

Comparação entre as técnicas de estabilização química e reforço com geossintético na melhoria da resistência ao cisalhamento de solo com baixa capacidade de suporte

Alexandre de Souza Júnior ^[1], Carina Silvani ^[2], Eduardo Antonio Guimarães Tenório ^[3], Jonny Dantas Patrício ^[4], Kênia Araújo de Lima Scariot ^[5], Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena ^[6]

[1] alexandrejr5@hotmail.com. [2] carinasilvani@gmail.com. [3] eduardo_agt123@hotmail.com. [4] jonny_dantas@hotmail.com. [5] keniaaraujolima@hotmail.com. [6] ledach@uol.com.br. Universidade Federal de Campina Grande / Engenharia Civil.

RESUMO

Solos de baixa resistência necessitam do uso de técnicas de consolidação, melhoramento e reforço no intuito de gerar uma redistribuição global das tensões e deformações. Entre elas, podem-se mencionar as técnicas de melhoramento com inserção de agentes cimentantes e de geossintéticos. A presente pesquisa teve por objetivo realizar um estudo da resistência ao cisalhamento de um solo de baixa capacidade de suporte no seu estado natural e após o emprego da técnica de estabilização química e de inserção de materiais de reforço (geotêxtil não-tecido e geogrelha). A avaliação do comportamento mecânico do solo foi realizada por meio do ensaio triaxial do tipo não adensado e não drenado. A técnica de estabilização química do solo, comparada às técnicas de reforço com geossintéticos, proporcionou melhor comportamento resistente, visto que a inserção do cimento ao solo promoveu resultados superiores de resistência ao cisalhamento do solo pesquisado. Entretanto, a presente pesquisa não considerou as vantagens técnicas, econômicas e ambientais de cada tecnologia, porém esses aspectos podem inviabilizar as construções com solo melhorado.

Palavras-chave: Melhoramento de solo. Estabilização química. Solo reforçado com geotêxtil. Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

Low bearing capacity soils can be improved by consolidation or reinforcement techniques. Currently, there are two usually solutions for ground improvement, chemical stabilization with cement and lime and geotextile reinforced soil. The research aimed to study the shear strength of soil in its natural state and after chemical stabilization and insertion of reinforcement materials (non-woven geotextile and geogrid). The evaluation of the mechanical behavior of soil was carried out using the unsaturated undrained triaxial test. Shear resistance of the cemented soil was better than geotextile reinforced soil. However, the present research did not consider each technology's technical, economical, and environmental advantages. These aspects can make ground improvement not sustainable.

Keywords: *Ground improvement. Chemical stabilization. Geotextile Reinforced Soil. Shear strength.*

1 Introdução

O solo é uma matéria-prima de suporte necessária à construção civil, contudo, suas propriedades sofrem influências de fatores como clima, mineralogia, relevo e tempo. Além disso, o solo apresenta baixa resistência à tração quando comparados a resistência deste material à compressão. O uso desse material em obras geotécnicas, por exemplo, taludes, barragens, rodovias e fundações, deve satisfazer parâmetros como peso específico seco, condutividade hidráulica e desempenho mecânico (NICHOLSON, 2014; LATIFI *et al.*, 2017).

Em algumas regiões do planeta, o solo não satisfaz às especificações necessárias ao uso para fins construtivos, impondo, assim, um novo desafio à engenharia geotécnica. A construção em solos com baixa capacidade de suporte acarreta problemas de estabilidade, capacidade de carga e recalque excessivo. Isso acontece, durante e após a execução da obra, devido à alta compressibilidade, baixa resistência e baixa permeabilidade do solo (GHADIR; RANJBAR, 2018).

Do ponto de vista construtivo, a remoção e substituição de depósitos de solos naturais problemáticos por solos de elevada resistência ao cisalhamento implicam impactos econômicos e ambientais devido à necessidade de transporte e de área para armazenamento do material. Logo, uma solução tecnicamente eficiente e sustentável para garantir uma elevada resistência ao cisalhamento é o melhoramento dos solos locais. Entende-se por melhoramento de solos o conjunto de técnicas de estabilização e reforço empregadas para aprimorar propriedades geotécnicas do solo (HUANG; HAN, 2009).

As vantagens da estabilização consistem na elevação da capacidade de carga do solo, redução dos efeitos de recalques absolutos e funcionamento dos solos estabilizados como plataforma para construção. Além do mais, destacam-se a redução da variação de volume do solo, devido à variação de temperatura ou umidade, ao aumento da durabilidade e à diminuição da plasticidade do solo (EUROSOILSTAB, 2002).

