

GEOSSINTÉTICOS EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL: AVANÇOS E PERSPECTIVAS

Geosynthetics in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: Advances and Prospects

Ennio Marques Palmeira^a, Maria das Graças Gardoni^b, Gregório Luis Silva Araújo^a

^a Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil.

^b Departamento de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

RESUMO – Geossintéticos vêm sendo utilizados de forma crescente em obra geotécnicas e de proteção ao meio ambiente nas últimas décadas. As principais razões para tal crescimento de utilização ao longo dos anos são a facilidade e rapidez de instalação, facilidade de transporte, custo-benefício favorável, redução na utilização de materiais de construção naturais e menores impactos ambientais de obras com geossintéticos. Além disso, por serem manufaturados, os produtos geossintéticos têm sofrido contínuos desenvolvimentos para melhorar suas propriedades de engenharia e melhorar seus desempenhos. O presente artigo apresenta e discute algumas aplicações inovadoras de geossintéticos, bem como aplicações sob condições severas de utilização em obras geotécnicas e de proteção ambiental. São abordadas aplicações de geossintéticos como barreiras contra líquidos e gases, drenagem, filtração e reforço de solo, bem como combinações de geossintéticos e materiais de construção alternativos. São também apresentados e discutidos os avanços e as perspectivas futuras para estes materiais.

ABSTRACT – Geosynthetics have been increasingly used in geotechnical and environmental protection works in the last decades. The main reasons for such increase in the use of such materials throughout the years are easy and quick installation, easy transportation, favourable cost-benefit, reduction of the use of natural construction materials and less environmental impact of works with geosynthetics. Besides, by being manufactured, geosynthetic products have suffered continuous developments to improve its engineering properties and to improve its performance. This paper presents and discusses some novel applications of geosynthetics, as well as applications under severe conditions in geotechnical and in environmental protection works. Applications of geosynthetics as barriers against liquids and gases, drainage, filtration and soil reinforcement are approached, as well as combinations of geosynthetics and alternative construction materials. Advances and prospects for such materials are also presented and discussed.

Palavras Chave – Geossintéticos, Geotecnia, Meio Ambiente.

Keywords – Geosynthetics, Geotechnics, Environment.

E-mails: palmeira@unb.br (E. Palmeira), mgardoni06@gmail.com (M. Gardoni), gregorio@unb.br (G. Araújo)

ORCID: orcid.org/0000-0003-2620-0708, orcid.org/0000-0001-6025-0296, orcid.org/0000-0003-4524-8846

1 – INTRODUÇÃO

Geossintéticos têm sido utilizados com diversas funções em obras geotécnicas e de proteção ao meio ambiente. Dentre as vantagens na utilização de geossintéticos, podem ser citadas: facilidade e rapidez de instalação, facilidade de transporte para áreas remotas, redução ou eliminação da utilização de materiais de construção naturais, repetibilidade e uniformidade de propriedades relevantes e redução do impacto ambiental de soluções com geossintéticos em relação às alternativas convencionais. Tais materiais podem assumir funções tais como drenagem, filtração, barreira, reforço, separação e proteção. Como se tratam de materiais manufaturados, novos produtos e aplicações têm surgido ao longo dos anos e, certamente, continuarão a surgir em função de avanços na ciência dos materiais, particularmente, no estudo de polímeros.

Ao longo das últimas décadas, os materiais geossintéticos evoluíram muito significativamente em termos de variedade de produtos, variedade de aplicações e propriedades de engenharia. Além disso, tais materiais mostraram-se efetivos quando combinados com materiais de construção alternativos em obras de reforço e drenagem. A viabilização da utilização de materiais de construção alternativos (resíduos de construção, rejeitos de mineração etc.) reduzem a exploração de materiais naturais e o acúmulo destes resíduos em aterros sanitários, com evidentes benefícios para o meio ambiente. Pesquisas executadas nas últimas décadas têm mostrado também que soluções de engenharia com uso de geossintéticos impactam menos o ambiente do que as soluções tradicionais (Stucki et al., 2011, Frischknecht et al. 2012, Heerten, 2012, Touze, 2021).

Nos primórdios da utilização de geossintéticos, basicamente só existiam aplicações de geotêxteis em obras de drenagem, filtração e reforço de solos e de geomembranas, na função barreira. Ao longo dos últimos 50 anos estes produtos foram aprimorados e novos produtos surgiram, tais como geogrelhas, geocélulas, geomantas, georredes, geocompostos, geocompostos argilosos e geossintéticos eletrocinéticos. As funções e aplicações destes materiais em obras geotécnicas e de proteção ambiental também se expandiram enormemente (Palmeira et al., 2008, Brandl, 2010, Touze, 2021).

O presente artigo apresenta e discute avanços na utilização de geossintéticos e perspectivas futuras para o uso destes materiais em geotecnia e meio ambiente. São abordadas aplicações inovadoras com funções como reforço, barreira, drenagem e filtração em aplicações complexas e severas com tais materiais, como em obras de mineração e reforço de solos com utilização de materiais de construção não convencionais.

2 – GEOSSINTÉTICOS EM DRENAGEM E FILTRAÇÃO

2.1 - Geossintéticos em drenagem e filtração em mineração

O uso de sistemas de drenagem e filtros geossintéticos em projetos de mineração é particularmente interessante, uma vez que estes sistemas podem ser construídos de forma muito rápida. Embora a confiança no uso de tais materiais em obras de rotina tenha aumentado consistentemente ao longo do tempo, ainda persistem preocupações em relação à sua utilização em grandes obras, como grandes barragens de rejeitos e grandes pilhas de resíduos, ou seu comportamento de longo prazo em instalações de disposição de resíduos. Em muitas aplicações de mineração, o sistema de drenagem encontra condições muito severas por causa de regimes de fluxo complexos, heterogeneidade dos rejeitos, condições ambientais agressivas e elevados níveis de tensões durante a construção e em toda vida útil da obra.

Os sistemas de drenagem em barragens ou pilhas de rejeitos também podem estar sujeitos a altos níveis de tensões, dependendo de sua altura e peso específico dos rejeitos. Para barragens de altura moderada, a tensão vertical pode facilmente superar 1000 kPa. Nesse contexto, o desempenho dos filtros geotêxteis sob elevados níveis de tensões também deve ser avaliado, por estes serem materiais compressíveis. A compressão e a impregnação do geotêxtil por partículas de solo durante

o espalhamento do rejeito, ou devido à ação de forças de percolação carreando partículas soltas, podem impregnar o filtro e aumentar significativamente a capacidade de retenção e alterar as condições de colmatação do geotêxtil (Gardoni 2000; Palmeira e Gardoni 2000a e b; Gardoni e Palmeira, 2002; Gardoni e Palmeira, 2002; Palmeira et al. 2005; Palmeira et al., 2010, Palmeira, 2018). Os critérios de projeto disponíveis atualmente não levam em consideração a influência de tais mecanismos na capacidade de retenção e potencial de colmatação dos filtros geotêxteis (Gardoni e Palmeira, 2002).

2.1.1 – Minério de Ferro do Complexo de Carajás - VALE

O complexo minerário Serra de Carajás, pertencente à empresa Vale, produz um dos melhores minérios de ferro do mundo, mas tem uma característica que o torna menos competitivo no mercado internacional: alto teor de umidade presente no produto natural. Essa característica é significativamente agravada pelo processo de peneiramento úmido utilizado para obter a distribuição granulométrica adequada nos produtos finais. A Figura 1 mostra o complexo da Mineração de Carajás.



(a) Vista da cava da mina de Carajás



(b) Água livre nas pilhas

Fig. 1 - Complexo minerador de Carajás, PA, Brasil.

O Sinter Feed sai do processo de peneiramento com teor de umidade em torno de 12% e é transportado por correia transportadora até o pátio de estocagem, onde é depositado em pilhas que chegam a 20 m de altura, para ficar exposto à secagem por 2 ou 3 dias. A elevada umidade do material pode provocar a instabilidade das pilhas no pátio de armazenamento. O transporte pela ferrovia da companhia Vale permite o escoamento da água dos vagões junto com os finos de minério que contaminam o lastro da ferrovia e, portanto, diminuem a sua vida útil. No porto de São Luís, MA, o minério de ferro é estocado nos pátios de estocagem e mais água pode ser incorporada ao minério devido às constantes chuvas na região norte do Brasil. Após o embarque, a parte inferior do minério de ferro dos porões é difícil de ser retirada devido à presença de água livre. Esse fato acarreta um alto custo de transporte e de desembarque no destino. O teor de umidade final em torno de 9% corresponde a um grande volume de água que é transportado junto com o minério de ferro, considerando que o volume de exportação desse tipo de minério se situa em torno de 35 milhões de toneladas por ano.

Nos estudos descritos a seguir (Gardoni et al., 2010a e b, Moreira, 2011 e Ferreira, 2009) geossintéticos foram utilizados para drenar fluidos dos sistemas de transporte de minério de ferro (vagões e esteira) na Mineração Carajás, Vale, com o objetivo de diminuir o teor de umidade do

minério de ferro. Com base no estudo, foi projetado um sistema de drenagem composto por um geotêxtil não tecido e uma georrede para ser instalado na parede lateral e no fundo dos vagões do trem de carga que transporta o minério de ferro até o porto de São Luís. O sistema de drenagem deve conduzir a água drenada do minério para um reservatório instalado no fundo do vagão, e essa água armazenada no reservatório deve ser descartada no porto. Para tanto, foi desenvolvido um protótipo de sistema de drenagem na forma de gaiolas para serem acondicionadas nos vagões do trem de carga. Análises numéricas foram realizadas para avaliar a eficiência do sistema de drenagem com geossintéticos. Os resultados mostraram que os filtros geocompostos podem reduzir o teor de água do minério para até 6%.

Os geocompostos para drenagem também podem ser utilizados em pilhas de minério, visando reduzir sua umidade. Estudos numéricos foram realizados para estudar esse tipo de aplicação e as Figuras 2 e 3 mostram resultados obtidos nas pilhas com e sem geossintéticos (Gardoni et al., 2010a e b e Moreira, 2011). Pode-se observar que a presença de camada drenante na base da pilha pode reduzir consideravelmente a umidade, melhorando também as condições de estabilidade da pilha.

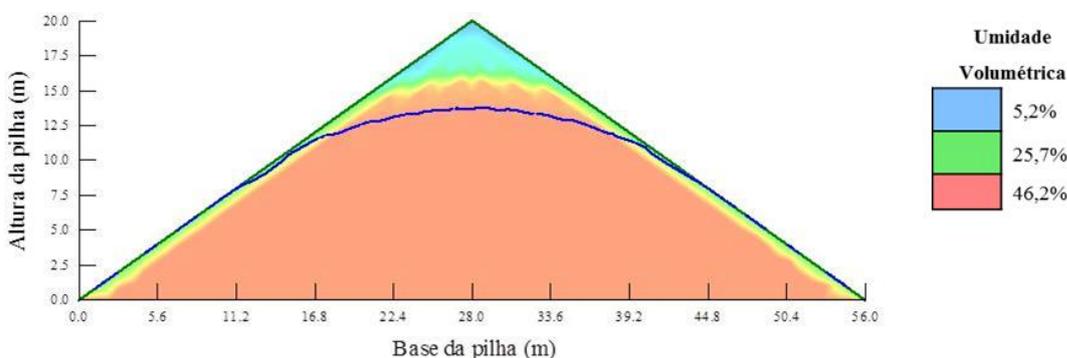


Fig. 2 – Diagrama de umidade da pilha de minério sem sistema de drenagem na base.

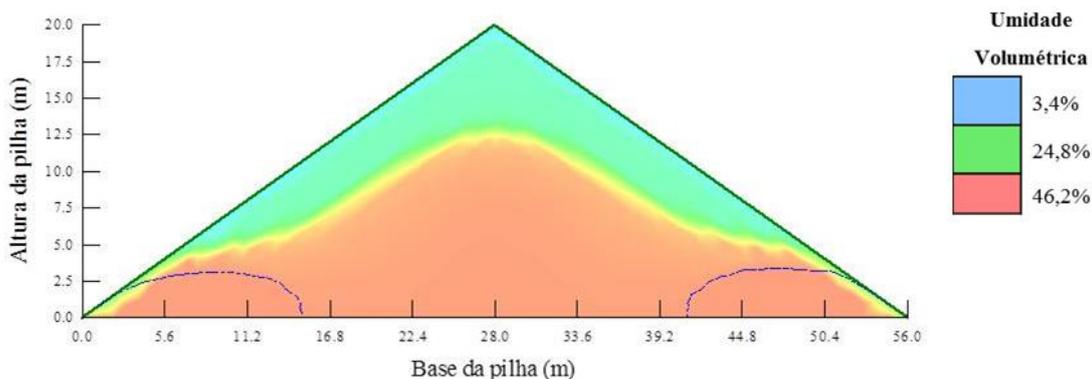


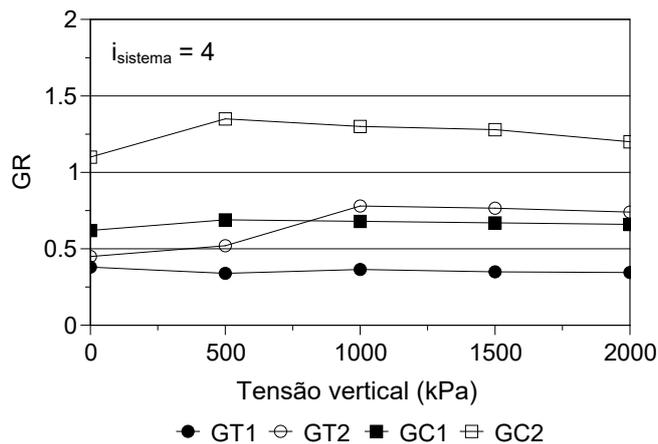
Fig. 3 – Diagrama de umidade da pilha de minério com sistema de drenagem de base.

O comportamento dos filtros geotêxteis em barragens de rejeitos é muito complexo devido aos regimes de fluxo, heterogeneidade dos rejeitos, construção e condições ambientais agressivas e altos níveis de tensões, por exemplo. Um dos aspectos que contribuem para a severidade das aplicações de filtros geotêxteis em mineração são as possibilidades de ataque químico e colmatção química do filtro. Uma metodologia de teste capaz de simular de forma mais realista as condições de deposição de rejeitos, como em um aparelho de teste de calha, seria capaz de produzir resultados de previsões mais acurados. Portanto, mais pesquisas são necessárias para um melhor entendimento sobre o comportamento de filtros geotêxteis em aplicações de mineração.

