de compactação de 95%; (b) Compactado em wot+2% e 95% de grau de compactação.

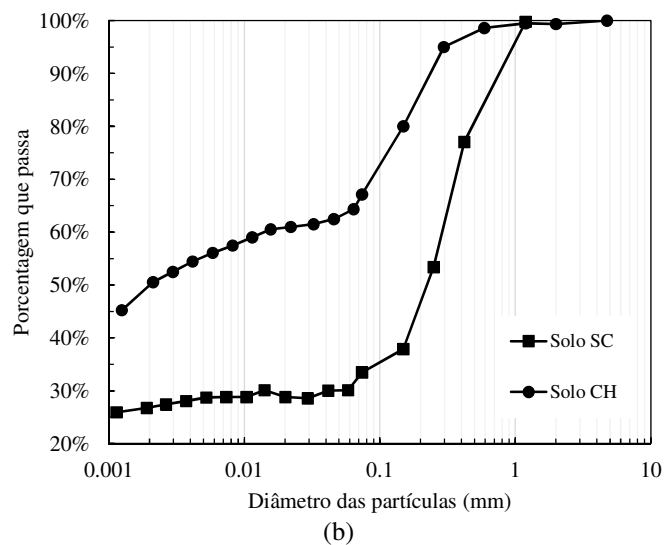
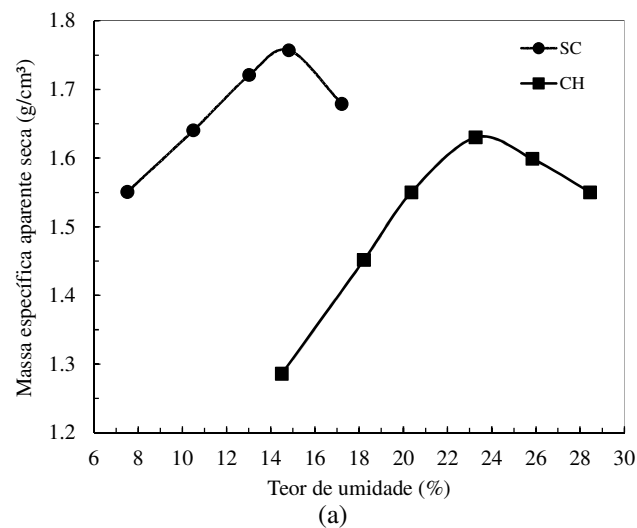


Figura 4.9 – Caracterização: (a) Curvas de compactação; (b) Curvas Granulométricas.

A Figura 4.10 mostra os minerais encontrados nas análises de DRX dos dois solos analisados. Os difratogramas foram interpretados com base na lista de fases candidatas gerada pela última versão disponível da base COD (Cristallographic Open Database) através do Match! Interface de software (Crystal Impact, Germany) e complementada por Brindley & Brown (1980) e Moore e Reynolds (1997). A quantificação das fases minerais presentes nas amostras foi realizada pelo método RIR (Dish, 2015). O solo SC apresenta 50% de Quartzo, 6,2% de Caulinita, 7,2% de Gibbsita e 0,2% de Goethita, enquanto o solo CH apresenta 17,2% de Quartzo, 5,2% de Hematita, 13,2% de Caulinita, 11% de Gibbsita e 8,8% de Goethita. A mineralogia presente em ambos os solos evidencia solos formados em climas tropicais ou subtropicais, comumente ricos em Caulinita, Hematita, Goethita, Óxidos de ferro e Alumínio.

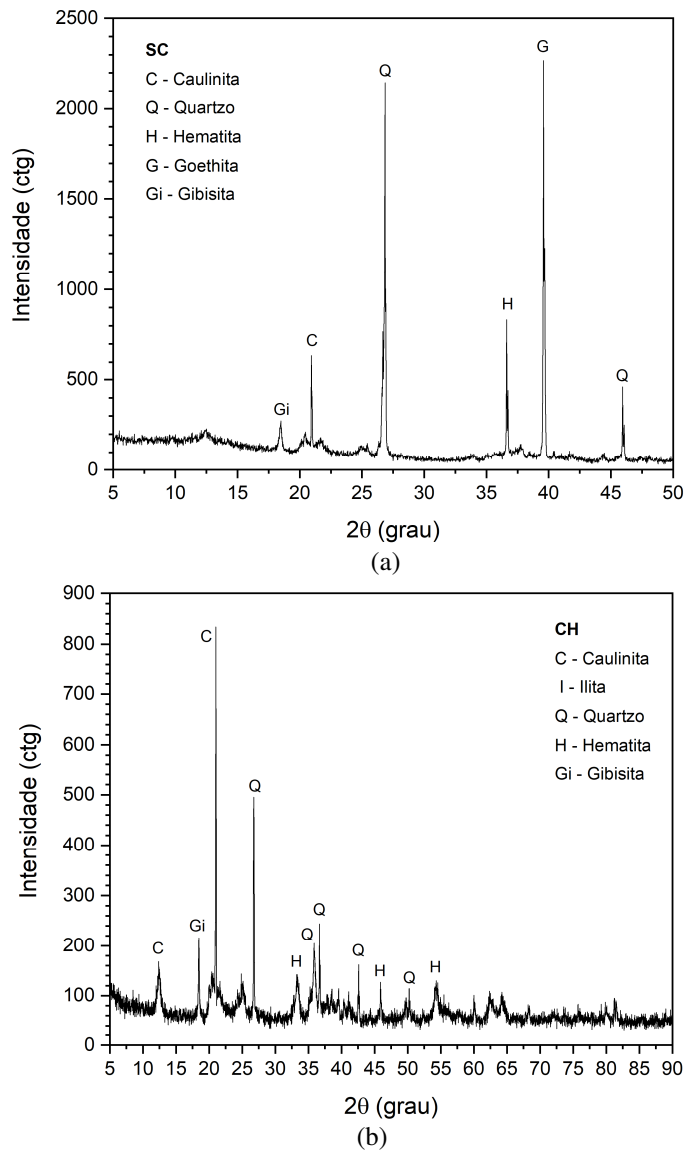


Figura 4.10 - Mineralogia dos solos: (a) SC; (b) CH.

Para avaliar as propriedades hidráulicas insaturadas dos solos, foi utilizada a técnica do papel de filtro (ASTM D5298) para determinação da curva de retenção de água no solo (CRA) por secagem e umedecimento. A Figura 4.11 mostra as curvas de retenção de água dos solos do subleito. A curva SC do solo foi ajustada usando um modelo bimodal de Durner (1994). A curva CH do solo foi ajustada pela equação de Fredlund e Xing (1994). Os parâmetros de ajuste são mostrados na Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

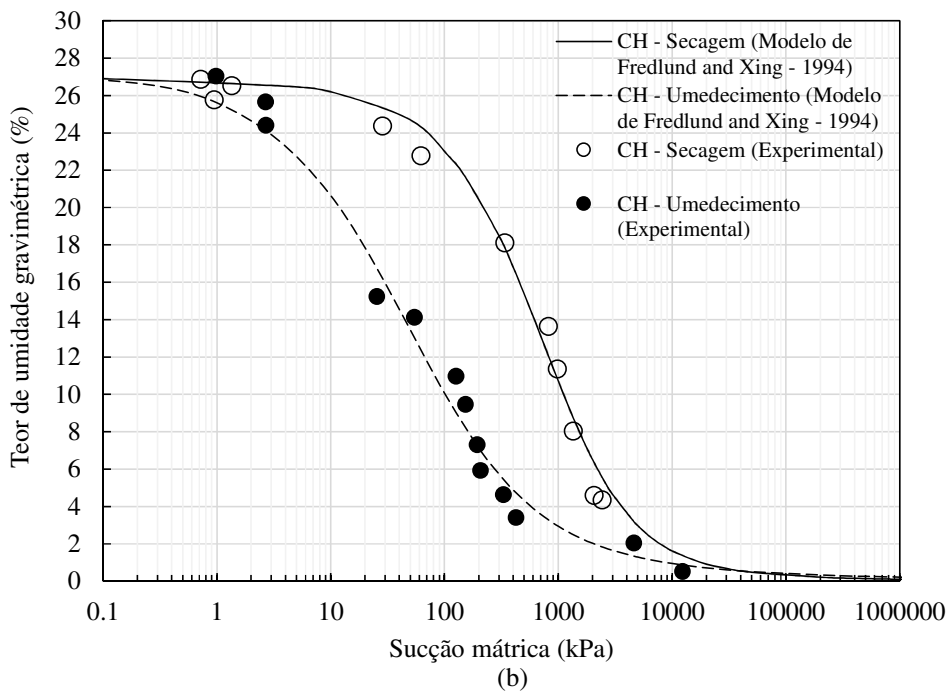
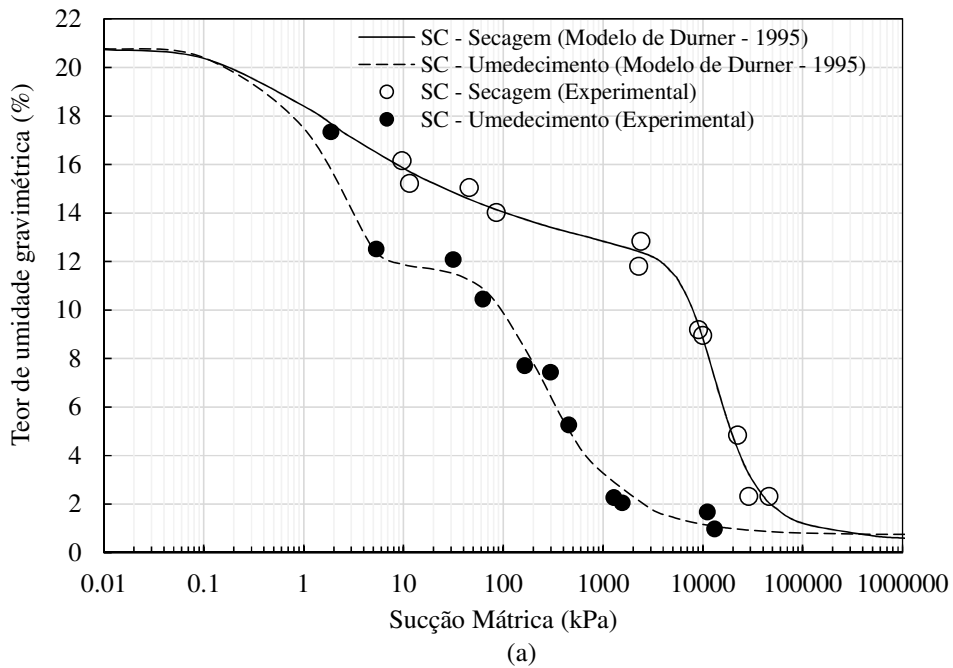


Figura 4.11 - Curva de retenção de água dos solos por secagem: (a) solo SC; (b) solo CH.

Tabela 4.2. Parâmetros de ajuste da curva de retenção do solo CH.

| Parâmetros de ajuste Fredlund e Xing 1994 – CH | | | | | |
|--|--------------|--------|---------|--------|---------|
| Secagem | | | | | |
| θ_s | θ_r | a_f | n_f | m_f | R^2 |
| (%) | (%) | (kPa) | - | - | - |
| 26,149 | 0,0000087417 | 8297.1 | 0,97336 | 2.8705 | 0.98578 |
| Umedecimento | | | | | |
| θ_s | θ_r | a_f | n_f | m_f | R^2 |
| (%) | (%) | (kPa) | - | - | - |
| 27,141 | 0,00017766 | 46,353 | 0,71210 | 2,4801 | 0.97678 |

Tabela 4.3. Parâmetros de ajuste da curva de retenção do solo SC.

| Parâmetros de ajuste Durner 1995 – SC | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|---------|------------|--------|-------------|--------|---------|
| Secagem | | | | | | | |
| θ_s | θ_r | w_1 | α_1 | n_1 | α_2 | n_2 | R^2 |
| (%) | (%) | - | (kPa) | - | (kPa) | - | - |
| 20,766 | 0,000199914 | 0,48564 | 3,4559000 | 1,1881 | 0.000092128 | 2,6221 | 0.99235 |
| Umedecimento | | | | | | | |
| θ_s | θ_r | w_1 | α_1 | n_1 | α_2 | n_2 | R^2 |
| (%) | (%) | - | (kPa) | - | (kPa) | - | - |
| 20,744 | 0.73513 | 0,44724 | 0,50228 | 3,2779 | 0,0069935 | 1,7664 | 0.99389 |

De acordo com a Figura 4.11b, o solo CH apresenta uma CRA com comportamento unimodal, o que é coerente com a distribuição granulométrica homogênea deste solo. O comportamento bimodal apresentado no SC do solo CRA (Figura 4.11a) é o resultado da existência de macro e microporos na estrutura do solo. CRAs com comportamento semelhante ao solo SC utilizado nesta pesquisa foram obtidas por Portelinha e Zornberg (2017) e Marçal et al. (2020) para solos lateríticos naturais e compactados. Nestes casos, os macros poros do solo são formados pela estrutura granular do solo, composta por areia e agregados finos (argila e silte). Microporos estão presentes em agregações de minerais argilosos comumente encontrados em solos lateríticos (argila e silte), efeito dado pela presença de óxidos de ferro e Alumínio (Hematita e Goethita). O primeiro nível da curva representa o comportamento não saturado na estrutura dos macroporos, enquanto o segundo representa o comportamento na estrutura dos microporos do solo.

4.2 Geomembrana

Como parte dos ensaios realizados no modelo físico, foi utilizada uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) lisa (2.0 mm), representando um dos modelos mais utilizados nos projetos de aterros de resíduos sólidos no Brasil. A Figura 4.12 apresenta a geomembrana e a

Tabela 4.2 apresenta a características das geomembrana utilizada, disponibilizadas pelo fabricante.

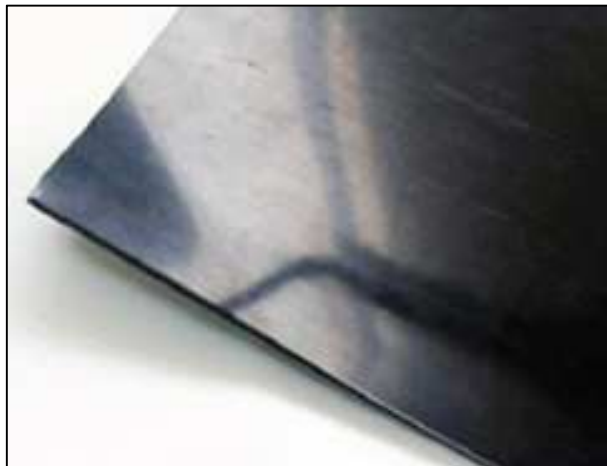


Figura 4.12 - Detalhe da geomembrana lisa usada nessa pesquisa.

Tabela 4.2 - Propriedades da Geomembrana.

| Propriedades | Unidade | Valor | Referência |
|--|-------------------|-----------------------|--------------------|
| Espessura | mm | 2,0 | ASTM D751 |
| Densidade (mín) | g/cm ³ | 0,94 | ASTM D1505/D792 |
| Resistência á tração no escoamento (méd. mín.) | kN/m | 29 | ASTM D6693 |
| Deformação no escoamento (méd. mín) | % | 12 | ASTM D6693 |
| Resistência à tração na ruptura (méd. mín.) | kN/m | 53 | ASTM D6693 |
| Deformação na ruptura (méd. mín) | % | 700 | ASTM D6693 |
| Resistência ao rasgo (méd. mín.) | N | 249 | ASTM D1004 |
| Resistência ao puncionamento (méd. mín.) | N | 640 | ASTM D4833 |
| Condutividade hidráulica | cm/sec | 1,5x10 ⁻¹¹ | ASTM E96 |

4.3 Colunas de Hidratação Isotérmicas

Colunas de PVC de 250 mm de diâmetro e 500 mm de altura foram construídas para investigar a hidratação em um sistema fechado de três GCLs instalados sobre solos de subleito. Ambos os solos foram preparados nos teores de umidade (w_{sub}) para 14,8% e 16,8%, respectivamente, w_{ot} e $w_{ot}+2\%$ para o solo SC, e 24% e 26%, respectivamente w_{ot} e $w_{ot}+2\%$ para solo CH. Cada coluna foi compactada com 10 camadas de solo de 40 mm cada, com grau de compactação de 95% em relação aos parâmetros ótimos. Mesmo com a variação do teor de umidade do solo, o índice de vazios foi mantido, adotando-se uma variação neste parâmetro inferior a 5%. Os parâmetros de compactação utilizados na construção das colunas foram os mesmos adotados na determinação da WRC. O solo compactado foi temporariamente selado com uma tampa permitindo o equilíbrio da umidade.

A Figura 4.13 apresenta o procedimento experimental do ensaio de hidratação. Após a compactação do solo na coluna (Figura 4.13a) e escarificação da última camada compactada (Figura 4.13b), as amostras de GCL, extraídas dos rolos e cortadas em um diâmetro de 250 mm, foram então colocadas sobre o solo do subleito. A Figura 4.13 apresenta os GCLs instalados nas colunas, sendo GCL1 na Figura 4.13c, GCL2 na Figura 4.13d, e GCL3 na Figura 4.13e. Os GCLs foram instalados com teor de umidade de recebimento (Tabela 5.1). Após a colocação das amostras, uma geomembrana (Figura 4.13f) foi colocada sobre o GCL na coluna para minimizar a evaporação potencial no espaço superior acima do GCL e para simular as condições de campo. Para garantir o contato total entre o GCL e o solo do subleito, uma camada de brita ensacada foi colocada sobre a geomembrana para aplicar uma tensão de 1 kPa e as colunas foram fechadas (Figura 4.13g). Essa metodologia é a mesma utilizada por Rayhani et al. (2011), Anderson et al. (2012), Sarabian e Rayhani et al. (2013) e Acikel et al. (2018a).

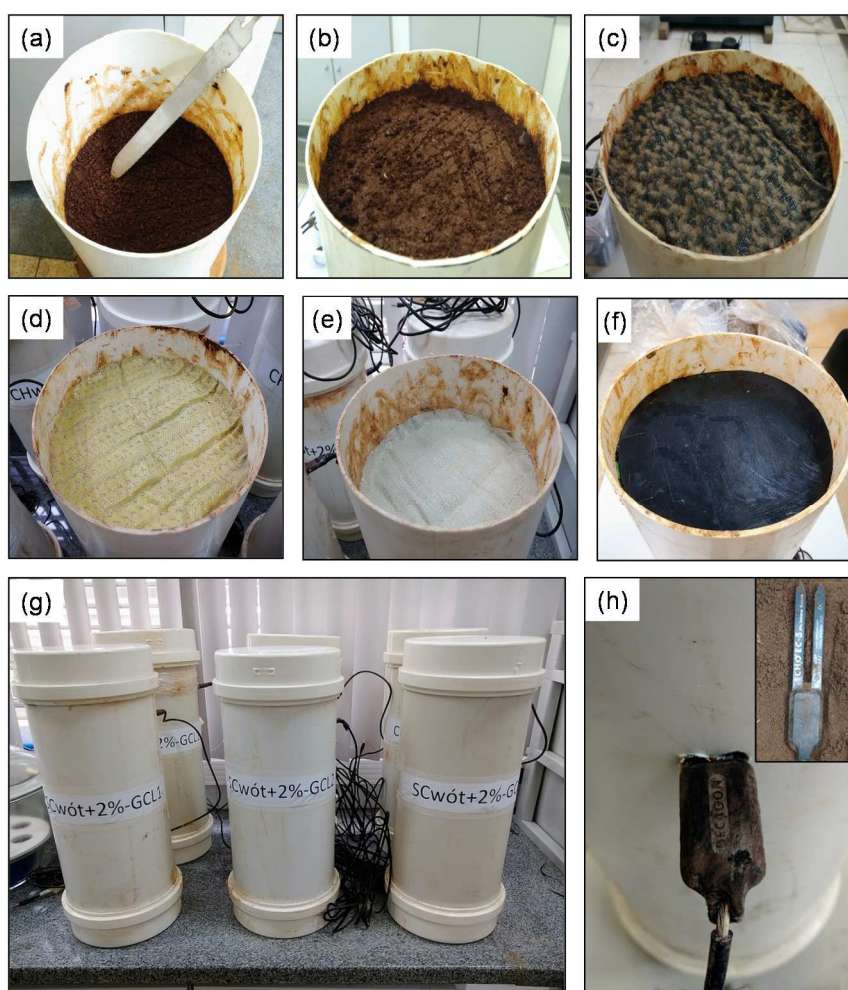


Figura 4.13 - Procedimento experimental do ensaio de hidratação: (a) processo de compactação do solo; (b) última camada de solo compactado; (c) instalação do GCL1; (d) instalação do GCL2; (e) instalação do GCL3; (f) instalação da geomembrana; (g) colunas; (h) sensores de umidade.

A umidade volumétrica do solo, no interior das colunas de hidratação, foi medida por meio de um sensor capacitivo (Figura 4.13h) instalados durante o processo de compactação do solo. O sensor EC-5 (EM50) mede o conteúdo volumétrico de água por meio da constante dielétrica do solo usando tecnologia de capacitância. O sensor usa uma frequência de 70 MHz, o que minimiza a salinidade e os efeitos de textura.

A configuração final do ensaio de coluna é mostrada na Figura 4.14. O GCL1 foi ensaiado nos dois solos e em ambos os teores de umidade de compactação. Adicionalmente, GCL2 e GCL3 foram ensaiados em ambos os solos no teor de umidade de w_{ót}+2%, totalizando 8 testes de coluna isotérmica. Exceto por um teste executado durante 18 semanas, todos os testes são executados durante 20 semanas. Os experimentos foram conduzidos em condições isotérmicas de ambiente controlado de 20±2°C.

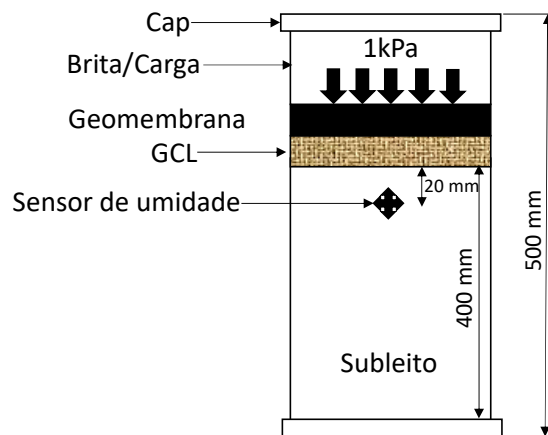


Figura 4.14 – Configuração final das colunas utilizadas nos ensaios para ensaios Isotérmicos.

Durante os ensaios, o teor de umidade gravimétrico do GCL foi monitorado semanalmente para avaliar a progressão da hidratação do GCL. O teor de umidade do GCL foi obtido por pesagem em balança digital de precisão de 0,01 g. Para minimizar a perda de umidade, o processo de medição de pesagem do GCL foi concluído em menos de 5 min e o sistema foi novamente selado. Ao final de cada ensaio, amostras de solo foram extraídas ao longo da altura da coluna (40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360 e 400 mm) para medir o teor de umidade gravimétrico do subleito. As leituras de umidade volumétrica do solo foram realizadas a cada 5 minutos.

Ao término dos períodos de hidratação, as amostras de GCL foram ensacadas e armazenadas em uma caixa térmica em uma sala com temperatura controlada. Cada amostra foi

então submetida a uma nova série de testes de caracterização, a fim de determinar os valores pós-hidratação de SI, CTC e condutividade hidráulica. A Figura 4.15 apresenta um fluxograma dos ensaios isotérmicos.