Dentre as técnicas de melhoramento de solo, este estudo se limita a avaliar a resistência do solo sob os aspectos da estabilização química e do reforço pela inserção de geossintéticos.

A estabilização química busca melhorar a estabilização volumétrica, a resistência mecânica e o comportamento tensão-deformação por meio da

inserção de um agente cimentante, sendo o cimento Portland e a cal os mais utilizados. A cimentação do solo consiste em um mecanismo de aglutinação da massa de solo que, sob ação do aditivo, cimenta as partículas, promovendo melhorias nas propriedades de resistência (SANDRONI; CONSOLI, 2010; CHAO-LUNG; ANH-TUAN; CHUN-TSUN, 2011; DIAS, 2012).

Outra alternativa, para o melhoramento do solo, fundamenta-se no uso de geossintéticos. Essa técnica consiste em um sistema construtivo formado de solo e geossintético intercalados em camadas. Dessa forma, propicia uma redistribuição homogênea das tensões e, conseqüentemente, as deformações induzidas são também homogêneas. Os geossintéticos são constituídos de polímeros naturais ou sintéticos, sendo o geotêxtil e a geogrelha os mais utilizados em obras geotécnicas (AGUIAR, 2010; AVESANI NETO; FUTAI, 2016; PLÁCIDO, 2016).

Visando contribuir com o desenvolvimento da literatura específica, este estudo propõe-se a avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo de baixa capacidade de suporte no seu estado natural e após a aplicação de técnicas de melhoramento com cimento, cal e geossintético.

2 Referencial teórico

2.1 Solos com baixa capacidade de suporte

Atualmente, a população mundial enfrenta dificuldades para encontrar formas sustentáveis de executar suas construções. Para um melhor aproveitamento das áreas disponíveis ou por questões econômicas, surge a necessidade de reforçar solos com baixa capacidade de suporte (QUARIGUASI *et al.*, 2018).

Define-se como solos de baixa capacidade de suporte aqueles cujas características principais são alta compressibilidade, baixa resistência e baixa permeabilidade (VIERO, 2016).

A necessidade de realização de obras sobre esse tipo de solo, sem haver sua substituição, requer estudos geológicos-geotécnicos, bem como análise de critérios econômicos, para avaliar qual a melhor alternativa técnica a ser adotada. Em geral, para contornar a limitação de resistência ao cisalhamento e viabilizar o uso desses solos, são aplicadas técnicas de consolidação, melhoramento e reforço no intuito de gerar uma minimização ou redistribuição global das tensões e deformações (HUANG; HAN, 2009; RAMOS, 2018).

O melhoramento geotécnico baseia-se nos métodos de comprimir, grampear ou grautear o solo, podendo ser empregado em projetos dos sistemas viário e ferroviário, aeroportos, obras de terra e projetos de fundações. Essa técnica combina compactação com processos químicos ou inclusão de materiais de reforço.

2.2 Estabilização química

Consiste na técnica de estabilizar o solo natural pela adição de agentes cimentantes e pozolânicos por meio da mistura mecânica desses componentes com o solo. Esta metodologia permite a criação de um novo material com capacidade para suprir condições de resistência, durabilidade e expansão do solo (FRITSCHER; SANTOS, 2017; CARRETTA; MATTOS, 2017).

A escolha do componente químico utilizado para promover a estabilização deve ser definida a partir da economia, tempo de execução, finalidade da obra e, de forma particular, das propriedades dos materiais a serem corrigidos. Em geral, esse tipo de melhoramento se dá por processos químicos, iniciados pela adição de cal, cimento ou materiais betuminosos, combinados à compactação do solo (CASAGRANDE, 2001).

2.2.1 Solo-cimento

O solo-cimento é um produto da mistura homogênea da massa de solo, cimento e água que, em proporções apropriadas, após compactação e cura úmida, resulta num material com resistência mecânica e durabilidade (ABCP, 1986).

O efeito do cimento pode ser observado de maneira distinta a depender do solo ser granular ou coesivo. Nos solos granulares, destina-se a formar ligações nos contatos entre partículas de modo a conferir um aumento da parcela resistente relativa à coesão. Com relação aos solos finos, os grãos de cimento são tidos como núcleos que aderem às partículas ao seu redor, formando regiões de material floculado com ligações a partir da cimentação. A função principal desse agente cimentante é desenvolver uma estrutura capaz de minimizar variações da umidade do solo, que desenvolvem esforços de tração e compressão no interior da massa porosa (MACHADO *et al.*, 2005).