Um programa de ensaios de laboratório para investigar a capacidade de geotêxteis em reduzir a umidade de minérios durante o transporte da mina de Carajás para o porto de São Luis foi também executado. Ferreira (2009) utilizou ensaios de Razão entre Gradientes (*Gradient Ratio Tests*) sob confinamento para avaliar a capacidade de geotêxteis não tecidos e geocompostos para drenagem em reduzir a umidade do minério (sinter feed e pellet feed) da mina de Carajás. Testes com aplicação de vácuo na base do equipamento foram também realizados como parte da pesquisa. Dentre os minérios ensaiados, o pellet feed (PF) se caracteriza por ser um material mais fino ($D_{85} = 0,095$ mm, onde D_{85} é o diâmetro de grãos correspondente a 85% passando, $D_{50} = 0,048$ mm e $D_{10} = 0,0081$ mm, $C_u = 6,8$, onde C_u é o coeficiente de uniformidade, $G = 4,94$, onde G é a densidade dos grãos e $k = 8,4 \times 10^{-7}$ m/s, onde k é o coeficiente de permeabilidade) que o sinter feed (SF, $D_{85} = 1,70$ mm, $D_{50} = 0,18$ mm, $D_{10} = 0,007$ mm, $C_u = 44,3$, $G = 4,95$ e $k = 3,0 \times 10^{-5}$ m/s). Para os ensaios, os espécimes destes materiais foram preparados com densidade relativa igual a 50%. Os geotêxteis GT1 e GT2 são produtos manufacturados de poliéster, não tecidos, agulhados, e com valores de massa por unidade de área iguais a 400 g/m^2 e 600 g/m^2 , respectivamente. As aberturas de filtração destes produtos variam de 0,13 mm a 0,23 mm e de 0,11 mm a 0,19 mm, dependendo do produto considerado. Os geocompostos GC1 e GC2 são produtos combinando núcleo drenante de geomanta (GC1) ou georrede (GC2) entre camadas de filtros geotêxteis não tecidos agulhados, com massas por unidade de área iguais a 950 g/m^2 e 900 g/m^2 e espessuras iguais a 7,8 mm e 11,7 mm, respectivamente.

A Figura 4a apresenta resultados de ensaios de razão entre gradientes para um gradiente hidráulico total (gradiente entre as extremidades do sistema minério-geossintético) igual a 4 e tensões verticais no topo da amostra variando de 0 a 2000 kPa. Os valores de GR (razão entre gradientes) se mostraram bastante constantes nos ensaios com GT1 e GC1, ao passo que aumentaram nos ensaios com GT2 e GC2. Apesar de um mecanismo severo de piping no início dos ensaios, os sistemas permaneceram estáveis durante as durações dos ensaios. Análises microscópicas dos espécimes de filtros geotêxteis ao final dos ensaios revelaram que partículas grandes de minério ficaram aprisionadas nos vazios do geotêxtil, como mostrado na Figura 4b. Tal fato foi também observado em experimentos semelhantes realizados por Gardoni e Palmeira (2002), Beirigo (2005) e Palmeira et al. (2005 e 2010).

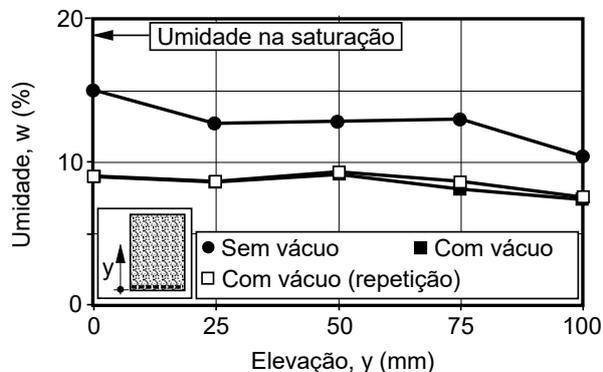
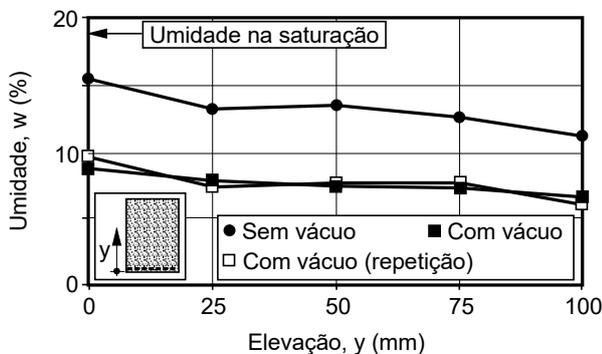
A capacidade drenante dos geossintéticos ensaiados foi avaliada em ensaios de razão entre gradientes por meio de fluxo gravitacional e com aplicação de vácuo na base do sistema minério-geossintético. Inicialmente, o sistema foi submetido ao fluxo de água até estabilização da vazão sob uma tensão vertical de 2000 kPa. A seguir, o fluxo foi interrompido e a amostra deixada drenando através da sua base com ou sem a aplicação de vácuo. Ao final do processo de drenagem, valores de umidade do minério foram medidas em diferentes pontos da amostra. As Figuras 5a e 5b mostram a variação da umidade na amostra (sinter feed) ao longo da sua altura em ensaios com os geocompostos GC1 e GC2, com e sem aplicação de vácuo na base, respectivamente. Sob a ação da gravidade somente, dependendo do ponto considerado (y , na Fig. 5), observam-se reduções de umidade do minério, em relação à situação saturada inicial, entre 18% e 37% no sistema com GC1 e entre 21% e 45% no sistema com GC2. Já com a aplicação de vácuo na base da amostra, observam-se reduções mais significativas, entre 53% e 67% no sistema com GC1 e entre 53% e 62% no sistema com GC2. Ensaios semelhantes com pellet feed mostraram reduções de umidade ao longo da altura do espécime de minério variando entre 22% e 33% quando da utilização de vácuo. Assim, a utilização de vácuo pode reduzir de forma mais significativa a umidade do minério de Carajás, embora a aplicação de vácuo em condições de campo pode não ser tão simples ou economicamente viável.



(a) GR versus tensão vertical.

(b) Grão dentro do geotêxtil.

Fig. 4 - GR versus tensão vertical para um gradiente do sistema igual a 4.



(a) Sistema GC1/sinter feed.

(b) Sistema GC2/sinter feed.

Fig. 5 – Variação de umidade ao longo da altura da amostra de minério.

2.1.2 - Tubos geotêxteis para filtração e confinamento de rejeitos finos de minério de ouro

Desde a década de 1980, a tecnologia de tubos geotêxteis tem sido usada em projetos de engenharia em todo o mundo para diferentes fins como, por exemplo, proteção de ambientes marinhos contra a erosão, drenagem de sedimentos contaminados e desidratação de lodo (Fowler et al., 2005). O desaguamento de rejeitos de mineração é uma aplicação mais recente. Atualmente, as principais técnicas de disposição de rejeitos adotadas são aterros hidráulicos e barragens de rejeitos. O uso dessas técnicas implica em altos custos para a mineração em termos de operação, manutenção e monitoramento destas estruturas geotécnicas. Além disso, existem grandes riscos associados à ocorrência de acidentes de grande impacto ambiental, social e econômico. Este método de disposição vem encontrando dificuldades crescentes de licenciamento no Brasil, especialmente o método de disposição à montante. A possibilidade de utilização de estruturas tubulares geotêxteis como alternativa à disposição convencional de rejeitos finos em barragens e diques tem sido amplamente discutida no Brasil, devido às recentes falhas em barragens a montante, principalmente no estado de Minas Gerais. As rupturas de estruturas tradicionais de contenção de rejeitos que ocorreram recentemente no Brasil (Barragem de Fundão, em 2015, e Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, em 2019) causaram impactos ambientais e sociais irreversíveis (Morais e Gardoni, 2020).

De acordo com Lawson (2008), os tubos geotêxteis são uma alternativa tecnológica para desaguar e confinar rejeitos de mineração, especialmente para atividades minerárias instaladas em locais ambiental e socialmente sensíveis, e que gerem rejeitos em escala relativamente menor. Como

exemplo, Wilke et al. (2015) mostram a experiência de uso de tubos geotêxteis para desaguar e confinar todo o rejeito de mineração de zinco e níquel produzido na mina de Talvivaara, localizada na Finlândia. Para grandes instalações de mineração, que depositam seus rejeitos em barragens construídas com a técnica de aterro hidráulico, os tubos geotêxteis podem ser utilizados como solução pontual, ou ainda para dispor parte do rejeito produzido. Yang *et al.* (2019) apresentam a aplicação de tubos geotêxteis para a disposição de parte do rejeito gerado em uma barragem de rejeitos de bauxita localizada na China. A seguir, são apresentadas algumas aplicações de tubos geotêxteis para desaguardamento de rejeitos em minas no Brasil.

2.1.3 - Tubos geotêxteis para o desaguardamento, confinamento e empilhamento de resíduos de mineração de ouro

Silva (2017) desenvolveu um projeto de pesquisa para avaliar o uso de tubos de geotêxtil tecido para desidratar, confinar e empilhar rejeitos de minério de ouro. Uma estrutura de tubo geotêxtil empilhado foi construída na barragem de rejeitos da mineradora Fazenda Brasileiro, da empresa de mineração Yamana Gold, Bahia, Brasil. A densidade do rejeito (G_s) foi de 2,85; a análise granulométrica mostra que o material é composto por 75% de partículas finas. O geotêxtil tecido tinha uma resistência à tração de 100 kN/m, massa por unidade de área de 554 g/m² e espessura de 1,77 mm. A eficiência de desidratação foi avaliada por meio de ensaios de *jar-test*, cone e ensaio de desaguardamento do geotêxtil (GDT). A partir dos resultados dos ensaios de desidratação, foi definido que o floculante Magnafloc LT27 seria adicionado aos rejeitos para evitar a perda excessiva de partículas finas.

Um protótipo foi construído dentro da área de mineração, no topo de uma pilha de rejeitos, e foi monitorado durante dois anos. As dimensões da área de teste foram 7 m x 9 m, e uma camada de drenagem foi construída sobre a geomembrana para coletar o fluido ao longo do processo de desidratação (Fig. 6a). O protótipo foi desenhado para uma estrutura de três níveis, sendo 9 unidades de tubos geotêxteis no primeiro nível, 4 no segundo nível e uma unidade de tubo geotêxtil no terceiro nível de empilhamento. Cada unidade de tubo geotêxtil tinha 2,0 m de largura e 6,0 m de comprimento e foi projetada para ter altura máxima de 1,0m ao final do processo de enchimento. A Figura 6 mostra o protótipo do empilhamento drenado construído na mineradora.

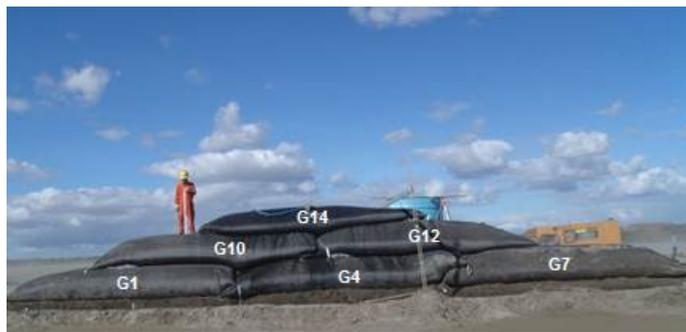
Os rejeitos confinados dentro dos tubos geotêxteis tiveram sua concentração de sólidos avaliada por meio de coleta de amostras próximo à porta de arquivamento dos tubos. Após a última etapa de enchimento, as coletas foram realizadas após 24h, 48h, 72h, 7 dias, 21 dias e 28 dias. A Figura 7 mostra a variação de concentração de sólidos ao longo do tempo. O maior aumento no teor de sólidos ocorreu nas primeiras 24 horas, quando a concentração de sólidos passou de 53% para 75%. Esses dados correspondem a um teor de água de 100% diminuindo para 25% em um dia. Após as primeiras 24 horas, a taxa de dessecação diminuiu e o aumento adicional no conteúdo de sólidos foi de cerca de 10% em 13 dias. Cada unidade de tubo geotêxtil foi capaz de desidratar e confinar uma quantidade de 5,4 m³ de rejeitos em uma área de 108 m².

Após a realização do enchimento e empilhamento dos tubos geotêxteis, a estrutura permaneceu no campo por mais 24 meses. Durante este período, vários estudos foram realizados para um melhor entendimento do comportamento dos tubos e das deformações ocorridas após o enchimento, por meio de modelagens numéricas e modelos analíticos (Silva, 2019, Cardoso, et al., 2020, Silva et al., 2021). Após esse período, foi elaborado um plano de exumação para coleta de amostras a serem submetidas a um programa experimental em laboratório (Gardoni e Morais, 2020).

Após 24 meses de consolidação do material no interior dos tubos, contendo inicialmente 50% de sólidos, verificou-se que a densidade aparente seca era de 1,8 t/m³. Esse valor corresponde a uma porcentagem final de sólidos de 83%. Segundo Bittar (2017), a densidade aparente seca de rejeitos de minério de ouro no campo atinge valores entre 1,2 e 1,4 t/m³. Portanto, o resultado obtido pela consolidação de rejeitos finos em tubos geotêxteis comprova a excepcional eficiência desse processo



(a) Empilhamento drenado
- direção transversal



(b) Empilhamento drenado
- direção horizontal

Fig. 6 - Empilhamento drenado de tubos geotêxteis

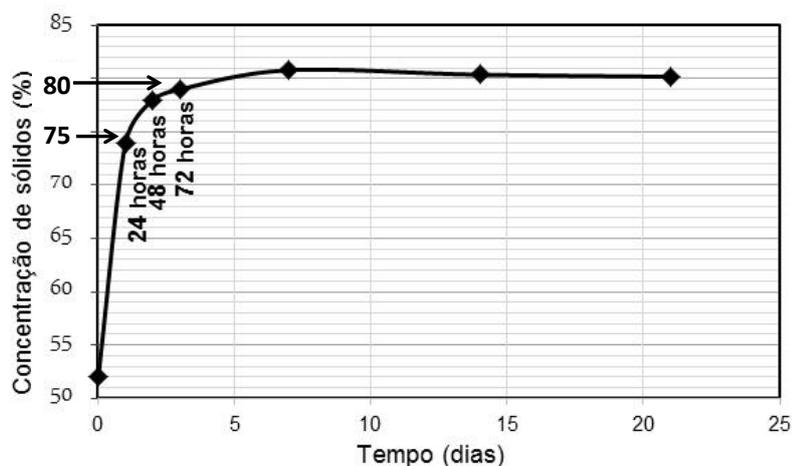


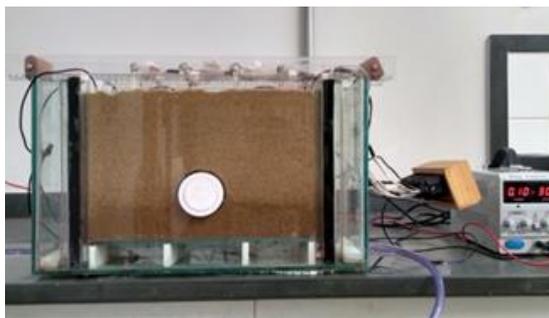
Fig. 7 – Concentração de rejeitos *versus* tempo nos tubos geotêxteis (Silva, 2017).

de destinação de rejeitos finos de mineração e sua viabilidade para utilização como estruturas seguras de mineração.

