

Capítulo X

AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE ALTERNATIVA PARA USO COMO CCL OU SISTEMA COMPOSTO (CCL + GCL) NA PLANÍCIE COSTEIRA SUL DO RIO GRANDE DO SUL





AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE ALTERNATIVA PARA USO COMO CCL OU SISTEMA COMPOSTO (CCL + GCL) NA PLANÍCIE COSTEIRA SUL DO RIO GRANDE DO SUL

Karina Retzlaff Camargo¹; Alexandre Felipe Bruch²

¹Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Avenida Itália, km 8, Rio Grande, Rio Grande do Sul, CEP 96203-900, karinacamargo@furg.br

²Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Rua Benjamin Constant, 989, Pelotas, Rio Grande do Sul, CEP 96010-020, abruch@gmail.com

RESUMO

Algumas regiões da costa brasileira, dentre as quais a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, são consideradas deficitárias em solos considerados nobres para obras de terra, tais como agregados pétreos e solos residuais. Neste contexto, solos adequados para uso como barreira impermeabilizante são ainda menos frequentes na região e, por isso, muitas vezes se faz necessário o uso de aditivos – geralmente bentonita - em solos naturais para tornar o solo apto tecnicamente a este fim. Por isso, este trabalho realiza a avaliação do comportamento mecânico e hidráulico, através de ensaios em equipamento triaxial, de um solo fino de comportamento laterítico, encontrado na Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul para uso como barreira mineral. É avaliado o comportamento do solo natural e de misturas com 2, 4 e 6% de bentonita, em termos de peso seco dos materiais, quando compactados na Energia do Proctor Intermediário. Em síntese, observa-se que a condutividade hidráulica diminui tanto com o aumento do teor de bentonita quanto com o aumento da tensão de confinamento. A condutividade hidráulica do solo apresentou uma redução de três ordens de grandeza quando este foi compactado com 6% de bentonita em relação ao solo natural (de 10⁻⁷ para 10⁻¹⁰m/s) e este foi o único teor que apresentou comportamento compatível para o uso como liner. Em relação à resistência ao cisalhamento das misturas, constatou-se que com o acréscimo de teor de bentonita de 0 para 6%, a coesão efetiva aumentou (de 2,3 para 12,8 kPa) e o ângulo de atrito efetivo diminuiu (de 22,7° para 14,0°). Assim, apresenta-se como solução tecnicamente viável para uso em liners o uso de um solo fino de comportamento laterítico com 6% de bentonita compactado na Energia do Proctor Intermediário. Entretanto, alerta-se para a diminuição dos parâmetros de resistência e na anisotropia desta diminuição causada pelo acréscimo de aditivo.

Palavras-chave: Camada de solo compactado, barreira impermeável, ensaios triaxiais, Planície Costeira do Rio Grande do Sul

ABSTRACT

Some regions of the Brazilian coast, among which the Coastal Plain of Rio Grande do Sul State, are considered deficient in soils considered noble for geotechnical projects, such as stony aggregates and residual soils. In this context, soils suitable for use as liner barrier are even less frequent in the region and, therefore, it is often necessary to use additives – usually bentonite – in natural soils to make the soil technically suitable for this purpose. Therefore, this project evaluates the mechanical and hydraulic behavior, through tests in triaxial equipment, of a fine lateritic soil, which is found in the Coastal Plain of Rio Grande do Sul State for use as a mineral barrier. The behavior of the natural soil and mixtures with 2, 4 and 6% of bentonite, in terms of dry weight of the material, are evaluated when compacted in the Energy of Intermediate Proctor. In summary, it is observed that the hydraulic conductivity decreases both with the increase in the bentonite content and with the increase in the confinement stress. The hydraulic conductivity of the soil presented a reduction of three orders of magnitude when it was compacted with 6% of bentonite in relation to the natural soil (from 10⁻⁷ para 10⁻¹⁰m/s) and this was the only content that presented a compatible behavior for use as a liner. Regarding the shear strength, it was found that the addition of bentonite content from 0 to 6%, the effective cohesion increased (from 2.3kPa to 12.8kPa) and the effective angle decreased (from 22.7° to 14.0°). Thus, a technically viable solution for use is the use of a lateritic behavior fine soil compacted with 6% of bentonite in the Energy of the Intermediate Proctor. However, attention should be paid to the decrease in strength parameters and the anisotropy of this decrease due to the presence of the additive.

Keywords: Compacted soil layer, waterproof barrier, triaxial test, Coastal Plain of Rio Grande do Sul State

INTRODUÇÃO

De acordo com Boscov (2008), o revestimento de fundo de aterros de resíduos tem como função reduzir o transporte de poluentes para

a zona insaturada e/ou aquífero subjacente até concentrações não prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente e é composto basicamente por camadas de impermeabilização (*liners*), drenagem e transição. Ainda segundo a autora, para a impermeabilização podem ser utilizadas camadas de solo compactado (*compacted clay liner* – CCL), geossintéticos (geomembrana – GM ou geocomposto argiloso para barreira impermeável – GCL) ou, mais usualmente uma combinação destas (CCL + GCL).

No Brasil, não há ainda uma norma de critérios de projeto, construção e operação de aterros sanitários, em contraponto aos resíduos perigosos (ABNT NBR 10157/87), resíduos não perigosos (ABNT NBR 13896/97) e resíduos inertes e da construção civil (ABNT NBR 15113/04). Apesar disso, no Estado de São Paulo, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) tem requisitado, para revestimento de fundo de aterros de resíduos Classe I, uma camada de solo argiloso compactado com espessura de 1 metro, condutividade hidráulica (inferior a 1×10^{-9} m/s sobreposta por duas membranas de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) com espessura de 2mm e condutividade hidráulica da ordem de 10^{-14} m/s, entremeadas por uma camada drenante para captar o percolado que eventualmente infiltre pela geomembrana superior (dreno testemunho). Já para resíduos Classe II exige-se as mesmas condições, mas a camada de solo argiloso pode ter 0,6 metro de espessura. Assim, Boscov (2008) informa que os sistemas de impermeabilização compostos (CCL + GCL) são considerados a melhor solução para a proteção do subsolo e das águas subterrâneas, pois promovem:

- A redução da condutividade hidráulica do sistema em virtude da atenuação dos defeitos locais, que podem acontecer nas geomembranas e camadas de solo, como ilustra a Figura 1;

- Facilitação do fluxo em direção ao sistema de coleta de percolado, diminuindo o tempo de residência sobre a camada impermeável;

- Prevenção contra problemas decorrentes da falta de compatibilidade entre percolado e solo, pois a geomembrana adia o contato entre ambos até que o sistema esteja sujeito a tensões efetivas

elevadas, correspondentes à sobrecarga do aterro;

- Proteção contra trincas de secagem, aspecto fundamental no emprego de argilas lateríticas, as quais são bastante comuns em algumas regiões brasileiras.

Por isso, entende-se que a solução combinada entre solo compactado e geomembrana é a melhor combinação para *liner* de aterros de resíduos ou mesmos outras obras civis que requeiram impermeabilização. Entretanto, conforme alertado por Bastos et al. (2008), muitas regiões da costa brasileira, dentre as quais a Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), ilustrada na Figura 2a, apresentam deficiência de materiais geotécnicos naturais considerados nobres para uso em obras de terra, tais como agregados pétreos e solos residuais. Por isso, desde 1993, o Grupo de Geotecnia da FURG (Universidade Federal do Rio Grande) e pesquisadores parceiros vem realizando estudos que visam o reconhecimento e caracterização geotécnica de solos considerados alternativos para este tipo de uso na PCRS. Dentre estes trabalhos, destaca-se que Bastos (2003) identificou e caracterizou geotécnicamente materiais com potencial de uso para obras de terra na região e Bastos et al. (2007) apresentaram o mapeamento geotécnico com a ocorrência destes solos. Apesar destas contribuições com a identificação de solos para utilização em obras de terra, ainda menos solos foram identificados com potencial de uso como CCL ou mesmo camada composta, apenas: (i) um solo argilo-arenoso residual de rochas graníticas; e (ii) um solo arenoso fino subsuperficial pertencente à barreira litorânea. Bastos et al. (2008) apresentaram resultados de *k* para estes dois solos, através de ensaios em permeâmetro de parede flexível, quando compactados na Energia do Proctor Normal. Enquanto o primeiro solo apresentou condutividade hidráulica média de $9,94 \times 10^{-10}$ m/s, o segundo apresentou $0,99 \times 10^{-7}$ m/s. Assim, o estudo consolidou a posição da “argila vermelha” oriunda das saibreiras do município do Capão do Leão como único material que, na condição natural, atende especificações técnicas para a construção de barreiras minerais no sul da PCRS, dada a baixa condutividade hidráulica e boa compactabilidade,

características típicas de um solo argiloso de comportamento laterítico. Entretanto, a jazida deste solo encontra-se no limite superior da porção sul da PCRS, o que pode impactar nos custos de transporte para obras de terra que requeiram impermeabilização em regiões mais austrais. Por isso, este trabalho avalia o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de solo arenoso fino subsuperficial pertencente à barreira litorânea misturado com bentonita, argilomineral expansivo que é capaz de diminuir a condutividade hidráulica da mistura, para uso como CCL ou camada composta no sul da PCRS, como alternativa à argila laterítica em condição natural.