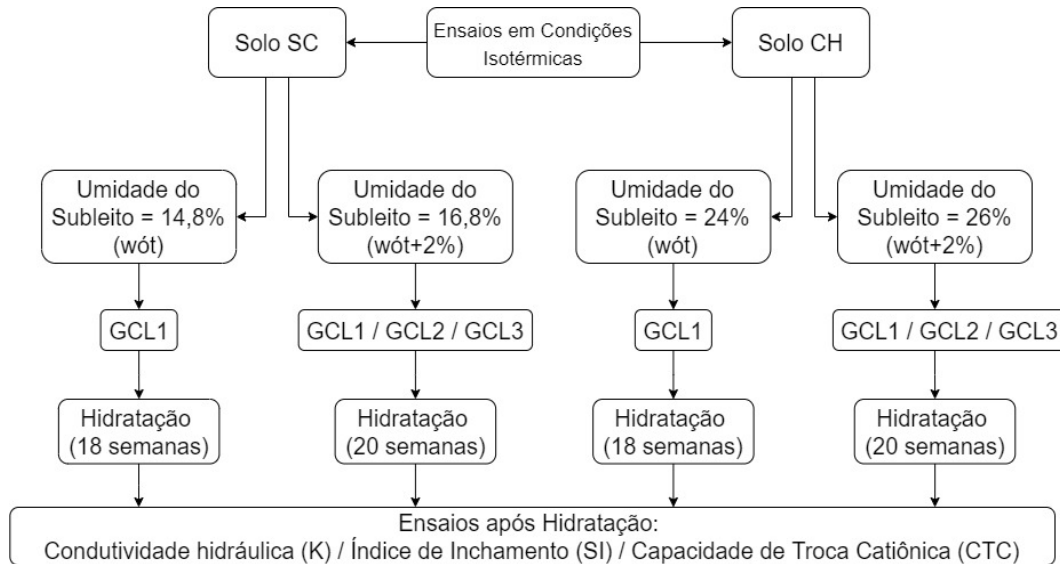


Figura 4.15 – Metodologia usada nos ensaios em condições isotérmicas.

4.4 Modelos físicos de *liners* com imposição de temperatura

Para a realização dos ensaios de hidratação dos GCLs pelo subleito quando submetidos a ciclos térmicos, foi construído um modelo físico que permite a instalação dos materiais do *liner* em camadas (solo de subleito + GCL + Geomembrana). Este modelo permite analisar a hidratação em uma condição de estresse (ciclos térmicos) e a sua relação e influência no comportamento de retração dos GCLs. A Figura 4.16 apresenta o modelo esquemático da caixa de ensaios desenvolvida para esta pesquisa, onde pode-se observar a disposição da geomembrana, do GCL, do solo de subleito compactado, da instrumentação e do sistema de aquecimento. Para avaliar a hidratação e o comportamento de retração do GCL nas condições de campo, as amostras foram submetidas a ciclos de aquecimento e resfriamento.

A Figura 4.17 apresenta a montagem da caixa de ensaios usada na pesquisa e processo de compactação do solo e instrumentação instalada. A caixa de ensaios foi construída em madeira plastificada, com dimensões internas de 650x360x600mm. As faces externas da caixa foram revestidas por uma camada de 6,0 cm de espessura de isopor (Figura 4.17a), com o objetivo de evitar a troca de calor do interior da caixa com o meio externo. As Figura 4.17b e

Figura 4.17c apresentam a caixa montada. O subleito na caixa foi compactado em 10 camadas de solo com 40 mm cada (Figura 4.17d), com grau de compactação de 95% em relação aos parâmetros ótimos. Mesmo com a variação do teor de umidade do solo, o índice de vazios foi mantido, adotando-se uma variação neste último parâmetro inferior a 5%. Os parâmetros de compactação utilizados na construção do modelo físico foram os mesmos adotados na determinação da WRC. O solo compactado era temporariamente selado com uma tampa permitindo o equilíbrio da umidade.

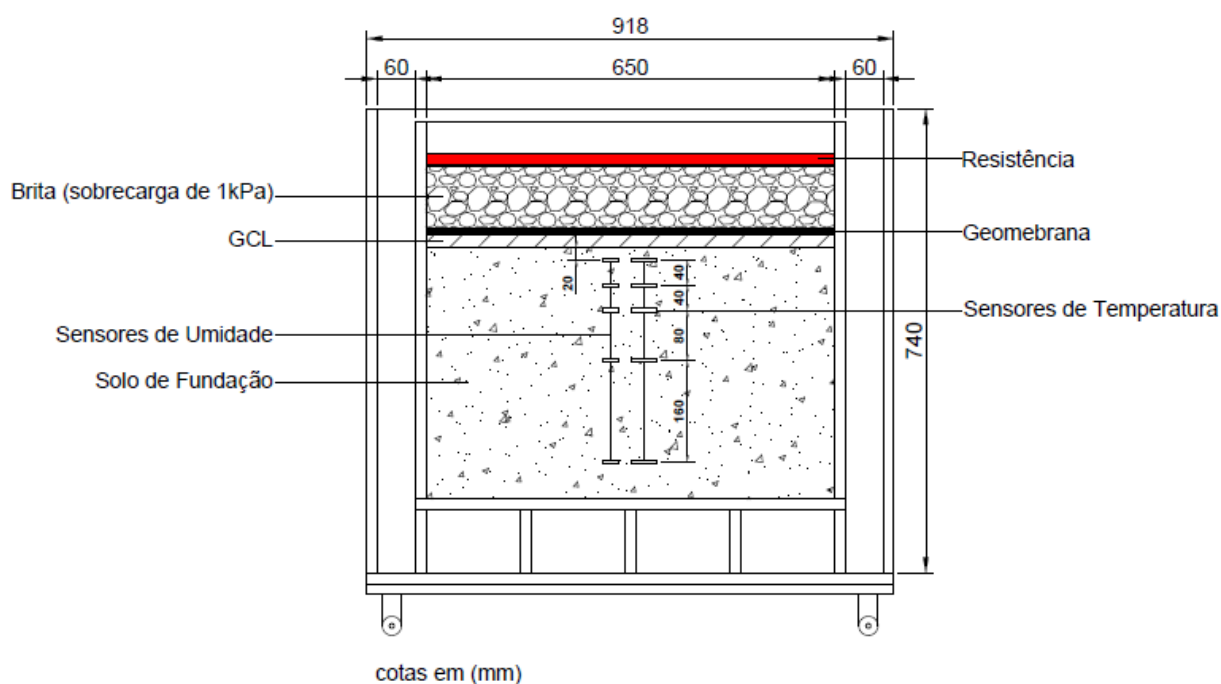


Figura 4.16 - Modelo esquemático da caixa de ensaios utilizada nesta pesquisa.

Os teores de umidade do subleito e a temperatura dentro do sistema foram monitorados com o uso de sensores inseridos em diferentes profundidades do subleito (Figura 4.17e). Para o monitoramento do teor de umidade do subleito foram utilizados sensores de umidade volumétrica EC-5 e *datalogger* EM50, usados também nos ensaios isotérmicos. O controle da temperatura aplicada no sistema foi monitorado por termopares, sendo estes constituídos de material rígido de aço inoxidável e com capacidade de leitura de temperaturas na faixa de -55 a 125°C com uma precisão de $\pm 0,25^\circ\text{C}$. Os sensores para medição do teor de umidade volumétrica inseridos nos solos foram calibrados previamente em corpos de provas compactados com os mesmos solos e parâmetros de compactação utilizados nos ensaios. A

Figura 4.18 apresenta os sensores de umidade e temperatura instalados nos modelos físicos.

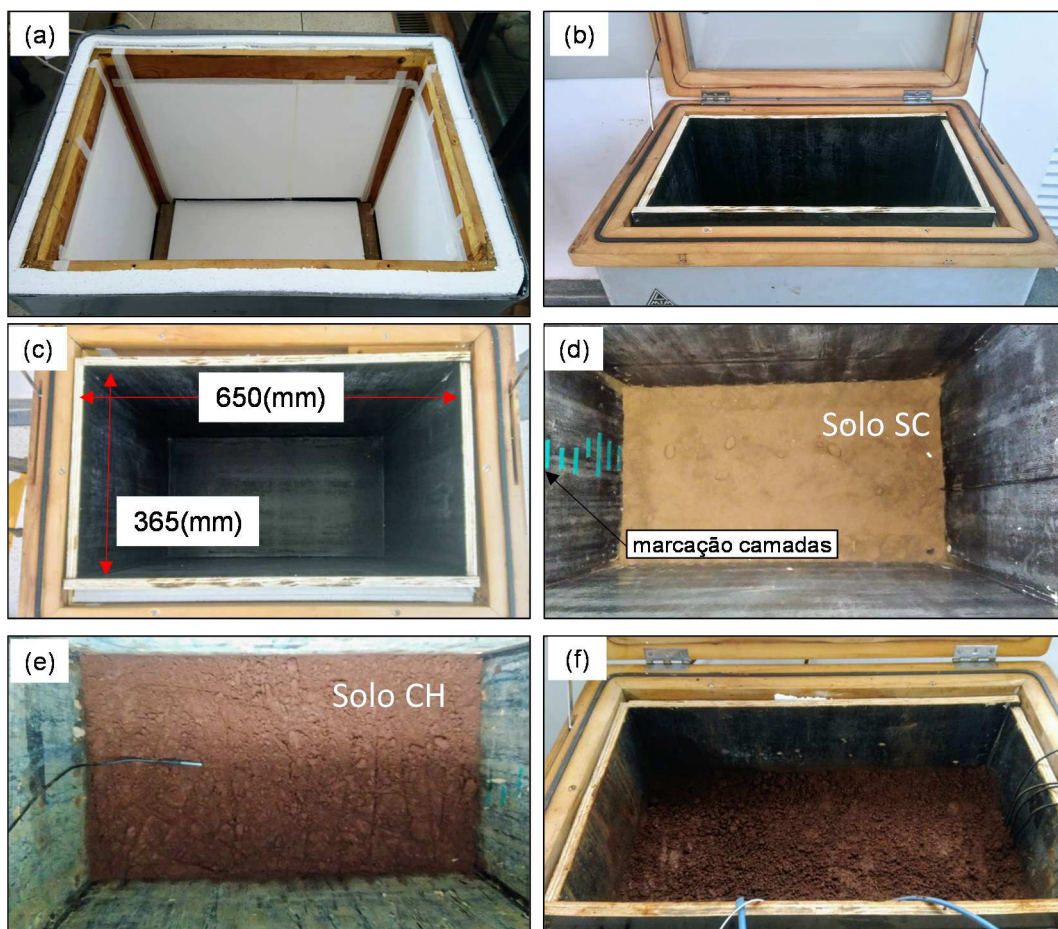


Figura 4.17 - Montagem da Caixa: (a) camada de isolamento; (b) caixa de ensaios; (c) detalhe das medidas; (d) marcação das camadas; (e) solo compactado; (f) última camada compactada.

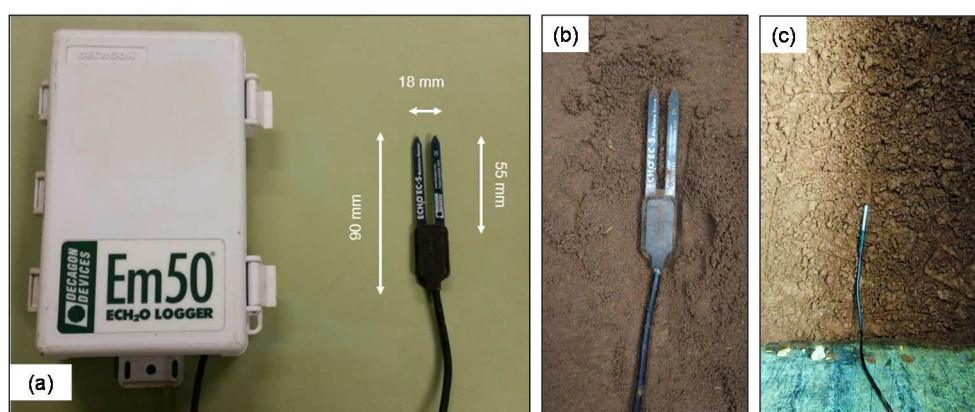


Figura 4.18 - Instrumentação: (a) sensor de umidade EC-5 e datalogger Em50; (b) sensor de umidade EC-5; (c) sensor de temperatura – Arduino.

O GCL foi instalado na caixa de ensaio, sobre o solo compactado, com teor de umidade de recebimento e cortado com o tamanho de 360x650 mm. Antes de instalar o GCL na caixa,

este foi unido a uma geomembrana de igual tamanho, e o conjunto (GCL+Geomembrana) foi ancorado, por um sistema de garras, nas extremidades de menor dimensão em um painel metálico. A Figura 4.19 apresenta a montagem dos geossintéticos no sistema de ancoragem. Este painel foi colocado dentro da caixa de ensaios em contato com o solo, simulando a ancoragem que estes dois materiais ficam submetidos nos taludes laterais e fundo dos aterros sanitários. Este painel foi proposto para ser utilizado como forma de medir a retração do GCL durante o ensaio. Modelos semelhantes de ancoragem foram utilizados em diversos ensaios de análise de retração em laboratório (Koerner, R. M; Koener, 2005; Thiel et al., 2006) e no estudo de modelo físico de Rowe et al. (2013).

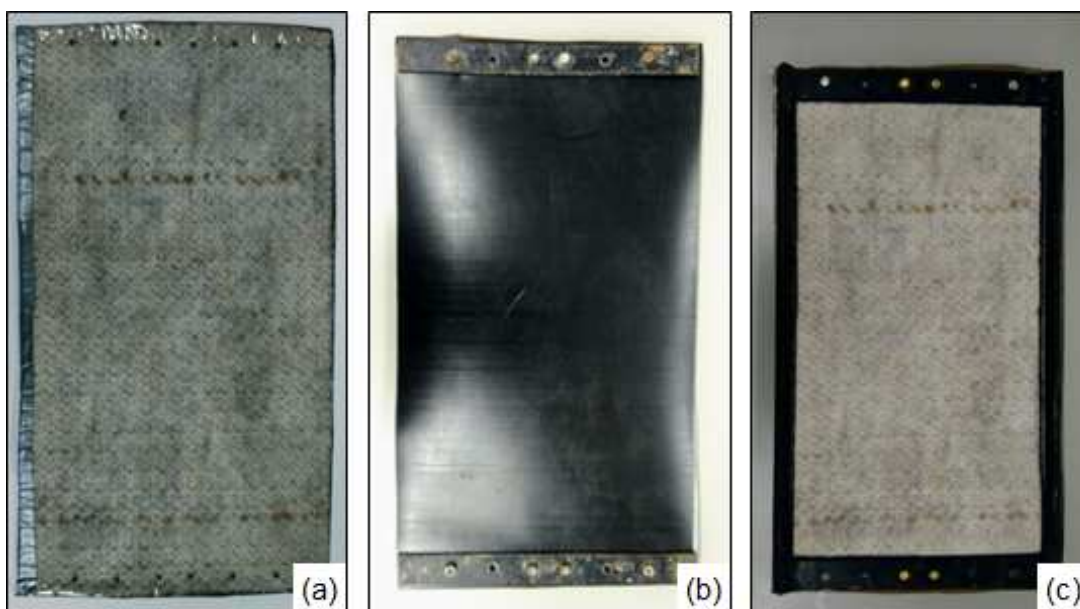


Figura 4.19 – Ancoragem dos geossintéticos: (a) corpo de prova de GCL; (b) geomembrana ancorada (vista superior); (c) GCL e Geomembrana ancorados no sistema (vista inferior).

A Figura 4.20 apresenta as etapas finais de montagem da caixa de ensaios. Dando sequência a confecção do modelo físico, o sistema de ancoragem formado pelo conjunto (GCL+Geomembrana) foi instalado na caixa de ensaios (Figura 4.20a). Uma sobrecarga foi aplicada com uso de brita (Figura 4.20b), instalada sobre o sistema de ancoragem. Nesta pesquisa, o modelo físico conta com uma sobrecarga de 1 kPa que garante o contato do GCL com o subleito e simula a camada de solo de proteção. Esta sobrecarga tem mesma magnitude da utilizada nos ensaios para determinação da curva de retenção de água dos solos e do GCL.

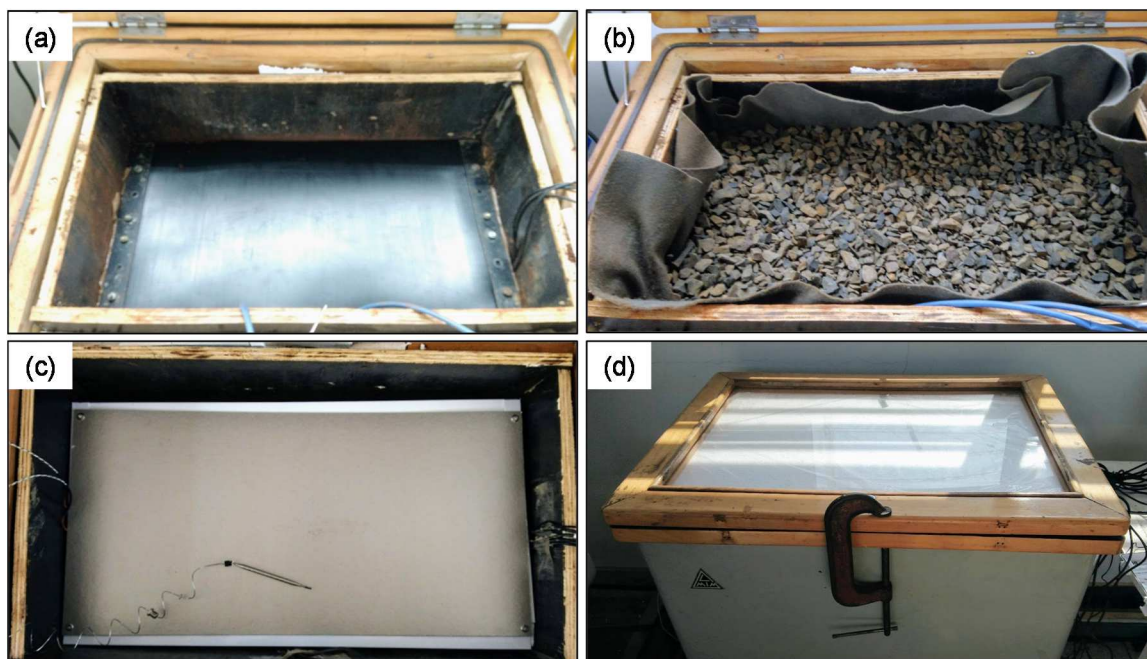
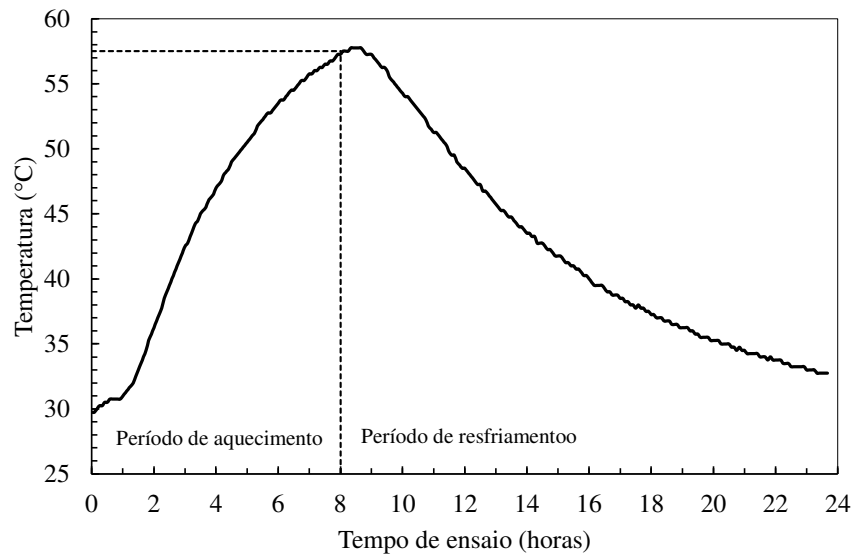


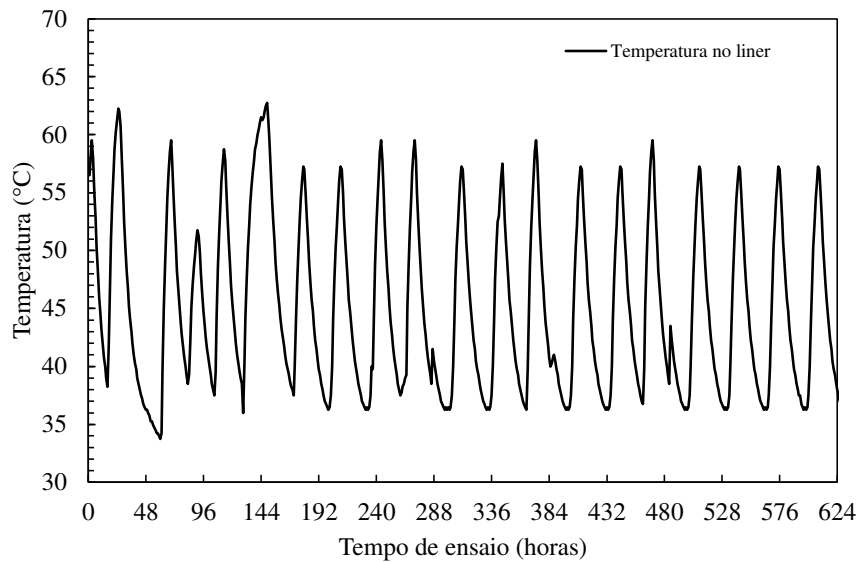
Figura 4.20 – Etapa final de montagem da caixa: (a) ancoragem com GCL e geomembrana; (b) sobrecarga com brita; (c) sistema de aquecimento; (d) vedação e fechamento.

Com a utilização de uma resistência (placa de mica), ilustrado na Figura 4.20c, foi imposto um período de aquecimento de 8 horas com uma temperatura de $57,5 \pm 4^\circ\text{C}$ na superfície do GCL, seguido de um período de resfriamento de 16 horas. Desta forma, o ciclo total de variação térmica foi de 24h. A Figura 4.21 apresenta o ciclo de aquecimento e resfriamento diário e perfil de variação de temperatura ao longo do ensaio. Por fim, o sistema foi vedado e fechamento para início dos ensaios (Figura 4.20d). Modelos físicos similares foram propostos por Rayhani et al. (2009) e Rowe et al., (2013), validando a adequação da dimensão da caixa de ensaios proposta e do sistema de aquecimento para simular uma camada de *liner* em laboratório.

O programa experimental dos ensaios térmicos foi realizado com apenas um GCL (GCL1), e com os dois solos lateríticos. O subleito SC foi preparado com um teor de umidade de 16,8 % ($w_{ót}+2\%$) e o subleito CH foi preparado em dois teores de compactação sendo 24% ($w_{ót}$) e 26% ($w_{ót}+2\%$). O ensaio com o solo $\text{CH}_{w_{ót}}$ durou 30 dias e os ensaios $\text{SC}_{w_{ót}+2\%}$ e $\text{CH}_{w_{ót}+2\%}$ duraram, respectivamente 56 e 63 dias.



(a)



(b)

Figura 4.21 - Ciclo de aquecimento e resfriamento: (a) Perfil padrão de temperatura diária; (b) Perfil de temperatura no tempo.

Para análise do efeito da hidratação na retração dos painéis de GCLs, foram realizadas medidas de deformação nos GCLs em intervalos de tempo de 7 a 20 dias até o final dos ciclos de ensaios. O processo de medição da retração foi realizado com uso de régua, tal como ilustra a Figura 4.22. Ao final dos períodos de hidratação, os painéis de GCL foram ensacados e armazenadas sala com temperatura controlada. Cada amostra foi então submetida a uma nova série de ensaios, a fim de determinar os valores pós-hidratação de SI, CTC e condutividade hidráulica. A Figura 4.23 apresenta um fluxograma dos ensaios realizado na condição de ciclos térmicos.

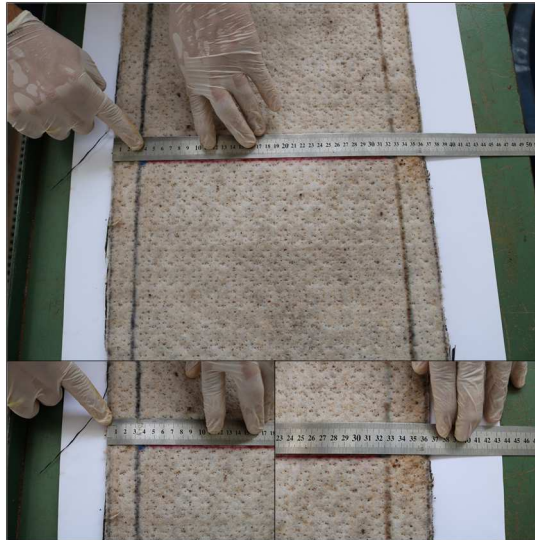


Figura 4.22 - Medição da retração no corpo de prova de GCL.