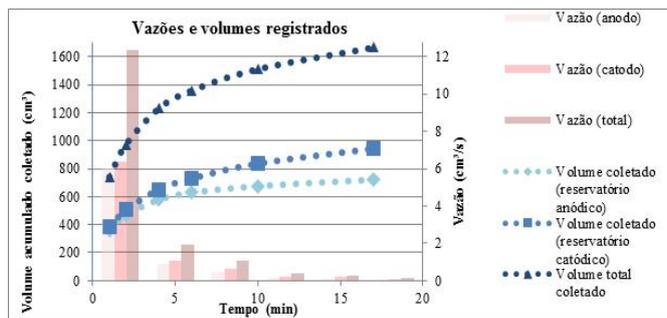
2.1.4 – Ensaios eletrocinéticos em tubos geotêxteis

Um dos grandes problemas identificados relacionado à drenagem de rejeitos finos é o tempo necessário para a obtenção do teor de sólidos final necessário, devido à baixa permeabilidade do material. Para acelerar o processo de desidratação, estudou-se a utilização do método eletrocinético, que consiste em aplicar uma baixa voltagem entre os elementos condutores inseridos no geotêxtil, que atuam como ânodo e cátodo, visando induzir o movimento da água pelos vazios do rejeito. As Figuras 8a e b mostram o equipamento desenvolvido para testes eletrocinéticos com geotêxteis tecidos e não tecidos (Oliveira et al., 2018 e Oliveira, 2019).

O fenômeno da eletrosmose envolve o transporte de água através de uma rede contínua de vazios entre as partículas sólidas, sendo o movimento gerado na dupla camada difusa. Seu principal mecanismo é o movimento de íons, que carregam moléculas de água atraídas eletricamente por eles (Asadi et al., 2013). Embora o fenômeno seja conhecido há mais de dois séculos, seu uso em solos e resíduos de mineração ainda é limitado devido a problemas intrínsecos à aplicação, como corrosão dos ânodos, consumo de energia relativamente alta e dificuldade de direcionar gases e líquidos de forma eficiente (Zhuang et al., 2015). No entanto, a invenção dos geossintéticos eletrocinéticos (EKG) estimulou novos estudos e aplicações da eletrosmose.



(a) Equipamento para ensaios electrocinéticos



(b) Resultados dos ensaios de desaguamento.

Fig. 8 – Drenos electrocinéticos para drenagem de rejeitos de mineração (Oliveira e Gardoni, 2020).

O estudo mostrado na Figura 8 (Oliveira e Gardoni, 2020) se propôs a avaliar técnica e economicamente o processo de desidratação por aplicação de diferenças de potencial elétrico em rejeitos de mineração de ouro confinados. A associação dessas tecnologias (tubos geotêxteis e método electrocinético) visa melhorar o processo de desaguamento, proporcionando uma opção mais rápida e segura para o descarte de rejeitos. A propriedade condutiva do tubo foi obtida pela inserção de eletrodos de cobre na malha do geotêxtil. Alguns resultados de interesse para esta pesquisa foram: propriedades físico-químicas e mineralógicas da fração sólida do rejeito e do fluido antes e após o processo de desaguamento; características físicas, mecânicas, hidráulicas e de durabilidade do geotêxtil e eficiência do desaguamento. Dentre as opções têxteis disponibilizadas, a que apresentou melhor desempenho dreno-filtrante nos ensaios em pequena escala para o rejeito predominantemente siltoso foi o geocomposto constituído internamente por um geotêxtil não tecido e externamente por um geotêxtil tecido. A adição polimérica com função floculante acelerou o desaguamento e melhorou a eficiência de filtragem (EF), pouco alterando a eficiência de drenagem (ED). O emprego de geotêxtil previamente saturado com solução adstringente tornou o desaguamento mais rápido. Os resultados relacionados ao processamento do desaguamento com aplicação de diferença de potencial elétrico de 30V estão exibidos na Figura 8b.

Em face das técnicas de engenharia disponíveis, a tecnologia de tubos geotêxteis pode ser uma das soluções para consolidação, desaguamento e empilhamento de rejeitos de mineração. A desidratação de materiais com alto teor de água por meio de tubos geotêxteis também pode ser uma técnica eficiente para aumentar a qualidade do efluente e reduzir os custos de tratamentos químicos de sistemas que operam com balanço hídrico positivo ou em circuito fechado.

Com base nos resultados das aplicações descritas acima, a utilização de tubos geotêxteis para disposição de rejeitos de minério de ouro é entendida como uma alternativa viável, pois além de desidratar os rejeitos, pode reduzir a turbidez e a concentração de metais pesados do efluente e, conseqüentemente, minimizar os riscos e impactos ambientais das atividades de mineração.

2.1.5 – Desempenho de filtros geotêxteis sob condições severas de utilização

Filtros geotêxteis são comumente utilizados em obras geotécnicas e de proteção ambiental em associação ou como substitutos para materiais naturais. A rapidez e simplicidade de instalação destes filtros, bem como a repercussão ambiental favorável da não utilização de materiais naturais, têm aumentado muito suas utilizações ao longo das últimas décadas. Dentre estes filtros, os geotêxteis do tipo não tecido se caracterizam por uma estrutura composta de filamentos distribuídos de forma aleatória, conferindo-lhes uma microestrutura bastante complexa. Além disso, por trabalharem enterrados, são submetidos à compressão e, dependendo da utilização, podem também ser submetidos a forças de tração, como é o caso de emprego de geotêxteis em tubos geotêxteis, barreiras contra sedimentos (*silt fences*) ou como componente de sistema de drenagem de aterros sobre solos compressíveis. Outro mecanismo que pode influenciar o comportamento filtrante de geotêxteis não

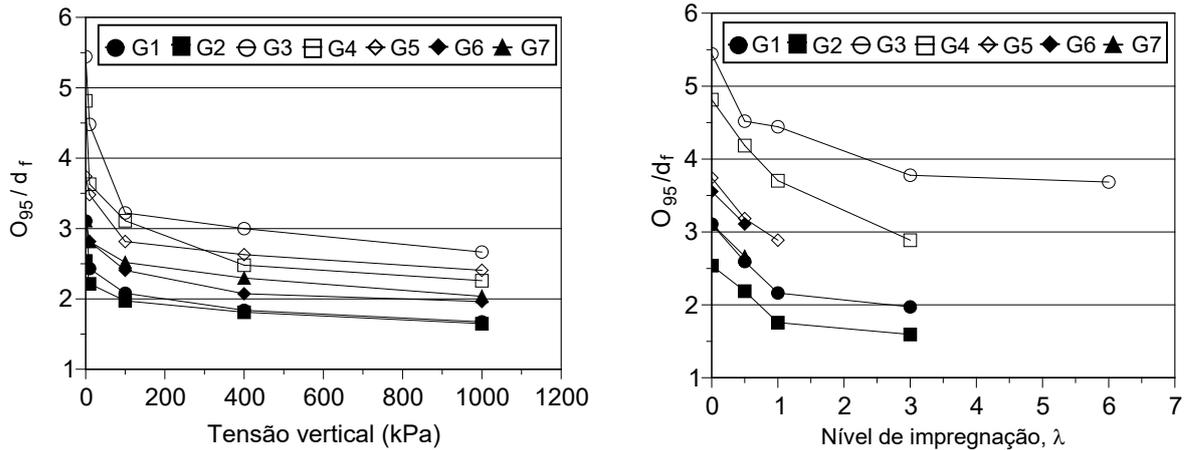
tecidos é a possibilidade de impregnação dos seus vazios por partículas de solo, o que pode ocorrer durante o espalhamento e compactação de solo (particularmente os não coesivos) sobre o filtro ou por partículas que são trazidas pela água durante a operação do filtro. Tais situações afetam o comportamento de filtros geotêxteis. Em vista do exposto, as condições de utilização de filtros geotêxteis podem ser bastante severas, mesmo em obras geotécnicas rotineiras.

Diferentes tipos de experimentos de laboratório têm sido realizados ao longo dos anos para o estudo do comportamento e desempenho de filtros geotêxteis, bem como para quantificar suas propriedades relevantes (Palmeira, 2020). Dentre estes ensaios, incluem-se ensaios de peneiramento, ensaio de razão entre gradientes, ensaio de condutividade hidráulica e o ensaio de Ponto de Bolha (*Bubble Point Test*).

Palmeira e Trejos Galvis (2017) investigaram de forma pioneira a variação das dimensões de poros de geotêxteis não tecidos confinados, com e sem impregnação por partículas de solos, com a utilização de um equipamento para ensaio de Ponto de Bolha especialmente projetado para a pesquisa. Os geotêxteis (polipropileno e poliéster) ensaiados tinham valores de massa por unidade de área variando entre 200 g/m² e 1800 g/m². A Figura 9a apresenta a variação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos normalizada pelos diâmetros dos seus filamentos (d_f) com tensão vertical, em espécimes de geotêxteis virgens (sem impregnação por partículas de solo). Nesse caso, a abertura de filtração (equivalente ao tamanho do maior grão esférico capaz de atravessar o filtro geotêxtil) foi tomada como sendo o diâmetro equivalente do poro (O_{95}) para o qual 95% dos demais poros são menores do que aquele valor. Pode-se observar uma significativa redução no valor de O_{95} com a tensão vertical, particularmente para valores de tensões verticais até 400 kPa. A consequência prática de tais resultados é que a compressão do filtro pode aumentar consideravelmente sua capacidade de retenção de partículas do solo base, bem como altera as condições de colmatação em relação à situação do filtro não confinado.

A presença de partículas de solo dentro dos vazios do geotêxteis influencia a sua compressibilidade e influencia adicionalmente a sua abertura de filtração. A Figura 9b mostra a variação da abertura de filtração do geotêxtil com seu nível de impregnação (λ), definido como a massa de partículas de solo dentro do geotêxtil dividida pela massa de filamentos do geotêxtil. Nesse caso, os resultados são para ensaios em espécimes de geotêxteis não confinados. Pode-se observar que a impregnação do geotêxtil pode também reduzir de forma significativa a abertura de filtração do filtro, ou seja, o diâmetro de outras partículas que poderiam atravessar o geotêxtil. A influência combinada do confinamento e da impregnação do geotêxtil por partículas de solo reduz mais ainda a abertura de filtração do geotêxtil. Palmeira e Trejos Galvis (2017) apresentam comparações entre previsões e medições de aberturas de filtração para geotêxteis não tecidos virgens e impregnados utilizando métodos semiempíricos e probabilísticos.

O comportamento de filtros submetidos à tração tem sido investigado por diferentes pesquisadores ao longo dos anos (Fourie e Kuchena, 1995, Wu et al., 2008, Fourie e Addis, 1997 e 1999, Moo-Young e Ochola, 1999) por meio de ensaios de peneiramento em espécimes de geotêxteis submetidos a forças de tração somente. Palmeira et al. (2019) investigaram o comportamento de filtros geotêxteis não tecidos submetidos à tração e ao confinamento por meio de ensaios de ponto de bolha. A Figura 10a apresenta a variação da abertura de filtração (nesse caso em termos de O_{98}) de geotêxteis não tecidos com a deformação de tração em ensaios sem confinamento e com deformações biaxiais (mesma deformação de tração em duas direções ortogonais). Os geotêxteis ensaiados foram produtos manufacturados com poliéster e com massas por unidade de área variando entre 200 g/m² e 500 g/m². Os resultados mostram aumentos significativos na abertura de filtração com o aumento da deformação de tração. No entanto, o confinamento do geotêxtil previamente tracionado reduz a sua abertura de filtração, como pode ser verificado nos resultados apresentados na Figura 10b, que mostra a variação de O_{98} com a tensão vertical para diferentes deformações biaxiais de tração impostas ao espécime

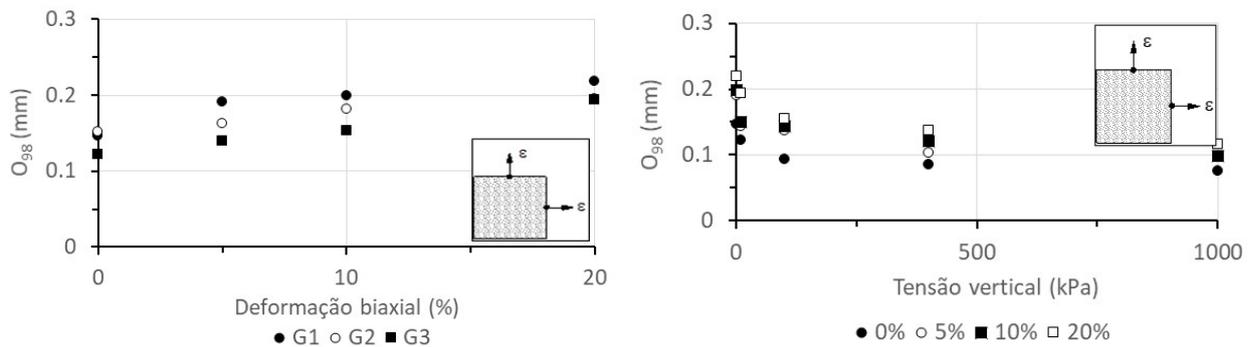


(a) Abertura de filtração versus tensão vertical.

(b) Abertura de filtração versus λ .

Fig. 9 – Variação de abertura de filtração de geotêxteis não tecidos com a tensão vertical e nível de impregnação (modificado de Palmeira e Trejos Galvis 2017).

Os resultados apresentados acima mostram a necessidade de mais pesquisas visando um melhor entendimento do comportamento de filtros geotêxteis sob diferentes condições de carregamento. Os critérios de filtro disponíveis na atualidade não levam em conta os mecanismos descritos acima, o que pode levar a projetos muito conservadores ou a situações em que mecanismos de colmatção do filtro possam ocorrer para condições diferentes daquelas esperadas para geotêxteis não submetidos à compressão e/ou tração.



(a) O_{98} versus deformação biaxial.

(b) O_{98} versus tensão vertical.

Fig. 10 – Variação da abertura de geotêxteis não tecidos com a deformação de tração – Ensaio sem confinamento (modificado de Palmeira et al. 2019).

3 – GEOSINTÉTICOS COMO BARREIRAS

3.1 - Barreiras impermeabilizantes para contenção de fluidos contaminados

A durabilidade é um dos aspectos fundamentais para o bom desempenho de geossintéticos em sistema de barreiras contra o fluxo de líquidos e gases. A seguir, são descritos casos históricos em que técnicas construtivas e ensaios especiais foram realizados visando a quantificação da degradação de geomembranas e o melhor desempenho de obras de disposição de rejeitos de mineração.

3.1.1 - Mineração Fazenda Brasileiro e Mineração Jacobina - Yamana Gold Mining

Um experimento de campo com o objetivo de investigar o desempenho de geomembranas de PEAD e PVC em uma barragem de rejeitos de ouro foi realizado por Santos e Gardoni (2014 e 2016), Sampaio et al. (2015 e 2017) e Halabi et al. (2020). Nesse estudo, foram avaliadas as propriedades físicas das geomembranas de PVC e PEAD, cujo emprego foi destinado a formar barreira em taludes de barragens de rejeitos e fundações das minerações Fazenda Brasileiro (FBM) e Jacobina (JYGM), ambas da empresa Yamana Gold, localizadas no estado da Bahia, nordeste do Brasil. As duas mineradoras beneficiam ouro, cujo processo de separação de rejeitos aplica um conjunto de operações físicas e químicas. Atualmente, em Fazenda Brasileiro, a operação do sistema consiste basicamente no bombeamento de rejeitos da planta de beneficiamento até o Lago II. O *underflow* é disposto em pilha no Lago II e o *overflow* é lançado no Lago III, que também recebe o sobrenadante do Lago II.