MATERIAIS E MÉTODOS

Solo

O solo estudado é encontrado na PCRS, a qual, segundo Tomazelli e Villwock (2005) teve os depósitos que formam seu arcabouço geológico desenvolvidos a partir de sistemas deposicionais que ocorreram no final do Terciário e, principalmente, durante o Quaternário. A formação deu-se através de um amplo sistema de leques aluviais, situado em sua parte mais interna, próximo às áreas-fonte, e do acréscimo lateral de quatro sistemas deposicionais do tipo “laguna-barreira”, apresentados na Figura 2b. Segundo Villwock e Tomazelli (1995), os depósitos sedimentares da PCRS compõem a seção superior emersa da Bacia de Pelotas. Ainda segundo os autores, os sistemas deposicionais se desenvolveram a partir de ciclos transgressivos-regressivos controlados pela glacioeustasia e registraram máximos transgressivos seguido por regressões. De acordo com Tomazelli (1990, 1993) a transgressão pós-glacial iniciada em torno de 14 ka atrás foi promovida por uma subida rápida do nível do mar, pontuada por breves períodos de estabilização. Côrrea (1990) reconheceu, ao longo da PCRS, paleoníveis marinhos nas profundidades atuais de 120-130m, 60-70m, 32-45m e 20-25m, que marcam estes períodos de estabilização. Há cerca de 5,1 ka foi atingido o máximo avanço, com linha de costa estendendo-se até os depósitos da Barreira III, parcialmente erodindo-os e escavando uma falésia de abrasão. Após 5,1 ka, uma fase transgressiva ampliou a Barreira IV e os depósitos

do sistema lagunar (BUCHMANN, 1997).

Com a realização dos estudos de Bastos (2003), Bastos et al. (2007) e Bastos et al. (2008) foi evidenciada a possibilidade do uso técnico de misturas de bentonita e de um solo encontrado no horizonte de evolução pedogenética de uma das barreiras litorâneas que formam a PCRS, de idade pleistocênica, denominada Barreira Litorânea II (VILLWOCK, 1984), identificado na Figura 3. Segundo Bastos et al. (2008), esta barreira está relacionada ao segundo evento transgressivo-regressivo do mar no Pleistoceno, com idade aproximada de 325 ka e trata-se do sistema ilhas-barreira responsável pelo primeiro isolamento da Lagoa Mirim. Os sedimentos são compostos por areias quartzo-feldspáticas, castanho-amareladas, bem-arredondadas, envoltas em uma matriz siltico-argilosa de natureza diagenética. Os processos pedogenéticos atuais e pretéritos afetaram profundamente estes sedimentos, o que destruiu estruturas sedimentares primárias. Os processos pedogenéticos atuantes sobre este pacote de sedimentos, em particular a translocação de elementos no perfil e a consequente acumulação de argila e óxidos de ferro e alumínio no horizonte B, determinaram a formação de Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos arênicos, identificados como pertencentes à unidade de mapeamento Tuia (EMBRAPA, 2006).

De acordo com Bastos et al. (2008), este solo tem sido explorado de forma incipiente para pequenas obras de terra na região. Entretanto, suas peculiares características físicas e morfológicas, assemelhadas a solos arenosos finos lateríticos da região sudeste do país, justificam o aprofundamento do estudo das propriedades geotécnicas deste solo na condição compactada. Ainda de acordo com os autores, o solo estudado pertence ao horizonte pedogenético B de perfis de Argissolos Vermelho-Amarelos, formados nos terrenos sedimentares da Barreira Litorânea II, o qual é tradicionalmente chamado pelo Grupo de Geotecnia da FURG de solo ARMAR, em função do nome fantasia de uma das empresas que o explora comercialmente, denominada de Areia do Mar. A Figura 4a ilustra a ocorrência deste solo no litoral sul do Rio Grande do Sul, bem como indica a localização da jazida estudada e a Figura 4b

apresenta o perfil deste solo. Bastos et al. (2008) afirmam que é frequente o perfil deste solo apresentar-se recoberto por depósitos eólicos recentes, ainda sujeitos à mobilização pelo vento. Outra situação comum é a presença de mosqueados no perfil quando este atinge a zona de oscilação do lençol freático (caráter plíntico).

A jazida estudada localiza-se às margens da BR-392, no trecho Pelotas-Rio Grande, na localidade de Domingos Petrolini, onde o solo de interesse é explorado comercialmente. A maior parte do material explorado é beneficiado em secador a lenha e é comercializado para a indústria de fertilizantes do município de Rio Grande, exercendo papel no processo de granulação do adubo. Mais recentemente, em função das obras de duplicação rodoviária que vem acontecendo na região, este solo passou também a ser utilizado para este fim. Ao todo, foram coletados cerca de 200 kg do solo previamente seco e acondicionado em depósito, conforme ilustra a Figura 5a. Em seguida, o material foi acomodado em caixas de madeirite e foi transportado para o local de realização dos ensaios (Figura 5b).

Bentonita

A bentonita utilizada na pesquisa é uma bentonita sódica ativada (montmorilonita cálcica ativada com carbonato de cálcio), cuja principal característica de interesse é a elevada capacidade de expansão quando hidratada. O aditivo utilizado nesta pesquisa atende comercialmente pelo nome de Permigel e foi fornecido pela empresa Bentonit União Nordeste S. A. A Tabela 1 apresenta a composição química da bentonita e a Tabela 2 apresenta algumas propriedades geotécnicas da mesma.

Mistura solo-bentonita

Nesta pesquisa foram utilizadas misturas de solo ARMAR e bentonita nos teores de 2, 4 e 6%, as quais são denominadas, respectivamente, por S02, S04 e S06. O solo natural, ou seja, sem o acréscimo de aditivo é denominado S00. Cabe ressaltar que as proporções de solo e bentonita foram calculadas em função do peso seco dos materiais. A preparação das misturas foi realizada adotando-se os seguintes procedimentos: (i) descondicionamento das caixa

de madeirite; (ii) secagem ao ar; (iii) homogeneização do solo; (iv) redução da quantidade de material, por quarteamento, até a obtenção de massa do material suficiente para a realização do ensaio; (v) rehomogeneização do material com auxílio da peneira de abertura 2 mm; (vi) adição da bentonita, no teor desejado, seguido pela homogeneização manual da mistura; (vii) adição da massa de água necessária, seguida pela completa homogeneização dos materiais; (viii) acondicionamento da mistura, devidamente identificada, em sacos plásticos hermeticamente fechados, seguido por repouso, por no mínimo três dias, com o intuito de ser atingida a completa homogeneização do material.

Mistura solo-bentonita

Nesta pesquisa foram utilizadas misturas de solo ARMAR e bentonita nos teores de 2, 4 e 6%, as quais são denominadas, respectivamente, por S02, S04 e S06. O solo natural, ou seja, sem o acréscimo de aditivo é denominado S00. Cabe ressaltar que as proporções de solo e bentonita foram calculadas em função do peso seco dos materiais. A preparação das misturas foi realizada adotando-se os seguintes procedimentos: (i) descondicionamento das caixa de madeirite; (ii) secagem ao ar; (iii) homogeneização do solo; (iv) redução da quantidade de material, por quarteamento, até a obtenção de massa do material suficiente para a realização do ensaio; (v) rehomogeneização do material com auxílio da peneira de abertura 2 mm; (vi) adição da bentonita, no teor desejado, seguido pela homogeneização manual da mistura; (vii) adição da massa de água necessária, seguida pela completa homogeneização dos materiais; (viii) acondicionamento da mistura, devidamente identificada, em sacos plásticos hermeticamente fechados, seguido por repouso, por no mínimo três dias, com o intuito de ser atingida a completa homogeneização do material.

Métodos

A seguir são apresentados os métodos de ensaios e demais procedimento adotados no programa experimental. Em síntese, todos os métodos foram realizados adotando-se

procedimentos preconizados em normas técnicas, as quais estão devidamente referenciadas. No caso de modificação de procedimento descrito em alguma norma técnica ou ausência de padronização específica é realizada uma descrição mais detalhada do método adotado.

A preparação das amostras e determinação do teor de umidade das mesmas foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457/16. O limite de liquidez e o limite de plasticidade foram determinados pela NBR 6459/16 e NBR 7180/16, respectivamente. A análise granulométrica e a massa específica dos grãos foram determinadas conforme recomendações da NBR 7181/16 e NBR 6508/14, respectivamente. Entretanto, o caráter expansivo e a dificuldade para a completa hidratação da bentonita fez com que alguns procedimentos tivessem que ser alterados:

- para o ensaio de granulometria conjunta ao invés de 75 g de material, foi utilizado 25 g e para garantir a completa hidratação do material, o mesmo foi deixado em repouso por uma semana em solução de 125 g de hexametáfosfato de sódio (concentração de 45,7 g de sal para 1.000 cm³ de solução em água destilada);

- para a determinação do peso específico dos grãos foram utilizadas apenas 15 g do material, ao invés de 50 g recomendado e o tempo de repouso da amostra em água destilada foi de uma semana.

Além da caracterização geotécnica tradicional, o solo natural e as misturas também foram caracterizados pela Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), adotando-se os procedimentos recomendados por Nogami e Vilibor (1995).

Os corpos de prova (CP) utilizados nos ensaios triaxiais foram compactados dinamicamente na Energia do Proctor Intermediário. As dimensões consideradas aceitáveis foram de 50 ± 1 mm de diâmetro (D) e 125 ± 1 mm de altura (H), de forma a atender a relação altura-diâmetro prescrita pela ASTM D 4767/1995 ($H = 2,0$ a $2,5 D$). Os parâmetros de compactação foram obtidos através de procedimento de compactação, conforme recomendações da NBR 7182/16. Convém destacar que, em função da possibilidade de quebra dos grãos e do caráter expansivo da bentonita, todos os

ensaio foram realizados sem o reuso do material.

Após moldagem de cada um dos CPs, foi realizada a instalação do mesmo em câmara triaxial, seguindo-se as seguintes etapas: (i) saturação das válvulas presentes na base da câmara triaxial, seguida pela limpeza e lubrificação com graxa de silicone a superfície da mesma; (iii) posicionamento do CP sobre o pedestal da câmara, com disposição da pedra porosa e papel filtro, previamente saturados, na base e no topo do mesmo; (iv) colocação do cabeçote (*top cap*) sobre o conjunto papel filtro e pedra porosa acondicionados no topo do CP; (iv) colocação de duas membranas impermeáveis de látex nas regiões superior e inferior do CP, na interface com base e *top cap*, de forma a diminuir a possibilidade de danos à membrana final; (v) colocação da membrana impermeável que reveste todo o espécime com vedação através de anéis *o'ring* no topo e na base do CP; (vi) fechamento da câmara triaxial com posterior ajuste e travamento do pistão de carregamento axial sobre o cabeçote justaposto ao CP, restringindo assim possíveis deformações longitudinais ao mesmo durante as fases de saturação e adensamento; (vii) eliminação de bolhas de ar oclusas nas linhas condutoras de pressão; (viii) preenchimento da câmara com água destilada; e (ix) retirada de possível bolhas de ar retidas no interior da câmara triaxial, por meio de um suspiro localizado junto à tampa da mesma. O aspecto geral do CP instalado em câmara triaxial é mostrado na Figura 6.