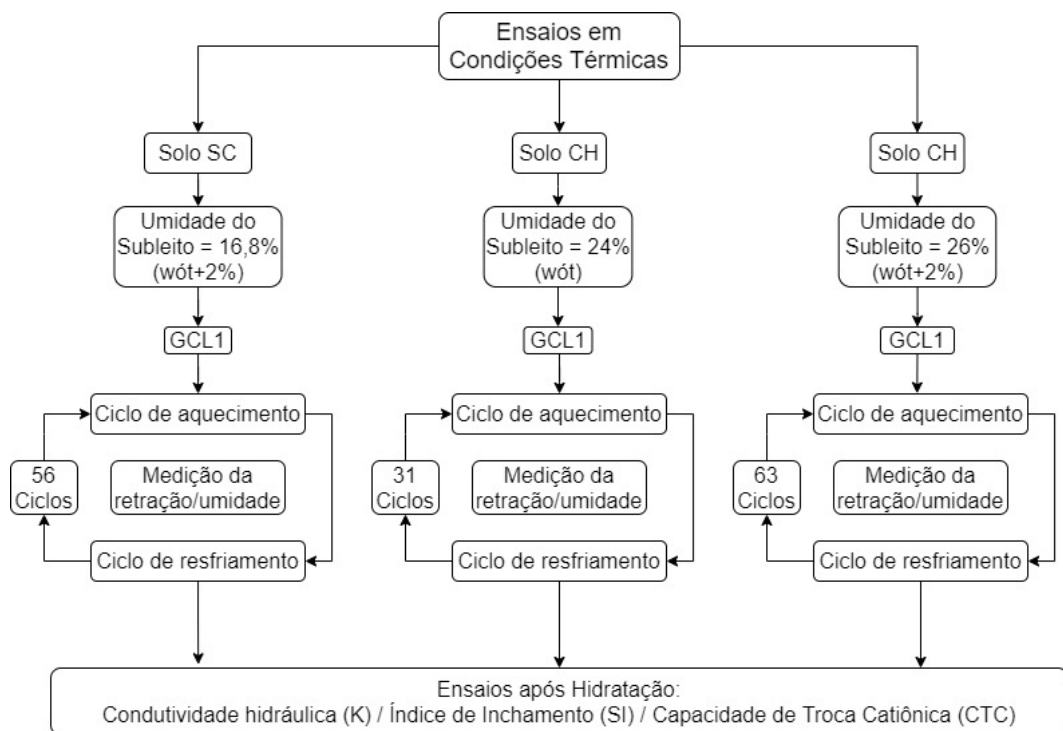


Figura 4.23 – Metodologia usada nos ensaios em condições térmicas.

5. Resultados

5.1 Propriedades dos GCLs

A

Tabela 5.1 apresenta os resultados da caracterização dos GCLs utilizados nesta pesquisa. O GCL1 apresenta uma bentonita granular composta por um geotêxtil de suporte do tipo tecido (GTT) e um geotêxtil de cobertura não tecido (GTNT). O GCL2 consiste em um núcleo de bentonita em pó aditivada com sódio composta por um geotêxtil de suporte do tipo tecido (GTT) e um geotêxtil de cobertura não tecido (GTNT). O GCL3 é composto por uma bentonita em pó, um geotêxtil de suporte do tipo tecido (GTT) revestido com uma manta não tecida de PET e um geotêxtil de cobertura do tipo tecido (GTT).

Tabela 5.1 - Caracterização GCLs utilizados na pesquisa.

| Componente | Propriedades | GCL1 | GCL2 | GCL3 | Referência | |
|--|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------|
| | | Granular | Pó | Pó | | |
| Bentonita | Textura | | | | - | |
| | Distribuição Granulométrica (mm) | D ₁₀ | - | - | - | ASTM D 422 |
| | | D ₃₀ | - | - | - | |
| | | D ₆₀ | - | - | 0,001 | |
| | | D ₉₀ | 0,3 | 0,07 | 0,04 | |
| | Índice de Plasticidade (%) | 252 | 253 | 273 | ASTM D 4318 | |
| | Massa seca por unidade de área (g/m ²) | 4964,0 | 3878,5 | 4375,1 | ASTM D 5993 | |
| | Índice de inchamento (ml/2g) | 25 | 18 | 25 | ASTM D 5890 | |
| | Perda de fluído (ml) | 18 | 32 | 28 | ASTM D 5891 | |
| | Conteúdo de Esmectita (%)* | 80 | 80 | 80 | - | |
| Capacidade de troca catiônica (meq/100g) | 140 | 110 | 163 | - | | |
| Geotêxtil Suporte | Tipo | GTT | GTT | GTT | - | |
| | Massa seca por unidade de área(g/m ²) | 130 | 100 | 118 | ASTM D 5261 | |
| | Polímero | PP | PP | PP | - | |
| Geotêxtil Cobertura | Tipo | GTNT | GTNT | GTT | - | |
| | Massa seca por unidade de área(g/m ²) | 200 | 270 | 237 | ASTM D 5261 | |
| | Polímero | PP | PP | PP | - | |
| | Tratamento Térmico | Sim | Sim | Não | - | |
| GCL | Ligação | Agulhado | Agulhado | Costurado | - | |
| | Espessura (mm) | 7,0 | 7,0 | 6,0 | ASTM D 1776 | |
| | Umidade de recebimento (%) | 21 | 10 | 11 | ASTM D 2216 | |
| | Umidade de saturação - w _{ref} sobre 1 kPa (%) | 182,7 | 214,2 | 267,7 | ASTM D 2216- | |
| | Resistência à tração (kN/m) | 12,0 | 9,8 | 30,0 | ASTM D 5887 | |
| | Peel test (N/m) | 150 | 95 | - | ASTM D 6496 | |
| | Condutividade hidráulica (m/s) | 1,2x10 ⁻¹¹ | 1,2x10 ⁻¹¹ | 4,8x10 ⁻¹¹ | ASTM D 5887 | |

* Valores máximos fornecidos pelos fabricantes.

GTT = Geotêxtil Tecido, GTNT = Geotêxtil Não Tecido, PP = Polipropileno.

Os resultados de índice de inchamento das bentonita e os valores de capacidade de troca catiônica (CTC) mostram-se dentro do esperado para GCLs (>70 meq/100g) em função da mineralogia encontradas. Os resultados de condutividade hidráulica saturada dos GCLs mostram que todos os materiais apresentam os valores esperados de 10^{-11} m/s e massa seca por unidade de área maiores do que 3800 g/m^2 . Quanto o teor de umidade de recebimento, o GCL1 apresenta-se com teor de umidade (21%) mais elevado do que os demais, sendo respectivamente 10% e 11% para os GCLs 2 e 3.

A Figura 5.1 apresenta a curva de distribuição granulométrica das bentonitas usadas nos três GCLs. Comparativamente, verifica-se que mesmo nos GCLs com bentonita em pó como é o caso dos GCL2 e GCL3 existe uma parcela significativa de material granular em todas as amostras. Esta variabilidade nos tamanhos dos grãos da bentonita do GCL é um parâmetro que influencia o processo de hidratação.

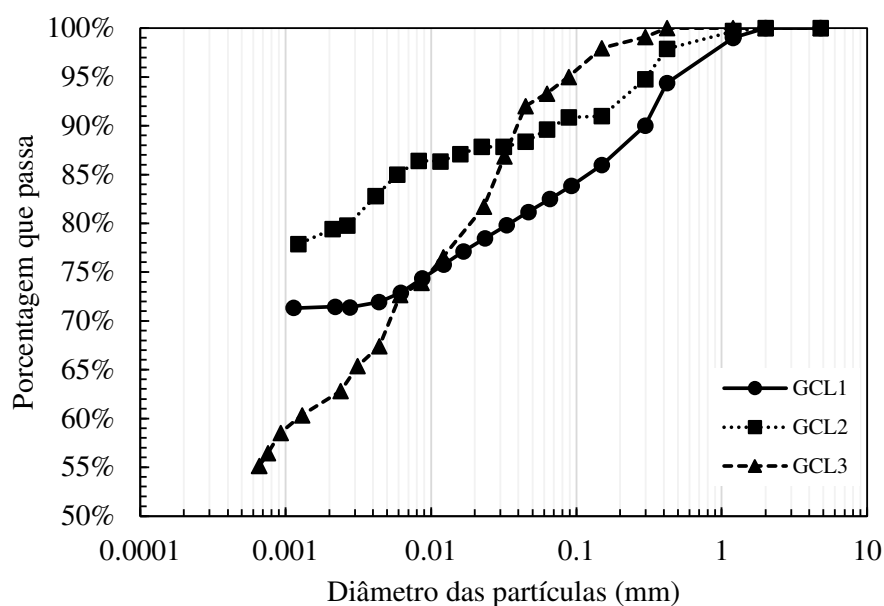


Figura 5.1 - Granulometria da bentonita dos GCLs.

As Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam análises mineralógicas das bentonitas dos GCLs 1, 2 e 3, respectivamente, usando faixa de varredura Padrão 5 a 90° . Os resultados confirmaram a presença de Esmectita e Montmorilonita em todas as bentonitas. Há também a presença de minerais de Quartzo em todas as bentonitas estudadas. Porém, GCL 2 apresenta em sua mineralogia o argilo-mineral Caulinita, o que é um aspecto interessante, visto que esta

bentonita é extraída no estado da Paraíba-Brasil, região com solos residuais tropicais. A presença da Caulinita é um indicativo de que a bentonita do GCL2 tende a ser menos reativa, e consequentemente apresentar características de expansão menores que a das bentonitas sódicas naturais. Mesmo tratada com sódio, esta bentonita não alcançou o mínimo de 25 ml/2g no ensaio de inchamento.

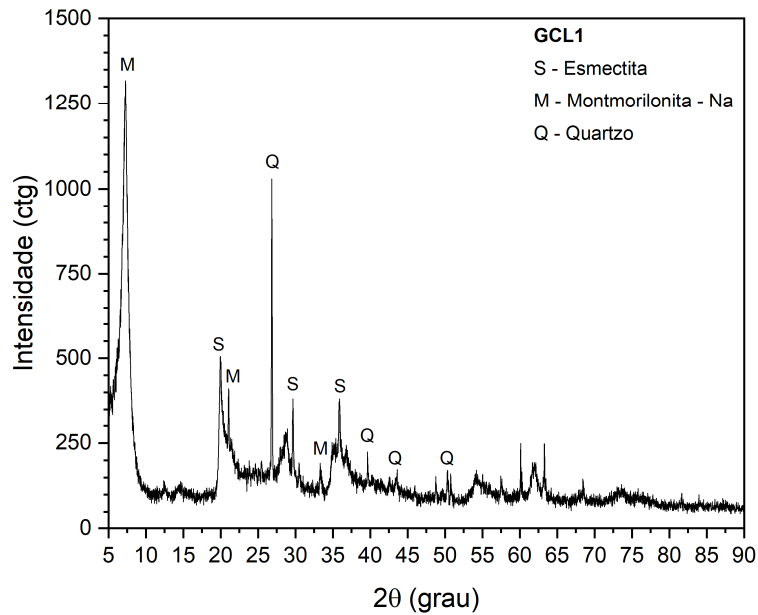


Figura 5.2 – Difração de Raio X - Bentonita do GCL1.

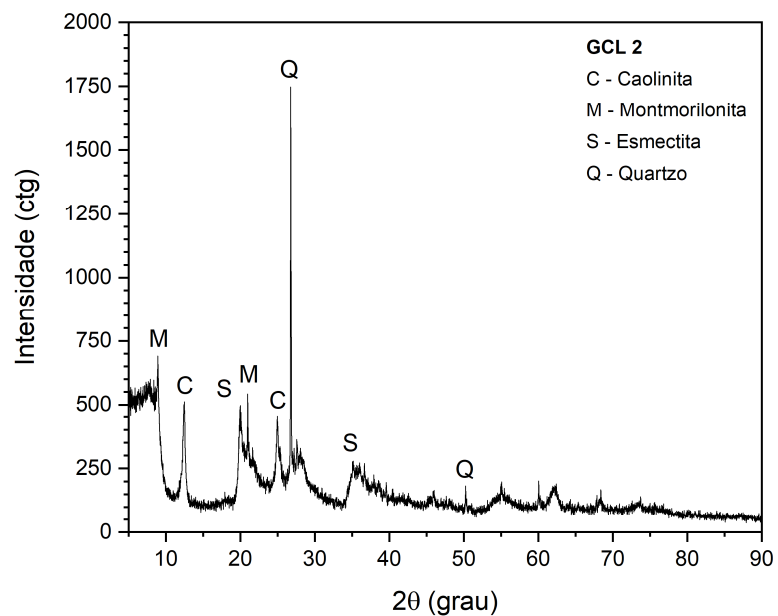


Figura 5.3 – Difração de Raio X – Bentonita do GCL2.

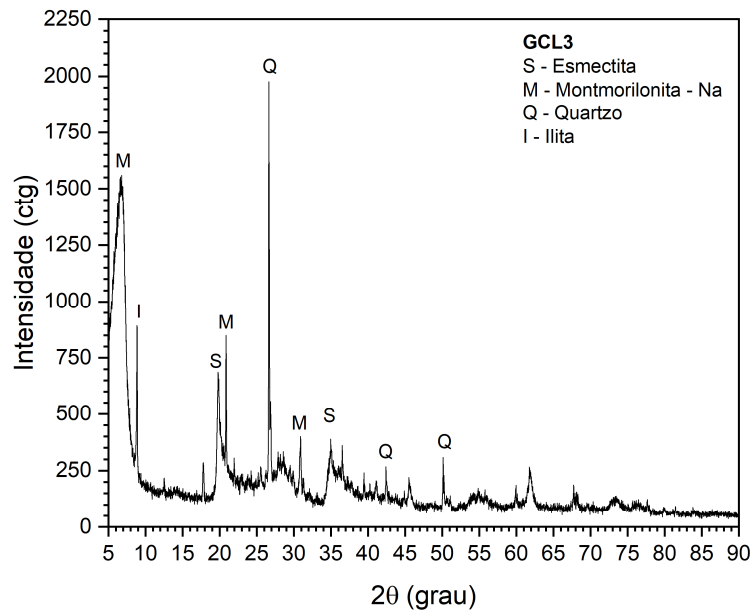


Figura 5.4 – Difração de Raio X – Bentonita do GCL3.

As curvas de retenção de água (CRA) dos GCLs foram obtidos pela técnica do papel filtro (ASTM D5298) adaptada por Acikel et al. (2015) e Touze et al. (2021). As WRC dos GCLs foram obtidas usando um processo de umedecimento, conforme mostrado na Figura 5.4. Os parâmetros de ajuste são apresentados na Tabela 5.2. Pode-se observar que a curva de retenção do GCL1 com bentonita do tipo granular apresentar uma curva bem gradual, mostrando a presença de diversos tamanhos de poros na estrutura da bentonita. O GCL2, que apresenta uma bentonita do tipo pó, mas com uma significativa quantidade de partículas maiores (areia) em sua composição, tem uma curva bimodal resultado da variação brusca na distribuição de poros. O GCL 3, constituído de uma bentonita em pó, apresenta uma curva de retenção mais gradual do que a do GCL2 com um elevado valor de saturação. Os três GCLs apresentam diferenças significativas em seu valor de ponto de entrada de ar e no teor de umidade residual. Importante notar também a diferença na inclinação correspondente a zona de transição. O GCL2 apresentou a maior inclinação, seguido do GCL1 de bentonita sódica granular. O GCL3, composto por bentonita sódica em pó, apresentou a menor inclinação desse trecho. Esse trecho é importante, uma vez que descreve a variação da sucção com a umidade na faixa correspondente a troca de umidade do GCL com o subleito.

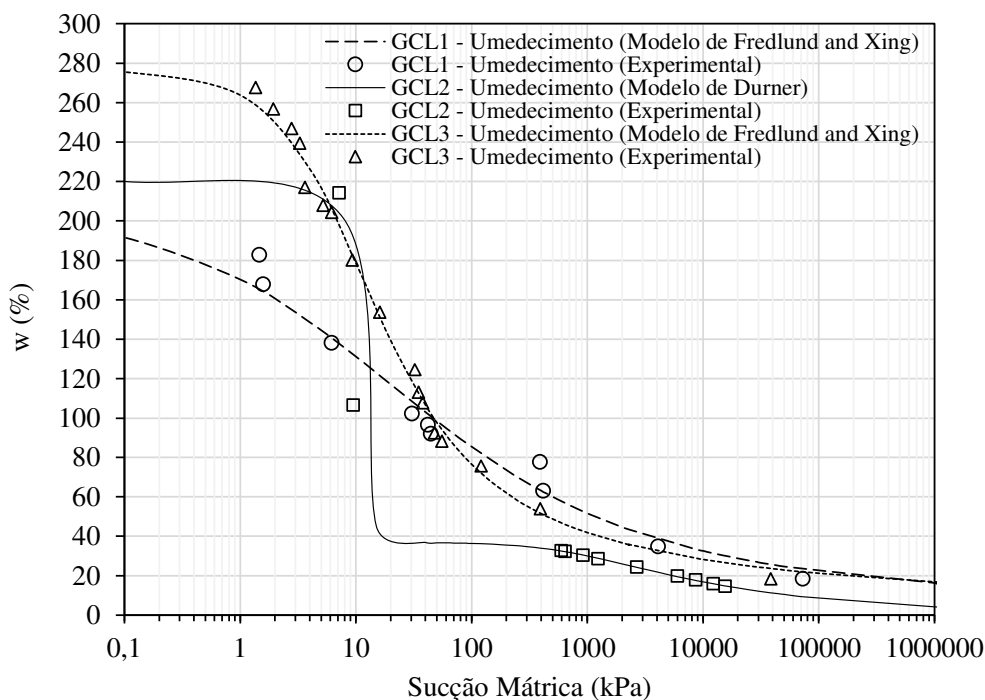


Figura 5.5 - Curvas de retenção de água dos GCLs (umedecimento).

Tabela 5.2 - Parâmetros de ajuste da curva de retenção dos GCLs (umedecimento).

| GCL | Parâmetros de ajuste Fredlund e Xing – (umedecimento) | | | | | | | |
|------|---|-------------------|----------------|---------------------|------------|---------------------|------------|------------|
| | θ_s (%) | θ_r (%) | a_f (kPa) | n_f - | m_f - | R^2 - | | |
| GCL1 | 205,51 | 0,16337 | 74,647 | 0,46592 | 1,4903 | 0,97522 | | |
| GCL3 | 276,48 | 0,00085121 | 60,031 | 1,1545 | 1,0622 | 0,99362 | | |
| GCL2 | Parâmetros de ajuste Durner 1995 – (umedecimento) | | | | | | | |
| | θ_s (%) | θ_r (%) | w_1 - | α_1 (kPa) | n_1 - | α_2 (kPa) | n_2 - | R^2 - |
| | 220 | 0,00014071 | 0,44724 | 0,83167 | 14,237 | 0,0013378 | 1,2986 | 0,99999 |

5.2 Resultados dos ensaios isotérmicos de hidratação

5.2.1 Efeito do teor de umidade e do tipo de subleito na hidratação de GCL

A Figura 5.6 apresenta os dados de teor de umidade gravimétrica do GCL1 e dos dois diferentes subleitos (CH e SC) ao longo do processo de hidratação do GCL por colunas isotérmicas. Cabe ressaltar que o GCL1 é composto por uma camada de bentonita granular (Tabela 1). A hidratação GCL é expressa em termos de teor de umidade gravimétrica (w_{GCL}) no eixo vertical esquerdo do gráfico, enquanto o teor de umidade gravimétrica do subleito (w_{sub}) é apresentado no eixo vertical direito. Ambos os subleitos (SC e CH) foram compactados no teor ótimo de umidade (w_{ot}) e 2% acima ($w_{ot+2\%}$). Os resultados mostram

que o subleito compactado a 2% acima do teor ótimo de umidade promoveu aumento na hidratação do GCL1 em até 70% nos dois tipos de subleitos. No entanto, o tipo de subleito teve efeito na capacidade de hidratação do GCL1, uma vez que o subleito CH resultou em uma menor hidratação em comparação com o solo SC. Além disso, o GCL1 foi hidratado mais rapidamente quando em contato com o subleito SC do que o solo CH, mesmo este tendo um teor de umidade inicial significativamente inferior. Ainda, na Figura 5.6a, observa-se que o tempo necessário para equilibrar a hidratação do GCL1 foi o mesmo para os subleitos SC e CH compactados a 2% acima do teor de umidade ótima, com o equilíbrio acontecendo em torno de 12 semanas. Os ensaios de hidratação do GCL1 conduzidos com subleitos no teor ótimo de umidade de compactação mostram que o equilíbrio da hidratação do GCL1 aconteceu somente após 16 semanas para o subleito CH (Figura 5.6b), enquanto o subleito SC hidratou o GCL1 em um período menor, de 12 semanas (Figura 5.6a). De maneira geral, observou-se uma maior dificuldade do GCL1 em se hidratar quando em contato com solos mais finos, não só em termos do teor final de umidade, mas também em termos de velocidade de hidratação ao longo do tempo. Este fato pode ser explicado pelos níveis de sucção do solo CH terem sido majoritariamente maiores durante a hidratação GCL1 do que a observada no solo SC.

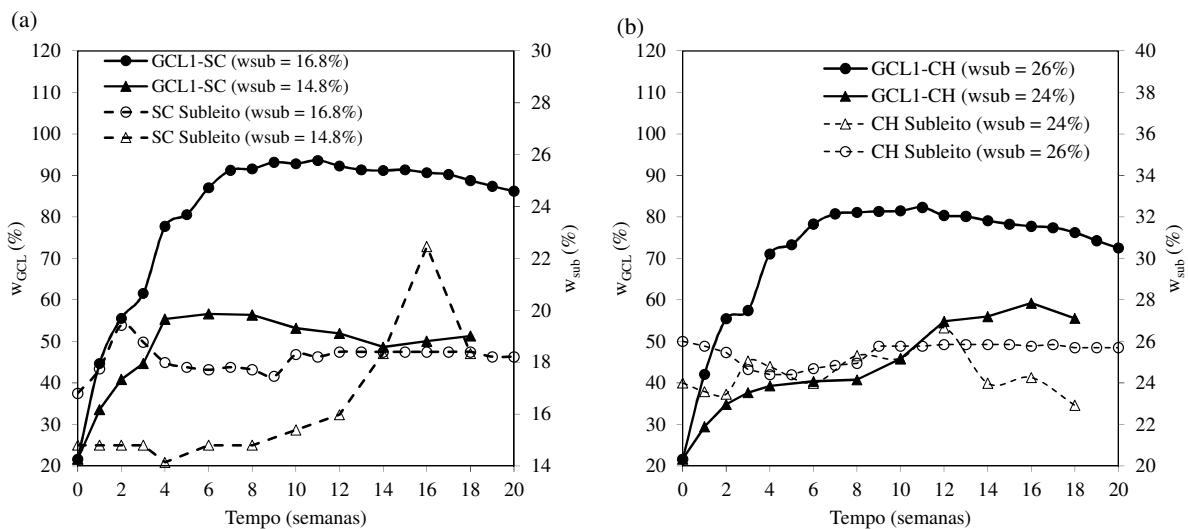


Figura 5.6 - Teores de umidade de GCL1 e subleitos ao longo da hidratação em condições isotérmicas em contato com: (a) o solo SC; (b) o solo CH.