Santos (2014 e 2016) avaliaram as propriedades físicas das geomembranas de PEAD e Cloreto de Polivinila (PVC) que possuíam espessuras de 1,5 e 0,8 mm, respectivamente, e foram instaladas ao longo de um período de quatro anos, de 2006 a 2010, pela Fazenda Brasileiro Mineração (FBM). A Figura 11a mostra uma vista do Lago II na Mineradora Fazenda Brasileiro e a Figura 11b mostra o sistema de barreira do reservatório da barragem de Jacobina, BA, com geomembrana de PEAD. Os testes foram realizados em quatro tipos de amostras, tais como: amostras intactas (GMV), amostras envelhecidas em laboratório (GMD), amostras envelhecidas em câmara de intemperismo (GMC) e amostras exumadas das barragens (GMEX). Este procedimento permitiu comparar a durabilidade de amostras envelhecidas/exumadas com amostras virgens, e avaliar o grau de envelhecimento e perda de durabilidade das geomembranas.

Os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura mostraram baixo nível de degradação das geomembranas de PEAD. No entanto, as geomembranas de PVC mostraram uma perda de resistência muito maior do que o HDPE. A geomembrana de PVC, instalada em 2006, apresentou uma estrutura com superfície com fissuras profundas, indicando um comprometimento de sua propriedade como barreira. Esta conclusão foi confirmada pelos resultados obtidos no tempo de indução oxidativa - OIT, com as amostras exumadas apresentando apenas 10,2 minutos para OIT, em comparação aos 114,3 minutos da amostra virgem.



(a) Vista do Lago II – FBM



(b) Impermeabilização do reservatório - JYGM.

Fig. 11 – Mineração Fazendas Brasileiro e Jacobina, BA (Sampaio et al., 2014 e Santos e Gardoni, 2016).

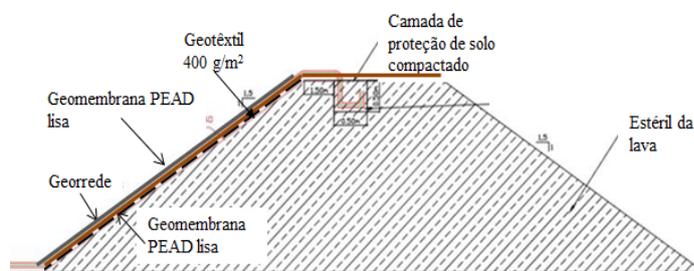
3.1.2 - Mineração Vanádio de Maracás

A propriedade da Mineradora Vanádio de Maracás S.A totaliza 17.690 hectares e está localizada a leste do Estado da Bahia. A mina fica a cerca de 250 km a sudoeste de Salvador (capital da Bahia). A Figura 12 apresenta o projeto da Bacia de Depósito de Rejeitos Não Magnéticos 04 (BNM 04), que é uma das estruturas de disposição controlada dos rejeitos não magnéticos gerados a partir da exploração e beneficiamento do vanádio, com capacidade para armazenamento final de 1.047.523,57 m³.

A BNM 04 é uma estrutura de barramento com camada dupla de geossintéticos, sendo: um geotêxtil não tecido de poliéster, com massa por unidade de área igual a 400 g/m², instalado sobre a camada de solo compactado, com a função de proteção da geomembrana; uma geomembrana de PEAD lisa, com 1 mm de espessura; um sistema de detecção de vazamentos com camada de georrede com 5,5 mm de espessura instalada entre as geomembranas e outra geomembrana lisa de PEAD com 1 mm de espessura.

O projeto demonstrou que a técnica de controle da percolação com geossintéticos adotada na Mineradora Vanádio de Maracás, com camada dupla de geomembrana e camada de georrede, permitiu a detecção e o tratamento de pequenos vazamentos de forma a melhorar e assegurar o controle e a confiabilidade do sistema de disposição de rejeitos.

A experiência descrita acima possibilitou compreender que a tecnologia adotada na construção da barragem de rejeitos trouxe ganhos substanciais ao conceito de segurança dessa obra. Os sistemas executados que permitiram um controle no monitoramento da fuga de líquidos, no acompanhamento sistêmico do barramento e nas observações de “surgências” facilitaram a gestão de risco da estrutura. Foi possível verificar também que as estruturas construídas com materiais geossintéticos, os quais possuem alto grau de controle tecnológico e industrial e excelentes propriedades mecânicas e físicas, possibilitaram um melhor desempenho da obra.



(a) Seção transversal da BNM 04



(b) Vista da BNM 04 de Maracás

Fig. 12 – Mineração de Vanádio de Maracás – estrutura da BNM 04 em dupla camada de geossintéticos (Botelho, 2019).

3.2 – Avaliação da resistência de interfaces solos-geomembranas por meio de parâmetros de rugosidade

Nas últimas décadas, o estudo da resistência de interface entre geossintéticos e outros materiais tem sido realizado com diferentes tipos de equipamentos. Basicamente, três são os ensaios que vêm sendo comumente utilizados para se obter o ângulo de atrito de interface (δ) solo-geossintético: cisalhamento direto convencional (CDC), cisalhamento direto de maiores dimensões (CDM) e

ensaio de plano inclinado (PI). Um dos problemas relatados com relação ao primeiro (ASTM D3080/D3080M, 2011) é a menor possibilidade de aplicação de baixas tensões confinantes ($\sigma_n < 15$ kPa), o que muitas vezes representa um caso crítico, como ocorre na execução de camada de proteção ou drenagem sobre a geomembranas em taludes de áreas de disposição (Reyes Ramirez e Gourc, 2003). Além disso, a escala é outro fator relevante, principalmente em ensaios com geomembranas com texturas. Uma maneira de evitar ou minimizar o efeito de escala é a utilização de equipamento com dimensões maiores da caixa de cisalhamento. Um outro equipamento que pode ser empregado para baixas tensões é o equipamento de plano inclinado (PI), onde uma rampa é levantada a uma velocidade constante (ISO 12957-2, 2005). Acima da rampa há uma caixa com o solo sobre o geossintético, e o levantamento é realizado até que haja um grande deslocamento da caixa, indicando a ruptura da interface. Além desse equipamento poder representar um trecho da geomembrana no campo, praticamente anulando o problema de escala, também permite a aplicação de tensões confinantes baixas.

Pesquisas desenvolvidas nos últimos anos têm mostrado que vários são os fatores que influenciam o ângulo de atrito de interface entre geomembranas e solos: a densidade do solo empregado, o tamanho médio e forma dos grãos, o tipo de solo (grosso ou fino), o nível de tensões aplicadas etc. (Sánchez, 2018). Para o caso da geomembrana, o tipo de polímero, a espessura, o tipo de superfície abaixo dela (lubrificada ou rugosa), a altura de aspereza e o tipo de rugosidade também influenciam na resistência de interface obtida (Briançon et al. 2011, Bacas et al. 2015, Afzali-Nejad et al. 2018). Quando a interface envolve geotêxteis e geomembranas, a espessura do geotêxtil e sua gramatura podem influenciar na resistência de interface, devido ao efeito gancho-laço descrito por Hebler et al. (2005). Apesar das pesquisas já realizadas, nota-se que a estimativa desse valor ainda necessita de mais estudos. Nesse contexto, Sánchez (2018) menciona que os parâmetros de rugosidade da superfície das geomembranas podem influenciar na resistência de interface. Esses parâmetros, além de levarem em conta a altura máxima de aspereza, medem também a topografia “secundária”, no nível abaixo da altura máxima entre asperezas.

Os parâmetros de rugosidade podem ser medidos bi ou tridimensionalmente, por meio de um microscópio de alta resolução e são determinados em, no máximo, 48 h (Sánchez, 2018). Em termos bidimensionais (ISO 4287, 1997), é possível obter um valor que represente a distância entre o maior pico e o maior vale (Figura 13a) em todas as seções avaliadas (R_t). Outro valor que pode ser medido é o valor médio entre o maior pico e do maior vale (R_z), por meio de dez (ou mais) sessões lineares (Figura 13b) traçadas em diferentes partes da amostra. Ainda é possível obter o parâmetro que representa o valor médio, em módulo (Figura 13c), de picos e vales (R_a) ou valores da média entre picos e vales em cada seção linear (Figura 13d) especificada (R_c). Tridimensionalmente, é possível obter parâmetros semelhantes, sendo esses valores determinados ao longo de toda a superfície da amostra. As medições tridimensionais podem também fornecer valores de volumes estimados relacionados a determinadas alturas ou vales, a partir de um plano de referência (Sánchez, 2018).

Sánchez (2018) investigou a resistência de interface para uma geomembrana lisa (GM-S) e três geomembranas texturizadas (GM-T1, GM-T2 e GM-T3) de polietileno de alta densidade, com 2,0 milímetros de espessura, e diferentes tipos de aspereza. Os materiais empregados como interface consistiram em uma areia média ($D_{50} = 0,43$ mm), um geotêxtil não tecido com massa por unidade de área igual a 300 g/m^2 (GT-1) e um geotêxtil não tecido com massa por unidade de área igual a 600 g/m^2 (GT-2). A Figura 14a ilustra os resultados obtidos. Para as interfaces com areia, a resistência de interface aumentou quando comparados os valores da geomembrana lisa e das geomembranas texturizadas. No entanto, o aumento da altura de aspereza não causou um aumento da resistência de interface e isso pode ser justificado tendo em vista o fato de que o tamanho do grão da areia provocou o seu rolamento parcial sobre as texturas. Além disso, a densidade da areia usada pode também ter influenciado os resultados.

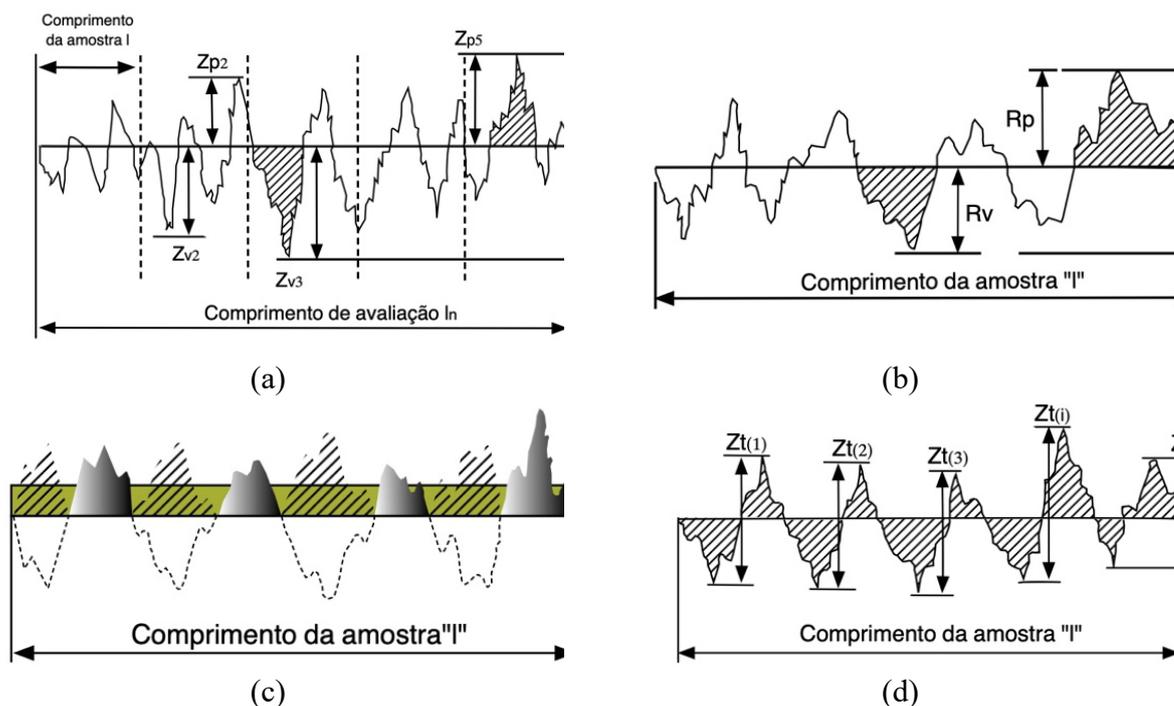


Fig. 13 - Alguns parâmetros de rugosidade de interface: (a) R_t , (b) R_c e (c) R_a e (d) R_c (Sánchez, 2018).

Por sua vez, para os experimentos empregando geotêxteis, o tipo de geomembrana utilizada influenciou os resultados obtidos, mas não de forma linear (Fig. 14a). Um aumento da altura de aspereza não gerou um aumento de mesma grandeza na resistência de interface. Para o caso da GM-T3, com maior altura de aspereza, a resistência de interface diminuiu, o que pode ser atribuído ao fato de as asperezas não conseguirem penetrar completamente entre os fios do geotêxtil utilizado (interfaces geomembrana-geotêxtil). Ao comparar os dois tipos de geotêxteis usados, notou-se que a redução da resistência de interface foi maior para o GT-2, de maior massa por unidade de área (600g/m^2), uma vez que a maior densidade de fios por metro quadrado desse geotêxtil influenciou em seu travamento nas asperezas.

Visando entender melhor os resultados de resistência de interface obtidos, foram medidos parâmetros de rugosidade bidimensionais das geomembranas, que estão apresentados na Figura 14b. Foi possível observar que, conforme esperado, as geomembranas apresentaram resultados diferentes. Notou-se, ainda, que a face interna da geomembrana forneceu valores diferentes dos apresentados pela face externa, o que está associado ao método de fabricação das geomembranas, seja matriz plana (GM-T1 e GM-T2) ou matriz balão (GM-T3). Outra observação é que a tendência dos valores apresentados não seguiu a tendência dos valores de resistência de interface. Um aumento dos parâmetros de rugosidade não implica necessariamente em um aumento na resistência da interface. Isso pode ser explicado pelo fato de outros fatores, como o tamanho médio dos grãos da areia, ou a massa por unidade de área do geotêxtil, também influenciarem nesse comportamento. Para a face externa, ensaiada com a interface com areia, nota-se que o valor de R_c foi o que apresentou comportamento mais semelhante ao apresentado pela resistência de interface. Ao se compararem os valores apresentados pelas geomembranas GM-S e GM-T1, houve um aumento tanto na resistência de interface como no valor de R_c . No entanto, não houve aumento significativo destes valores ao se comparar GM-T1 e GM-T2, nem quando se compara GM-T2 a GM-T3. Com base nestes resultados, é possível concluir que os parâmetros de rugosidade podem ser empregados como parâmetros de controle das geomembranas, complementarmente à altura de aspereza fornecida pelos fabricantes.

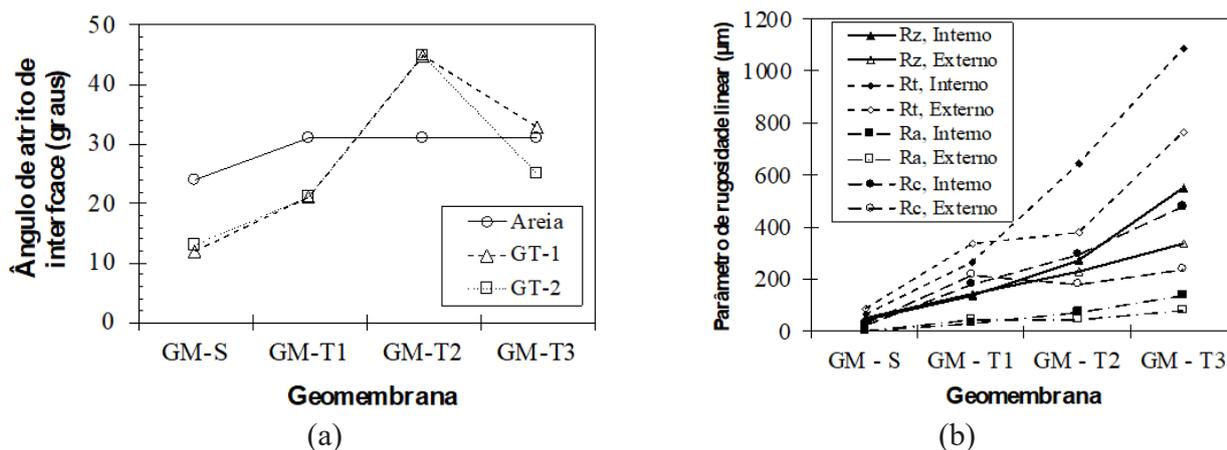


Fig. 14. Resultados obtidos por Sánchez (2018): (a) ensaios de rampa para diferentes interfaces e (b) variação de parâmetros de rugosidade para diferentes geomembranas.