Uma vez instalado o CP, foi então estabelecida a fase de saturação do mesmo. Inicialmente percola-se água durante 24 horas no CP. Isto é realizado mantendo-se a tensão confinante em 50kPa e a contrapressão em 40kPa. Após este período, uma vez ao dia eleva-se a pressão confinante e contrapressão em 50kPa. As pressões são elevadas até atingir-se um estágio de 600 e 590kPa. Após 24 horas da aplicação deste estágio, a saturação é verificada através do parâmetro B de Skempton, o qual é definido através da Equação 1, em que Δu é o acréscimo de pressão neutra gerada e $\Delta \sigma$ é o incremento de tensão confinante aplicada. Assume-se que o CP está saturado quando o valor de B for superior a 0,9. Se o CP não pudesse ser considerado saturado,

aplicavam-se novos estágios até a saturação poder ser presumida. Após confirmação da saturação do CP, era iniciada a fase de percolação para determinação da condutividade hidráulica. O fluxo de água foi estabelecido aplicando-se um gradiente hidráulico de aproximadamente 5, oferecido pela diferença de 5kPa nas pressões entre base e topo ao longo dos, aproximadamente, 10cm de altura do CP. Destaca-se que as referidas pressões eram ajustadas de acordo com a pressão confinante empregada ao final do estágio de saturação e que o gradiente hidráulico usado está em conformidade com as especificações da ASTM D 5084/2010.

O volume de água percolado foi medido por meio de um variador de volume acoplado a um transdutor de deslocamento. As informações foram transferidas, processadas e registradas automaticamente, em intervalos de tempo pré-programados, a partir de um sistema de aquisição de dados gerenciado por *software* de interface. A técnica permitiu determinar a vazão percolada e, através da aplicação da Lei de Darcy (Equação 2), determinar a condutividade hidráulica. Para fins de padronização, convencionou-se adotar a condutividade hidráulica referida à água na temperatura de 20°C, utilizando-se as Equações 3 e 4, as quais são sugeridas pela ASTM D 5084/2010, em que Q é a vazão, k é a condutividade hidráulica, i é o gradiente hidráulico, A é a área da seção transversal, k_{20} é a condutividade hidráulica a 20°C e T é a temperatura. Analogamente, a condutividade hidráulica também foi realizada após a fase de adensamento dos CPs. Entretanto, as pressões de base e topo foram ajustadas de acordo com a pressão confinante na etapa precedente.

Os ensaios triaxiais realizados foram do tipo CU (adensado e não drenado) com medida de poropressão e com um único estágio de carregamento. Foram realizadas quatro séries de ensaios (S00, S02, S04 e S06), com um mínimo de três ensaios cada, variando a tensão de confinamento aplicada. Como para situação convencionais de Engenharia, a tensão a que um solo está submetido em campo raramente ultrapassa 400 kPa, adotou-se este valor máximo para a tensão de confinamento. Assim, foram adotadas tensões de confinamento de 100, 200 e 400 kPa. A velocidade

da prensa de cisalhamento foi de 0,2 mm/min.

A tensão de confinamento imposta na fase de adensamento corresponde à tensão principal menor durante a fase de ruptura (σ_1). A tensão desviadora ao longo de toda a etapa de ruptura foi medida através de anel dinamométrico acoplado a um transdutor de deslocamento e foi medida com taxa de aquisição de 1 Hz. A tensão desviadora máxima somada à tensão principal menor corresponde à tensão principal maior (σ_1). Estas duas tensões principais permitiram determinar o Círculo de Mohr de cada CP e com esta informação, determinar os parâmetros p (Equação 5) e q (Equação 6) da linha K-f e, em termos de tensões efetivas e , assim considerando a poropressão (u), p' (Equação 7) e q' (Equação 8).

A reta correspondente à envoltória no espaço p - q , em termos de tensões totais, é representada pela Equação 9 e, em termos de tensões efetivas, é representada pela Equação 10, em que a e a' são os parâmetros de resistência modificados, os quais representam a linha K-f. É demonstrado na bibliografia específica que os parâmetros de resistência no espaço tensão normal – cisalhante, correspondente à envoltória de Mohr-Coulomb podem ser determinados pelas Equações 11, 12, 13 e 14, em que \emptyset corresponde ao ângulo de atrito em termos de tensões totais, \emptyset' corresponde ao ângulo de atrito em termos efetivos, c corresponde ao intercepto coesivo em termos totais e c' corresponde ao intercepto coesivo em termos efetivos. Assim, as envoltórias de ruptura no espaço tensões normais-cisalhantes ($\sigma - \tau$), são representadas, em termos totais e efetivos, respectivamente pelas Equações 15 e 16.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Caracterização geotécnica

A Tabela III apresenta os resultados de caracterização geotécnica obtidos para o solo natural, para as misturas solo-bentonita e para a bentonita. Os dados evidenciam que a bentonita apresenta um índice de atividade coloidal (I_a) de um solo ativo. Desta forma, fica confirmado o tipo de argilomineral expansivo (com estrutura 2:1) da bentonita sódica utilizada nesta pesquisa. O solo

natural, segundo este mesmo critério, é classificado como inativo. Além disso, constata-se que o acréscimo de bentonita, em todos os teores analisados, faz com que o solo se comporte como de atividade normal. Constata-se que há um aumento no limite de liquidez (w_l) com o acréscimo do aditivo. Sabe-se que este era um comportamento esperado, uma vez que o acréscimo de finos a um solo, caso do acréscimo de bentonita, tende a aumentar o limite de liquidez do mesmo. O limite de plasticidade (w_p) manteve-se praticamente constante com o acréscimo de bentonita e, conseqüentemente, o índice de plasticidade (I_p) das amostras apresentou um comportamento altamente influenciado pelo limite de liquidez. Constata-se também que com o acréscimo de aditivo, o peso específico dos grãos do solo aumenta. Este era um comportamento esperado uma vez que o peso específico dos grãos (γ_s) da bentonita é maior que o do solo natural (28,3 e 26,3 kN/m³, respectivamente).

A Tabela IV sumariza os resultados de distribuição granulométrica do solo natural, da bentonita e das misturas. Constata-se que a adição de bentonita não alterou significativamente a quantidade de argila das misturas. Este comportamento é semelhante ao encontrado por Morandini (2009). Este autor acredita que parte da bentonita adicionada às misturas agregou e/ou flocculou a grãos siltosos e arenosos. Como neste trabalho observa-se uma diminuição das frações areia média e fina e um leve aumento das frações argila e silte, acredita-se que uma parte da bentonita tenha agregado e/ou flocculado à fração silte. De posse dos resultados dos Limites de Atterberg das amostras e da composição das frações granulométricas, procedeu-se à classificação geotécnica dos solos segundo a TRB (*Transportation Research Board*) e pelo SUCS (Sistema Classificado de Classificação de Solos), cujos resultados estão resumidos na Tabela 5. Pelo SUCS tanto o solo natural quanto as misturas são classificadas como SC, ou seja, areia argilosa. Pelo TRB, o solo natural é classificado como pertencente ao grupo A-6, ou seja, argila plástica de baixa compressibilidade, e com a adição de bentonita as misturas passam a se comportar como argila plástica de alta compressibilidade, ou seja, a

adição de bentonita tende a diminuir o desempenho mecânico das misturas. Além disso, mesmo todas as misturas sendo classificadas como de argila plástica de alta compressibilidade, o aumento do índice de grupo com o aumento do teor de bentonita denota a diminuição na capacidade de suporte causada pelo acréscimo do aditivo.

As curvas de compactação obtidas para a Energia do Proctor Intermediário são apresentadas na Figura 07 e os parâmetros de compactação – $w_{ót}$ (umidade ótima) e $\gamma_{dmáx}$ (peso específico aparente seco máximo) são identificados na Tabela 6. Vale ressaltar que a curva de saturação traçada na Figura 7 é referente ao solo sem o acréscimo de aditivo. Através dos parâmetros de compactação obtidos pode-se observar que o solo natural e as misturas apresentaram comportamento compatível com o esperado. O teor de umidade ótimo aumentou com o acréscimo de bentonita. Isto ocorre, provavelmente, devido ao fenômeno de absorção de água pela bentonita durante o processo de homogeneização da mistura. Analogamente, constatou-se que o peso específico aparente seco máximo diminuiu com o acréscimo de bentonita. Estima-se que este fenômeno ocorre, provavelmente, devido à textura do solo tornar-se gradualmente mais fina conforme o aumento no teor de bentonita.

A Metodologia MCT classifica pedologicamente o solo natural como LA' (solo arenoso de comportamento laterítico), a mistura com 2% como NA' (areia siltosa ou areia argilosa de comportamento não-laterítico) e as misturas com 4 e 6% de aditivo como NG' (argila, argila siltosa ou argila arenosa de comportamento não-laterítico). Assim, entende-se que o acréscimo de bentonita ao solo natural é responsável por mudar o comportamento laterítico apresentado pelo mesmo para comportamento não-laterítico. Além disso, na condição natural o solo comporta-se como arenoso e apenas 2% de aditivo já é o suficiente para mudar a classificação para areia siltosa ou argila arenosa e, a partir de 4% de aditivo, o solo é classificado como argila, argila siltosa ou argila arenosa, ou seja, comportamento de solo fino.