O mecanismo de reações do solo-cimento pode ser descrito em duas fases: primária e secundária. Na fase primária, acontecem as reações de hidratação dos

silicatos e aluminatos presentes no cimento Portland. Na fase secundária, as reações ocorrem entre os argilominerais disponíveis no solo e o hidróxido de cálcio, subproduto da hidratação do cimento (ABIKO, 1987).

2.2.2 Solo-cal

A adição da cal ao solo provoca modificação das propriedades físicas do solo, bem como pode transformá-lo em uma massa estabilizada com características de resistência e durabilidade. Esse processo depende do tipo e quantidade de cal disponível na mistura, além do tempo de cura (USACE, 1984).

A cal, como aditivo químico para melhoramento de solo, acarreta reações de troca catiônica, floculação, pozolânicas e carbonatação. Para o desenvolvimento dessas reações, o solo deve possuir sílica ou alumina amorfa, além de uma umidade adequada (AZEVEDO, 2010).

As reações de troca catiônica e floculação são interdependentes e se iniciam rapidamente, produzindo alterações imediatas da plasticidade e, em menor escala, na resistência ao cisalhamento da mistura. Quimicamente, o mecanismo de reação se dá por meio de uma troca de base, no qual os cátions da cal, de carga mais elevada, substituem íons mais fracos (Na^+ , H^+) existentes na superfície dos argilominerais. A ligação química entre as partículas de argila, em virtude da carga elevada dos íons de cálcio provenientes da cal, ocasiona uma atração de maior magnitude, promovendo a floculação dos grãos de solo (MITCHELL; HOOPER, 1961).

As reações pozolânicas são resultantes da interação entre cal, água, sílica, ferro silicatos e alumínio silicatos amorfos presentes no solo, levando à formação de géis de silicatos de cálcio hidratados. Esses elementos envolverão as partículas argilosas do solo, cristalizando-as. A consequência de médio e longo prazo desse efeito é o aumento da resistência mecânica e da durabilidade, bem como redução da permeabilidade (PORTELINHA, 2008; VILLALBA, 2015).

Por fim, a carbonatação é a reação do hidróxido de cálcio com o gás carbônico da atmosfera, formando um carbonato relativamente solúvel. É um processo prejudicial à estabilização, pois diminui a oferta de cal para as reações pozolânicas (MALLELA; QUINTUS; SMITH, 2004).

2.2.3 Reforço com geossintéticos

Reforçar um solo baseia-se na inclusão de diferentes materiais na massa compactada de solo. Os materiais usados para compor uma estrutura de solo reforçado devem: possuir resistência à tração e deformação em longo prazo compatível com os valores esperados na obra; boa interação solo-reforço; resistência à degradação biológica e química; facilidade de instalação e execução da obra; baixo custo (RACANA; GOURVES; GREDIAC, 2001; AVESANI NETO; BUENO, 2009).

Como alternativa para reforço de solos, há os geossintéticos, que são materiais produzidos a partir de polímeros naturais ou sintéticos. Esses materiais são inseridos na superfície ou interior dos solos e têm a capacidade de exercer funções de drenagem, filtragem, separação, proteção, reforço, estanqueidade e controle de erosão (PAULA, 2003).

A classificação desses materiais baseia-se no tipo de polímero utilizado durante a produção e nas diferenças estruturais desse processo (produção do polímero com seus vários aditivos, produção dos componentes, conversão dos componentes no geossintético). Os geossintéticos mais especificados para atuar como reforço de solo são os geotêxteis tecidos e não tecidos, as geogrelhas, as geotiras e os geocompostos. Neste estudo, serão abordados os geotêxteis não tecidos e as geogrelhas (ABINT, 2001; AGUIAR; VERTEMATTI, 2004).

Os geotêxteis não tecidos são constituídos por filamentos contínuos ou fibras cortadas distribuídos aleatoriamente. A interligação desse material ocorre por processos mecânicos, térmicos ou químicos (ABNT, 2003).

As geogrelhas são estruturas resistentes à tração, com formato de grelha, que permitem a interação do meio em que se encontram confinadas e cuja função predominante é o reforço (ABNT, 2003).