4 – GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS DE SOLO REFORÇADO

4.1 – Colunas granulares encamisadas com geossintéticos

Aterros sobre solos moles sempre foram obras desafiadoras em geotecnia, por apresentarem problemas de recalques excessivos ao longo do tempo e pela possibilidade de ruptura da fundação devido à sua baixa capacidade de carga. Existem várias técnicas de estabilização para esse tipo de obra. Por exemplo, podem-se citar a substituição parcial ou total do solo de fundação, emprego de drenos verticais associados a reforços na base do aterro, aplicação de vácuo em drenos verticais, dentre outras. Outra maneira de minimizar os problemas associados a esse tipo de construção é o emprego de colunas granulares ou estacas de concreto sob o aterro. Devido ao efeito do arqueamento no solo do aterro, há uma transferência de carga para os elementos mais rígidos na fundação, diminuindo a probabilidade de ruptura e reduzindo significativamente os recalques da obra devido ao adensamento do solo mole saturado. No entanto, muitas vezes o uso de estacas de concreto pode ter elevado custo quando comparado às colunas granulares. Apesar de aumentarem a rigidez e a capacidade de suporte do sistema aterro-solo mole, quando construídas em solos muito moles, as colunas granulares podem sofrer elevadas deformações radiais, devido ao baixo confinamento lateral na sua porção superior, o que reduz a sua eficiência.

Uma técnica que vem sendo empregada como reforço para colunas granulares é aplicação de um encamisamento por meio de um geotêxtil tecido de alta rigidez e resistência à tração. A Figura 15a mostra a execução de colunas granulares na construção de uma área para trilhos na Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA), no Rio de Janeiro, Brasil. O método de instalação vibratório emprega um tubo de revestimento que aumenta a densidade da areia durante sua retirada. A presença da camisa de geossintético aumenta o confinamento da coluna, o que, por sua vez, aumenta sua capacidade de carga e rigidez. Ao longo dos anos, as pesquisas têm mostrado que a técnica é viável e segura (Raithel et al., 2002, Riccio et al. 2015, Gu et al. 2016, Nagula et al. 2018, Hosseinpour et al. 2019, Zhang et al. 2020).

Visando aumentar o conhecimento sobre a técnica de colunas granulares encamisadas, Alkhorshid (2017) realizou ensaios em grande escala usando uma caixa com dimensões iguais a 1,6 m x 1,6 m x 1,2 m (Figura 15b). O solo mole de fundação foi instrumentado com piezômetros, células de tensões totais e medidores de deslocamentos. Os ensaios mostraram que a poropressão aumentou devido à instalação das colunas. No entanto, a dissipação ocorreu de forma rápida, uma vez que as próprias colunas funcionaram como elementos drenantes. A pesquisa, além mostrar o aumento da capacidade de carga de colunas granulares preenchidas com diferentes materiais (areia, brita e resíduos da construção), também investigou a influência nos valores obtidos quando

empregados reforços com resistência e rigidez à tração diferentes. Além disso, os resultados mostraram que durante o processo de cravação da coluna há aumento do empuxo lateral sobre a argila de fundação (Figura 16a) (Alkhorshid et al. 2019).

Araújo et al. (2009) investigaram de forma pioneira o uso de colunas granulares encamisadas em solos colapsíveis, com diferentes materiais de preenchimento (areia, brita e solo-cimento) e diferentes materiais de encamisamento (geogrelha e geotêxtil tecido). Os ensaios consistiram em provas de carga em campo com medição da deformação interna dessas colunas e saturação do solo colapsível adjacente à coluna após um determinado nível de carregamento. Assim como em solos moles, a presença da camisa aumentou a capacidade de carga da coluna em solos colapsíveis (Figura 16b). Dentre os resultados obtidos, foi possível verificar que a quebra de grãos da brita empregada, devido ao carregamento aplicado, teve influência relevante nos recalques obtidos. As medições das deformações mostraram que, como esperado, as deformações horizontais e verticais na coluna são maiores no topo (Araújo et al., 2009) e diminuem ao longo da profundidade. O efeito da saturação do solo colapsível mostrou, ainda, que a presença do reforço geossintético melhorou o comportamento da coluna em relação à situação sem camisa.

4.2 – Estudo de colunas granulares usando-se a técnica de solo transparente

A utilização de solos transparentes é uma técnica já empregada há anos para análises em engenharia. Dyer (1985) realizou ensaios de cisalhamento direto utilizando foto-elasticidade com o objetivo de avaliar o comportamento de solo reforçado com grelha metálica. O autor verificou que o tamanho dos membros da geogrelha e seu espaçamento influenciaram nos resultados obtidos.

Nos últimos anos, o aumento de recursos tecnológicos para captação de imagens e para processamento de dados fez com que a técnica voltasse a ser utilizada com maior frequência. Na técnica de solo transparente, basicamente, emprega-se um porofluido de mesmo índice de refração que o material granular que representa o solo. Assim, a luz, que tende a sofrer refração no meio, desviando o seu ângulo de incidência, atravessa o material, tornando-o transparente. Uma das vantagens do método é a possibilidade de realização de captura de imagens na seção referente ao plano central do ensaio. Esse plano pode ser traçado com o auxílio de um sistema a laser com características específicas.

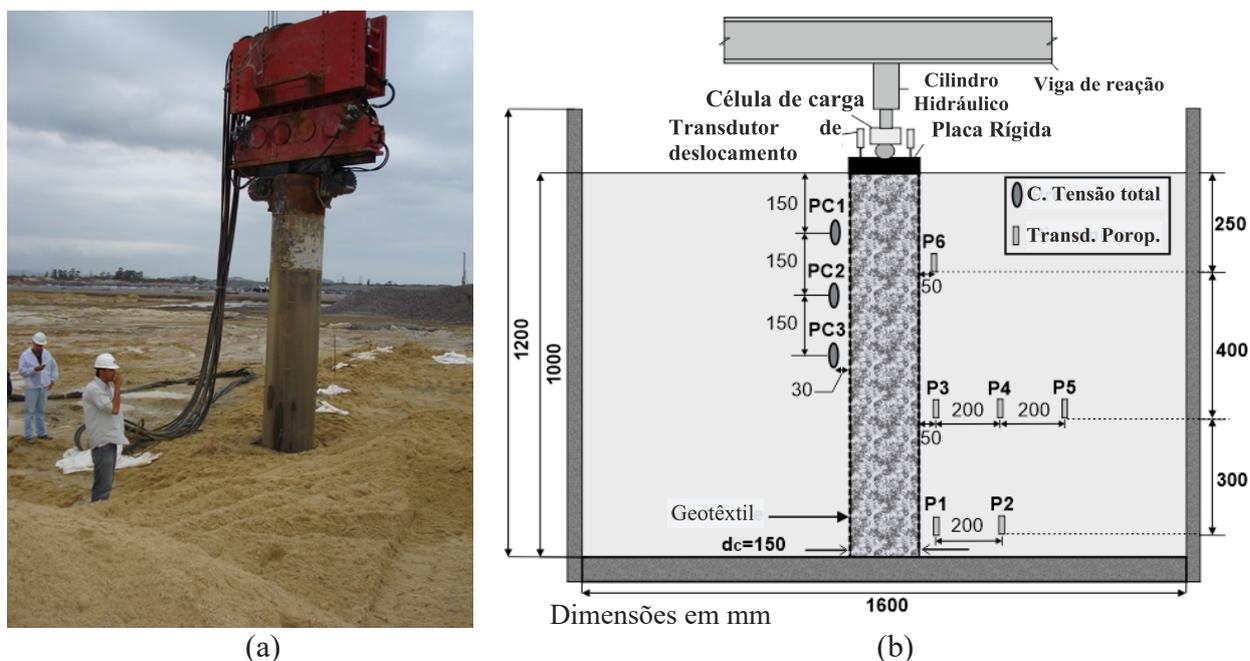


Fig. 15. Colunas encamisadas: (a) instalação em campo e (b) ensaios em grande escala (Alkhorshid et al., 2019).

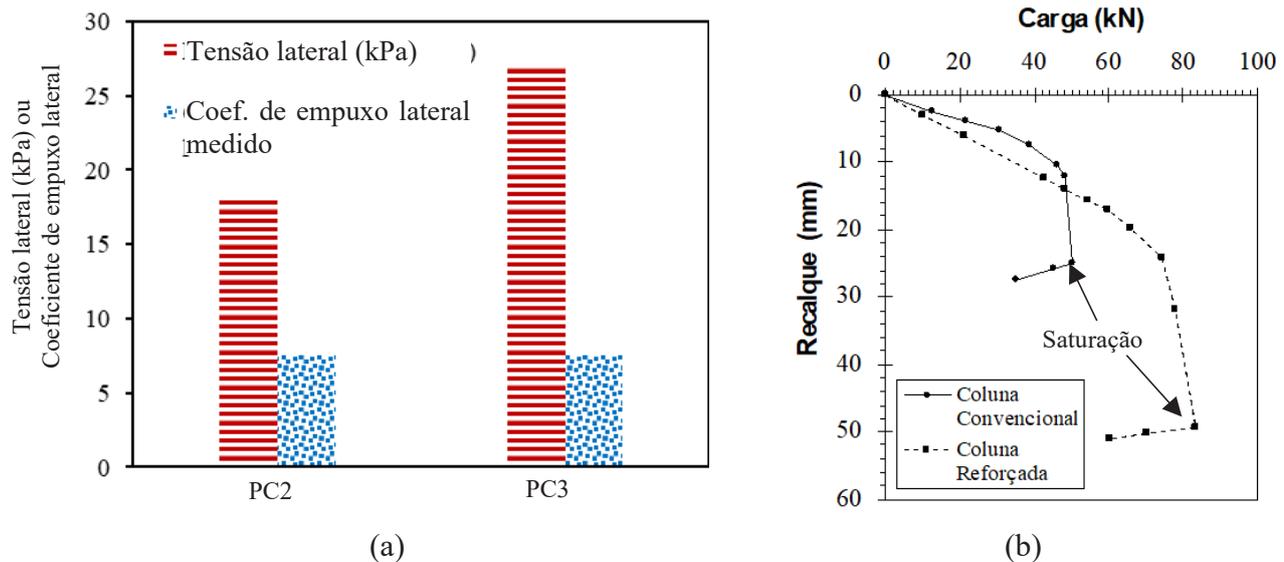


Fig. 16. Colunas granulares encamisadas com geossintéticos: (a) variação coeficiente de empuxo devido à cravação das colunas (Alkhorshid, 2017) e (b) curva carga-recalque ilustrando o efeito do encamisamento e de saturação em solos colapsíveis (Araújo et al., 2009).

Como materiais que podem ser empregados para simular o solo, podem ser usados, por exemplo, quartzo, sílica gel, sílica amorfa, Aquabeats e Laponirta RD® (Iskander et al. 2002, Wallace e Rutherford 2015, Ganiyu et al. 2016). Alguns desses materiais são mais compressíveis e outros menos, podendo-se, assim, simular areias ou argilas. O fluido a ser empregado pode ser óleo mineral (ou combinação de dois óleos) ou água destilada, dependendo do material granular empregado. A Figura 17a mostra o emprego desse tipo de material para avaliação de técnicas construtivas de colunas granulares. Cabe salientar que o efeito de escala é extremamente relevante para obtenção adequada dos resultados e que, assim sendo, sua influência nos elementos envolvidos (estacas, sapatas, resistência à tração do reforço, rigidez do reforço, resistência não drenada do solo, dentre outros) deve ser devidamente considerada.

Ezzein e Bathurst (2014) empregaram solo transparente, visando avaliar a interação solo-geossintético em ensaios de arrancamento. Tendo em vista que em ensaios rotineiros desse tipo se consegue medir apenas o valor de deslocamento e força na extremidade externa do reforço, os autores apresentaram uma aplicação de solo transparente com o objetivo de obter as deformações ao longo do comprimento do reforço.

Black (2015) realizou ensaios de centrífuga com solo transparente, visando avaliar o efeito da escala e do nível de tensões aplicado em duas escalas diferentes, e verificou que o emprego desse equipamento obteve resultados semelhantes para os dois casos. No entanto, os ensaios com centrífuga têm custos elevados e limitam o uso da técnica e, por essa razão, a maioria das publicações apresentam resultados de ensaios em modelos 1g. Yuan et al. (2020) investigaram os deslocamentos de uma estaca carregada lateralmente em solo transparente com rede de percolação e concluíram que os deslocamentos da massa de solo ao redor da estaca ocorreram na sua porção mais superficial. Com o emprego do solo transparente, foi possível medir os deslocamentos ao redor da estaca ao longo da profundidade, o que não seria possível com um solo opaco. Souza (2021) está fazendo uso de Laponita RD® para avaliação do comportamento de estacas em aterros reforçados sobre solos moles, visando quantificar o efeito de empuxo da argila sobre os elementos de fundação vizinhos. Os resultados obtidos têm demonstrando que a Laponita RD® tem potencial para tal aplicação.

O uso de solos transparentes normalmente é associado à análise de imagens obtidas por meio de um sistema de câmeras. A grande vantagem é que não é necessária a inserção de medidores de deslocamentos no meio. Após um tratamento inicial, onde a imagem é convertida em escala preto e



(a)



(b)

Fig. 17. Solos Transparentes aplicados em geotecnia: (a) aplicação a colunas granulares e (b) plano de referência com partículas de rastreamento em escala de preto e branco (Souza, 2021).

branco, as imagens são divididas em pixels e é possível obter vetores de deslocamentos ao longo do ensaio realizado. Há duas técnicas bastante empregadas para esse cálculo: *Digital Image Correlation* (DIC) e *Particle Image Velocimetry* (PIV). A primeira está relacionada ao estudo de deformações de diferentes tipos de materiais, enquanto a segunda, originária do próprio DIC, está voltada para os estudos de diferentes tipos de fluxos. Essas metodologias consistem no processamento de imagens sequenciais registradas ao longo de um experimento, a fim de determinar os vetores de deslocamento e retornar as deformações ocorridas no processo (DIC). Para o caso do PIV, são retornados a velocidade e direção do fluxo estudado (Souza, 2021). Por meio da técnica, com base em uma primeira imagem, que define o estado inicial da área analisada, utiliza-se uma equação de correlação para determinar os deslocamentos mais prováveis ocorridos na imagem capturada na sequência. Entretanto, para sua correta aplicação, é necessária a compreensão de alguns conceitos associados, seguindo uma sequência de etapas como a conversão da imagem para escala de preto e branco (Figura 17b).