Ensaio em equipamento triaxial

As características de moldagem dos CPs

ensaiados e o parâmetro B de Skempton encontram-se na Tabela 7, onde h_0 é a altura inicial do CP, D_0 méd é o diâmetro inicial médio do CP, m é a massa do CP, w_0 é o teor de umidade de moldagem do CP, e é o índice de vazios inicial do CP, n é a porosidade inicial do CP, GC é o grau de compactação, S é o grau de saturação e B é o parâmetro B de Skempton. Os resultados apontam para uma moldagem satisfatória das misturas, com todos os espécimes atingindo mais de 98% do grau de compactação e para uma dificuldade, conforme o acréscimo de bentonita, para atingir a saturação do solo, expressa pela diminuição do parâmetro B de Skempton.

Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica do solo natural e das misturas solo-bentonita antes da fase de adensamento estão apresentados na Figura 8 e Tabela 8 apresenta os resultados em termos médios. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada teor de bentonita e a condutividade hidráulica foi calculada em termos do volume percolado de água desde o tempo inicial do ensaio. Os ensaios foram realizados com tempos variáveis entre 300 e 480 minutos, aproximadamente. Observa-se que o solo natural apresenta uma condutividade hidráulica média da ordem de 10-7m/s e, com o acréscimo de aditivo este valor diminui, sendo que apenas o teor de 6% de aditivo torna o material apto para uso como CCL.

Os resultados para a fase de adensamento são apresentados na Figura 9 e na Tabela 9 são apresentadas as deformações volumétricas de estabilização em função do teor de bentonita e da tensão de confinamento. Em síntese, observa-se que a deformação volumétrica de estabilização diminui com o acréscimo de aditivo e aumenta com a tensão de confinamento.

Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica do solo natural e das misturas solo-bentonita após a fase de adensamento estão apresentados na Figura 10 e são sumarizados na Tabela 10. Como era esperado, a condutividade hidráulica, também na fase pós adensamento, diminui tanto com o acréscimo de bentonita, quanto com o aumento da tensão de confinamento. O acréscimo de bentonita no teor de 6% causou

uma diminuição da ordem de mil vezes em relação ao solo natural (de 10-7 para 10-10m/s). Desta forma, o solo S06 é o único que atende o requisito de condutividade hidráulica para CCL.

As curvas de tensão desviadora e poropressão em função da deformação axial durante a fase cisalhamento são apresentadas na Figura 11. Observa-se que as curvas correspondentes a 0, 2 e 4% de bentonita apresentaram o comportamento de uma areia compacta, enquanto as curvas correspondentes a 6% de bentonita apresentaram o comportamento de uma argila normalmente adensada. Assim, evidencia-se que 6% de bentonita é suficiente para mudar o comportamento mecânico do solo natural. A tensão desviadora na ruptura apresentou um comportamento similar para todas as tensões de confinamento. O solo natural apresentou uma tensão desviadora na ruptura superior ao de todas as misturas, o que enfatiza a contribuição da bentonita no decréscimo de resistência do solo. Entretanto, com o acréscimo de bentonita, esta tensão apresenta um decréscimo até tender, aproximadamente, a uma estabilização. Lukiantchuki (2007) observou um comportamento semelhante a este. Entretanto, entre 5 e 9% de acréscimo de bentonita, a autora detectou um aumento neste parâmetro.

A partir destes resultados é possível calcular os parâmetros de resistência, tanto em termos totais, quanto efetivos, das amostras estudadas. A Tabela 11 sumariza estes resultados. Observa-se que, em geral, a coesão aumentou com o acréscimo de bentonita. Este era um comportamento esperado em função do aumento da quantidade de finos ao solo com o acréscimo de bentonita. Por outro lado, o ângulo de atrito efetivo diminuiu com o acréscimo de bentonita. É provável que este comportamento ocorra pelo efeito de lubrificação que os grãos finos da bentonita ocasionam quando misturado ao solo natural.

Escolha do solo para uso como CCL ou camada composta

Um dos métodos mais tradicionais no Brasil para escolha de solo para uso como CCL ou camada composta CCL + GCL é o da CETESB (1993). Por isso, a Tabela 12 compara os requisitos estabelecidos por este método aos solos avaliados

por este trabalho. Com base nos critérios explicitados, ratifica-se que a mistura com 6% de bentonita é a única que atende todos os requisitos para uso como camada impermeabilizante.

CONCLUSÕES

Algumas regiões da costa brasileira, como a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, apresentam poucos materiais aptos para o uso em obras de terra e, neste contexto, solos adequados para o uso como barreira mineral são ainda mais difíceis de serem encontrados, dado a natureza granular predominante nos solos encontrados na região. É relatado na literatura apenas um solo encontrado na porção sul desta região que apresenta condições para este uso. Entretanto, este solo localiza-se no limite superior desta região, o que faz com que regiões mais austrais tenham um custo mais oneroso com o transporte e, por isso, precisem avaliar o uso de outras técnicas. Neste contexto, este trabalho avalia o uso técnico de um solo fino de comportamento laterítico, encontrado na Planície Costeira do Rio Grande do Sul aditivado com bentonita para uso como CCL ou mesmo camada composta CCL + GCL.

O solo natural e as misturas foram caracterizados geotecnicamente pelos métodos tradicionais de caracterização geotécnica (TRB e SUCS) e por um método indicado para solos tropicais (Classificação MCT). Observa-se que embora o aumento de bentonita não modifique significativamente as classificações tradicionais, a Classificação MCT é fortemente influenciada por este acréscimo, uma vez que o solo granular natural com apenas 6% de bentonita perde seu comportamento laterítico e passa a se comportar como um solo fino.

O comportamento hidráulico e mecânico do solo natural e das misturas, quando compactados na Energia do Proctor Intermediário, foram avaliados por ensaios triaxiais para determinação da condutividade hidráulica (antes e após a fase de adensamento) e por ensaios do tipo adensado e não-drenado com medida de poropressão, os quais permitiram a obtenção dos parâmetros de resistência em termos totais e efetivos. Os resultados apresentados indicam que a mistura com

6% de bentonita é a única que atende a todos os requisitos impostos pela CETESB (1993) para uso como barreira impermeabilizante. Entretanto, a realização deste trabalho evidenciou que apesar do aumento da coesão causada pelo acréscimo de bentonita, este acréscimo contribui para a lubrificação das partículas, com consequente diminuição do ângulo de atrito e, assim, da resistência do solo. Assim, o trabalho apresenta como solução tecnicamente viável para uso em CCL ou CCL+GCL na região o uso do solo ARMAR, com 6% de bentonita, compactado na Energia do Proctor Normal. Entretanto, destaca que apesar do acréscimo de bentonita contribuir para a diminuição da condutividade hidráulica do solo, ocasiona diminuição da resistência ao cisalhamento do mesmo, a qual precisa ser adequadamente avaliada nos projetos geotécnicos.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2010. D 5084: Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using flexible wall permeameter. ASTM International, West Conshohocken, USA, 23 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. NBR 10157: Aterros de resíduos perigosos – critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação – procedimento. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 6457: Amostras de solos – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- BENTONIT. 2023. Disponível em www.bentonit.com.br. Acessado em 26 jan 2023.
- BASTOS, C. A. B. 2003. Estudos recentes conduzidos na FURG sobre solos alternativos para a pavimentação econômica e obras de terra na Planície Costeira. Anais do II Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul - GeoRS 2003. Rio Grande/RS, p. 31 – 40.
- BASTOS, C. A. B.; MIRANDA, T. C.; SCHULER, A.; SCHMITT, L. A.; VASCONCELOS, S. M. 2007. Mapeamento geotécnico da Planície Costeira Sul do Estado do Rio Grande do Sul. Anais do 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental. Uberlândia/MG, CD, p. 538-552.
- BASTOS, C. A. B.; SOUZA, E. W.; CAMARGO, K. R. 2008. Avaliação da permeabilidade de solos compactados no litoral sul do Estado do Rio Grande do Sul e adjacências para uso como barreiras impermeáveis em obras de aterros de resíduos. Anais do 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Recife/PE, UFPE, 11 p.
- BARBOZA, E.; TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S.; ROSA, M. 2008. Planície costeira do Rio Grande do Sul: erosão em longo período. Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología. 15, p. 94 – 97.
- BARROS, C.M.M.; BASTOS, C.A.B.; CAMARGO, K.R.; SILVA, C.F. 2014. Ensaio de coluna para percolação de contaminantes em misturas solo-bentonita visando alternativa de barreira mineral em região costeira. Vetor (FURG), v. 24, p. 24-47.
- BOSCOV, M. E. 2008. Geotecnia Ambiental. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.
- BUCHMANN, F. S. C.; VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J. 1997. Evolução holocênica da paleoembocadura da Lagoa Mirim, RS, Brasil. Anais do 8º Congresso Latino Americano de Ciências do Mar. Santos, São Paulo. Boletim de Resumos.
- CAMARGO, K.R. 2012. Avaliação da condutividade hidráulica e de resistência ao cisalhamento de misturas solo-bentonita: estudo de caso de um aterro sanitário localizado em Rio Grande (RS). Dissertação de Mestrado. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- CAMARGO, K.R.; BRUCH, A.F.; RODRIGUES, M.L. 2023. Impermeabilização de fundo do aterro sanitário de Rio Grande/RS: considerações históricas, geológicas e geotécnicas. Revista Foco 16(5):e1728. DOI: 10.54751/revistafoco.v16n5-003.
- CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. 1993. Resíduos Sólidos Industriais. São Paulo/SP.
- CÔRREA, I. C. S. 1990. Analyse morphoestructurale et evolution paleogeographique de la plate-forme continentale atlantique sud-bresilienne (Rio Grande do Sul – Bresil). Tese de Doutorado. Talente – França. Universite de Bourdeaux.
- DANIEL, D. E. 1993. Clay liners. Geotechnical Practice for Waste Disposal. London, Chapman & Hall.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro. Embrapa Solos.
- HEAD, K. H. 1998. Manual of soil laboratory testing. Vol.3, Effective stress tests. ELE International Limited, 1238 p.
- LUKIANCHUKI, J. A. 2007. Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- MORANDINI, T. L. C. 2009. Condutividade hidráulica e compatibilidade em combinações de

solo tropical e bentonita para uso em barreiras. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. 1995. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Ed. Villibor, São Paulo, 212 p.