Quanto à variação do teor de umidade do subleito (durante a hidratação do GCL), verificou-se que as mudanças foram pequenas e oscilaram durante a hidratação do GCL em ambos solos. A pequena alteração no teor de umidade do subleito é esperada, uma vez que os

poros do solo de subleito são muito maiores que os poros do GCL. O subleito SC, na condição 2% acima da umidade ótima, demonstrou aumentos no teor de umidade durante as semanas iniciais de hidratação (Figura 5.6a) do GCL, enquanto foi verificada redução do teor de umidade o solo SC compactado no teor de umidade ótima. O aumento do teor de umidade no solo durante a hidratação pode ser explicado pela transferência de umidade das camadas mais inferiores do solo dentro da coluna para as camadas superficiais do solo, o que é gerado por um fluxo ascendente estabelecido pela diferença de sucção entre o GCL e o solo do subleito. Diferentemente do solo SC, o solo CH mostrou reduções nos teores de umidade durante a hidratação para ambas as condições de compactação (Figura 5.6b). Neste caso, podemos observar a diferença de velocidade na movimentação de umidade dentro da coluna para o solo argiloso. O solo CH dificultou a movimentação de água de pontos mais profundos, fazendo com que a troca de umidade entre os materiais ocorresse em regiões mais superficiais do subleito. Essa latência na transferência de umidade do solo argiloso é justificada pela granulometria deste solo, mas fino que o solo SC, bem como os valores de sucção elevados acarretando uma transferência de umidade lenta. Uma pequena variação de umidade nesses solos representa uma variação significativa nos valores de sucção. Como o solo tendeu a secar, enquanto o GCL tendeu a umedecer, ocorreu um aumento significativo do valor de sucção do solo que dificultou a hidratação do GCL.

A Figura 5.7 compara os resultados da hidratação do GCL1 por solos lateríticos com os resultados de ensaios da literatura também realizados em condições isotérmicas com subleitos formados em zonas de clima temperado. O GCL1 utilizado nesta pesquisa tem características semelhantes aos GCLs usados nos estudos citados na literatura, embora nesses estudos o geotêxtil tecido dos GCLs estivesse em contato com o subleito. Os resultados são apresentados em termos do aumento do teor de umidade gravimétrico do GCL normalizado pelos respectivos w_{ref} . As curvas de retenção de água destes subleitos também são apresentadas para entender a influência no processo de hidratação do GCL. Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados usando subleitos com grande parcela de partículas granulares (Figura 5.7a) mostram a hidratação do GCL pelo solo laterítico SC com uma velocidade inicial semelhante à do solo SC estudado por Anderson et al. (2012), mesmo com o GCL sendo hidratado com geotêxtil não tecido em contato com o solo. No entanto, a análise realizada por Anderson et al. (2012) usou o GCL com um teor de umidade inicial menor do que valor encontrado nesta pesquisa. Quando comparamos a capacidade de hidratação dos solos lateríticos estudados nesta pesquisa com solos formados em zonas de clima temperado podemos observar que a velocidade e taxa de

hidratação inicial é semelhante. No entanto, a transferência de umidade dos subleitos lateríticos para o GCL é comprometida após 8 semanas de hidratação. Após esse período inicial, o subleito com solos formados em zonas de clima temperado continua proporcionando incrementos na umidade do GCL, diferente do observado no solo laterítico. Comparando as CRAs dos solos (Figura 5.7b), nota-se que a forma da CRA dos solos lateríticos conduz para níveis mais altos de sucção do que o subleito SC de Anderson et al. (2012). Isso se deve ao comportamento bimodal das CRA dos solos lateríticos. A curva do solo laterítico SC apresenta, em seu primeiro trecho, variação significativa dos valores de sucção para pequenas variações de umidade, razão pela qual nas primeiras semanas de hidratação o subleito transfere água com relativa facilidade para o GCL. No entanto, com o incremento da sucção e entrada no segundo trecho da curva de retenção, os valores de sucção do subleito são da ordem de 10000 kPa, dificultando o processo de hidratação do GCL. É válido ressaltar, no entanto, que um solo puramente arenoso como o usado no estudo de Acikel et al. (2018a) com um GCL semelhante ao GCL1 apresentou teores de umidade menores que o hidratado pelo subleito laterítico SC.

Em subleitos argilosos (Figura 5.7c), o solo laterítico CH demonstrou uma maior capacidade de hidratação dos GCL que o solo CH com presença de caulinita de Acikel et al. (2018a). Importante informar que os teores de umidade inicial dos subleitos foram semelhantes em ambos trabalhos. Observa-se que o solo CH laterítico não apresentou uma CRA bimodal e os níveis de sucção foram mais baixos do que para os outros solos. Comparando os resultados com o solo CH de Queensland de Acikel et al. (2018a), é interessante notar que a capacidade de hidratação inicial foi muito semelhante ao do solo laterítico CH, mas houve posteriormente, após 8 semanas, uma maior capacidade de hidratação GCL no solo CH laterítico. Este comportamento pode ser explicado comparando-se o formato das curvas de retenção destes solos (Figura 5.7d). O valor de entrada de ar do solo CH Queensland é maior que o solo CH laterítico. Isso significa que o processo de transferência de água do solo CH Queensland de Acikel et al. (2018a) ocorre para elevados valores de sucção da ordem 2000 kPa enquanto que para o solo CH laterítico é na faixa de 100 kPa. É interessante observar que até 20 kPa as curvas dos solos CH Queensland e CH laterítico se sobrepõe, após esse valor o solo laterítico CH já apresenta variação da sucção com o teor de umidade, diferentemente do observado para o solo CH Queensland.

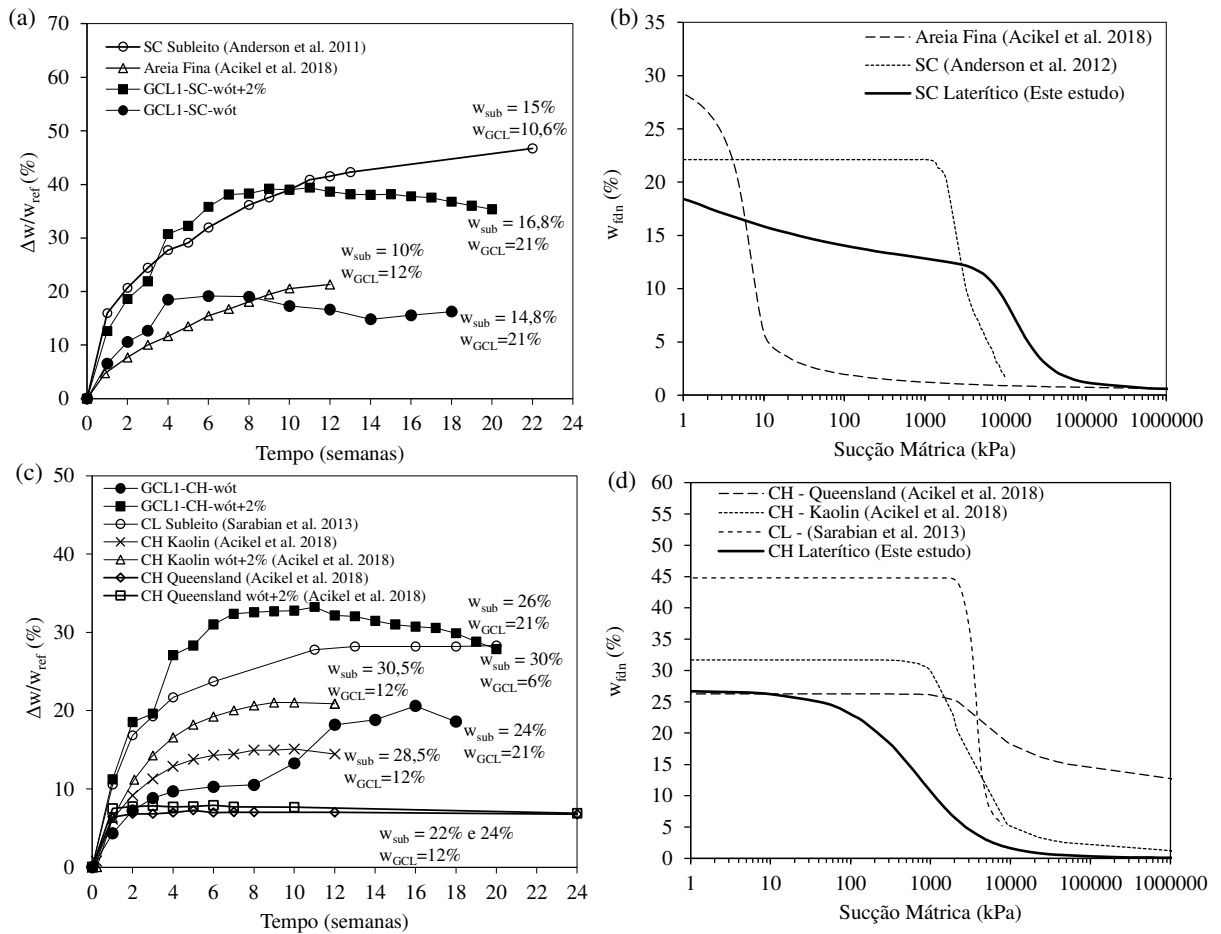


Figura 5.7 - Comparação da hidratação de GCL1 por diferentes subleitos: (a) Hidratação de GCL por subleitos granulares; (b) CRA dos subleitos granulares; (c) hidratação de GCL de subleitos argilosos; (d) CRA dos subleitos argilosos.

5.2.2 Efeito do tipo de GCL na hidratação

A Figura 5.8 compara os resultados dos ensaios de hidratação em condições isotérmicas, para os três GCLs avaliados. Foram comparados os processos de hidratação dos GCLs nos dois solos de subleito, ao longo de 20 semanas. Nestes casos, ambos os subleitos foram compactados com 2% acima da umidade ótima de compactação. A Figura 5.8a e Figura 5.8b apresentam os resultados para os três GCLs em contato com solo SC e CH, respectivamente. Já as Figura 5.8c e Figura 5.8d apresentam os resultados de hidratação normalizada (w/w_{ref}) dos três GCLs em contato com solo SC e CH, respectivamente, bem como a os resultados dos teores de umidade do subleito ao longo da hidratação (w_{sub}). Para Chevrier et al. (2012) e Rowe (2020), valores de umidade acima de 80% são um pré-requisito para o GCL efetivamente atuar como uma barreira de fluidos, condição esta que depende do tipo do GCL e das propriedades do solo de subleito. Comparando os resultados desta pesquisa com a recomendação feita por Chevrier et

al. (2012) e Rowe (2020), os valores de umidade alcançados pelo GCL1 para o solo $SC_{wót+2}$ e $CH_{wót+2\%}$ estariam dentro da faixa recomendada, com exceção do GCL1 no subleito CH. No entanto, quando os resultados são analisados em termos de hidratação normalizada (w/w_{ref}), nenhum dos GCLs alcançou a saturação completa em contato com os subleitos lateríticos, atingindo valores relativamente baixos de 40 a 50% da hidratação.

Os resultados da Figura 5.8c mostram que o subleito SC conseguiu hidratar de forma semelhante os três GCLs analisados, demonstrando que o tipo de GCL teve uma influência pouco significativa nos resultados. A hidratação normalizada do GCL1, que é composta por bentonita granular, atingiu o valor máximo de 51,2% em aproximadamente 11 semanas de ensaio em contato com este subleito SC. Já os GCL2 e GCL3, ambos compostos com bentonita em pó, apresentaram hidratação de 51,8 e 54% em 17 semanas respectivamente. Esses resultados demonstram que não houve diferença no comportamento de hidratação de uma bentonita cálcica (com adição de sódio), caso do GCL 2, e bentonitas naturalmente sódicas (GCL1 e GCL3) em contato com o subleito SC. Pequenas diferenças na capacidade de hidratação foram observadas apenas na curva do GCL3.

O mesmo comportamento foi visto no comportamento de hidratação dos três GCLs quando em contato com o subleito CH (Figura 5.8b e Figura 5.8d). Nesse caso, com a bentonita granular, o GCL1 atingiu 45,1% de hidratação, enquanto o GCL2 (bentonita em pó) atingiu 50,9% e o GCL3 (bentonita em pó) atingiu 51,1%. Os GCL1 e GCL3 demonstraram redução na hidratação à longo prazo, o que indica uma troca de umidade entre o subleito CH e os GCLs, explicitada pela queda no teor de umidade dos GCL1 e GCL3, e conseqüente redução na diferença de sucção entre GCL e subleito. Destes resultados, podemos destacar que o GCL1 apresentou a menor hidratação nas duas condições analisadas. Duas características da fabricação deste GCL podem explicar esse comportamento, são elas: granulometria da bentonita e o tipo de geotêxtil em contato com o subleito. A bentonita granular do GCL1 não consegue ocupar os poros do geotêxtil não tecido com bentonita como ocorre no caso do GCL2 com bentonita do tipo pó, que ocupa esses espaços na estrutura do geotêxtil. A ausência de grãos de bentonita no geotêxtil dificulta a transferência por ligação capilar entre o subleito e o GCL1, esse comportamento também foi apontada por Acikel et al. (2018a) ao estudar a hidratação de GCLs em colunas.

As Figuras Figura 5.8c e Figura 5.8d apresentam as mudanças nos teores de umidade dos subleitos ao longo do processo de hidratação dos GCLs nos solos SC e CH. Os teores de umidade foram monitorados usando os sensores de umidade localizados a 20 mm abaixo da

camada de GCL (ver Figura 4.14). Conforme indicado na figura, os teores de umidade do subleito não apresentaram um padrão progressivo bem definido como observado durante a hidratação dos GCLs durante a hidratação. Os valores de teor de umidade oscilam entre processos de secagem e umedecimento enquanto o GCL se hidratou. Nota-se na Figura 5.8c um aumento inicial seguido de uma redução nos valores de umidade do solo SC durante a hidratação dos GCLs 1 e GCL3 até atingir o equilíbrio de umidade. Ao contrário, o subleito SC mostrou seu teor de umidade reduzindo e então se equilibrando. Os valores de umidade do subleito CH (Figura 5.8d) também oscilam entre processo de secagem e umedecimento, mas em amplitudes superiores às observadas no subleito SC. Esses resultados indicam que a hidratação do GCL envolve um fluxo transiente ascendente condicionado pelo diferencial de sucção desenvolvido entre o GCL e o subleito. Em algumas situações, a tensão de sucção levou a um fluxo de água ascendente, elevando a água de pontos mais profundos do que aquele onde o sensor de umidade estava localizado, aumentando o teor de umidade do subleito em regiões mais superficiais em um curto espaço de tempo. À medida que o GCL se hidrata, o gradiente hidráulico é reduzido, equilibrando os valores do teor de umidade do subleito SC. No entanto, a troca constante de umidade na interface GCL-subleito levou a uma variação do diferencial de sucção ao longo da hidratação do GCL. Esta oscilação é maior no solo CH, pois o diferencial de sucção é geralmente menor durante todo o processo de hidratação do GCL, isso resulta na troca constante de umidade entre o solo e o GCL. Este fenômeno é governado pelo comportamento da curva de retenção de água de cada material, que será discutido posteriormente neste trabalho.

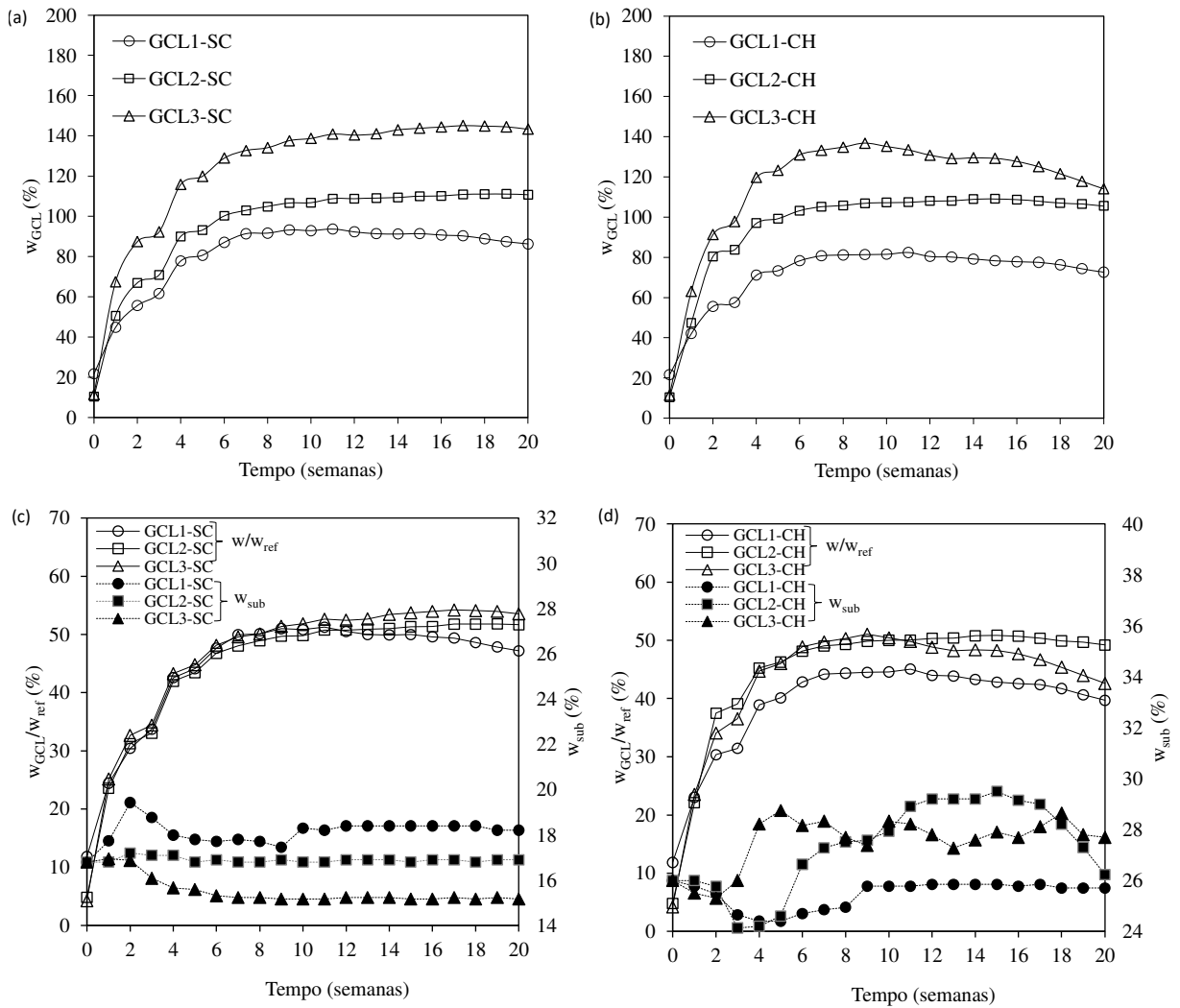


Figura 5.8 - Efeito do tipo de GCLs na hidratação: (a) GCLs em contato com o solo SC, (b) GCLs em contato com o solo CH.

Após o término da hidratação dos GCLs, ou seja, ao fim dos ensaios, os perfis de umidade do subleito foram determinados a partir de amostras de solo extraídas das colunas ao final dos ensaios. Os resultados são apresentados na Figura 5.9. Análises da Figura 5.9 permitem observar o fluxo de água ascendente estabelecido pelo diferencial de sucção desenvolvido na interface GCL-subleito durante a hidratação. Deve-se observar que a hidratação dos GCLs pode levar a mudanças nos teores de umidade em pontos mais profundos do subleito. Ainda deve-se observar que os sensores estão localizados na superfície da coluna, confirmando a hipótese do fluxo ascendentes nas situações em que se registrou aumento do teor de umidade do subleito. O diferencial de sucção desenvolvido no contato entre o GCL e o subleito levou a uma subida capilar dos pontos mais profundos para hidratar em GCLs. Em algumas situações específicas, como as apresentadas nas Figuras Figura 5.9c e Figura 5.9f, os

resultados apresentaram secagem nos pontos superficiais. A Figura 5.9a mostra que o GCL1 absorveu umidade a partir dos 300 mm de profundidade no subleito SC. Observou-se que GCL2 e GCL3 absorvem umidade de pontos mais profundos (maiores que 350 mm) no subleito SC. No que se refere ao subleito CH, houve uma tendência dos GCLs em absorver umidade de profundidades menores do que as observadas no subleito SC, o que está associado à redução do diferencial inicial de sucção e no diferencial durante a hidratação. Observa-se a maior secagem na região superficial do subleito para o GCL3 (Figura 5.9c e Figura 5.9f) em relação aos GCLs 1 e 2, para ambos os subleitos avaliados, corroborando a hipótese de que o GCL se hidrata mais quanto maior a diferença de sucção entre o GCL e o subleito.

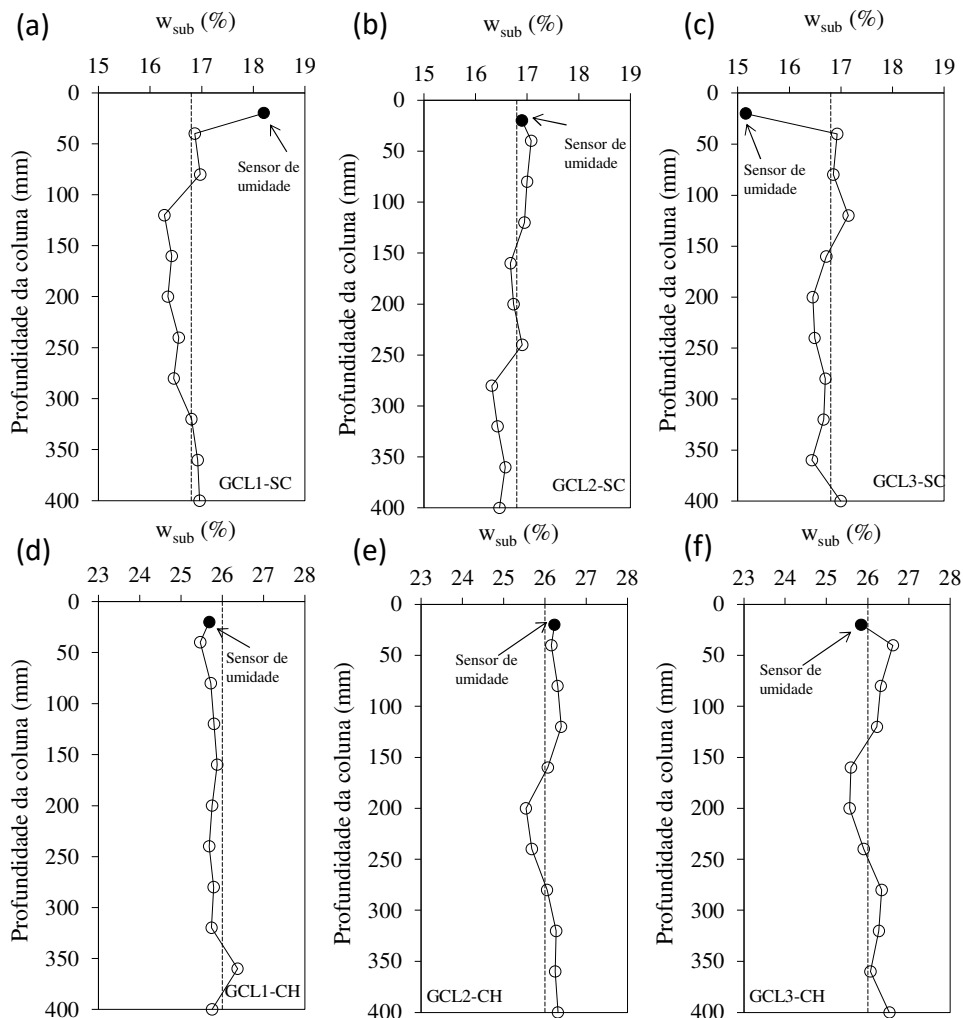


Figura 5.9 - Perfis de teor de umidade do subleito após o término da hidratação dos GCLs: (a) GCL1 no subleito SC; (b) GCL 2 no subleito SC; (c) GCL3 no subleito SC; (d) GCL1 no subleito CH; (e) GCL2 no subleito CH; (f) GCL3 no subleito CH.

5.2.3 Avaliação da transferência de umidade entre GCLs e subleitos baseada em análises da sucção durante hidratação

Um melhor entendimento da transferência de água entre o GCL e o subleito é obtido ao comparar os valores de sucção e as curvas de retenção de água de ambos os materiais, tal como apresentado na Figuras 5.10 e 5.11.