Um exemplo de aplicação da técnica em geotecnia é o apresentado por Khatami et al. (2019), onde os autores estudaram o efeito de arqueamento de solo sobre estacas por meio de imagens com câmeras e uso de DIC. De acordo com a pesquisa, foi possível visualizar e quantificar as zonas formadas ao longo do processo de arqueamento e a distribuição das tensões. Essa técnica vem sendo empregada ao longo dos anos com diferentes aplicações na área de geotecnia, tais como testes de compressão simples de amostras de concreto, interação solo-geossintético em ensaios de arrancamento ou reforço de fundações com emprego de geossintéticos (Peng e Zornberg 2019, Abdulqader et al. 2020, Chen et al. 2020).

Conforme é possível observar, a técnica de solos transparentes tem imenso potencial de aplicação para pesquisas envolvendo geossintéticos em diferentes campos, uma vez que se trata de um método não intrusivo e com as ferramentas empregadas cada vez mais potentes, como a captação de imagens e a sua velocidade de processamento.

4.3 – Combinação de materiais de construção alternativos e reforço geossintético

4.3.1 Muro reforçado com utilização de resíduos de construção e demolição

Volumes consideráveis de resíduos são gerados em obras de construção civil. Tais resíduos são comumente dispostos em aterros sanitários, ocupando grandes volumes que poderiam ser

preenchidos por outros tipos de resíduos mais danosos ao meio ambiente. A título de exemplo, cerca de 70% dos resíduos que são dispostos no aterro sanitário da cidade de Brasília, Brasil, são resíduos de construção e demolição. Situação mais crítica ocorre quando tais resíduos são dispostos de forma clandestina, com evidentes impactos negativos ao meio ambiente. Assim, uma destinação mais apropriada para resíduos de construção implicará em menor acúmulo em aterros sanitários e benefícios ambientais, já que não seriam utilizados materiais naturais convencionais na execução de aterros de obras geotécnicas.

Santos et al. (2013 e 2014) apresentam resultados de pesquisas com dois muros reforçados com geossintéticos, com 3,6 m de altura, construídos com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) como material de aterro. Um dos muros (Muro 1) foi reforçado com uma geogrelha (aberturas com 20 mm x 20 mm), com rigidez à tração de 300 kN/m, e o outro (Muro 2) com um geotêxtil não tecido, agulhado, com rigidez (não confinada) de 15 kN/m. Ensaios de tração confinada neste mesmo geotêxtil imerso em material granular similar revelaram valores de rigidez à tração confinada semelhantes ao da geogrelha. A Figura 18 apresenta uma vista dos muros ao final da construção. Os muros foram instrumentados com medidores de recalques, medidores de deslocamentos na face, células de tensões totais, extensômetros para medição de deformações nos reforços e inclinômetro no pé de cada muro. O material de aterro (RCD-R) apresentava diâmetro de grãos D_{85} , D_{50} e D_{10} iguais a 15 mm, 2,1 mm e 0,032 mm, respectivamente, peso específico de 17,8 kN/m³, ângulo de atrito de 41° e coesão igual a 6 kPa. Como foram construídos sobre o solo colapsível da cidade de Brasília, DF, Brasil, um sistema de reservatórios (Fig. 18) permitiu a inundação do solo de fundação para se avaliar a influência do colapso desse solo no comportamento dos muros.

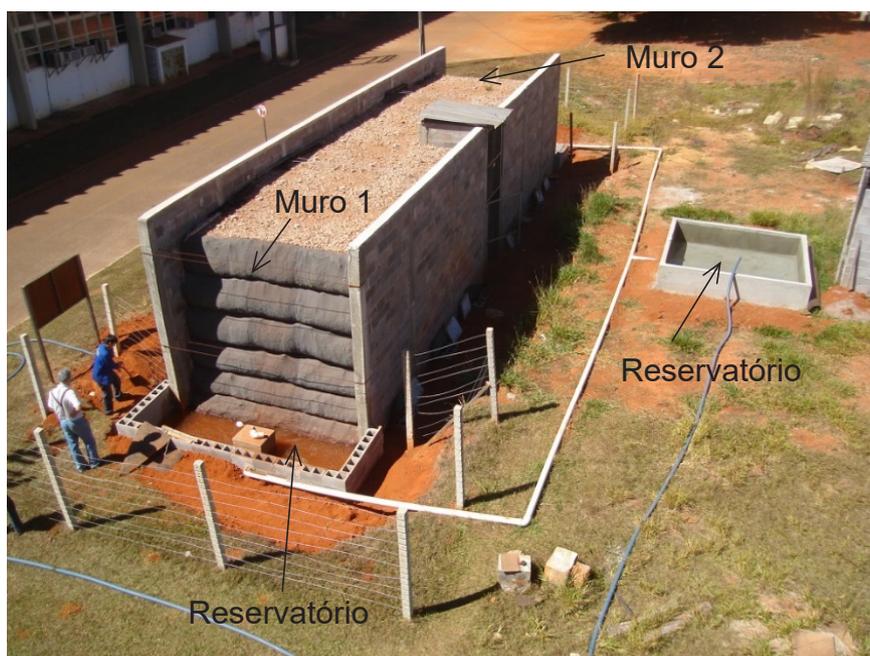


Fig. 18 - Muros experimentais construídos com resíduos de construção e demolição reciclados.

A Figura 19 apresenta resultados de variação de deformações medidas na geogrelha em 3 elevações a partir da base do muro ($y = 0, 1,2$ m e 3,0 m) ao longo de aproximadamente 1 ano de observação. Pode-se notar que, com exceção da camada na base do muro, as maiores deformações de tração ocorreram próximo à face da estrutura, mas com valores inferiores a 0,35%. Os resultados obtidos mostraram também que o colapso do solo de fundação por inundação causou recalques adicionais nos muros, mas não alterou significativamente as deformações de tração nos reforços.

Os resultados dos experimentos descritos acima evidenciam o potencial de utilização de resíduos de construção e demolição como aterro para obras em solo reforçados com geossintéticos. Góngora e Palmeira (2012) também observaram o bom desempenho de resíduos de construção e demolição como material de aterro de estradas não pavimentadas. Alkhorshid et al. (2019) reportam bons resultados de ensaios de laboratório de grandes dimensões em colunas granulares feitas de RCD-R e encamisadas com geotêxtil tecido. Santos (2007) e Vieira et al. (2020) também mostram o bom nível de interação entre RCD-R e geogrelhas por meio de ensaios de arrancamento de grandes dimensões.

4.3.2 Reforço de sublastro de ferrovia com rejeitos de mineração

Fernandes et al. (2008) e Palmeira (2016) avaliaram o desempenho de rejeitos de mineração como material de construção de sublastro na ferrovia Victória-Minas. Esta ferrovia pertence à companhia Vale de mineração, tem cerca de 800 km de extensão, e está submetida a um tráfego intenso de trens transportadores de minério de ferro. O material alternativo de sublastro consistiu de uma mistura de 50% de um solo local silto-arenoso, 25% de resíduos de mineração (silte arenoso) e 25% do material convencional de sublastro. Tal mistura apresentou uma distribuição granulométrica com $D_{85} = 0,9$ mm, $D_{50} = 0,076$ mm e $D_{10} = 0,0012$ mm, consideravelmente mais fino que o material de sublastro convencionalmente utilizado ($D_{85} = 24,0$ mm, $D_{50} = 5,1$ mm e $D_{10} = 0,0075$ mm). O reforço utilizado foi uma geogrelha manufaturada com poliéster, com aberturas com 30 mm x 30 mm, resistência à tração (ensaio de faixa larga) igual a 65 kN/m e rigidez à tração secante a 5% de deformação igual a 520 kN/m. A Figura 20 apresenta a seção transversal de um dos trechos experimentais investigados. É importante frisar que o tráfego de trens sobre as seções experimentais era o mesmo que trafegava pela ferrovia. A Figura 21a apresenta uma vista de uma das seções experimentais e na Figura 21b são apresentados esquemas das seções experimentais com e sem reforço. A seção S1 foi a seção de referência, construída com o material de sublastro convencional. Nas seções S2 e S3 o material de sublastro alternativo foi reforçado com geogrelha instalada na base (seção S2) e no topo (S3) da camada. O sublastro da Seção S6 consistiu somente do material alternativo, sem presença de reforço, também para efeito de comparação.

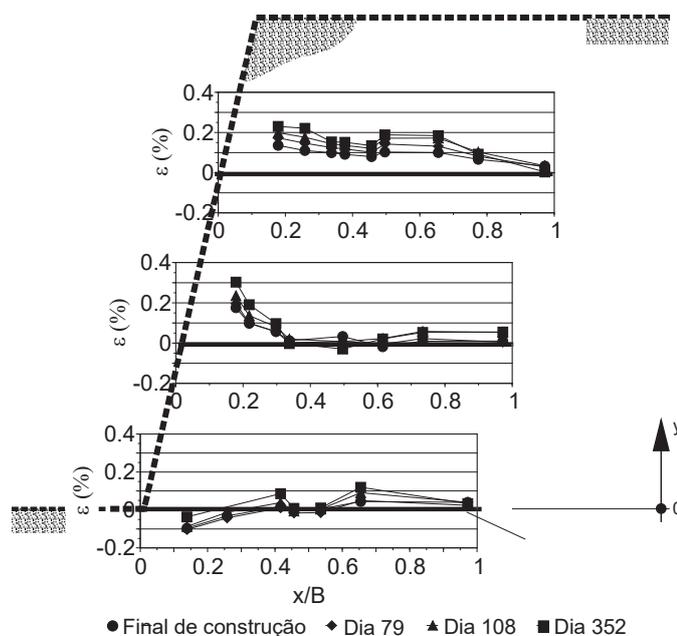


Fig. 19 - Deformações na geogrelha do Muro 1 (Santos, 2011).

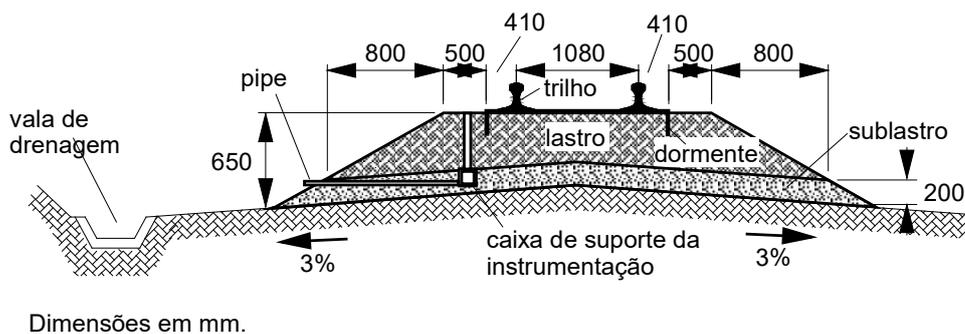


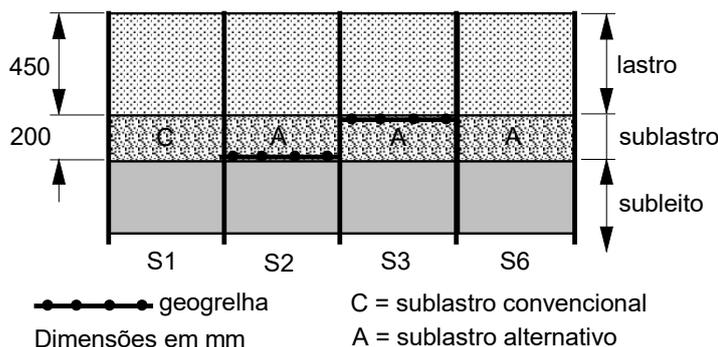
Fig. 20 – Seção transversal dos trechos experimentais (modificado de Palmeira, 2016).

A Figura 22a mostra resultados de deformações horizontais medidas na camada de sublastro em função do número de eixos que passaram sobre as seções experimentais S1, S3 e S6. Como esperado, as maiores deformações ocorreram na seção S6, construída com o material alternativo sem reforço, seguida pelas deformações observadas na seção de referência (S1). A seção reforçada com geogrelha (S3) apresentou deformações significativamente menores que as demais.

Resultados de ensaios de viga Benkelman no pavimento ferroviário são apresentados na Figura 22b. Nota-se a maior deformabilidade da seção com material alternativo de sublastro sem reforço (seção S6). Já as seções reforçadas (S2 e S3) apresentaram deformabilidade semelhante à seção de referência. Estes resultados mostram a significativa influência da presença da camada de reforço na melhoria do desempenho do material alternativo de sublastro.

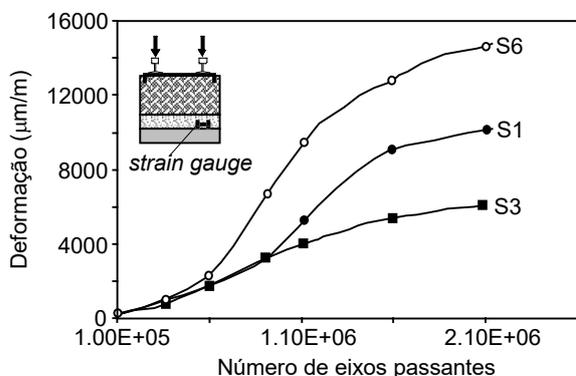


(a) Vista de uma seção experimental.

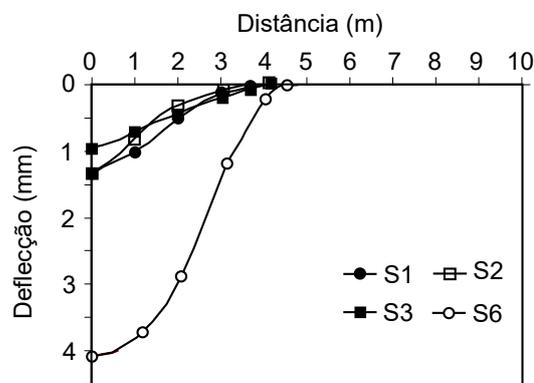


(b) Seção transversal dos trechos experimentais.

Fig. 21 – Seções experimentais na ferrovia Victória-Minas (modificado de Palmeira 2016).



(a) Deformações no sublastro.



(b) Ensaios de viga Benkelman.

Fig. 22 – Deformabilidade do pavimento ferroviário.

Um benefício adicional trazido pela utilização de reforço geossintético no pavimento ferroviário foi a redução de quebra de grãos do lastro. A Figura 23 mostra a variação percentual de quebra de grãos do lastro em função do tempo de monitoramento e do número de eixos passantes sobre as seções experimentais. A seção de referência (S1) foi a que apresentou maior intensidade de quebra de grãos do lastro, seguida pela seção com sublastro alternativo sem reforço. Já as seções com sublastro reforçado com geogrelha apresentaram reduções significativas de quebra de grãos da camada de lastro. Tal comportamento se deve ao melhor confinamento lateral do pavimento ferroviário devido à presença da camada de reforço. A menor quebra de grãos da camada de lastro tem repercussão positiva na redução de custos de manutenção da ferrovia.