TOMAZELLI, L. J. 1990. Contribuição aos estudos dos sistemas deposicionais holocênicos do nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul – com ênfase no sistema eólico. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VILLWOCK, J. A. 1984. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. Pesquisas, 16: 5 – 49.

TOMAZELLI, L. J. 1993. O regime dos ventos e taxa de migração e dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. Pesquisas em Geociências. Porto alegre 20(1): 18 – 26.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. 1996. Quaternary geological evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 68: 373-382.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. 2005. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. Gravel, 3(1), p. 110-115.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, J. L. 1995. Geologia costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas do CECO-IG-UFRGS. Porto Alegre, 8: 1 – 45.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, J. L.; LOSS, E. L.; DEHNARDT, E. A.; HORN FILHO, N. O.; BACHI, F. A.; DEHNARDT, B. A. 1986. Geology of Rio Grande do Sul Coastal Province. Rabassa, J. (ed). Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, 4., p. 79 – 97.

ANEXOS

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad 1$$

$$Q = k i A \quad 2$$

$$k_{20} = R_T k \quad 3$$

$$R_T = \frac{2,2902 (0,9842)^T}{T^{0,1702}} \quad 4$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad 5$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad 6$$

$$p = p - u \quad 7$$

$$q' = q \quad 8$$

$$q = a + p \tan \alpha \quad 9$$

$$q' = a' + p' \tan \alpha' \quad 10$$

$$\emptyset = \sin^{-1} \tan \alpha \quad 11$$

$$c = \frac{a}{\cos \alpha} \quad 12$$

$$\emptyset' = \sin^{-1} \tan \alpha' \quad 13$$

$$c' = \frac{a'}{\cos \alpha'} \quad 14$$

$$\tau = c + s \tan \theta \quad 15$$

$$\tau' = c' + s' \tan \theta' \quad 16$$

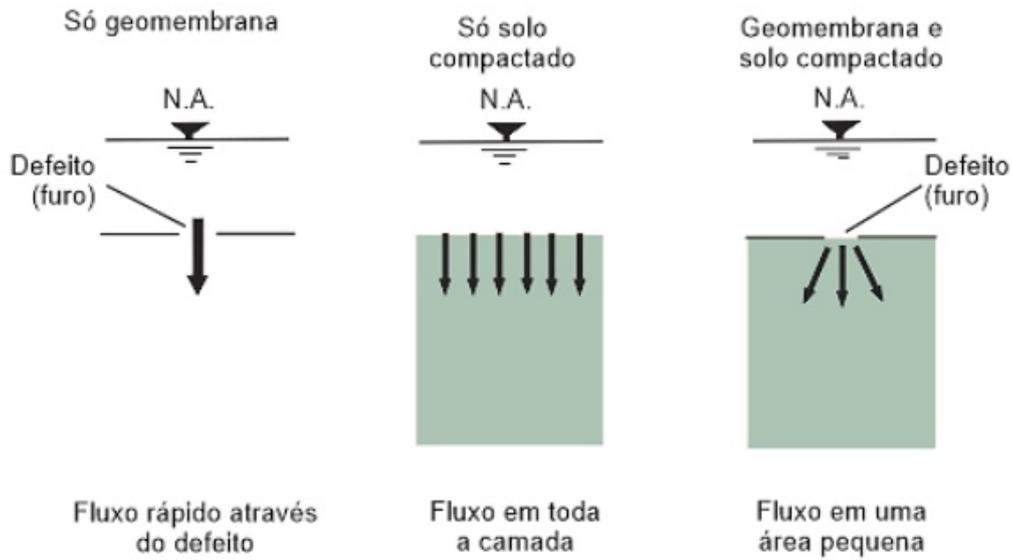


Figura 1. Padrões de percolação através de geomembranas, solos e sistemas compostos. Fonte: modificado de Daniel (1993) por Boscov (2008)

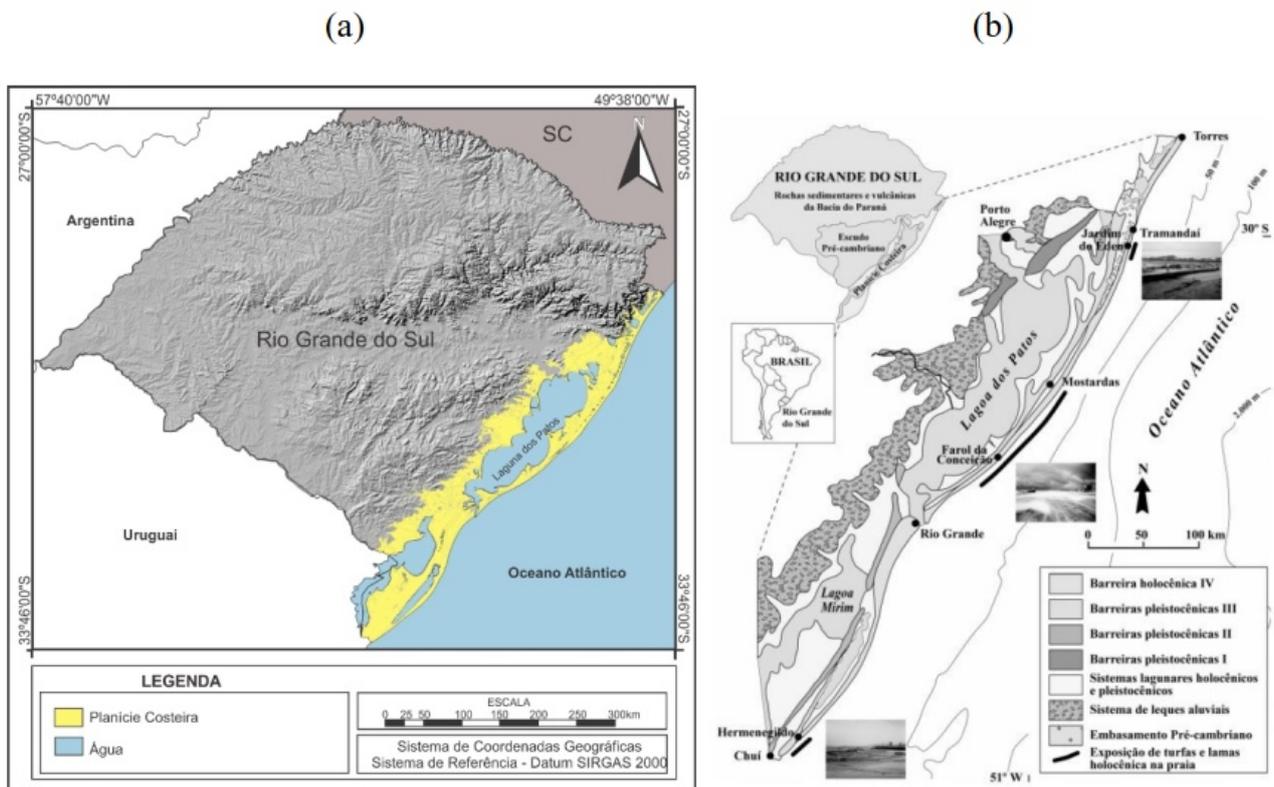


Figura 2. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: (a) localização; e (b) mapa geológico simplificado. Fonte: (a) este trabalho (b) modificado de Tomazelli e Villwock (1996) por Barboza et al. (2008).

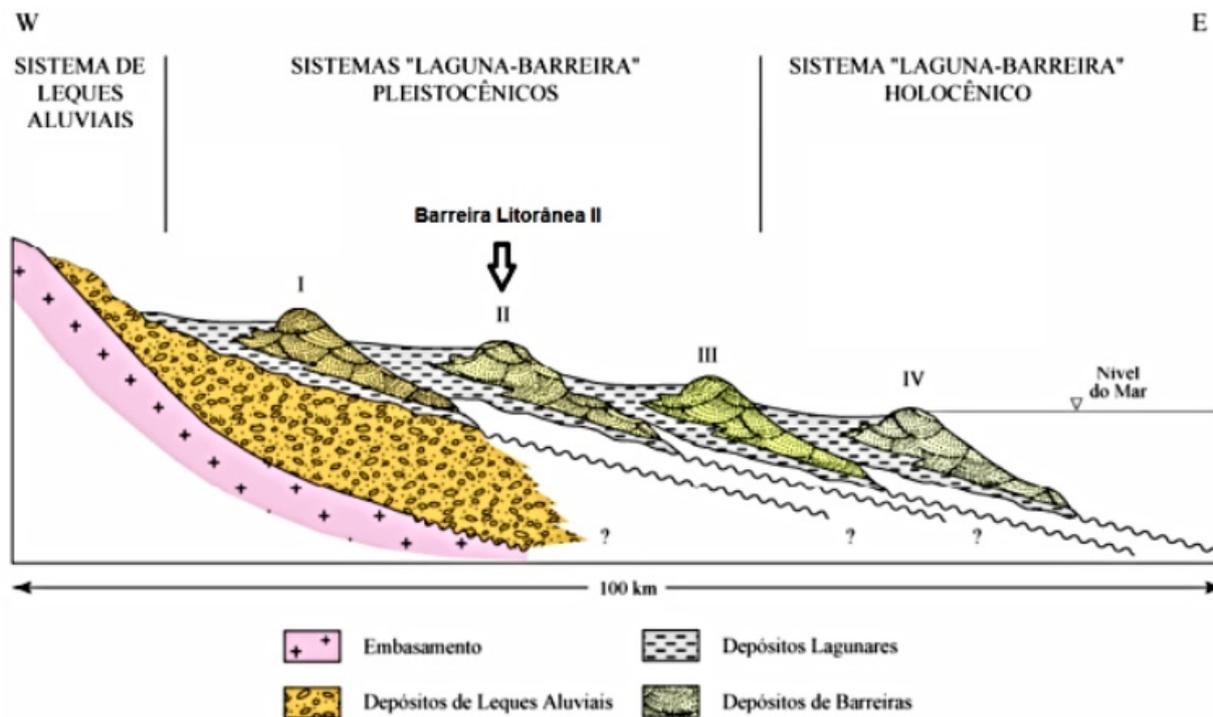


Figura 3. Perfil esquemático (W-E) transversal aos sistemas deposicionais da PCRS. Fonte: modificado de Villwock e Tomazelli (1995).