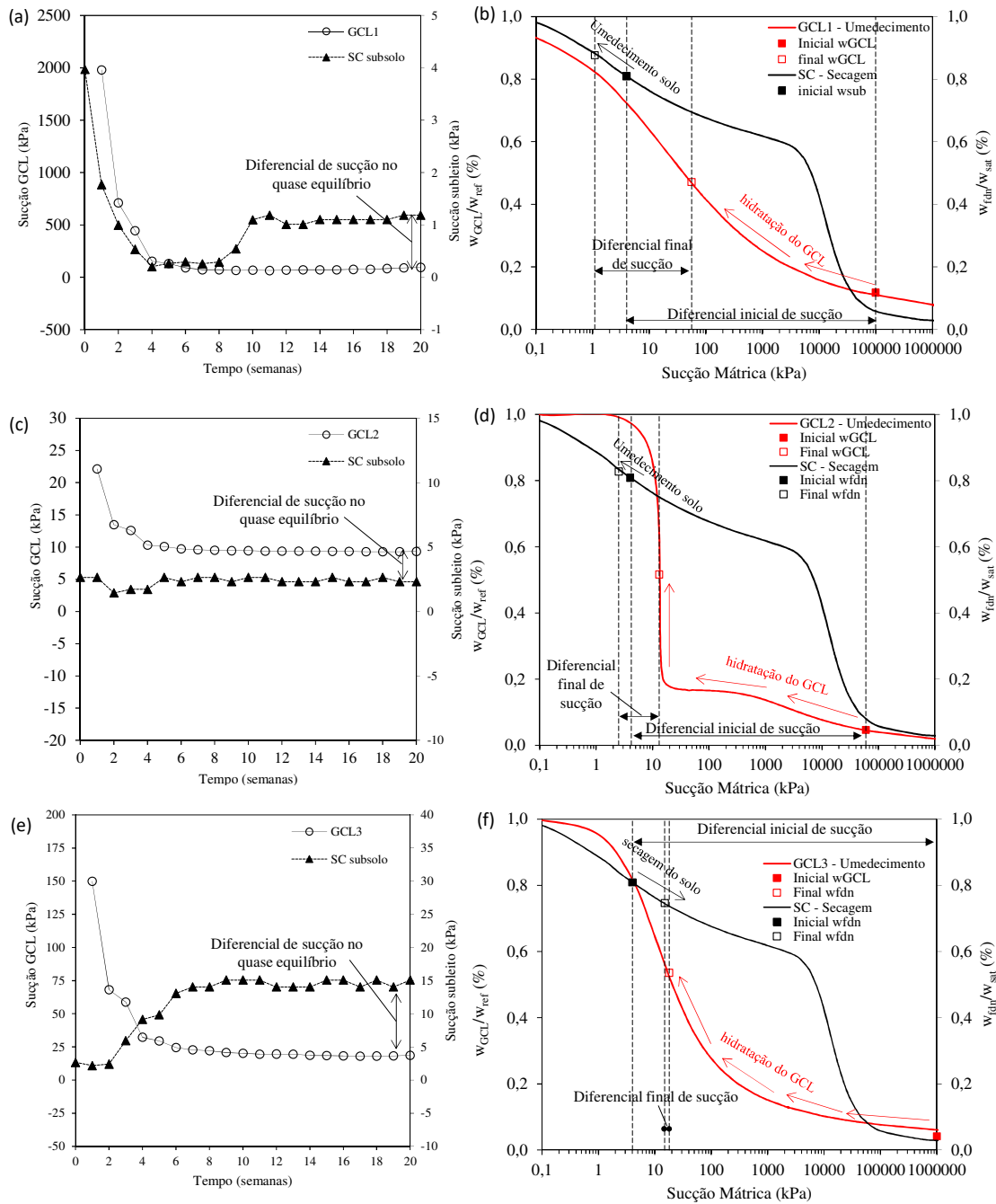


Figura 5.10 - Redistribuição da água entre o GCL e o subleito SC durante a hidratação: (a) sucção do GCL1 e do subleito; (b) caminho de sucção nas CRAs de GCL1 e subleito; (c) valores de sucção de GCL2 e do subleito; (d) caminho de sucção nas CRAs do GCL2 e subleito; (e) valores de sucção de GCL3 e do subleito; (f) caminho de sucção nas CRAs do GCL3 e subleito.

A Figura 5.10 indica as mudanças de sucção dos GCLs e dos subleitos durante o período de hidratação. Os valores de sucção foram obtidos utilizando o teor de umidade medido por sensores de umidade e seus correspondentes valores de sucção nas curvas de retenção de água. Os valores de sucção dos GCLs são plotados no eixo esquerdo, enquanto os valores de sucção dos subleitos no eixo direito. A Figura 5.10a mostra a progressão dos valores de sucção nos testes de hidratação realizados com o subleito GCL1 e SC. A Figura 5.10b mostra o caminho de sucção de ambos os materiais ao longo de suas curvas de retenção de água para explicar a hidratação dos GCLs pelos subleitos. A sucção inicial de GCL1 é de cerca de 30000 kPa, enquanto a sucção do subleito é de 4 kPa. A diferença de sucção entre os dois materiais é o diferencial de sucção inicial que gera o fluxo de água ascendente do subleito para o GCL. A absorção de água do subleito levou a uma redução da sucção do GCL e ao aumento da sucção do subleito a um estado de quase equilíbrio. Um estado de quase equilíbrio é alcançado quando o diferencial de sucção é drasticamente reduzido. O tempo e os valores de diferencial de sucção necessários para atingir o estado de quase equilíbrio dependem da forma do GCL e das curvas de retenção de água do subleito.

Os valores de sucção do GCL2 e do subleito SC são representados na Figura 5.10c. Observa-se que, neste caso, os potenciais de sucção foram geralmente mais baixos do que as do GCL1, o que levou a níveis de hidratação mais elevados. Isso indica que ocorre maior hidratação do GCL à medida que diminui o diferencial de sucção final. Observa-se ainda que a diferença na forma da curva de retenção de água do GCL2 (Figura 5.10d) em comparação com o GCL1 levou à um diferencial de sucção final distinto e conseqüente comportamento de hidratação. Da mesma forma, a forma da curva de retenção de água de GCL3 (Figura 5.10e) levou a um diferencial de sucção baixo ao longo do tempo de hidratação, sendo essa diferença de apenas 3 kPa. No entanto, além de favorecer a hidratação do GCL, um diferencial de sucção muito baixo em uma curva de retenção com uma inclinação significativa como é caso justifica mudanças no sentido da transferência de água. Nestes casos o GCL pode por um curto período de tempo hidratar o subleito e vice-versa até um novo ponto de equilíbrio da sucção. Nota-se na Figura 5.10e que os valores de sucção do subleito aumentam (desidratação) enquanto a sucção GCL diminui (hidratação). A medida que o subleito se desidrata, há uma tendência de nova redistribuição de umidade no longo prazo até um novo equilíbrio. Este fato levou à desidratação do GCL após 14 semanas, indicando o subleito absorvendo água do GCL.

Na Figura 5.11, os resultados indicam que a forma da CRA do subleito CH também tem um papel significativo na hidratação dos GCLs.

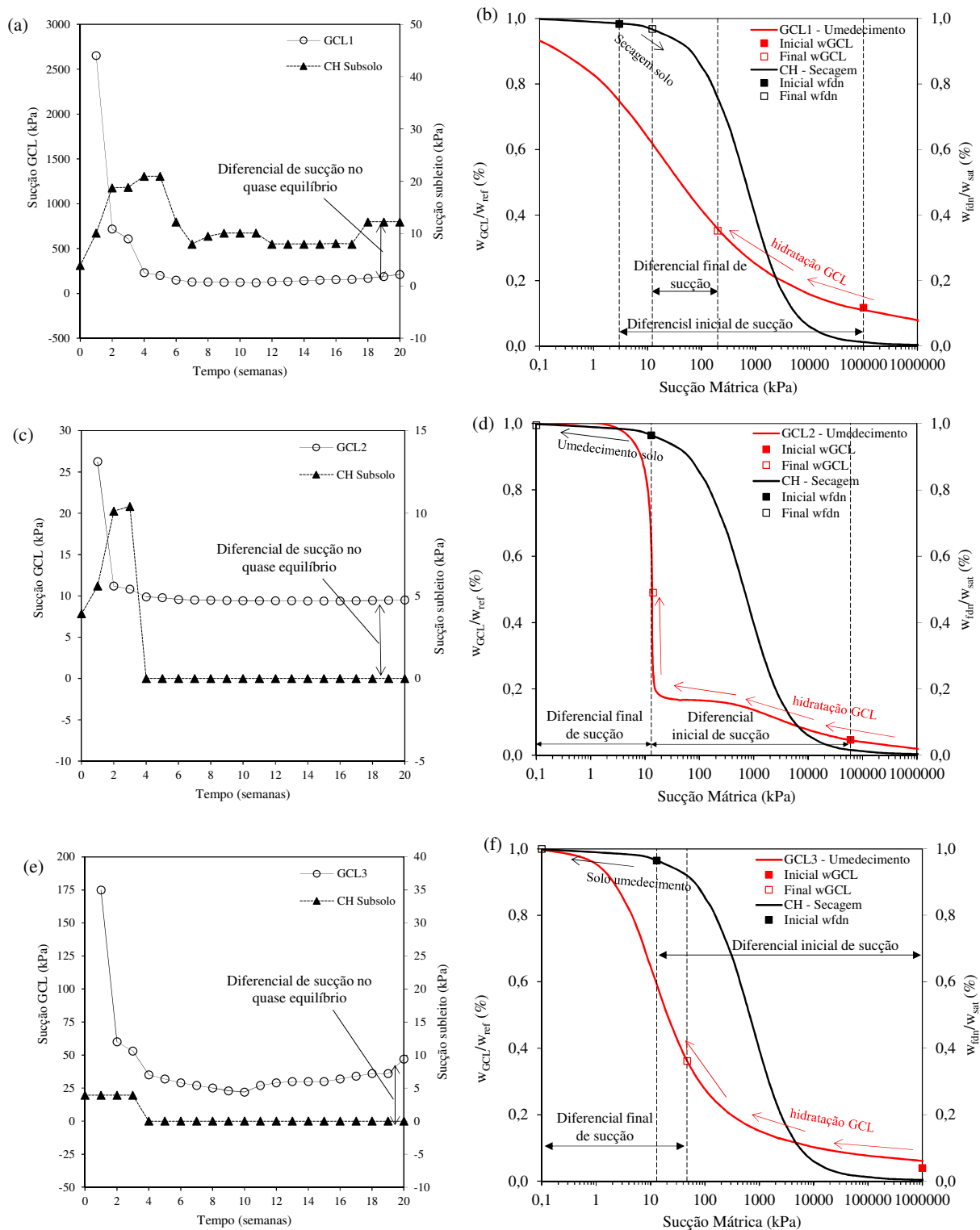


Figura 5.11 - Redistribuição da água entre o GCL e subleito CH durante a hidratação do GCL: (a) valores de sucção do GCL1 e do subleito; (b) caminho de sucção nas CRAs do GCL1 e solo; (c) valores de sucção de GCL2 e do subleito; (d) caminho de sucção nas CRAs do GCL2 e subleito; (e) valores de sucção do GCL3 e do subleito; (f) caminho de sucção nas CRAs do GCL3 e subleito.

Embora o diferencial de sucção inicial foi semelhante ao do subleito SC, os diferenciais de sucção entre o GCL e o subleito, durante e no final da hidratação, foram geralmente

maiores. Este fato levou ao aumento dos valores de sucção do subleito nas primeiras semanas e posterior redução. Este maior diferencial de sucção explica a dificuldade dos GCLs em se hidratarem em contato com o solo CH em comparação com o solo SC (Figura 5.6 e Figura 5.7).

5.3 Resultados dos ensaios de hidratação em condições térmicas

5.3.1 Perfil de temperatura

Para investigar o efeito da exposição aos ciclos térmicos diários na hidratação dos GCLs dentro das caixas de ensaio foram aplicados ciclos de aquecimento e resfriamento. A Figura 5.12 apresenta a imposição desses ciclos para as três condições analisadas nesta pesquisa, juntamente da variação do teor de umidade no sensor mais próximo instalado no subleito, comprovando a dissipação desse gradiente térmico.

De modo geral, a temperatura registrada nos ensaios foi aquela imposta no sistema (30 a 65°C). Durante os ensaios, houve falhas nas leituras do sensor térmico em determinados períodos do monitoramento, razão pela qual o número de ciclos registrados difere do número total de ciclos térmicos aplicados. O sensor de umidade instalado no solo próximo ao GCL, em todos os casos, registrou redução no teor de umidade do solo ao longo do ensaio. O ensaio com solo CH_{wót+2%} não apresentou resultados compatíveis com o teor de umidade gravimétrico do solo ao final do ensaio, porém, neste caso, foi usado sensores do tipo Arduino, enquanto nos demais, foi usado sensor Em50.

A influência dos ciclos térmicos no sistema pode ser melhor observada na Figura 5.13, que apresenta o perfil de temperatura no subleito durante os ciclos de aquecimento e resfriamento e a variação da umidade do subleito registradas pelos sensores instalado na profundidade da caixa (4 cm, 8 cm, 12 cm, 16 cm e 24 cm). A temperatura inicial no primeiro ciclo variou entre 30°C e 45°C (Figura 5.13a, Figura 5.13c, Figura 5.13e), porém com a aplicação de mais ciclos térmicos, a temperatura na superfície sofreu um aumento, e ao final dos ciclos de aquecimento variou entre 55°C e 65°C.

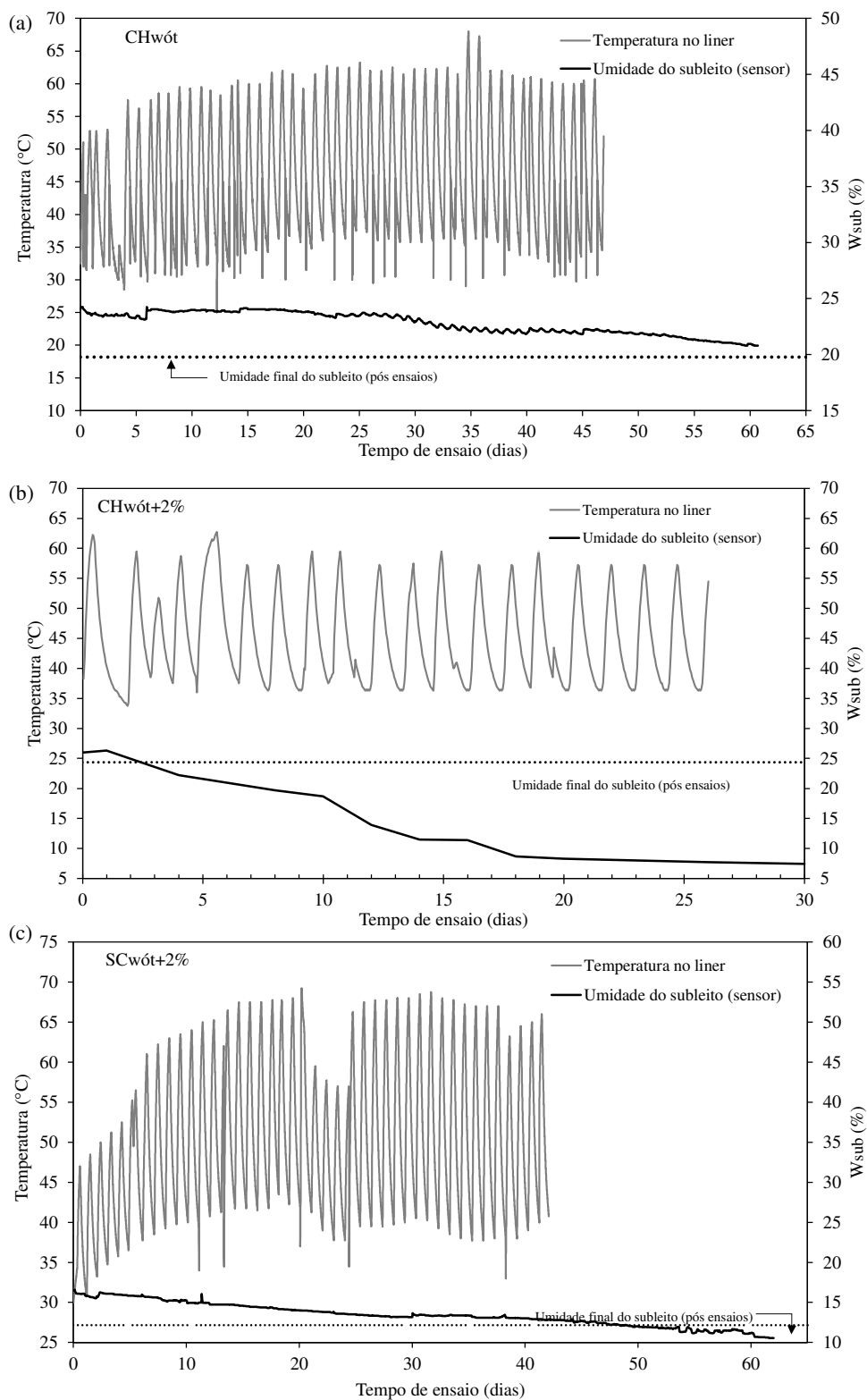


Figura 5.12 – Imposição dos ciclos térmicos: (a) CHwót; (b) CHwót+2%; (c) SCwót+2%.

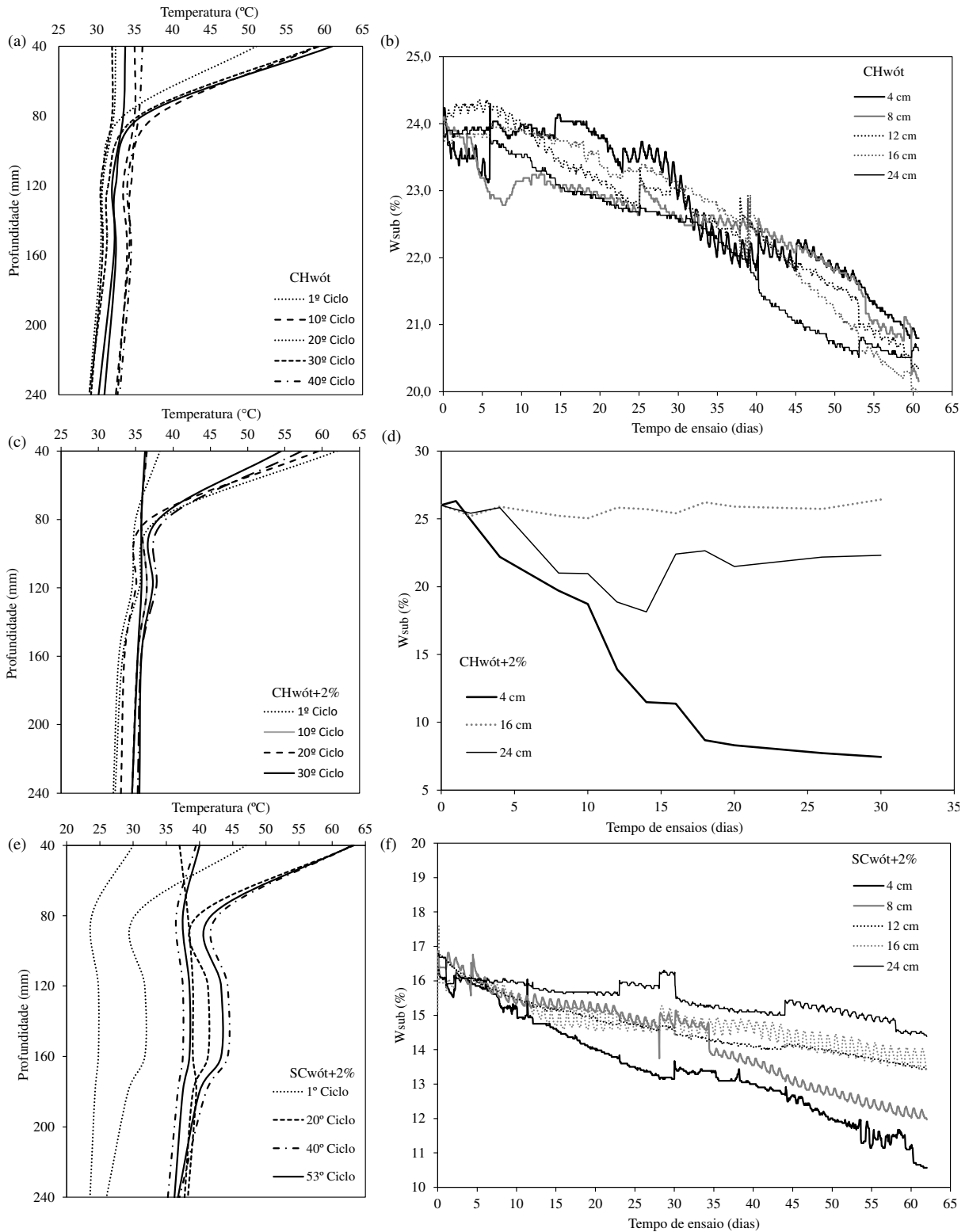


Figura 5.13 – Perfil térmico no subleito com a variação da umidade: (a) temperatura CH_{wót}; (b) umidade CH_{wót}; (c) temperatura CH_{wót}+2%; (d) umidade CH_{wót}+2%; (e) temperatura SC_{wót}+2%; (f) umidade SC_{wót}+2%.

A energia aplicada na caixa de ensaios pela imposição dos ciclos de aquecimento não foi totalmente dissipada no ciclo de resfriamento. Este acúmulo de energia é observado pelo

aumento da temperatura no subleito mediante a aplicação dos ciclos térmicos e confirmado pela variação de umidade do subleito nas diferentes profundidades (Figura 5.13b, Figura 5.13d, Figura 5.13f). O solo SC apresentou o maior acúmulo de energia com a maior variação da temperatura no subleito com o aumento dos ciclos térmicos. As maiores variações de temperatura ocorreram nos primeiros 8 cm do subleito e, abaixo dessa profundidade, a variação da temperatura foi menos intensa e mais gradual. O acúmulo de calor com o tempo diminuiu ligeiramente o gradiente térmico, porém esta é uma representação realista do que também aconteceria no campo, tal como apontado por Rowe et al. (2013).

5.3.2 Efeito do teor de umidade e do tipo de subleito na hidratação de GCL em condições térmicas

As Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam os resultados de teor de umidade gravimétrica do GCL1 quando hidratado em condições térmicas por dos dois diferentes subleitos (CH e SC) ao longo do processo de hidratação na caixa de ensaio. Na Figura 5.14, a hidratação do GCL1 é expressa em termos de teor de umidade gravimétrica do GCL1 (w_{GCL}) no subleito SC_{wot+2%}. A Figura 5.15 apresenta a evolução da hidratação do GCL1 para o subleito CH compactado no teor ótimo de umidade e 2% acima.

Os resultados mostram que, em contato com o subleito CH, o GCL1 apresentou teor de umidade gravimétrica de 19,8% após os ciclos de umedecimento e secagem para o subleito compactado no teor ótimo de umidade, e de 29,6% para o subleito compactado no teor ótimo de umidade com 2% acima. O GCL1 em contato com o subleito SC apresentou, após os ciclos de umedecimento e secagem, um teor de umidade gravimétrico de 19,8%. Quando se compara estes resultados com a hidratação em condições isotérmicas (Figura 5.14a), é possível observar uma redução na capacidade desse solo lateríticos de hidratar o GCL1, inclusive com a perda da umidade inicial do GCL. Este comportamento de perda de umidade também foi observado para o subleito CH no teor ótimo de umidade (Figura 5.15).