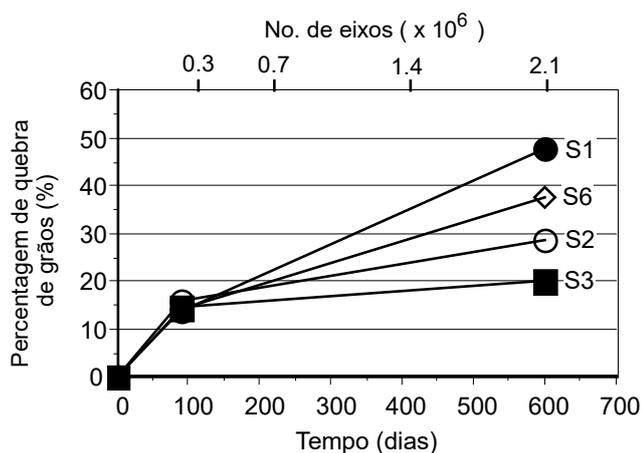


Fig. 23 – Quebra de grãos da camada de lastro ao longo do tempo

5 – PERSPECTIVAS

O futuro das aplicações de geossintéticos em obras geotécnicas e de proteção ambiental é certamente promissor. Algumas razões corroboram com tal expectativa. Primeiramente, por serem materiais manufaturados, desenvolvimentos científicos da ciência dos materiais e dos polímeros continuarão a permitir o surgimento de novos geossintéticos, aprimoramento de propriedades de geossintéticos existentes, e poderão também ampliar o campo de utilização destes materiais. Um desenvolvimento relativamente recente foram os geocompostos eletrocinéticos para drenagem (EKG) (Jones et al. 2006), que promovem a drenagem da água do subsolo por meio da eletrose, como comentado anteriormente nesse trabalho. Tal técnica tinha sido praticamente abandonada devido aos problemas associados à corrosão de componentes do sistema. Com o desenvolvimento dos geocompostos eletrocinéticos para drenagem, tal técnica foi retomada e vem sendo aplicada no adensamento de solos moles saturados, descontaminação de terrenos e melhoria de condições de estabilidade de encostas, por exemplo. Geocompostos argilosos (GCL) condutores de eletricidade também já estão disponíveis (USPAP, 2019), o que facilita a detecção de danos antes da disposição de resíduos sobre o GCL. Já existem geocompostos ativos, associados a componentes químicos, que podem ser utilizados para a descontaminação de terrenos, aterros sanitários e encapsulamento de lagoas de rejeitos (Huesker, 2020). Geogrelhas podem ser manufaturadas incorporando fibras óticas que permitem a determinação de suas deformações de tração a qualquer instante. Também já se dispõe de tecnologia para o desenvolvimento de geomembranas com sensores capazes de identificar regiões altamente tensionadas ou danificadas (Borns, 1997), com repercussão em obras em que tais geossintéticos sejam utilizados como barreiras contra líquidos e gases. Pesquisadores da Pennsylvania State University, EUA, desenvolveram um polímero multifásico capaz de autorregenerar cortes quando em contato com água (Messer, 2015). Certamente, tal descoberta, se estendida às geomembranas, permitirá o desenvolvimento de produtos menos susceptíveis a vazamentos, em consequência de danos, em obras hidráulicas e de disposição de resíduos.

Um sistema de filtro inovador foi utilizado na rodovia M56, Reino Unido (The Construction Index, 2019). Tal sistema incorpora partículas granulares capazes de tratar metais tóxicos e remover poluentes solúveis e sólidos que são trazidos por runoff. Kim et al. (2020) apresentam o desempenho de geotêxteis (tecidos e não tecido) revestidos com nano partículas magnéticas para aquecimento/transferência de calor em solos. Os autores observaram melhor desempenho de aquecimento quando geotêxteis não tecidos foram utilizados. Prambauer et al. (2019) apresentam estudo sobre a utilização de geotêxteis biodegradáveis, cujas aplicações são particularmente interessantes em situações em que se deseje que o geotêxtil tenha menor vida útil por razões ambientais.

Geossintéticos incorporando grafeno em sua fabricação já vêm sendo desenvolvidos (Kelsey, 2016). A incorporação de grafeno pode proporcionar geossintéticos com resistências à tração superiores à do aço, propriedades autoreparadoras, desempenho hidrofóbico e elevada condutividade elétrica. Prevê-se a criação de materiais nanocompósitos com propriedades anticolidação em geotêxteis ou elevada capacidade de localização de pontos de vazamento em sistemas de barreiras. No ano de 2017, cerca de 10.000 m² de geotêxtil melhorado com grafeno foram utilizados pela empresa Queensland CSG, Austrália, para a detecção de furos em sistemas de barreiras (Kelsey, 2017). Tal sistema é capaz de detectar furos com diâmetros tão pequenos quanto 0,7 mm.

Outro aspecto que tende a fomentar cada vez mais a utilização de geossintéticos é a capacidade de tais materiais proverem soluções de engenharia que produzem menores impactos ambientais (Stucki et al., 2011, Frischknecht et al. 2012, Heerten, 2012, Damians et al., 2017, Touze, 2021). Comparativamente a soluções convencionais, soluções com geossintéticos podem reduzir substancialmente impactos provocados por emissão de gases nocivos à atmosfera, menor consumo de água, menor consumo de energia (renovável e não renovável) etc. A Figura 24 compara emissões de gás carbônico e consumo de energia associados a três tipos de estruturas de contenção (muro de gravidade de concreto, muro tipo cantilever e muro reforçado com geossintético) (Damians et al. 2017). Pode-se notar as significativas reduções em emissões e consumo de energia proporcionadas pela solução em muro reforçado.

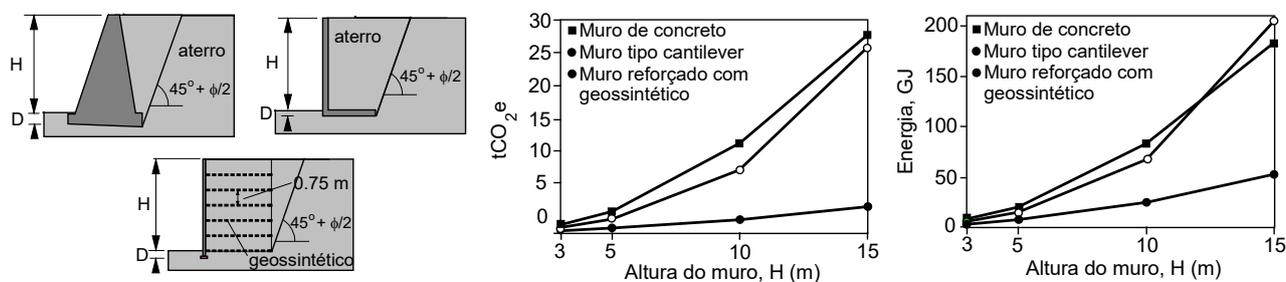


Fig. 24 - Redução de impactos ambientais proporcionados por um muro reforçado com geossintético (modificado de Damians et al., 2017).

A utilização de geossintéticos associados a materiais de construção alternativos potencializa os efeitos benéficos ao meio ambiente (Palmeira, 2016). Alguns exemplos deste tipo de associação foram descritos no presente trabalho, como nos casos de utilização de resíduos de construção e demolição reciclados e rejeitos de mineração reforçados com geossintéticos. Outras aplicações podem incluir geossintéticos combinados a pneus usados (inteiros ou triturados), garrafas plásticas e resíduos de construção em obras de drenagem (Palmeira, 2016). Tais associações deverão ser cada vez mais frequentes, em vista da necessidade crescente de reciclagem de resíduos e preservação de recursos naturais.

6 – CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou avanços e perspectivas de geossintéticos em aplicações em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Foram apresentadas e discutidas utilizações destes materiais como filtros, barreiras e reforço em estudos e aplicações inovadoras. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas.

Os geotêxteis são excelentes materiais para filtração. No entanto, dependendo da situação e do grau de severidade da utilização, as propriedades destes filtros podem ser alteradas em relação àquelas obtidas por metodologias de ensaio convencionais. Assim, a realização de ensaios especiais deve ser encorajada, particularmente em situações em que o filtro seja submetido a confinamento elevado e a solicitações de tração.

O emprego de geossintéticos para a redução da umidade de minério de ferro apresentou excelente desempenho, uma vez que os drenos propostos foram capazes de reduzir o teor de umidade do minério de 12% para cerca de 6%. Este fato reduz o risco da liquefação que ocorria dentro dos vagões que transportavam o minério até o Porto de São Luis, MA, reduzem a contaminação do lastro da ferrovia pela perda de minério e os custos de transportes.

Geomembranas de PEAD, de 1,5 mm de espessura, apresentaram excelente desempenhos em aplicações sob condições severas nas barragens de rejeitos de ouro de Jacobina e Fazendas Brasileiro. Entretanto, as geomembranas de PVC, instaladas em 2006, apresentavam profundos craqueamentos, com potencial de comprometer a estanqueidade do sistema. Os resultados obtidos mostram que a realização de ensaios em geossintéticos sob condições críticas, particularmente ensaios de durabilidade de longa duração para avaliação da degradação de geomembranas, deveriam se tornar práticas de rotina em projetos envolvendo utilização de geossintéticos em obras de mineração.

Os tubos geotêxteis apresentaram bom desempenho no confinamento, desaguamento e empilhamento dos rejeitos de ouro. A avaliação de tubos exumados, após 2 anos de vida útil, mostrou que o geossintético dos tubos apresentava resistência à tração próxima à do geotêxtil virgem. No entanto, cuidados devem ser tomados, especialmente no aspecto construtivo, para evitar deformações excessivas que possam comprometer o empilhamento de tubos. A utilização de geotêxteis em obras de mineração é certamente muito promissora, particularmente após acidentes recentes de grandes proporções em barragens de rejeitos no Brasil. A utilização de geotêxteis eletrocinéticos neste tipo de obra também é certamente interessante, por permitir uma maior eficiência na redução da umidade dos rejeitos confinados.

A utilização de reforço geossintético pode viabilizar a utilização de materiais de construção não convencionais, com benefícios como: redução do impacto ambiental provocado por tais materiais, redução da utilização de materiais naturais nobres e redução de custos. O presente artigo apresentou combinações bem sucedidas de reforços geossintéticos e rejeitos de mineração e resíduos de construção e demolição em pavimentos ferroviários e estruturas de contenção.

O uso de parâmetros de rugosidade na avaliação da resistência de interface entre geomembrana e outros materiais tem grande potencial. Nesse contexto, o emprego isolado da altura de aspereza na quantificação da aderência de interfaces por ser considerado inadequado.

O encamisamento geossintético de coluna granular aumenta a sua capacidade de carga e rigidez, e pode ser aplicado em colunas em solos moles e em solos colapsíveis. Este tipo de técnica de estabilização de aterros sobre solos compressíveis certamente terá aplicação crescente ao longo dos próximos anos. A possível quebra do material de preenchimento influencia os resultados e deve ser considerada, pois pode comprometer a eficiência da coluna na redução de recalques.

Apesar de ser uma técnica já conhecida, solos transparentes têm sido empregados nos últimos anos e possuem grande potencial para investigações envolvendo geossintéticos, particularmente em situações complexas, onde a realização de experimentos de campo ou de laboratório não sejam suficientes para um perfeito entendimento e quantificação da contribuição do geossintético.

Por serem materiais manufaturados, alguns avanços recentes nas áreas de ciência dos materiais, polímeros, nanotecnologia etc. já têm sido incorporados a produtos geossintéticos. As perspectivas são de que, no futuro, geossintéticos com melhores propriedades de engenharia e novos produtos sejam cada vez mais comuns na prática da engenharia.

As obras com geossintéticos impactam menos o meio ambiente que as alternativas convencionais. As reduções de impacto se evidenciam em reduções de emissões de gases nocivos ao meio ambiente, menor consumo de água, menores consumos de energias renováveis e não renováveis, menor acidificação etc. Como a preservação ambiental tem importância fundamental, as perspectivas são de que tais características fomentem mais ainda a utilização de geossintéticos em obras geotécnicas e geoambientais.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar seus agradecimentos às seguintes instituições, que colaboraram de diferentes modos com as pesquisas descritas nesse artigo: Universidade de Brasília, Universidade Federal de Minas Gerais, CNPq, CAPES, FAP-DF e os fabricantes de geossintéticos que cederam seus produtos.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulqader, A.; Rizos, D. C. (2020). *Advantages of using digital image correlation techniques in uniaxial compression tests*. Results in Engineering, vol. 6: 100109. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100109>
- Afzali-Nejad, A.; Lashkari, A.; Farhadi, B. (2018). *Role of soil inherent anisotropy in peak friction and maximum dilation angles of four sand-geosynthetic interfaces*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 46, No. 6, pp. 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.08.003>
- Alkhorshid, N.R. (2017). *Analysis of geosynthetic encased columns in very soft soil*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-133/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.
- Alkhorshid, N.; Araújo, G. L. S.; Palmeira, E. M.; Zornberg, J. G. (2019). *Large scale load capacity tests on a geosynthetic encased column*. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 47, pp. 632-641. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103458>
- Araújo, G. L. S.; Palmeira, E. M.; Cunha, R. P. (2009). *Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil*. Geosynthetics International, vol. 16, nº 6: 433-451. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.6.433>
- Asadi, A.; Huat, B. K.; Nahazanan, H.; Keykha, H. A. (2013). *Theory of electroosmosis in soil*. International Journal of Electrochemical Science, vol. 8, nº 1, pp. 1016–1025.
- ASTM D3080/D3080M, 2011. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM International, West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/D3080_D3080M-11
- Bacas, B.M.; Cañizal, J.; Konietzky, H. (2015). *Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 7, nº 6, pp. 638-645. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.08.001>

- Beirigo, E. A. (2005). *Comportamento filtro-drenante de geotêxteis em Barragens de rejeitos de mineração*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 192 p.
- Bittar, R. J. (2017). *Comunicação pessoal*.
- Black, J. A. (2015). *Centrifuge Modelling With Transparent Soil and Laser Aided Imaging*. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 38, nº 5, pp. 631-644.
- Borns, D. J. (1997). *Geomembrane with incorporated optical fiber sensors for geotechnical and environmental applications*. Proc. International Containment Technology Conference, St. Petersburg, Florida, pp. 1067-1073.
- Botelho, C. A. A (2019). *Estudo do comportamento de barreiras impermeáveis e detecção de vazamentos para gestão de risco em bacia de rejeito de mineração*. Monografia de Especialização em Segurança de Barragem, Universidade Federal da Bahia, 118 p.
- Brandl, H. (2010). *Geosynthetics applications for the mitigation of natural disasters*. 9th International Conference on Geosynthetics, Guarujá, SP, Brasil, vol. 1, pp. 67-112.
- Briançon, L.; Girard, H.; Gourc, J. P. (2011). *A new procedure for measuring geosynthetic friction with an inclined plane*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 29, nº 5, pp. 472-482. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.04.002>
- Cardoso, F. H. C; Silva, V.L.; Maia, K. C. P.; Gardoni, M. G. G (2020). *Numerical modelling of geotextile tubes*. 4th Pan American Conference on Geosynthetics, Rio de Janeiro, Brazil. Meio Digital.
- Chen, J.; Guo, X.; Sun, R.; Rajesh, S.; Jiang, S.; Xue, J. (2020). *Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand*. *Geotextile and Geomembranes*, vol. 49, nº 2, pp. 399-412. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.01>
- Damians, I. P.; Bathurst, R. J.; Adroguer, E. G.; Josa, A.; Lloret, A. (2017). *Environmental assessment of earth retaining wall structures*. *Environmental Geotechnics*, vol. 4, nº 6, pp. 415-431, <http://dx.doi.org/10.1680/jenge.15.00040>
- Dyer, M. R. (1985). *Observation of stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement*. PhD Dissertation. University of Oxford, UK.
- Ezzein, F. M.; Bathurst, R. J. (2014). *A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 42, nº 3, pp. 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.04.003>
- Ferreira, J. C. (2009). *Estudos sobre drenagem e redução de umidade do minério de ferro de Carajás com a utilização de geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 92 p.
- Fourie, A. B.; Addis, P. C. (1997). *The effect of in-plane tensile loads on the retention characteristics of geotextiles*. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 20, nº 2, pp. 211-217.
- Fourie, A. B.; Addis, P. C. (1999). *Changes in filtration opening size of woven geotextiles subjected to tensile loads*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 17, pp. 331-340.
- Fourie, A. B.; Kuchena, S. M. (1995). *The influence of tensile stresses on the filtration characteristics of geotextiles*. *Geosynthetics International*, vol. 2, nº 2, pp. 455-471.