As vantagens do uso de geossintéticos estão relacionadas a fatores econômicos, ambientais e técnicos, quando comparados a métodos convencionais de reforço e melhoria do solo. Koerner (2012) cita como benefícios oferecidos pelos geossintéticos: economia frente aos materiais naturais; redução de emissão de carbono comparado a outras soluções tradicionais; rápida instalação; possibilidade da execução de projetos até então inexecutáveis; substituição de materiais naturais; controle de qualidade por serem manufaturados.

A inclusão dos geossintéticos não se refere ao melhoramento das características próprias do solo, mas do comportamento global, a partir da transferência dos esforços para os reforços. Assim, o principal objetivo desses elementos de reforço é inibir o desenvolvimento de deformações, uma vez que absorvem as tensões de tração (FERREIRA, 2010).

3 Programa experimental

3.1 Materiais

O solo utilizado consistiu de amostras deformadas e coletadas no Complexo Habitacional Aluísio Campos na cidade de Campina Grande (PB). Essas amostras foram devidamente acondicionadas e identificadas, sendo, posteriormente, transportadas para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para realização de ensaios de caracterização física, química e mecânica. Através de uma análise preliminar, observou-se que as amostras coletadas apresentaram teores expressivos de finos na distribuição dos tamanhos dos grãos, predominando a fração argila.

Para alcançar os objetivos do estudo, quanto às técnicas de estabilização química e contenção com geossintéticos, foram empregados cimento Portland de alta resistência inicial (CP V - ARI), cal hidratada, além do geotêxtil não-tecido GEOFORT GF10/200 e a geogrelha STRATAGRID SG350.

A escolha dos estabilizantes químicos (cimento e cal) foi definida a partir da economia, tempo de execução e finalidade da obra, além do fato dos componentes químicos conferirem maior coesão aos solos devido a cimentação e aglutinação das partículas.

O cimento Portland utilizado foi de alta resistência inicial (CP V ARI) (ABNT NBR 16697/2018). Esse material foi adicionado nos teores de 0%, 5% e 7%, baseado nos estudos de Foppa (2005) e Cruz (2004).

A cal hidratada utilizada foi a dolomítica do tipo I (ABNT NBR 7175/2003). Esse material foi adicionado nas proporções de 0%, 3%, 4%, 5% e 6%, baseado nos estudos de Lovato (2004) e Klinsky, Faria e Leal (2014).

O geotêxtil empregado é um material geossintético constituído de 100% poliéster ou 100% polipropileno e fabricado pela empresa OBER S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO em fibras de alta tenacidade e elevada resistência mecânica, garantindo maior eficiência e durabilidade. As propriedades do geotêxtil GEOFORT GF10/200 estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações STRATAGRID SG350

Propriedades	Norma	Unidade	SG350
Força máxima	ASTM D6637/ 2015	kN/m	73,0
Resistência à tração - 2% de tensão	ASTM D6637/ 2015	kN/m	7,0
Resistência à tração - 5% de tensão	ASTM D6637/ 2015	kN/M	24,5
Resistência à tração - 10% de tensão	ASTM D6637/ 2015	kN/m	52,5
Tamanho da abertura	Medido	mm	21,6/15,2x14,0

Fonte: Elaboração própria (2020)

A geogrelha usada é um material de elevado desempenho para reforço de solos com aplicabilidade em sistemas de contenção, melhorias de solos moles e reforço de base de rodovias. Fabricada pela GeoSoluções Eng. Geotécnica Ltda, a geogrelha

é confeccionada em fios de poliéster de alto peso molecular e alta tenacidade, proporcionando durabilidade mecânica e química. As propriedades da geogrelha STRATAGRID SG350 estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações GEOFORT linha GF

Propriedades	Norma	Unidade	GF 10/200
Espessura	ABNT NBR ISO 9863-1/2013	mm	1,4
Gramatura	ABNT NBR ISO 9864/2013	g/m ²	200
Resistência à tração em faixa larga (transversal)	ABNT NBR ISO 10319/2013	kN/m	10
Alongamento na transversal	ABNT NBR ISO 10319/2013	%	50
Resistência à tração em faixa larga (longitudinal)	ABNT NBR ISO 10319/2013	kN/m	9
Alongamento na longitudinal	ABNT NBR ISO 10319/2013	%	50
Resistência ao rasgo trapezoidal (transversal)	ASTM D4533/2015	N	280
Resistência ao rasgo trapezoidal (longitudinal)	ASTM D4533/2015	N	310
Resistência ao punçonnemento CBR	ABNT NBR 12236/2013	kN	1,8
Resistência ao punçonnemento estático	ASTM D4833/2013	N	450
Permeabilidade	ASTM D4491/2014	cm/s	0,39
Abertura aparente	ASTM D4751/2012	mm	0,22