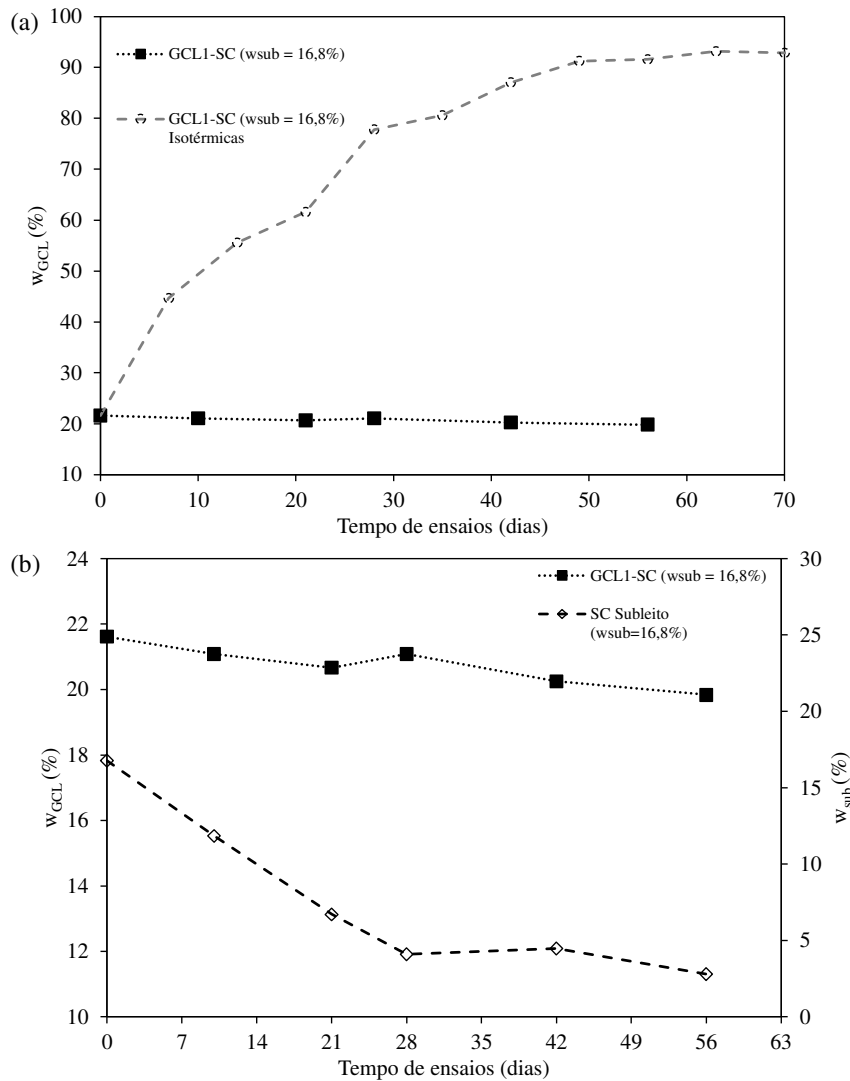


Figura 5.14 - Teores de umidade de GCL1 ao longo da hidratação em condições térmicas em contato com o solo SC: (a) comparação com as condições isotérmicas; (b) comparação com teor de umidade do subleito.

A diminuição na capacidade de hidratação dos GCLs era esperada devido a imposição de temperatura no sistema, como visto nos trabalhos de Anderson et al. (2012) e Rowe et al. (2011). Nestes estudos, a exposição aos ciclos térmicos também impactou significativamente na hidratação dos GCLs, embora nesses trabalhos não tenha sido observada secagem das amostras. A constatação da redução na umidade dos GCLs mostra que a adição de 2% de umidade nos parâmetros de compactação do solo não foi suficiente para evitar a secagem do GCL em duas das três condições analisadas. Este resultado pode ser explicado pela granulometria e mineralogia dos solos. Como discutido anteriormente, a presença de argilo-minerais mais ativos e/ou uma estrutura granular mais fina favorecem a retenção de água no subleito. A maior parcela de finos na granulometria do solo CH, aliado com o incremento de

2% de umidade, explica a capacidade do subleito $CH_{wót+2\%}$ de proporcionar uma pequena hidratação ao GCL, diferentemente do que aconteceu no solo $SC_{wót+2\%}$ e $CH_{wót}$, que não conseguiram hidratar o GCL1. A umidade inicial do subleito novamente se mostrou como uma variável importante, uma vez que o subleito $CH_{wót+2\%}$ evitou a desidratação do GCL1.

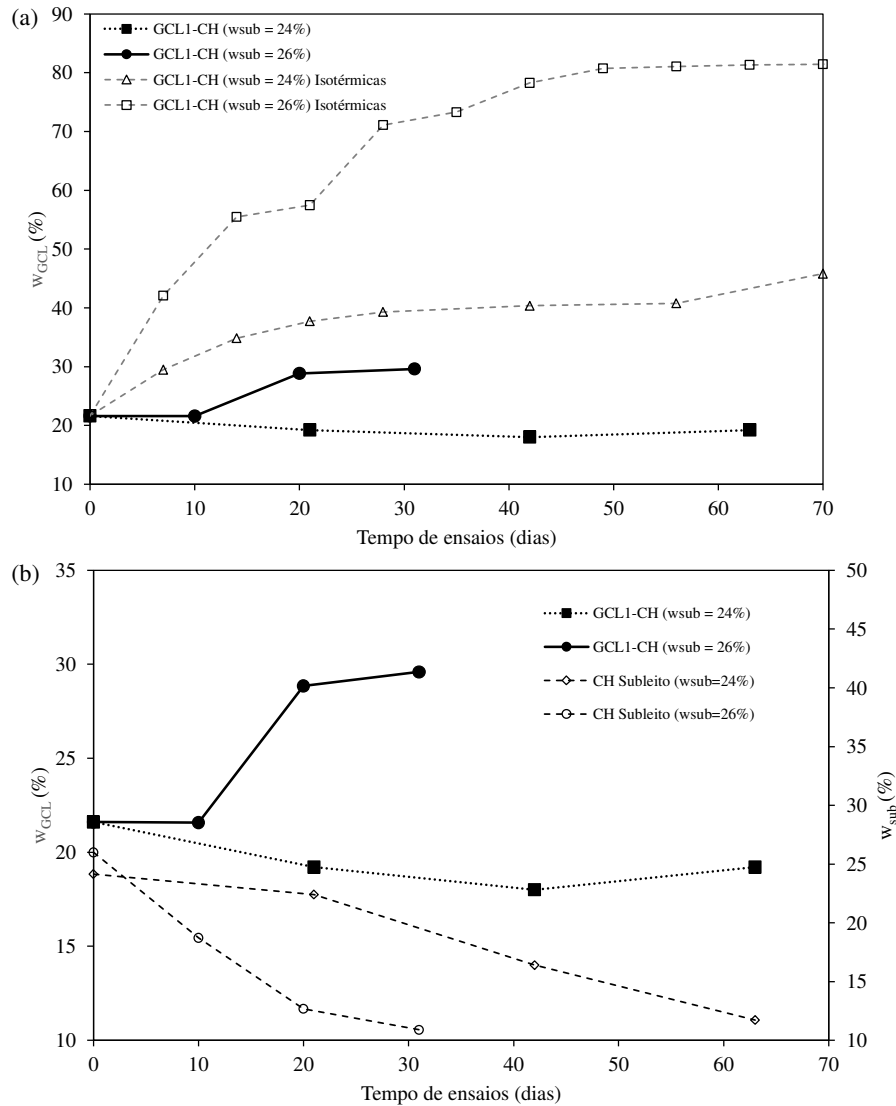


Figura 5.15 - Teores de umidade de GCL1 ao longo da hidratação em condições térmicas em contato com o solo CH: (a) comparação com as condições isotérmicas; (b) comparação com teor de umidade do subleito.

Com o monitoramento do teor de umidade do subleito, verificaram-se variações significativas entre as condições estudadas. Este comportamento era esperado em razão da imposição dos ciclos térmicos que representam uma condição de estresse para o GCL e para os solos de subleito. A imposição de um aumento da temperatura levou a transferência de umidade do subleito para o GCL1 com parte da umidade sendo transformada em vapor dentro do sistema.

A variação de umidade do subleito foi mais gradual para o subleito CH do que a observada para o subleito SC. Este comportamento é esperado em razão da granulometria dos solos. O solo CH, mais fino, apresentou uma transferência de umidade mais gradual entre as camadas do solo.

A Figura 5.16 compara os resultados destas análises com resultados da literatura, também conduzidos em condições térmicas, mas com solos formados em clima temperado. Os GCLs utilizados nas mencionadas pesquisas têm características similares as do GCL1 usando na presente pesquisa. No entanto, nestes estudos, o GCL foi instalado com o geotêxtil tecido em contato com o solo.

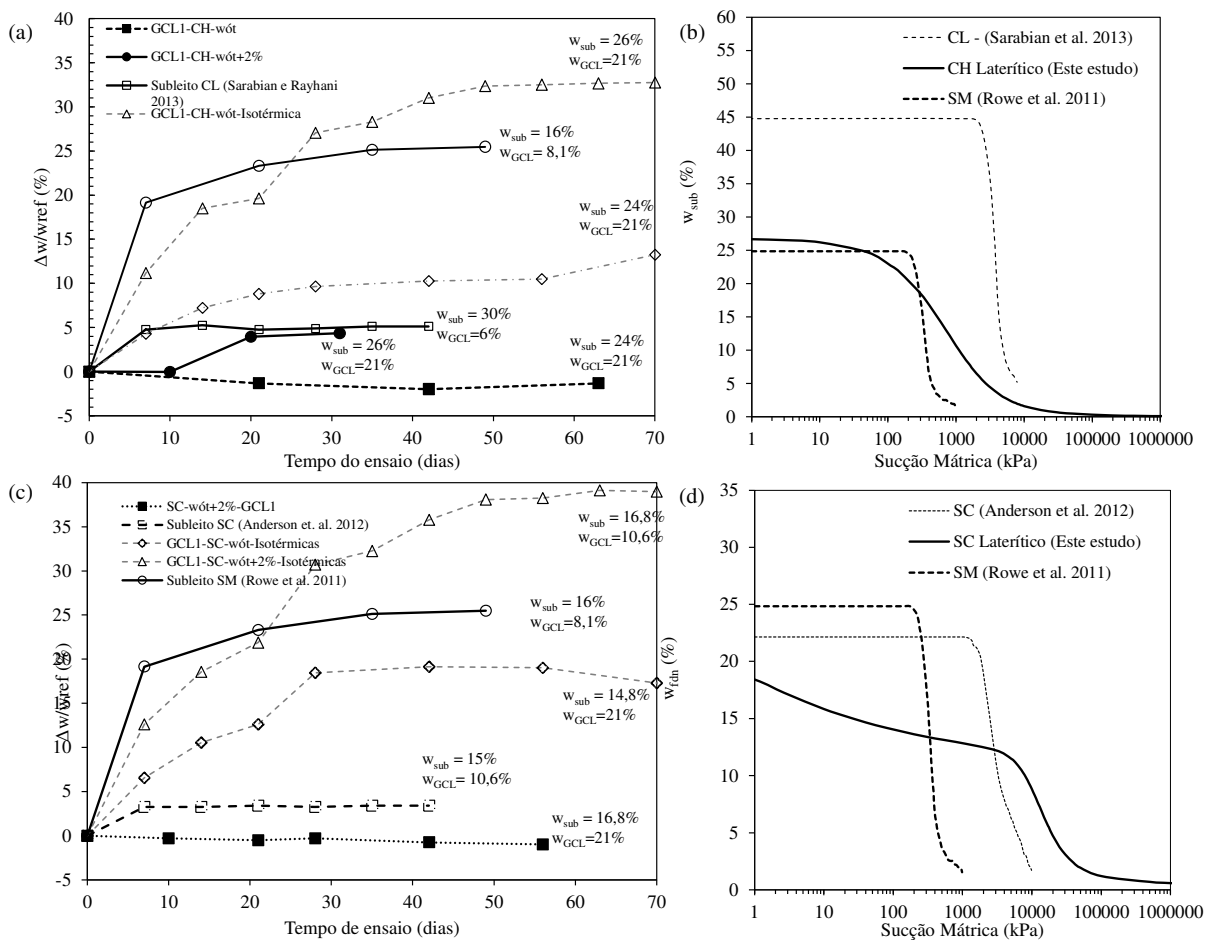


Figura 5.16 - Comparação da hidratação de GCL1 em condições térmicas: (a) Hidratação de GCL por subleitos argilosos; (b) CRA dos subleitos argilosos; (c) hidratação de GCL de subleitos granulares; (d) CRA dos subleitos granulares.

Os resultados na Figura 5.16 são apresentados em termos do aumento do teor de umidade gravimétrico do GCL normalizado pelos respectivos w_{ref} . As CRA destes subleitos

são novamente apresentadas (Figura 5.16b e Figura 5.16d) de modo a compreender a influência no processo de hidratação do GCL1. A Figura 5.16a apresenta a comparação com resultados da literatura para a hidratação do GCL1 pelo subleito CH. O solo CH necessitou de um período maior para iniciar a hidratação do GCL1 quando comprado ao solo CL da literatura. No caso do subleito CH_{w_{ot}+2%}, o GCL1 atingiu valores próximos aos encontrados por Sarabian e Rayhani (2013). A Figura 5.16c apresenta a hidratação do GCL1 pelo subleito SC com os resultados da literatura. Os resultados para o subleito SC mostram que esse solo laterítico apresentou maior dificuldade na hidratação do GCL1, o que pode ser explicado quando se analisas o formato da CRA do solo SC laterítico (Figura 5.16d), principalmente no primeiro trecho da curva. A CRA do solo laterítico mostra que este solo perde água com facilidade até valores de sucção da ordem de 10000 kPa, diferentemente do observado na literatura para os outros solos. Esse processo de perda de umidade do solo é intensificado quando se tem a imposição dos ciclos térmicos.

Após o término da hidratação dos GCLs em condições térmicas, os perfis de umidade do subleito foram determinados a partir de amostras de solo extraídas da caixa ao final dos ensaios e comparados com as condições isotérmicas. Os resultados apresentados na Figura 5.17, que apresenta perfis de teor de umidade do subleito após hidratação do GCL1 em condições térmicas e isotérmicas, permitem observar um fluxo de saída de água do subsolo estabelecido pelo diferencial de sucção desenvolvidas na interface GCL-subleito durante a hidratação, e também pela secagem do subleito em razão da exposição aos ciclos térmicos impostos. Deve-se observar que, diferentemente das colunas analisadas em condição isotérmicas, onde o diferencial de sucção era unicamente entre o subleito e o GCL, as análises em condições térmicas são mais complexas, já que o diferencial de sucção entre o GCL e o subleito variam juntamente com os ciclos de aquecimento e resfriamento. Isso é confirmado quando se comparar o perfil de umidade das colunas nas mesmas combinações GCLxSubleito com o perfil de temperatura das caixas de ensaios em condições térmicas. A perda de umidade no solo de subleito foi significativamente maior no caso dos ensaios submetidos a ciclos térmicos.

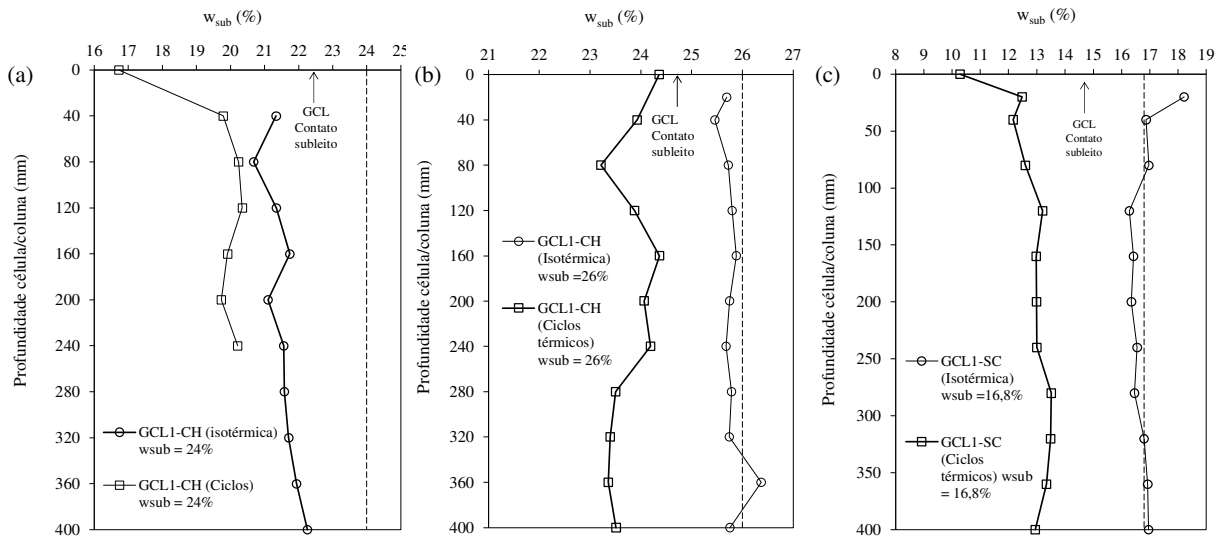


Figura 5.17 - Perfis de teor de umidade do subleito após hidratação do GCL1 em condições térmicas e isotérmicas: (a) GCL1 no subleito $CH_{wót}$; (b) GCL1 no subleito $CH_{wót+2\%}$; (c) GCL1 no subleito $SC_{wót+2\%}$.

5.3.3 Avaliação da troca de umidade entre GCLs e subleitos baseada em análises da sucção durante a hidratação em condições térmicas

A Figura 5.18 indica as mudanças na sucção dos GCLs e dos subleitos durante o período de hidratação nas condições térmicas. Os valores de sucção foram obtidos a partir dos valores de teor de umidade de ambos materiais durante a hidratação, da mesma forma realizada para os ensaios isotérmicos. Os valores de sucção dos GCLs são plotados no eixo esquerdo, enquanto os valores de sucção dos subleitos no eixo direito. A Figura 5.18a apresenta os valores de sucção nos ensaios de hidratação realizados com o GCL1 e o subleito SC. A Figura 5.18c e Figura 5.18e mostra a evolução dos valores de sucção nos ensaios de hidratação realizados com o GCL1 e o subleito CH. A sucção inicial de GCL1 é de cerca de 100000 kPa, enquanto a sucção do subleito é de 1-3 kPa.

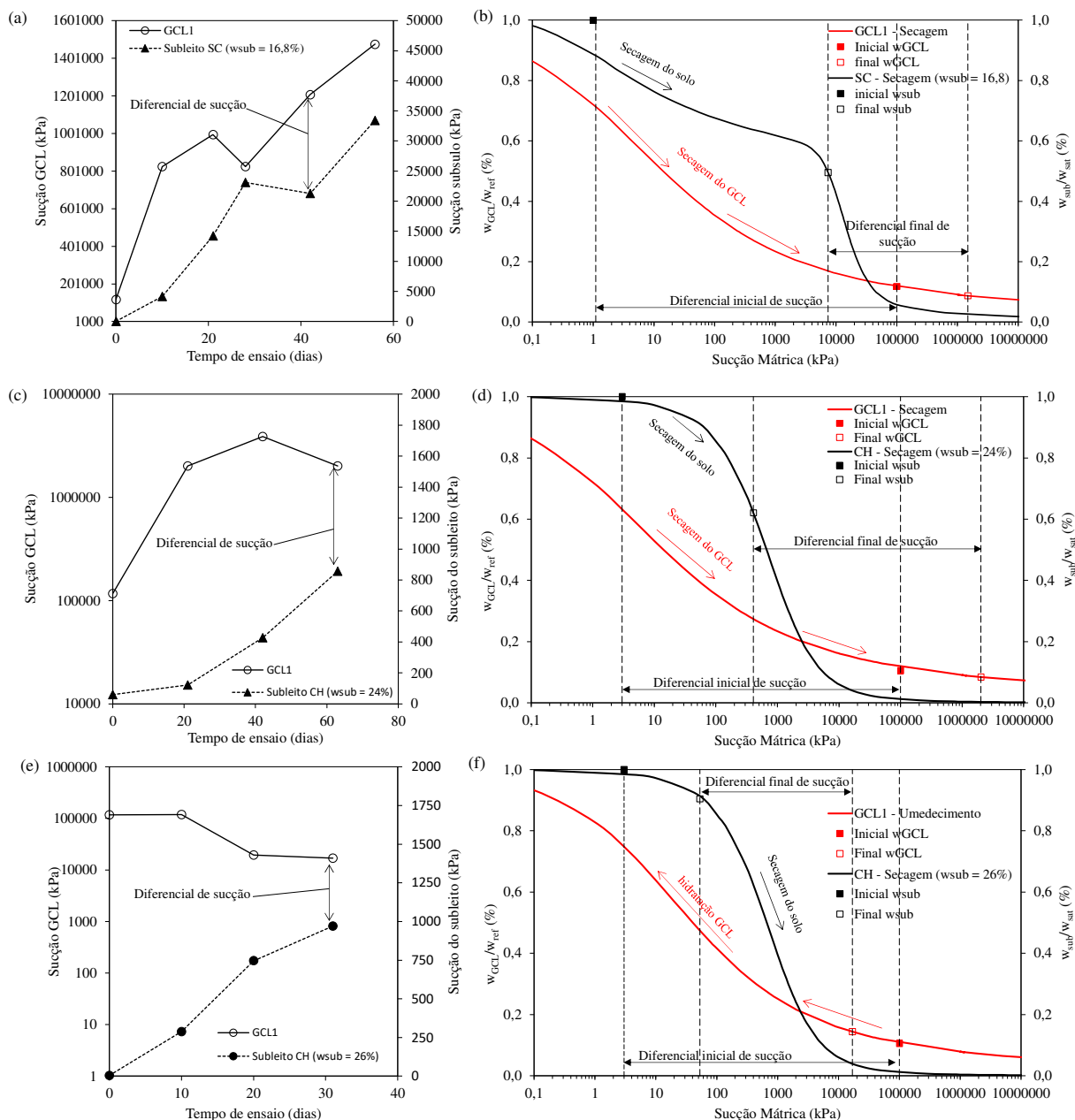


Figura 5.18 - Transferência de água entre o GCL e o subleito SC durante a hidratação: (a) caminho de sucção do GCL1 e do subleito SC_{wót+2%}; (b) caminho de sucção nas CRAs de GCL1 e subleito SC_{wót+2%}; (c) sucção de GCL1 e do subleito CH_{wót}; (d) caminho de sucção nas CRAs do GCL2 e subleito CH_{wót}; (e) sucção de GCL3 e do subleito CH_{wót+2%}; (f) sucção nas CRAs do GCL3 e subleito CH_{wót+2%}.

Diferentemente do observado nas análises em condições isotérmicas não houve um comportamento homogêneo de transferência de água do subleito para o GCL. Isso é justificado pelo fato de que o diferencial de sucção entre o GCL1 e subleito não reduziu. Ao analisar os gráficos, pode se observar que a diferença foi mantida durante todo o ensaio (Figura 5.18b, Figura 5.18c e Figura 5.18e). A única exceção foi o caso do GCL1 com o subleito CH no teor ótimo com 2% a mais (w_{ót+2%}). Nesta situação houve redução no diferencial de sucção entre o

GCL1 e o subleito. A absorção de água do subleito levou a uma redução da sucção do GCL1 e ao aumento da sucção do subleito a um estado de equilíbrio. Um estado de quase equilíbrio é alcançado quando o diferencial de sucção é drasticamente reduzido. O tempo e os valores de diferencial de sucção necessários para atingir o estado de quase equilíbrio dependem da curva de retenção do GCL e das curvas de retenção de água do subleito. Essa condição de quase equilíbrio não foi observada nas análises térmicas, uma vez que não houve redução drástica dos valores de sucção em nenhuma situação. Ao contrário do esperado, as sucções de ambos materiais aumentaram ao longo da hidratação, efeito gerado pela perda de umidade, mas também pelo efeito da temperatura. Pode-se dizer que não houve hidratação do GCL em subleitos em solos lateríticos em razão da diferença das condições térmicas de regiões tropicais, associada característica de retenção de água destes solos. Cabe notar a elevada perda de umidade do solo SC que resultou em um aumento significativo da sucção em relação ao solo CH, dado a característica bimodal da curva de retenção do solo SC. Isso gerou uma inversão no comportamento de hidratação entre os ensaios isotérmicos e térmicos. O solo SC hidratou mais o GCL em condições isotérmicas do que o solo CH, enquanto em condições térmicas o contrário foi evidenciado.

5.3.4 Análise da retração do GCL submetido a ciclos térmicos

Em conjunto com as análises de hidratação do GCL1 nas condições térmicas, foram medidos os valores de retração que os GCLs sofreram durante a realização dos ciclos de umedecimento e secagem no modelo físico de ensaios. A Figura 5.19 apresenta os resultados de retração do GCL1 ao longo dos ensaios em condições térmicas. A retração do GCL1 seguiu uma tendência de aumentou durante os ciclos térmicos, com valores máximos de retração, medidos no centro da amostra, de 1,37% para o GCL em contato com subleito $CH_{wót+2\%}$ e 0,82% para o subleito $CH_{wót}$ e de 1,03% para o subleito $SC_{wót+2\%}$. Estes valores de retração correspondem a valores da ordem de 3 a 5 mm de encolhimento da amostra.