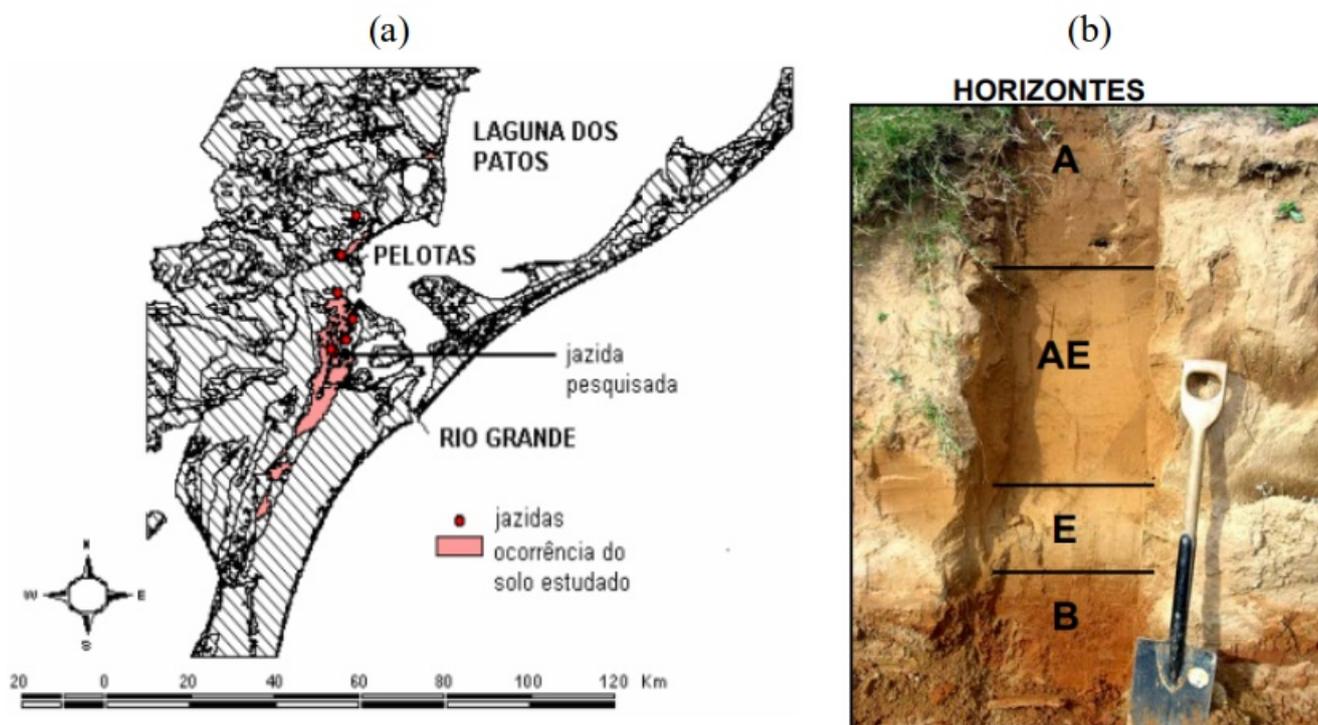


Figura 4. (a) Ocorrência do solo estudado no litoral sul do Rio Grande do Sul e localização da jazida estudada; (b) perfil do solo ARMAR. Fonte: Bastos et al. (2008).



Figura 5. Solo ARMAR: (a) depósito e local de coleta da amostra; e (b) exemplo de caixa de madeirite usada para o transporte da amostra.

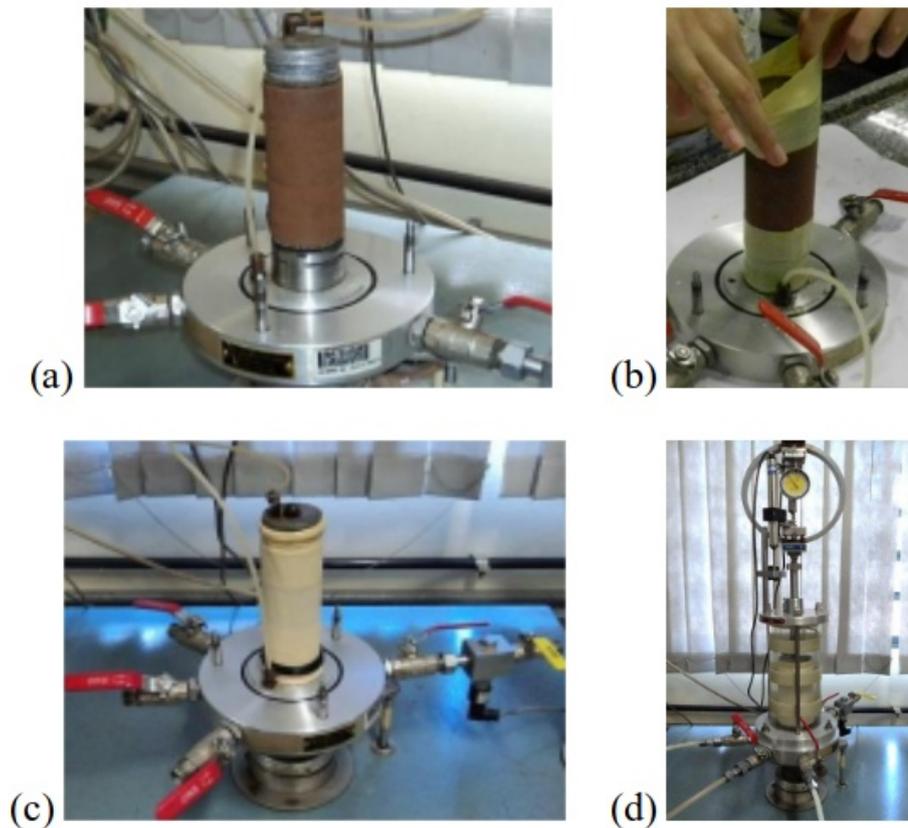


Figura 6. Instalação de CP em câmara triaxial: (a) instalação do CP na base; (b) instalação das membranas protetoras; (c) instalação da membrana; e (d) câmara montada.