- Fowler, J.; Larkins, K.; Duke, M. (2005). *Dredging aerobis digested biosolids into geotextile tubes for dewatering*. New Orleans East Municipal Sewage Treatment Plant., New Orleans, LA., USA.
- Frischknecht, R.; Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R. (2012). *Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials*. *Ground Engineering*, vol. 45, n° 10, pp. 24–28.
- Ganiyu, A. A.; Rashid, A. S. A.; Osman, M. H. (2016). *Utilisation of transparent synthetic soil surrogates in geotechnical physical models: A review*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, n° 4, pp.: 568-576. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.009>
- Gardoni, M. G. A. (2000). *Estudo do comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Gardoni, M. G. A., Morais, F. T. (2019). *Avaliação da resistência de geomembranas envelhecidas em laboratório e exumadas de barragens de rejeito de mineração de ouro*. VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos, SP, Meio digital, Brasil.
- Gardoni, M. G.; Palmeira, E. M (2002) *Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement*. *Geotechnique*, vol. 52, n° 6, pp. 405-418.
- Góngora, I. A. G.; Palmeira, E. M. (2012). *Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades*. *Geosynthetics International*, Vol. 19, No. 2, pp. 191-199. <https://dx.doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.191>
- Gu, M.; Zhao, M.; Zhang, L.; Han, J. (2016). *Effects of geogrid encasement on lateral and vertical deformations of stone columns in model tests*. *Geosynthetics International*, vol. 23, n° 2, pp. 100 –112. <http://dx.doi.org/10.1680/jgein.15.00035>
- Halabi, A. L. M.; Pimentel, K.; Gardoni, M. G. (2020). *Analysis of the Shear Stress Distribution on the Interface Shear Test for a Texturized Geomembrane and Gold Mining Underflow*. 4th Pan American Conference on Geosynthetics, Rio de Janeiro, Meio digital, Brazil.
- Hebeler, G. L.; Frost, J. D.; Myers, T. (2005). *Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane–geotextile systems*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 23, n° 1, pp. 77-105. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2004.06.002>
- Heerten, G. (2012) *Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 30, pp. 43–49.
- Hosseinpour, I.; Soriano, C.; Almeida, M. S. S. (2019). *A comparative study for the performance of encased granular columns*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, pp. 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.12.00>
- Huesker (2020). *Environmental protection with active geocomposites*. Huesker, https://www.geosynthetica.com/wp-content/uploads/PB_Tektoseal_Active_GB.pdf, Acessado em 15/11/2020.
- Iskander, M.G.; Liu, J.; Sadek, S. (2002). *Transparent amorphous silica to model clay*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, n° 3, pp. 262-273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:3\(262\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:3(262))

- ISO 4287:1997 - *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*. 25 p.
- ISO 12957-2:2005. *Geosynthetics — Determination of friction characteristics — Part 2: Inclined plane test*. 10 p.
- Jones, C. J. F. P.; Glendinning, S.; Huntley, D.T.; Lamont-Black, J. (2006). *Soil consolidation and strengthening using electrokinetic geosynthetics - Concepts and analysis*. Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (editores), Millpress, Rotterdam, vol. 1, pp. 411-414.
- Khatami, H.; Deng, A.; Jaksa, M. (2019). *An experimental study of the active arching effect in soil using the digital image correlation technique*. Computers and Geotechnics, vol. 108, pp. 183-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.023>.
- Kelsey, C. (2016). *Graphene-enhanced geotextiles*. <http://www.geosynthetica.net/graphene-enhanced-geotextiles-imagine-geofabrics/>. Acessado em 24/06/2016.
- Kelsey, C. (2017). *Graphene-enhanced geotextiles coming to US with Haydale agreement*. <https://www.geosynthetica.com/graphene-enhanced-geotextiles-imagine-hadale/>. Acessado em 26/11/2020.
- Kim, I.; Best, C.; Seunghye, K. (2020). *Feasibility of electromagnetic soil heating using magnetic nanoparticle-coated geotextiles*. Géotechnique Letters, vol. 10, pp. 149-154. <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00098>
- Lawson, C. R. (2008) *Geotextile Containment for Hydraulic and Environmental Engineering*. Geosynthetics International, vol. 15, n° 6, pp. 384-427.
- Messer, A.E. (2015). *Water heals a bioplastic*. Penn State News, University of Pennsylvania, USC, at <http://news.psu.edu/story/367826/2015/09/01/research/water-heals-bioplastic>, Acessado em 1/09/2015.
- Moo-Young, H.; Ochola, C. (1999). *Strain effects on the filtration properties of geotextiles*. Geosynthetics'99, vol. 2, pp. 757-768.
- Morais F. T.; Gardoni, M. G. A. (2020). *Geotextile tubes to dewater and confine gold tailings*. 4th Pan American Conference on Geosynthetics, Rio de Janeiro, Meio digital, Brazil.
- Morais, F. T. (2020) - *Performance of a drained stacking with geotextile tubes - new proposal for disposal of mining fine waste*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia. 187 p.
- Moreira, T. B. G., (2011). *Avaliação experimental de sistemas de drenagem com geossintéticos para diminuição de umidade no minério de ferro do complexo minerador da Serra de Carajás*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia. 227 p.
- Nagula, S. S.; Nguyen, D. M.; Grabe, J. (2018). *Numerical modelling and validation of geosynthetic encased columns in soft soils with installation effect*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 46, n° 6, pp. 790-800. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.07.011>
- Oliveira, W. S.; Gardoni, M. G. A.; Morais, F. T. C. (2018). *Avaliação de Fatores de Influência no Ensaio do Cone Têxtil*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica COBRAMSEG 2018, pp. 122-131, Salvador.
- Oliveira, W. S. (2019). *Avaliação do potencial da utilização de formas têxteis tubulares e geotêxteis eletrocinéticos para aceleração do desaguamento e disposição de rejeito de mineração de*

ouro. VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos, SP, Meio digital, Brasil.

- Palmeira, E. M. (2016). *Sustainability and innovation in geotechnics: Contributions from geosynthetics*. Soils and Rocks, vol. 39, n° 2, pp. 113-135.
- Palmeira, E. M. (2020). *A review on some factors influencing the behaviour of nonwoven geotextile filters*. Soils and Rocks, vol. 43, n° 3, pp. 351-368.
- Palmeira, E. M.; Gardoni, M. G. A. (2000a). *The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems*. Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection Systems, vol. 7, n°s 4-6, pp. 403-431.
- Palmeira, E. M.; Gardoni, M. G., (2000b). *Geotextiles in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges*. International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering, in conjunction with GeoEng 2000, M. Bouazza (Ed.), Melbourne, Australia, pp. 85-110.
- Palmeira, E. M. *Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente (2018)*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 294 p.
- Palmeira E. M.; Beirigo E.A.; Gardoni M. G. (2010) *Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 28, pp. 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.10.004>
- Palmeira, E. M.; Gardoni, M. G.; Luz, D. W. B. (2005). *Soil-Geotextile Filter Interaction under High Stress Levels in the Gradient Ratio Test*. Geosynthetics International, vol. 12 n° 4, pp. 162-175.
- Palmeira, E. M.; Melo, D. L. A.; Moraes-Filho, I. P. (2019). *Geotextile filtration opening size under tension and confinement*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 47, pp. 566-576. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmen.2019.02.004>
- Palmeira, E. M.; Tatsuoka, F.; Bathurst, R. J.; Stevenson, P. E.; Zornberg, J. G. (2008). *Advances in geosynthetics materials and applications for soil reinforcement and environmental protection works*. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, vol. 13, pp. 1-38.
- Palmeira, E. M.; Trejos Galvis, H. L. (2017). *Opening sizes and filtration behaviour of nonwoven geotextiles under confinement and partial clogging conditions*. Geosynthetics International, vol. 24, n° 2, pp. 125-138.
- Peng, X.; Zornberg, J. G. (2019). *Evaluation of soil-geogrid interaction using transparent soil with laser illumination*. Geosynthetics International, vol. 26, n° 2, pp. 206-221. <http://dx.doi.org/10.1680/jgein.19.00004>.
- Prambauer, M.; Wendeler, C.; Weitzenböck, J.; Burgstaller, C. (2019). *Biodegradable geotextiles – An overview of existing and potential materials*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 47, pp. 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.09.006>
- Raithel, M.; Kempfert, H. -G.; Kirchner, A. (2002). *Geotextile-encased columns (GEC) for foundation of a dike on very soft soils*. Geosynthetics – Proceedings of the 7th ICG: 1025-1028.
- Reyes Ramirez, R.; Gourc, J.P. (2003). *Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship*. Geosynthetics International, vol. 10, n° 5, pp. 165–175. <https://doi.org/10.1680/gein.2003.10.5.165>

- Riccio, M.; Almeida, M. S. S.; Hosseinpour, I. (2015). Full-scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns. *Geosynthetics International*, vol. 22, no. 6, pp. 428-438, <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00023>
- Sampaio S. S.; Gardoni M. G. A.; Palmeira E. M.; Park J. A. (2014). *Stability analyse of Jacobina's tailings dam, based on interface parameters of geomembrane-tailings obtained from laboratory tests*. 10th International Conference on Geosynthetic, pp. 156-164, Berlin, Germany.
- Sampaio S. S.; Gardoni M. G. A.; Palmeira E. M. (2015). *Interface and mechanical damage tests on geosynthetics used in gold tailings dams in Brazil*. 2^a Conferência Internacional Dam World, LNEC, pp. 128-136, Lisboa, Portugal.
- Sampaio, S.; Pimentel K., Halabi, A.; Gardoni M. G. A. (2017). *Stability Analysis of a Gold Tailings Dam Lined with HDPE Geomembrane*. First International Conference on Technology and Applications of Geosynthetics. Meio digital, Santiago, Chile.
- Sánchez, N. P. (2018). *Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais*, Publicação G.TD-144/18, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.
- Santos, E. C. G. (2011). *Avaliação experimental de muros reforçados executados com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e solo fino*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- Santos, E. C. G. (2007). *Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Santos, L. S.; Gardoni M. G. A. (2014). *Study of the durability of geomembranes for waterproofing of reservoirs of gold tailings dams in Brazil*. 10th International Conference on Geosynthetic, pp. 184-192, Berlin, Germany.
- Santos, L. S.; Gardoni M. G. A. (2016). *Evaluation of Geomembranes Degradation Aged of Laboratory and Exposed to Weathering*. 3rd Pan American Conference on Geosynthetics, Meio digital, Miami Beach, USA.
- Santos, E. C. G.; Palmeira, E.M.; Bathurst, R.J. (2013). *Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 39, n° 1, pp. 9–19.
- Santos, E. C. G.; Palmeira, E. M.; Bathurst, R. J. (2014). *Performance of two geosynthetic reinforced walls with recycled construction waste backfill and constructed on collapsible ground*. *Geosynthetics International*, vol. 21, n° 4, pp. 256-269. <http://dx.doi.org/10.1680/gein.14.00013>
- Silva, L. C. F (2017) *Uso de tubos geotêxteis para confinamento, desaguentamento e empilhamento de rejeito de ouro*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia. 160 p.
- Silva, V. L. (2019). *Análise do comportamento de tubos geotêxteis para confinamento de rejeito fino de mineração por meio de modelagem numérica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia. 168 p.
- Silva V. L.; Gardoni M. G. A.; Maia K. C. P. (2021). *Numerical modeling of geotextile tubes filling process with gold mine tailings*. *Geosynthetics International* (in press).

- Souza, H. P. (2021). *Análise experimental do efeito das cargas assimétricas sobre estacas de fundação executadas em argilas moles com uso de laponita RD* ®. Seminário de Doutorado. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 20 p.
- Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. (2011). *Comparative life cycle assessment of geosynthetics vs. conventional construction materials*. Research Report, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 81 p.
- The Construction Index (2019). *Pollution-busting drain filter installed on M56*. The Construction Index. <https://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/innovative-drain-filter-installed-on-m56>. Acessado em 11/09/2019.
- Touze, N. (2021). *Healing the world: a geosynthetic solution*. Geosynthetics International, vol. 28, nº 1, pp. 1-31. <https://doi.org/10.1680/jgein.20.00023>
- USPAP (2019). *Geosynthetic clay liner with electrically conductive properties*. United States Patent Applications Publication, Pub. No. US 2019/0212222 A1, USA.
- Vieira, C.S.; Pereira, P.; Ferreira, F.; Lopes, M.L. (2020). *Pullout behaviour of geogrids embedded in a recycled construction and demolition material. Effects of specimen size and displacement rate*. Sustainability, vol. 12, pp. 1-19, <http://doi:10.3390/su12093825>
- Wallace, J. F.; Rutherford, C. J. (2015). *Geotechnical properties of Laponite RD*®. Geotechnical Testing Journal, vol. 38, nº 5, pp. 574-587. <https://doi.org/10.1520/GTJ20140211>
- Wilke, M.; Breytenbach, M.; Reunanen, J.; Hilla, V.M. (2015). *Efficient environmentally sustainable tailings treatment and storage by geosynthetic dewatering tubes: Working principles and Talvivaara case study*, Intern. Symposium Tailings and Mine Waste, pp. 607-614, Vancouver.
- Wu, C. S.; Hong, Y. S.; Wang, R. H. (2008). *The influence of uniaxial tensile strain on the pore size and filtration characteristics of geotextiles*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 26, nº 3, pp. 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.004>.
- Yang, Y.; Wei, Z.; Cao, G.; Yang, Y.; Wang, H.; Zhuang, S.; Lu, T. (2019). *A case study on utilizing geotextile tubes for tailings dams construction in China*. Geotextile and Geomembranes, vol. 47, pp. 187-192.
- Yuan, B.; Sun, M.; Xiong, L.; Luo, Q.; Pradan, S. P.; Li, H. (2020). *Investigation of 3D deformation of transparent soil around a laterally loaded pile based on a hydraulic gradient model test*. Journal of Building Engineering, vol. 28, 101024, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101024>
- Zhang, L.; Xu, Z.; Zhou, S. (2020). *Vertical cyclic loading response of geosynthetic-encased stone column in soft clay*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 48, nº 6, pp. 897-911. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.07.006>
- Zhuang, Y.; Azzam, R.; Klapperich, H. (2015). *Electrokinetics in geotechnical and environmental engineering*. RWTH Aachen University, Aachen, Alemanha. ISSN 0341-3853. 187 p.