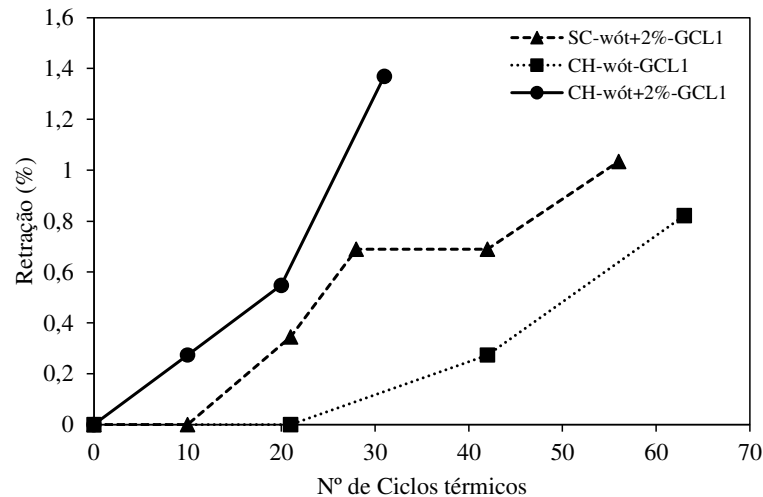


Figura 5.19 – Resultados de retração dos GCLs em condições térmicas.

A baixa retração encontrada para o GCL1 hidratado pelos subleitos lateríticos é similar aos valores encontrados por Thiel et al. (2006), quanto a relação entre ciclos térmicos e a retração, e de Rowe et al. (2013), que encontraram os maiores valores de retração para os GCLs com maior teor de umidade inicial. A magnitude dos resultados de retração observados nesta pesquisa é semelhante aos encontrados por Brachman et al. (2014), onde as amostras que foram analisadas em laboratório apresentaram retração entre 10 e 25%, enquanto as amostras de campo retraíram significativamente menos, entre 0,2% e 5,3%. Desta forma, o uso do modelo físico desenvolvido nesta pesquisa conseguiu captar efeito de retração similar a valores encontrados no campo.

Estes estudos mostram que a retração é um fenômeno diretamente ligado ao grau de hidratação dos GCLs. Quando o subleito consegue transferir umidade para o GCL, este material fica mais suscetível à retração. Uma vez exposto aos ciclos térmicos, o GCL mais úmido tem, por consequência, mais água retirada de sua estrutura, e como resultado, apresenta uma maior retração. Este comportamento foi confirmado nesta pesquisa, uma vez que os valores de retração apresentam relação direta com o teor de umidade final do GCL como mostrado na Figura 5.20. A maior retração observada nesta pesquisa foi a do GCL1 hidratado pelo subleito $CH_{wót+2\%}$. Nesta situação, o GCL1 apresentou o maior teor de umidade final dentre todas as amostras analisadas. Quando GCL1 foi hidratado pelo subleito $SC_{wót+2\%}$ e $CH_{wót}$ houve um processo de secagem de ambas as amostras, consequentemente a retração nestas amostras foi menor que a observada para o GCL1 hidratado subleito $CH_{wót+2\%}$. A ausência da hidratação é observada na Figura 5.21b, que mostra o GCL1 após a exposição à 63 ciclos térmicos comparada com a hidratação em condições isotérmicas no mesmo solo. Na imagem verifica-se

os grãos de bentonita intactos, sem nenhum vestígio de uma eventual inchamento e consequente hidratação do GCL.

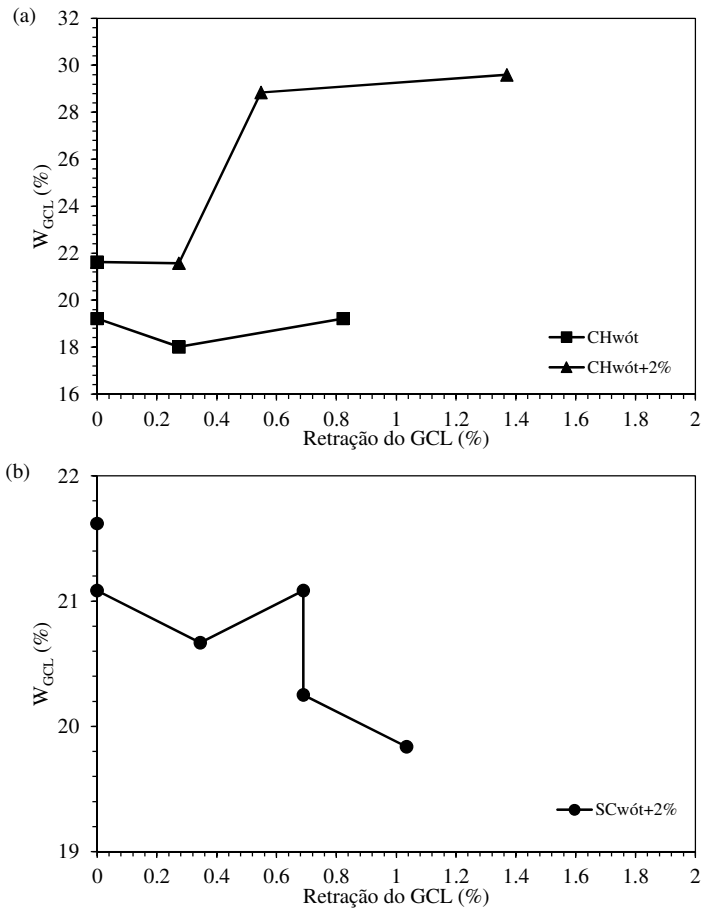


Figura 5.20 – Relação entre W_{GCL} e a retração: (a) subleito CH; (b) subleito SC.

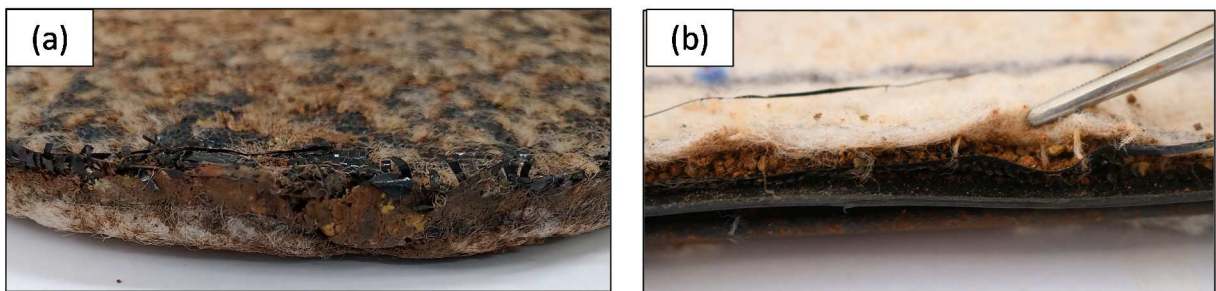


Figura 5.21 – GCL1 após a hidratação pelo subleito SCwót+2% (a) condições isotérmicas; (b) condições térmicas.

5.4 Efeito da hidratação insuficiente nas propriedades do GCL

Amostras de GCLs pós-ensaios, tanto em condições isotérmicas como térmicas, foram exumadas para a determinação de algumas propriedades que indicam eventuais perdas de eficiência do GCL devido à insuficiente hidratação. O índice de inchamento (SI) é um indicador da qualidade da bentonita porque o inchamento em água deionizada é sensível ao conteúdo de Montmorilonita (mineral ativo da bentonita), CTC e valência dos cátions ligados (Norrish e Quirk, 1954; Alther, 1986; Jo et al., 2001; Lee et al., 2005; Mishra et al., 2011). Atualmente, o índice de inchamento mínimo necessário para que a bentonita seja usada em um GCL é de 24 mL/2g (Olstá et al., 2004; Guyonnet et al., 2009; GRI GCL3, 2016). Adicionalmente, o índice de inchamento (SI) está estritamente relacionado com os valores de condutividade hidráulica (k) do GCL (Jo et al., 2001; Kolstad et al., 2004; Young Jo et al., 2004; Lee et al., 2005; Meer e Benson, 2007; Benson et al., 2007; Benson e Meer, 2009; Guyonnet et al., 2009; Scalia e Benson, 2011; Chen et al., 2018). Da mesma forma, Guyonnet (2009) recomenda que os GCLs tenham um valor mínimo de CTC de 70 meq/100g. A Tabela 5.3 resume os resultados obtidos após a hidratação para o índice de inchamento (SI) e a capacidade de troca catiônica (CTC) dos três GCLs estudados, tanto em condições térmicas quanto isotérmicas.

Tabela 5.3 - Propriedades das amostras de GCLs exumadas dos ensaios de laboratório.

| Ensaio | w/w _{ref} (%) | Amostra virgem | | Pós-hidratação | | % de alteração | |
|-----------------------|---------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | | SI (mL/2g) | CTC (meq/100g) | SI (mL/2g) | CTC (meq/100g) | SI (mL/2g) | CTC (meq/100g) |
| Condições isotérmicas | | | | | | | |
| GCL1-SC-wót | 28 | 25 | 140 | 23 | 145 | -8 | 4 |
| GCL1-SC-wót+2% | 47 | 25 | 140 | 21 | 117 | -16 | -16 |
| GCL2-SC-wót+2% | 52 | 20 | 110 | 20 | 99 | 0 | -10 |
| GCL3-SC-wót+2% | 54 | 25 | 163 | 21 | 109 | -16 | -33 |
| GCL1-CH-wót | 30 | 25 | 140 | 22 | 143 | -12 | 2 |
| GCL1-CH-wót+2% | 40 | 25 | 140 | 23 | 101 | -8 | -28 |
| GCL2-CH-wót+2% | 49 | 20 | 110 | 18 | 94 | -10 | -15 |
| GCL3-CH-wót+2% | 43 | 25 | 163 | 23 | 121 | -8 | -26 |
| Condições térmicas | | | | | | | |
| GCL1-SC-wót+2% | 10 | 25 | 140 | 23 | 141 | -8 | 1 |
| GCL1-CH-wót | 11 | 25 | 140 | 20 | 139 | -20 | -1 |
| GCL1-CH-wót+2% | 16 | 25 | 140 | 24 | 137 | -4 | -2 |
| SC-wót+2% | 16,8 | - | 8 | - | 7 | - | -1 |
| CH-wót+2% | 26 | - | 3 | - | 2 | - | -1 |

Os resultados da Tabela 5.3 mostram que as amostras virgens de GCLs alcançaram os valores mínimo exigido de SI de 24 mL/2g, exceto o GCL2 composto com bentonita cálcica aditivada com sódio. Os resultados mostram que a hidratação insuficiente reduziu os valores do SI para níveis mais baixos do que o mínimo necessário. Mesmo no caso de amostras na condição isotérmica (colunas), o inchamento das bentonitas foi evidenciado, mas não chegou a sua capacidade máxima. As Figura 5.22 e Figura 5.23 mostram os corpos de prova de GCL após os ensaios em condições isotérmicas, onde pode ser verificado o inchamento das bentonitas.

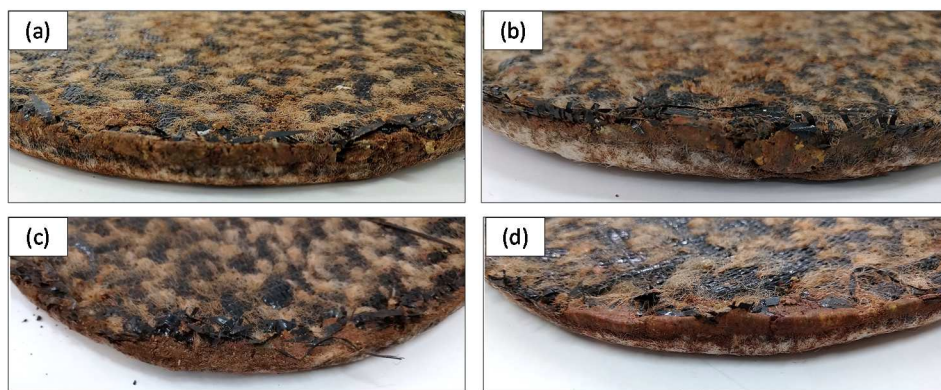


Figura 5.22 – GCL1 após a hidratação em condições isotérmicas: (a) $SC_{wót}$, (b) $SC_{wót+2\%}$, (c) $CH_{wót}$; (d) $CH_{wót+2\%}$.

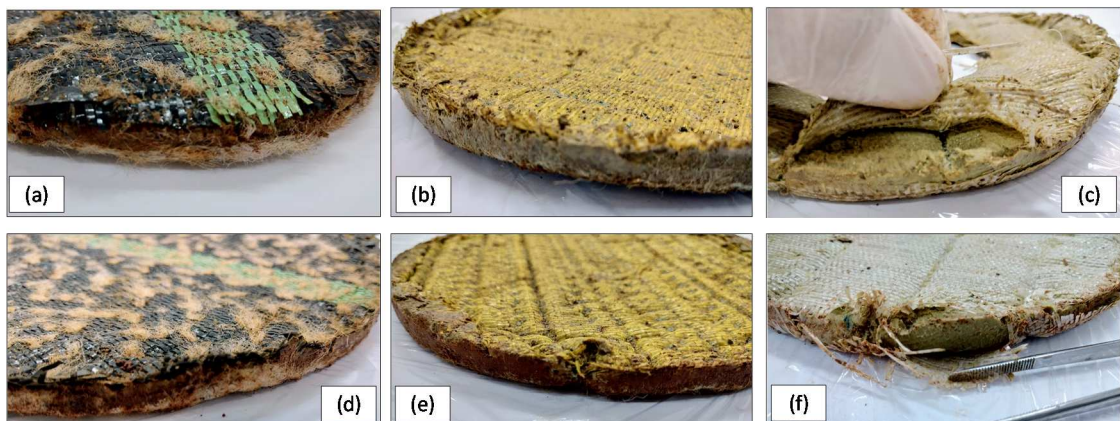


Figura 5.23 – GCLs após a hidratação em condições isotérmicas: (a) GCL1 no subleito $SC_{wót+2\%}$ (b) GCL2 no subleito $SC_{wót+2\%}$, (c) GCL3 no subleito $SC_{wót+2\%}$; (d) GCL1 no subleito $CH_{wót+2\%}$; (e) GCL2 no subleito $CH_{wót+2\%}$, (f) GCL3 no subleito $CH_{wót+2\%}$.

De acordo com a Tabela 5.3, todos os GCLs apresentam valores de CTC maiores que 70 meq/100g, mesmo após condições térmicas. Verificou-se que os valores CTC foram afetados de forma mais significativa do que os de SI em relação as amostras virgens. A bentonita granular do GCL1 sofreu uma menor influência da insuficiente hidratação nos valores

de SI e CTC do que a bentonita do tipo pó dos GCL2 e GCL3. No entanto, é interessante notar que algumas variáveis químicas dos percolantes e dos subleitos não foram avaliadas nessa pesquisa, e que influenciam nos valores de SI e CTC. Isso pode explicar porque as mudanças nos valores de SI e CTC foram diferentes para o subleito SC e CH, mesmo tendo o mesmo nível de hidratação.

A Figura 5.24 compara a condutividade hidráulica das amostras de GCLs analisadas nesta pesquisa na condição virgem e exumadas após os ensaios de hidratação em condições térmicas e isotérmicas. Conforme observado na Figura 5.24 houve um aumento drástico neste parâmetro após a insuficiente hidratação nas duas condições analisadas.

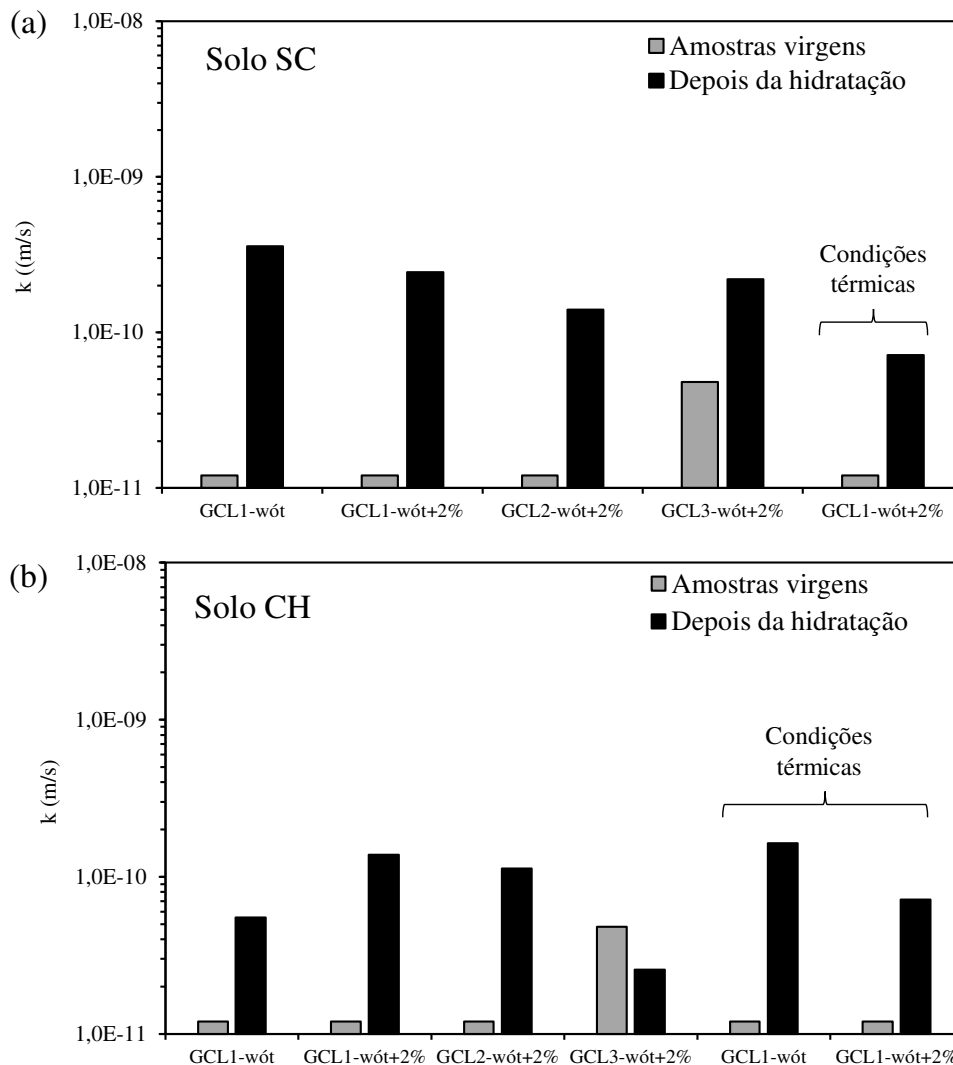


Figura 5.24 - Comparativo das condutividades hidráulicas medidas em amostras virgens e exumadas após os testes de hidratação: (a) solo SC; (b) solo CH.

A tendência de redução nos valores de SI e CTC para todos os GCLs pode ter impactado na resposta da condutividade hidráulica. Observa-se que o GCL3, composto por bentonita do tipo pó, foi menos afetado pela hidratação insuficiente do que as outras amostras analisadas. No entanto, este foi o GCL com as maiores reduções nos valores de SI após os ensaios. Não foram evidenciadas neste estudo tendências consistentes entre os níveis de hidratação nas duas condições analisadas e os valores SI ou CTC e a condutividade hidráulica dos GCLs pós-hidratação, como mostrado na Figura 5.25.

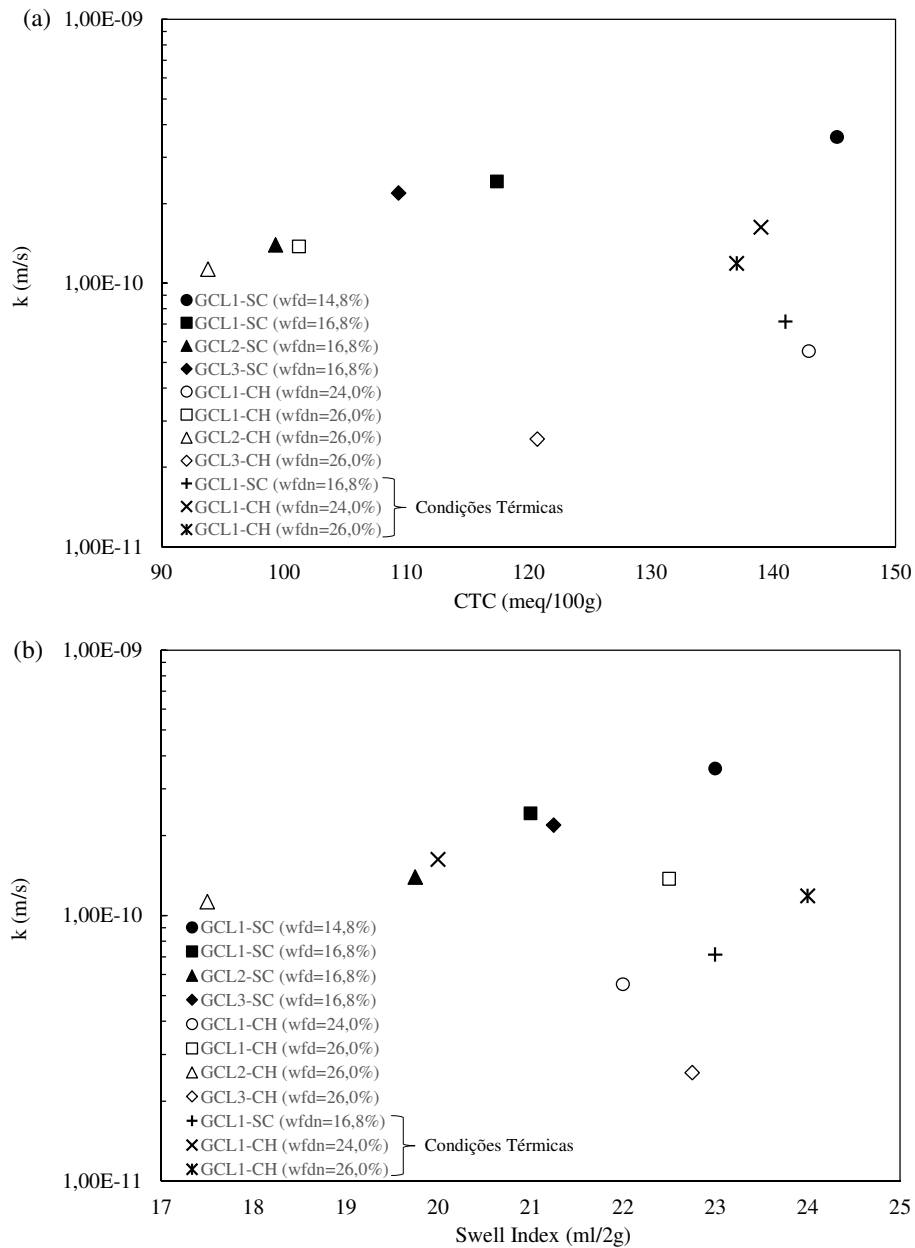


Figura 5.25 – Influência da propriedade do GCL na condutividade hidráulica após ensaios: (a) CTC; (b) SI.

Uma comparação dos resultados de condutividade hidráulica de Scalia e Benson (2011) e Meer e Benson (2007) com os encontrados nesta pesquisa são apresentados na Figura 5.26. Observa-se que os níveis de condutividade hidráulica medidos neste estudo são similares àqueles verificados na literatura, evidenciando a ausência de tendência ou inter-relação nos resultados. Isso permite concluir a necessidade de estudar o efeito de variáveis que podem influenciar na condutividade hidráulica de GCLs hidratados por diferentes subleitos.