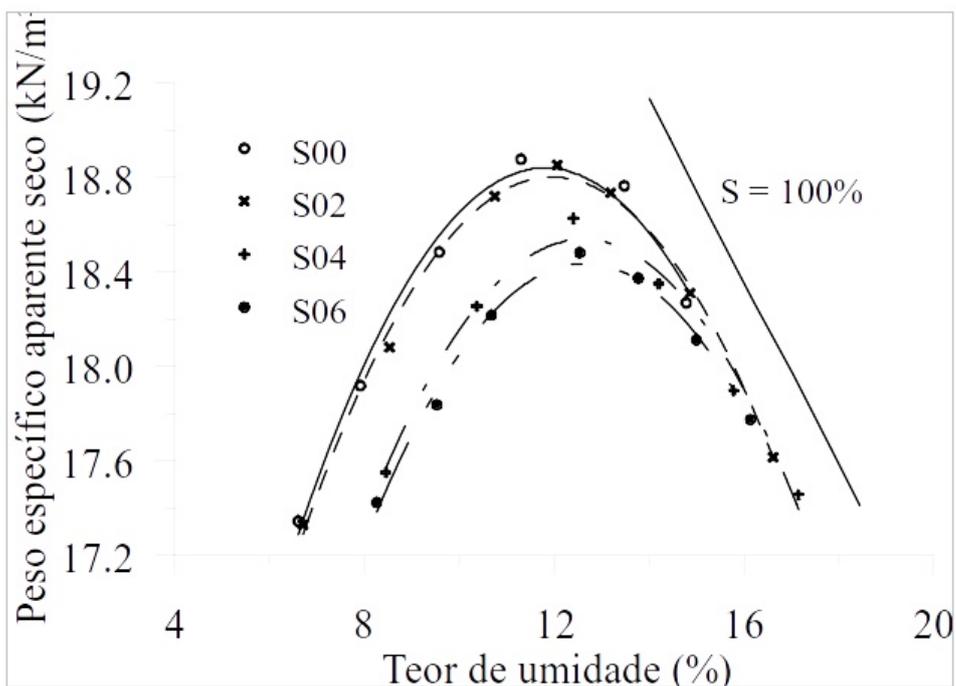


Figura 7. Curvas de compactação para o solo natural e misturas solo-bentonita

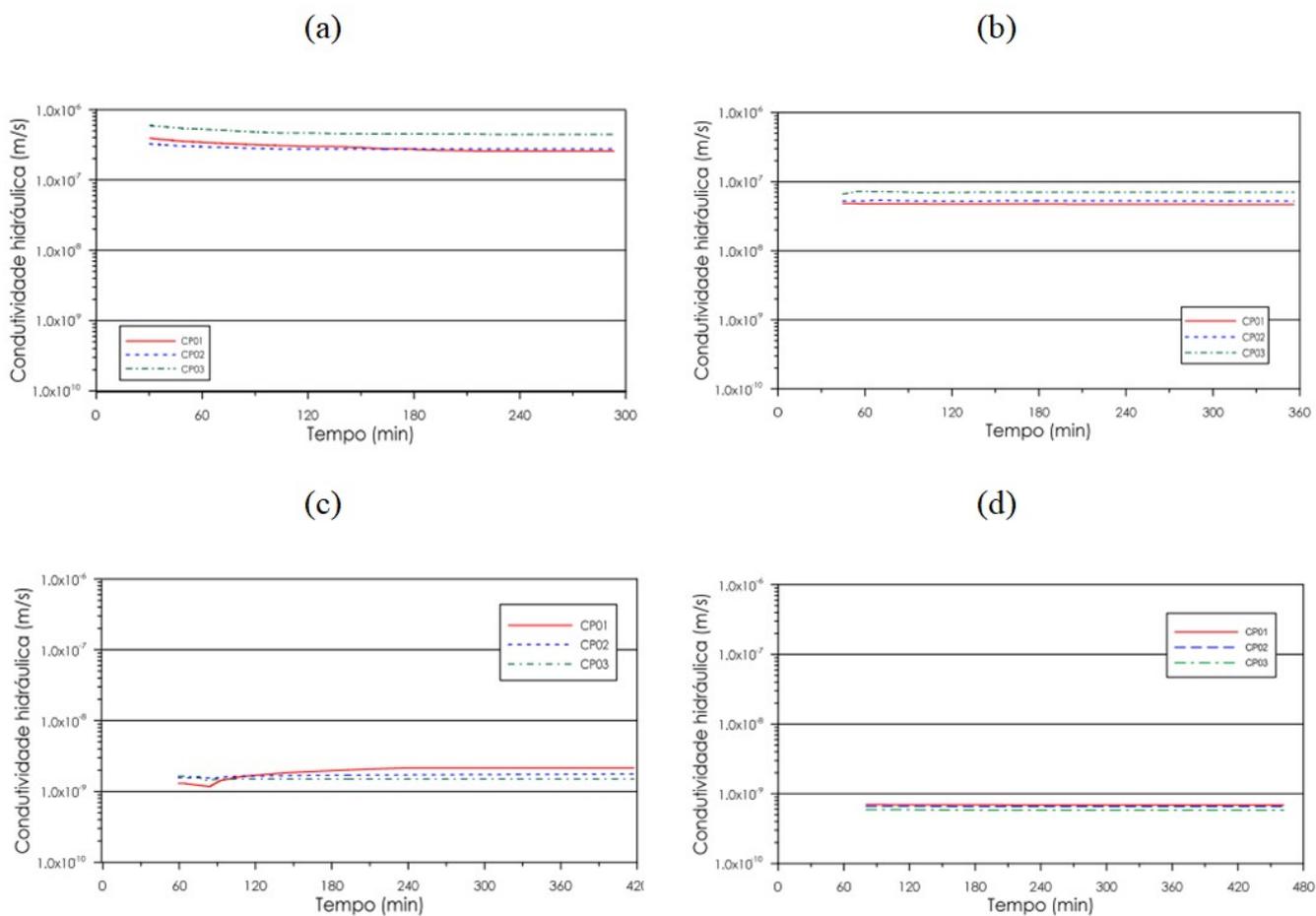


Figura 8. Condutividade hidráulica antes da fase de adensamento: (a) S00; (b) S02; (c) S04; e (d) S06.

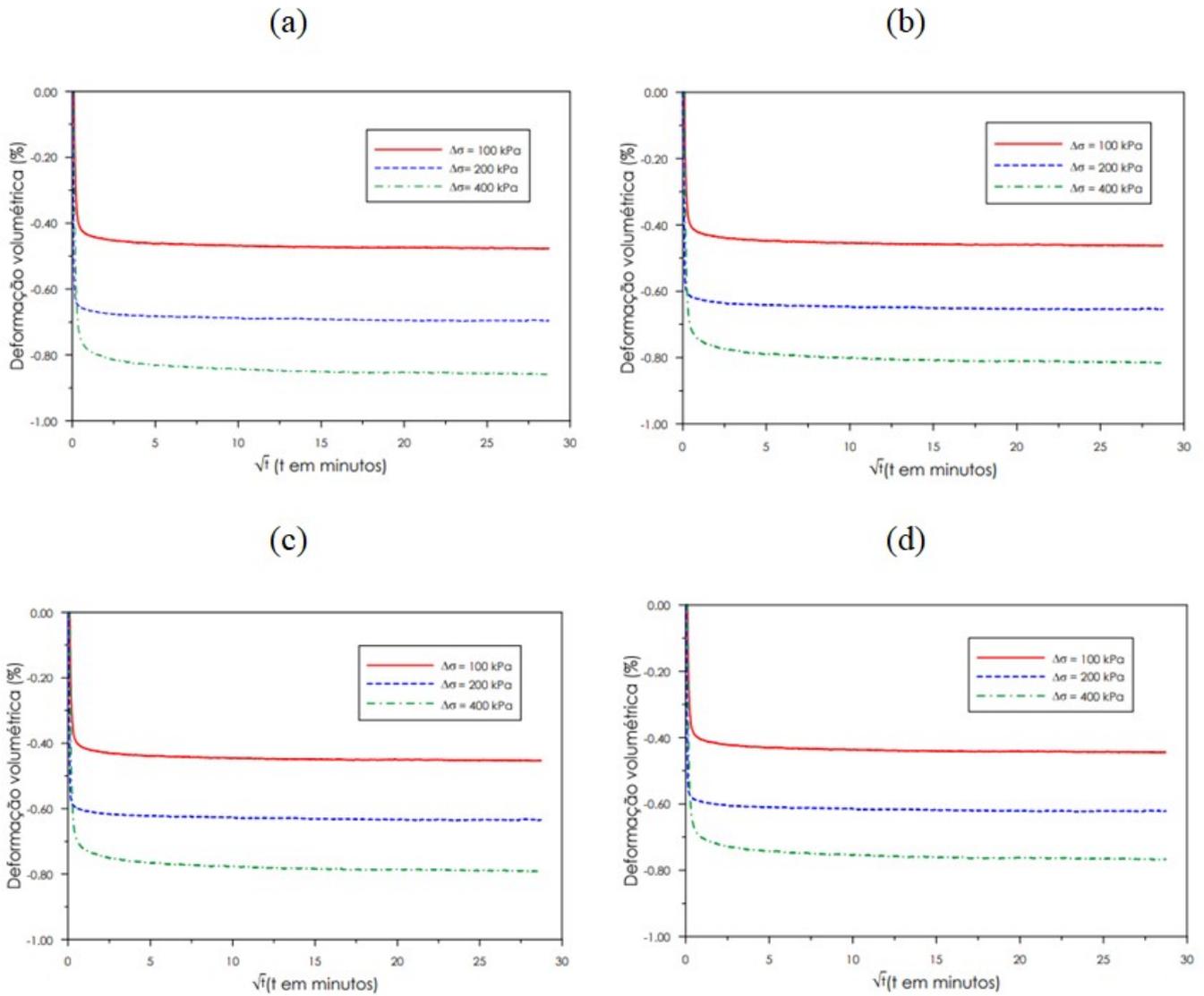
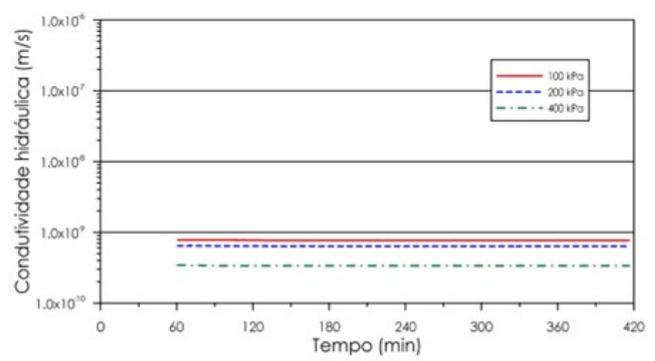
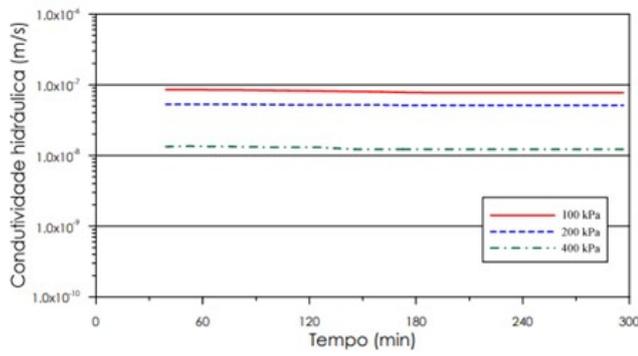


Figura 9. Variação volumétrica na fase de adensamento: (a) S00; (b) S02; (c) S04; e (d) S06.

(a)

(b)



(c)

(d)

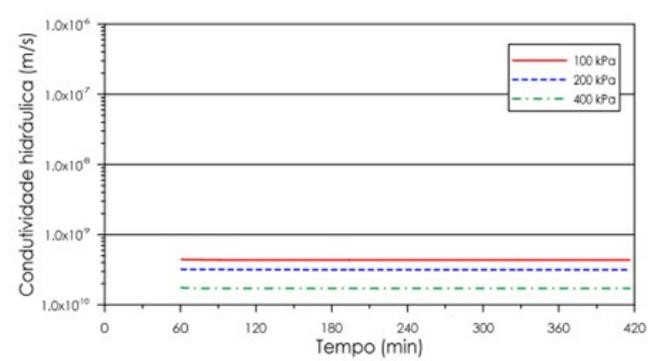
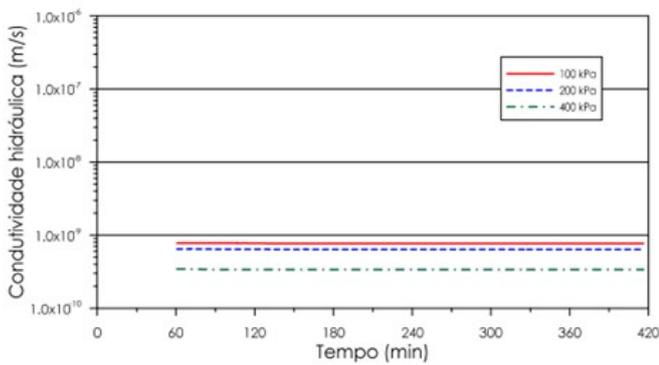


Figura 10. Condutividade hidráulica após fase de adensamento: (a) S00; (b) S02; (c) S04; e (d) S06.

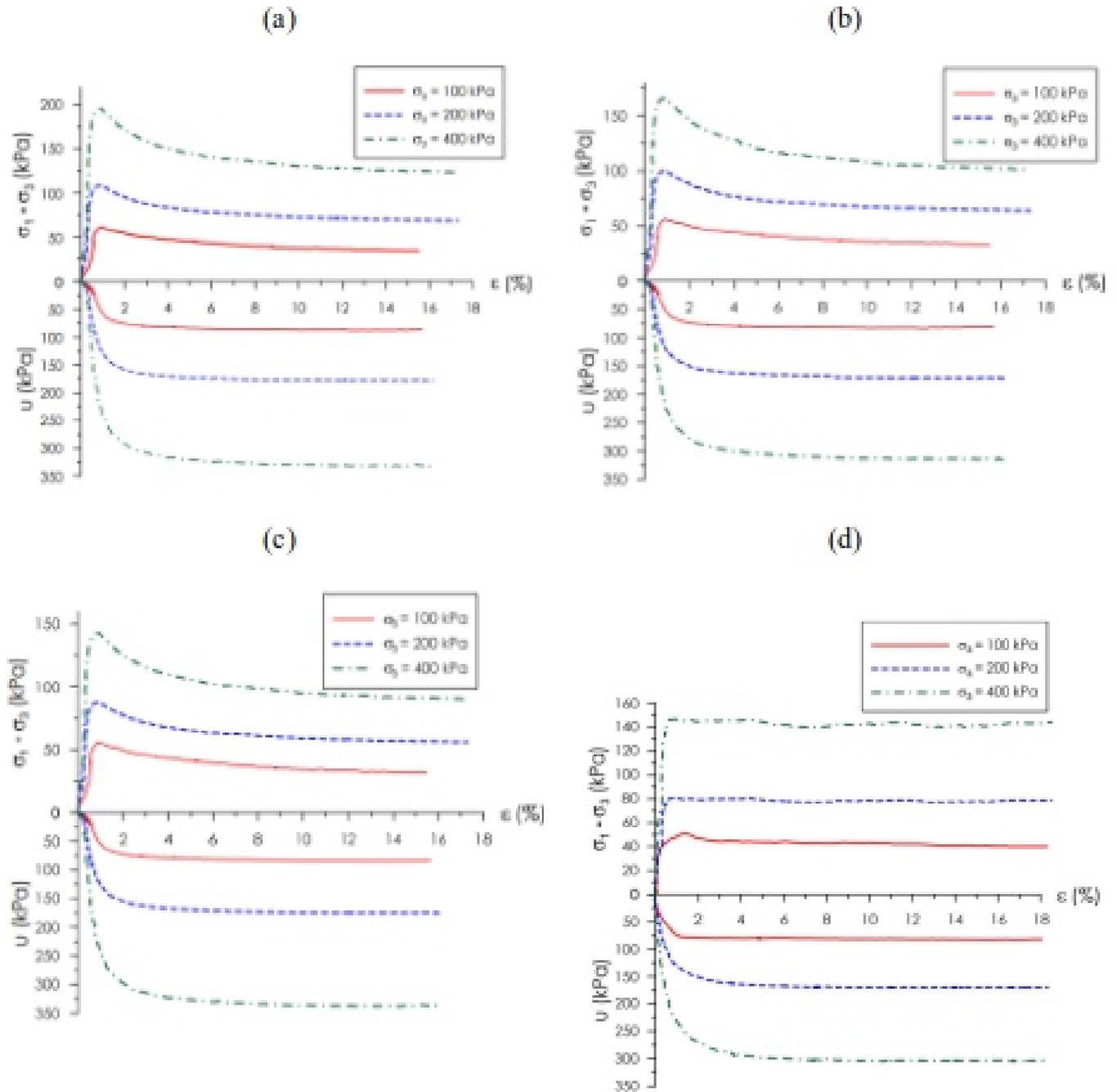


Figura 11. Curvas de tensão desviadora e poropressão em função da deformação axial: (a) S00; (b) S02; (c) S04; e (d) S06.

Tabela I: Composição química da bentonita

Composição química	%
Anidro silício	60,20
Óxido de alumínio	18,50
Óxido férrico	7,20
Óxido de magnésio	2,00
Óxido de cálcio	2,40
Óxido de titânio	0,90
Óxido de potássio	0,53

Fonte: Bentonit (2023)

Tabela II: Propriedades geotécnicas da bentonita

Propriedade	%
Peso específico dos sólidos (kN/m ³)	28 - 30
Limite de liquidez (%)	450 - 490
Limite de plasticidade (%)	40 - 65
Peso específico seco (kN/m ³)	9,60
Teor de umidade ótimo	50
Umidade natural (%)	17 - 19
Condutividade hidráulica (m/s)	1×10^{-10}
pH – 4,5% suspensão (%)	9,5

Fonte: Bentonit (2023)

Tabela III: Caracterização geotécnica do solo natural e misturas analisadas

	S00	S02	S04	S06	Bentonita
γ_s (kN/m ³)	26,3	26,5	26,6	26,7	28,3
w_l (%)	32	42	45	48	458
w_p (%)	16	16	16	17	55
I_p (%)	16	26	29	31	403
I_a	0,71	1,11	1,24	1,20	5,40

Tabela IV: Frações granulométricas do solo natural e misturas analisadas

	S00	S02	S04	S06	Bentonita
Argila (%)	24	24	24	25	75
Silte (%)	4	6	6	6	24
Areia fina (%)	45	44	45	44	0,5
Areia média (%)	27	26	25	25	0,5
Areia grossa (%)	0	0	0	0	0

Tabela V: Classificação geotécnica do solo natural e misturas analisadas

	S00	S02	S04	S06
TRB	A-6 (3)	A-7 (8)	A-7 (8)	A-7 (9)
SUCS	SC	SC	SC	SC

Tabela VI: Parâmetros de compactação na Energia do Proctor Intermediário do solo natural e misturas analisadas

	$\gamma_{d\text{ máx}}$ (kN/m ³)	$w_{ót}$ (%)
S00	18,92	11,09
S02	18,85	12,11
S04	18,61	12,36
S06	18,50	12,61

Tabela VII: Características de moldagem dos CPs do solo natural e misturas analisadas

Amostra	CP	$h_{o\ méd}$ (mm)	$D_{o\ méd}$ (mm)	m (g)	e	w (%)	n (%)	GC (%)	B
S00	1	124,9	50,5	533,01	0,406	13,92	28,88	98,90	0,99
	2	125,1	50,5	532,85	0,413	14,32	29,23	98,37	0,99
	3	124,8	50,5	536,55	0,392	13,69	28,16	99,84	0,98
S02	1	124,9	50,5	534,96	0,421	14,75	29,63	98,91	0,96
	2	124,9	50,5	534,91	0,421	14,69	29,63	98,95	0,95
	3	125,0	50,5	535,32	0,419	14,52	29,53	99,10	0,96
S04	1	125,1	50,5	532,19	0,444	15,33	30,75	99,01	0,94
	2	125,3	50,4	532,90	0,433	14,87	30,22	99,77	0,94
	3	125,3	50,4	531,72	0,439	15,16	30,51	99,30	0,92
S06	1	125,1	50,4	529,07	0,457	15,75	31,37	99,05	0,91
	2	125,3	50,4	530,50	0,452	15,45	31,13	99,41	0,91
	3	125,4	50,4	529,61	0,455	15,41	31,27	99,20	0,92

Tabela VIII: Condutividade hidráulica antes da fase de adensamento do solo natural e misturas analisadas

	CP 01	CP 02	CP 03	Média
S00	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-7}$
S02	$4,7 \times 10^{-8}$	$5,2 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$	$5,6 \times 10^{-8}$
S04	$2,1 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-9}$
S06	$6,9 \times 10^{-10}$	$6,6 \times 10^{-10}$	$5,8 \times 10^{-10}$	$6,4 \times 10^{-10}$

Tabela IX: Deformação volumétrica de estabilização (%) do solo natural e misturas analisadas

	100 kPa	200 kPa	400 kPa
S00	-0,478	-0,697	-0,855
S02	-0,466	-0,654	-0,813
S04	-0,454	-0,635	-0,790
S06	-0,441	-0,623	-0,768

Tabela X: Condutividade hidráulica após fase de adensamento do solo natural e misturas analisadas

	100 kPa	200 kPa	400 kPa
S00	$3,3 \times 10^{-7}$	$7,7 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$
S02	$5,6 \times 10^{-8}$	$5,3 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$
S04	$5,4 \times 10^{-9}$	$7,7 \times 10^{-10}$	$3,4 \times 10^{-10}$
S06	$6,4 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-10}$

Tabela XI: Parâmetros de resistência do solo natural e misturas analisadas

	c (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	ϕ' (°)
S00	7,1	2,3	10,6	22,7
S02	9,0	6,3	9,0	18,1
S04	12,2	11,2	7,2	15,1
S06	7,4	12,8	8,0	14,0

Tabela XII: Comparação entre os requisitos impostos por CETESB (1993) e os parâmetros dos solos natural e misturas

	CETESB (1993)	S00	S02	S04	S06
Classificação SUCS	CL, CH, SC ou OH	SC	SC	SC	SC
k (m/s)	$< 1,0 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^{-8}$	$5,4 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-10}$
% passante na peneira de abertura 0,075 mm (#200)	≥ 30	42,5	45,3	45,6	45,9
w_l (%)	≥ 30	32	42	45	48
I_p (%)	≥ 15	16	26	29	31
pH em água	≥ 7	5,41	6,91	7,49	8,63