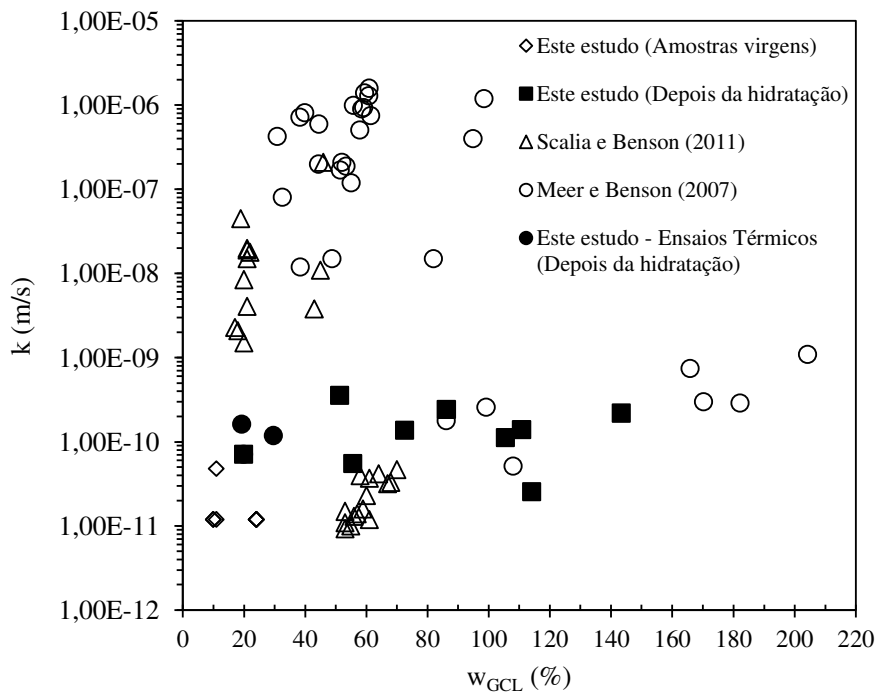


Figura 5.26 - Condutividade hidráulica após hidratação versus teor de umidade gravimétrica.

É válido ressaltar, no entanto, que os solos lateríticos se caracterizam por uma baixa reatividade, alto teor de óxidos de alumínio e ferro. Estes óxidos são encontrados na forma de minerais, os óxidos de ferro na forma dos minerais hematita e goethita, e os óxidos de alumínio na forma do mineral gibbsita. Essas características acarretam em valores de capacidade de troca catiônica dos solos relativamente baixos e compatíveis com a mineralogia destes solos (Meurer, 2006). A fase líquida dos solos lateríticos é composta pela água, que por ser um solvente, promove a solubilização de íons aderidos à superfície dos minerais constituintes do solo, além de dissolver gases oclusos nos poros (Farias, 2012). A presença dos óxidos de Fe e Al nessa fase líquida pode vir a substituir os cátions de Ca e Na das bentonitas e influenciar nos valores de condutividade hidráulica dos GCLs. Este comportamento, no entanto, não foi observado nesta pesquisa, resultado compatível com os observados por Bradshaw et al. (2013) ao estudar

a influência da troca catiônica na condutividade hidráulica dos GCLs. Bradshaw et al. (2013) analisaram a condutividade hidráulica de GCLs permeados com lixiviados sintéticos, e os resultados mostraram que não ocorreram trocas catiônicas significativas nos primeiros 30 dias de hidratação. Uma variação de 31% foi notada somente após 1 ano de hidratação das amostras, sem, no entanto, estabelecer uma relação dessa variação na condutividade hidráulicas dos GCLs.

Estes resultados indicam que análises complementarem mais detalhadas da CTC entre o subleito e o GCL, o tipo de bentonita e o tipo de GCL podem explicar a influência dessas variáveis na condutividade hidráulica dos GCLs. Um exemplo dessas variáveis é que após a instalação do GCL no subleito, os cátions da bentonita são suscetíveis à substituição por outros cátions presentes na água ao redor dos poros (Benson, 2013). Rowe et al. (2019) apontaram que a ocorrência de troca catiônica da bentonita do GCL com a água retirada dos poros do subleito afeta a condutividade hidráulica do GCL. Uma relação entre a condutividade hidráulica do GCL e os valores de SI e CTC são mais evidentes quando se altera o líquido percolante, principalmente líquidos agressivos com presença de grandes concentrações de cátions divalentes (Tian et al., 2019).

6 Conclusões

A expansão e aplicação dos GCLs nas mais diversas obras de engenharia como barreira hidráulica requer um conhecimento bem definido sobre suas características de desempenho deste em campo. Assim, visando compreender o processo de hidratação dos GCLs e seu desempenho pós-hidratação quando em contato com subleitos de solos lateríticos, esta pesquisa desenvolveu um amplo estudo laboratorial. Ensaios de hidratação dos GCLs foram desenvolvidos em condições isotérmicas por meio de colunas de hidratação, bem como análises em condições térmicas simuladas de campo por meio de modelo físico. As principais conclusões desta pesquisa foram:

- O teor de umidade do subleito teve significativa influência na hidratação dos GCLs, sendo que quando compactados com teor de umidade 2% acima do teor ótimo, todos os GCLs apresentaram desempenho superior do que quando hidratados nos parâmetros ótimos;
- A granulometria das bentonita do GCL se mostrou como uma variável sensível na hidratação dos GCLs pelo subleito. O tipo granular apresentou os menores teores de umidade do GCL em todas as análises. Esta condição foi agravada quando o GCL foi hidratado pelo subleito compactado com menor teor ótimo;
- O geotêxtil em contato com o subleito também apresentou influencia no processo de hidratação, sendo que o lado não tecido levou a um desempenho inferior, principalmente quando a bentonita era do tipo granular. Com bentonita do tipo pó, o desempenho de hidratação foi semelhante ao observado para o hidratado com o geotêxtil tecido em contato com o subleito;
- O entendimento do comportamento não saturado dos GCLs e dos subleitos é chave no entendimento da hidratação dos GCLs. Os resultados demonstraram que existe um diferencial de sucção que atua na transferência do subleito para o GCL e que a magnitude desse diferencial regula a hidratação do GCL ao longo de todo o processo tanto em condições térmicas como isotérmicas;
- A exposição à ciclos de variação térmicas impactou significativamente na capacidade de hidratação do GCL por solos lateríticos, chegando a secar o GCL durante o processo de hidratação;

- Os resultados demonstram que os solos lateríticos apresentam, em condições isotérmicas, velocidade inicial de hidratação do GCL semelhantes à de solos de zonas de clima temperado, embora em longo prazo tenham apresentado capacidade reduzida de hidratação, fato gerado pelo formato das curvas de retenção destes solos;
- O solo SC resultou em uma melhor hidratação dos GCLs do que o solo CH em condições isotérmicas. No entanto, o contrário ocorreu em condições térmicas. Esse comportamento está associado ao comportamento bimodal da curva de retenção do solo SC.
- As propriedades características dos GCLs sofreram alterações significativas após a insuficiente hidratação. Destaca-se o aumento significativo da condutividade hidráulica, o que é preocupante em termos práticos uma vez que reduz a eficiência do *liner*;
- A retração observada nas amostras ensaiadas em condições térmicas tem magnitude semelhantes as encontradas na literatura em condições de campo. Foi verificada uma relação dos valores de retração com teor de umidade final do GCL e o número de ciclos de umedecimento e secagem que as amostras foram submetidas.

Os estudos com GCLs apresentam um cenário de grandes desafios para a geotecnia, e atendem a uma demanda crescente do meio técnico que busca cada vez mais por assertividade na aplicação dos materiais e soluções geotécnicas.

Sugestões de Pesquisa

As experiências e constatações desta pesquisa apontam para novos objetivos a serem abordados e esclarecidos em trabalhos futuros. Análises numéricas podem contribuir para um melhor entendimento do processo de hidratação dos GCLs por meio de análises focadas no comportamento não saturado do subleito e GCL e na interação destes dois materiais em condições variadas de temperatura e umidade. Análises químicas mais aprofundadas nos parâmetros de CTC do solo e dos GCLs podem expandir a compreensão dos efeitos dessas variáveis nos valores de condutividade hidráulica dos GCLs para diferentes lixiviados. Estudos focados em monitoramento de campo podem confirmar os resultados do modelo físico desta pesquisa e refinar os parâmetros de projeto de liners com GCLs. Com relação às recomendações de projeto, análises mais focadas na relação custo x benefício na utilização de GCLs são necessárias a partir dos resultados aqui encontrados.

Referências Bibliográficas

ABDELRAZEK, A. Y.; ROWE, R. K. Interface transmissivity of conventional and multicomponent GCLs for three permeants. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, n. 1, p. 60–74, 2019.

ACIKEL, A. S. et al. Applicability and accuracy of the initially dry and initially wet contact filter paper tests for matric suction measurement of geosynthetic clay liners. **Géotechnique**, v. 65, n. 9, p. 780–787, set. 2015.

ACIKEL, A. S. et al. Insufficient initial hydration of GCLs from some subgrades: Factors and causes. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 6, p. 770–781, dez. 2018a.

ACIKEL, A. S. et al. Time-dependent unsaturated behaviour of geosynthetic clay liners. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55, n. 12, p. 1824–1836, dez. 2018b.

ALI, M. A. et al. Thermal conductivity of geosynthetic clay liners. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 9, p. 1510–1521, set. 2016.

ALTHER, G. R. The effect of the exchangeable cations on the physico-chemical properties of Wyoming bentonites. **Applied Clay Science**, v. 1, n. 3, p. 273–284, abr. 1986.

ANDERSON, R.; RAYHANI, M. T.; ROWE, R. K. Laboratory investigation of GCL hydration from clayey sand subsoil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 31, p. 31–38, abr. 2012.

ASTM D 1776. Standard Practice for Conditioning and Testing Textiles, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D 2216. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D2487-17e1, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017,

ASTM D 5261. Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D 5298. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (suction) Using Filter Paper, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D 5887. Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D 5890. Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of

Geosynthetic Clay Liners, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D 5891. Standard Test Method for Fluid Loss of Clay Component of Geosynthetic Clay Liners, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D 5993. Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geosynthetic Clay Liners, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D 6102, Standard Guide for Installation of Geosynthetic Clay Liners, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. ABNT, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo: determinação do limite de liquidez, ABNT, Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica, ABNT, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**. Solos – Ensaio de Compactação, ABNT, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, ABNT, Rio de Janeiro, 2000.

AZAD, F. M. et al. Laboratory investigation of thermally induced desiccation of GCLs in double composite liner systems. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 6, p. 534–543, 2011.

BEDDOE, R. A.; TAKE, W. A.; ROWE, R. K. Water-Retention Behavior of Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 11, p. 1028–1038, nov. 2011.

BENSON, C. Impact of subgrade water content on cation exchange and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners in composite barriers. In: **Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics**. [s.l.] CRC Press, 2013a. p. 79–84.

BENSON, C. Impact of subgrade water content on cation exchange and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners in composite barriers. In: **Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics**. [s.l.] CRC Press, 2013b. p. 79–84.

BENSON, C. H. et al. Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners in a Landfill

Final Cover. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 7, p. 814–827, jul. 2007.

BENSON, C. H.; MEER, S. R. Relative Abundance of Monovalent and Divalent Cations and the Impact of Desiccation on Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 3, p. 349–358, mar. 2009.

BOSTWICK, L. et al. Anisotropy and directional shrinkage of geosynthetic clay liners. **Geosynthetics International**, v. 17, n. 3, p. 157–170, jun. 2010.

BOSTWICK, L. E. et al. **The Effect of Sample Size on Shrinkage of a Non-Scrim Reinforced Geosynthetic Clay Liner in Laboratory Tests**. OttawaGeo2007. **Anais...2007**

BOSTWICK, L. E. Laboratory study of geosynthetic clay liner shrinkage when subjected to wet/dry cycles. **Analysis**, 2009.

BOUAZZA, A. Geosynthetic clay liners. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 20, n. 1, p. 3–17, 2002.

BOUAZZA, A. et al. Unsaturated geotechnics applied to geoenvironmental engineering problems involving geosynthetics. **Engineering Geology**, v. 165, p. 143–153, out. 2013.

BOUAZZA, A. et al. Heat and moisture migration in a geomembrane–GCL composite liner subjected to high temperatures and low vertical stresses. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 42, n. 5, p. 555–563, out. 2014.

BOUAZZA, A. et al. New insight on geosynthetic clay liner hydration: the key role of subsoils mineralogy. **Geosynthetics International**, v. 24, n. 2, p. 139–150, maio 2017a.

BOUAZZA, A. et al. Heat mitigation in geosynthetic composite liners exposed to elevated temperatures. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 5, p. 406–417, out. 2017b.

BOUAZZA, A.; GATES, W. P.; ABUEL-NAGA, H. M. Factors impacting liquid and gas flow through geosynthetic clay liners. **Geosynthetics–Recent Developments. Commemorating Two Decades of Geosynthetics in India**, v. Geosynthet, n. March 2018, p. 119–146, 2006.

BRACHMAN, R. W. I. et al. **Comparison of field and laboratory measurements of GCL shrinkage**. 10th International Conference on Geosynthetics, ICG 2014. **Anais...2014**

BRACHMAN, R. W. I.; KERRY ROWE, R.; ANDY TAKE, W. Reductions in GCL overlap beneath an exposed geomembrane. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144, n. 12, p. 1–9, 2018.

BRADSHAW, S. L.; BENSON, C. H. Effect of Municipal Solid Waste Leachate on Hydraulic Conductivity and Exchange Complex of Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 4, p. 04013038, abr. 2014.

BRADSHAW, S. L.; BENSON, C. H.; SCALIA, J. Hydration and Cation Exchange during Subgrade Hydration and Effect on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 139, n. 4, p. 526–538, abr.

2013.

BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. **Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification**. 1 st ed. London: [s.n.].

CARNERO-GUZMAN, G. G. et al. Using neutron spectroscopy to measure soil-water retention at high suction ranges. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 56, n. 12, p. 1999–2003, dez. 2019.

CHEN, J. N.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners with Sodium Bentonite to Coal Combustion Product Leachates. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144, n. 3, p. 04018008, mar. 2018.

CHEVRIER, B. et al. Geotextiles and Geomembranes Influence of subgrade , temperature and confining pressure on GCL hydration. v. 33, 2012.

CUI, Y. On the hydro-mechanical behaviour of MX80 bentonite-based materials. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 9, n. 3, p. 565–574, jun. 2017.

DANIEL, D. E.; KOENER, R. M. **Quality assurance and quality control for waste containment facilities**. [s.l.: s.n.].

DELAGE, P. Microstructure Features in the Behaviour of Engineered Barriers for Nuclear Waste Disposal. In: **Experimental Unsaturated Soil Mechanics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 11–32.

DISH, D. L. Quantitative X-Ray Diffraction Analysis of Soils. In: **Quantitative Methods in Soil Mineralogy**. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 2015. p. 267–295.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 211–223, fev. 1994.

FARIAS, W. M. **Processos evolutivos de intemperismo químico e sua ação no comportamento hidromecânico de solos do Planalto Central**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2012.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1 ago. 1994.

GATES, W. P. et al. Water desorption and absorption isotherms of sodium montmorillonite: A QENS study. **Applied Clay Science**, v. 147, n. March, p. 97–104, out. 2017.

GATES, W. P.; DUMADAH, G.; BOUAZZA, A. Micro X-ray visualisation of the interaction of geosynthetic clay liner components after partial hydration. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 6, p. 739–747, dez. 2018.

GIROUD, J. P. Quantification of geosynthetic behavior. **Geosynthetics International**, v. 12, n. 1, p. 2–27, jan. 2005.

GIROUD, J. P.; BADU-TWENEBOAH, K.; SODERMAN, K. L. Comparison of Leachate Flow Through Compacted Clay Liners in Landfill Liner Systems. **Geosynthetics International**, v. 4, n. 3–4, p. 391–431, jan. 1997.

GRI GCL3. **Standard Specification for Test Methods, Required Properties, and Testing Frequencies of Geosynthetic Clay Liners (GCLs)**. Folsom, PA: [s.n.]. Disponível em: <www.geosynthetic-institute.org>.

GUYONNET, D. et al. Geosynthetic Clay Liner Interaction with Leachate: Correlation between Permeability, Microstructure, and Surface Chemistry. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 6, p. 740–749, jun. 2005.

GUYONNET, D. et al. Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 5, p. 321–331, out. 2009.

HOSNEY, M. S.; ROWE, R. K. Performance of three GCLs used for covering gold mine tailings for 4 years under field and laboratory exposure conditions. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 3, p. 197–212, jun. 2014.

JO, H. Y. et al. Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single-Species Salt Solutions. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 7, p. 557–567, jul. 2001.

KERRY ROWE, R. et al. GCL hydration under simulated daily thermal cycles. **Geosynthetics International**, v. 18, n. 4, p. 196–205, ago. 2011.

KOERNER, R. M; KOENER, G. R. **In-Situ Separation of GCL Panels Beneath Exposed Geomembranes**. Folsom, PA: [s.n.].

KOLSTAD, D. C.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Hydraulic Conductivity and Swell of Nonprehydrated Geosynthetic Clay Liners Permeated with Multispecies Inorganic Solutions. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 12, p. 1236–1249, dez. 2004.

LEE, J.-M. et al. Correlating Index Properties and Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 11, p. 1319–1329, nov. 2005.

LIU, Y. et al. Hydraulic performance of geosynthetic clay liners to sulfuric acid solutions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, n. 1, p. 14–23, fev. 2015.

MARÇAL, R. et al. Reinforcing Effect of Polypropylene Waste Strips on Compacted Lateritic Soils. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9572, 17 nov. 2020.

MCWATTERS, R. S. et al. Geosynthetics in Antarctica: Performance of a composite barrier system to contain hydrocarbon-contaminated soil after three years in the field. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, n. 5, p. 673–685, out. 2016.

MEER, S. R.; BENSON, C. H. Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners

Exhumed from Landfill Final Covers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 5, p. 550–563, maio 2007.

MELCHIOR, S. et al. **Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers**. Clay Geosynthetics Barriers, Proceedings of the international symposium. **Anais...Nuremberg**: 2002

MEURER, E. J. **Fundamentos de química dos solos**. 3ª Ed. ed. Porto Alegre: EVANGRAF, 2006.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. CAROLINA C. Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina / PR. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 12, n. 24, p. 63–74, 2014.

MISHRA, A. K. et al. Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures. **Applied Clay Science**, v. 52, n. 1–2, p. 78–84, abr. 2011.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2nd. ed. London: Oxford University, 1997.

NAVARRO, V. et al. Differentiated intra- and inter-aggregate water content models of mx-80 bentonite. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 325–336, dez. 2015.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

NORRISH, K.; QUIRK, J. P. Crystalline Swelling of Montmorillonite: Use of Electrolytes to Control Swelling. **Nature**, v. 173, n. 4397, p. 255–256, fev. 1954.

OLSTA, J.; CHUNG, J.; DANIEL, D. Various Aspects of Sodium Bentonite Testing. In: **Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology: 2nd Symposium**. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2004. p. 3–8.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba-SP (escala 1: 100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1992.

PETROV, R. J.; ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 123, n. 8, p. 683–695, 1997.

PORTELINHA, F. H. M.; ZORNBERG, J. G. Effect of infiltration on the performance of an unsaturated geotextile-reinforced soil wall. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 3, p. 211–226, jun. 2017.

RAYHANI, M. H. T. et al. **Prototype Modeling of GCL Hydration and Shrinkage under Simulated Field Conditions**. Geosynthetics 2009. **Anais...2009**

RAYHANI, M. T. et al. Factors affecting GCL hydration under isothermal conditions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 6, p. 525–533, dez. 2011.

ROUF, M. A. et al. Water vapour adsorption and desorption in GCLs. **Geosynthetics International**, v. 23, n. 2, p. 86–99, abr. 2016.

ROWE, R. et al. Effect of Freeze-Thaw on the Permeation of Arctic Diesel Through a GCL. **Journal of ASTM International**, v. 1, n. 2, p. 11741, 2004.

ROWE, R. K. Long-term performance of contaminant barrier systems. **Géotechnique**, v. 55, n. 9, p. 631–678, nov. 2005.

ROWE, R. K. Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications. **Soils and Rocks**, v. 30, n. 1, p. 3–30, 2007.

ROWE, R. K. et al. Physical modelling of nonwoven/nonwoven GCL shrinkage under simulated field conditions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 40, p. 12–19, out. 2013.

ROWE, R. K. et al. Chemical interaction and hydraulic performance of geosynthetic clay liners isothermally hydrated from silty sand subgrade. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, n. 6, p. 740–754, dez. 2019.

ROWE, R. K. Geosynthetic clay liners: Perceptions and misconceptions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 2, p. 137–156, abr. 2020.

ROWE, R. K.; HOSNEY, M. S. Interface transmissivity and hydraulic conductivity of GCLs below poured concrete. **Geosynthetics International**, v. 22, n. 1, p. 48–69, fev. 2015.

SÁNCHEZ, M. et al. Fully Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Double-Porosity Formulation for Unsaturated Soils. **International Journal of Geomechanics**, v. 16, n. 6, dez. 2016.

SANTOS, G.; MARTÍNEZ, S. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS LATERÍTICOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

SARABIAN, T.; RAYHANI, M. T. Hydration of geosynthetic clay liners from clay subsoil under simulated field conditions. **Waste Management**, v. 33, n. 1, p. 67–73, jan. 2013.

SCALIA, J.; BENSON, C. H. Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Landfill Final Covers with Composite Barriers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 1, p. 1–13, jan. 2011.

SCALIA, J.; BENSON, C. H.; FINNEGAN, M. Alternate Procedures for Swell Index Testing of Granular Bentonite from GCLs. **Geotechnical Testing Journal**, v. 42, n. 5, p. 18, 1 set. 2019.

SUITS, L. D. et al. Effect of Permeant Water on the Hydraulic Conductivity of Exhumed GCLs. **Geotechnical Testing Journal**, v. 33, n. 3, p. 102609, 2010.

TAKE, W. A. et al. Thermal Expansion and Contraction of Geomembrane Liners Subjected to Solar Exposure and Backfilling. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 11, p. 1387–1397, nov. 2012.

TAKE, W. A. et al. Thermal exposure conditions for a composite liner with a black geomembrane exposed to solar radiation. n. 1, 2015.

THIEL, R. et al. **Laboratory measurements of GCL shrinkage under cyclic changes in temperature and hydration conditions**. Eighth International Conference on Geosynthetics. *Anais...*Fairfax, VA: 2006

TIAN, Z. et al. Approaches for estimating unsaturated soil hydraulic conductivities at various bulk densities with the extended Mualem-van Genuchten model. **Journal of Hydrology**, v. 572, p. 719–731, maio 2019.

TOUZE-FOLTZ, N.; XIE, H.; STOLTZ, G. Performance issues of barrier systems for landfills: A review. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 49, n. 2, p. 475–488, abr. 2021.

WEERASINGHE, I. A. et al. Factors affecting the hydraulic performance of a geosynthetic clay liner overlap. **Journal of Environmental Management**, v. 271, n. June, p. 110978, out. 2020.

WIREKO, C.; ABICHOU, T. Investigating factors influencing polymer elution and the mechanism controlling the chemical compatibility of GCLs containing linear polymers. **Geotextiles and Geomembranes**, n. March 2020, p. 15, fev. 2021.

YESILLER, N. et al. Hydration Fluid and Field Exposure Effects on Moisture-Suction Response of Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 145, n. 4, p. 04019010, abr. 2019.

YOUNG JO, H.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Hydraulic Conductivity and Cation Exchange in Non-prehydrated And Prehydrated Bentonite Permeated with Weak Inorganic Salt Solutions. **clays and clay minerals**, v. 52, n. 6, p. 661–679, 1 dez. 2004.

YU, B.; EL-ZEIN, A. Irrigated composite liner designs for fast hydration and prevention of thermal desiccation of geosynthetics clay liners. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 6, p. 950–961, dez. 2020.

YU, B.; EL-ZEIN, A.; ROWE, R. K. **Effect of bentonite mass per unit area on the desiccation of geosynthetic clay liners under high temperature and low overburden pressure**. Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics, Seoul-Korea. *Anais...*2018

ZORNBERG, J. G.; BOUAZZA, A.; MCCARTNEY, J. S. Geosynthetic capillary barriers: current state of knowledge. **Geosynthetics International**, v. 17, n. 5, p. 273–300, out. 2010.