Fonte: Elaboração própria (2020)

Os procedimentos experimentais de caracterização mecânica estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaios realizados para caracterização do solo pesquisado

Ensaio	Metodologia
Curva característica	Marinho (1995)
Compressão simples	ASTM D2166/2016
Compressão triaxial	ASTM D2850/2015

Fonte: Elaboração própria (2020)

O ensaio de curva característica adotado nesta pesquisa seguiu as metodologias apresentadas por Marinho (1995) e Guedes (2013), utilizando a técnica do papel filtro, com medidas de sucção mátrica por meio do papel Whatman nº 42. Esses dados permitiram a obtenção da curva de retenção do solo, sendo o resultado calibrado conforme a equação proposta por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992).

O ensaio de resistência à compressão simples foi utilizado visando analisar o efeito da estabilização química no solo baseado no estudo de Loch (2013). Nesse ensaio, utilizou-se uma prensa automática da SHIMADZU AG-IS, com célula de 100 kN. A velocidade de deformação desse ensaio foi de 1,30 mm por minuto.

Experimentalmente, foi utilizado o solo puro com o objetivo de comparar os valores de resistência quando estabilizados com cimento Portland e a cal, sendo moldados três corpos de prova para cada condição avaliada. Desse modo, os valores obtidos no ensaio com solo puro serviram de referência para mostrar a evolução da resistência ao se adicionar percentagens de aditivos em relação ao peso seco de solo.

Os corpos de prova cilíndricos moldados na compactação mecânica com dimensões de 100 mm de diâmetro e 130 mm de altura foram compactados nas condições de energia do Proctor Normal e mantidos em cura (úmida e ao ar livre) por 7 dias.

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados objetivando determinar a deformabilidade e a relação tensão-deformação das amostras, tornando possível avaliar os ganhos de resistência e de rigidez de um solo puro em comparação ao solo melhorado. Assim, a partir dos resultados obtidos no ensaio de compressão simples, optou-se, para esta fase da pesquisa, a modelagem do corpo de prova estabilizado somente com o agente cimentante que oferecesse maior ganho de resistência ao solo. Assim, a moldagem dos corpos

de prova foi realizada na umidade ótima e com energia do Proctor Normal.

Foram moldados, na compactação mecânica com energia Proctor Normal, 12 corpos de prova, sendo três corpos de prova para cada uma das seguintes condições: solo puro, solo estabilizado quimicamente com cimento (7%) curado por 7 dias, solo com inserção de geotêxtil não tecido e solo com inserção de geogrelha.

O ensaio de compressão triaxial foi realizado para amostras de solo puro com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. As amostras foram ensaiadas na umidade de moldagem (umidade ótima). Além das diferenças nas dimensões dos corpos de prova, as amostras de solo puro (50 mm x 100 mm) foram moldadas pelo procedimento de compactação estática, enquanto as amostras de solo (100 mm x 200mm) – por limitações do equipamento de compactação estática – foram moldadas sob compactação mecânica.

Os ensaios de compressão triaxial, para o solo estabilizado com agentes cimentantes, foram realizados apenas para amostras com teor de 7% de cimento, pois foram as que apresentaram maior resistência à compressão simples quando comparadas ao solo-cal e às amostras com percentuais inferiores de cimento.

As amostras de solo reforçado com geogrelha foram moldadas com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, uma vez que a abertura da malha do reforço inviabilizava a execução de corpos de prova menores. Os resultados dessas amostras foram comparados aos das amostras de solo puro com as mesmas dimensões e o mesmo processo de compactação (dinâmica). As demais condições de amostras, solo estabilizado com cimento e com inserção de geotêxtil não tecido, foram moldadas em corpos de prova de 50mm de diâmetro por 100 mm de altura e comparadas a amostra referência (solo puro – 50 mm x 100 mm), sendo estas amostras moldadas pelo processo de compactação estática.

Os ensaios triaxiais realizados foram do tipo não consolidado e não drenado (UU) e os corpos de prova se encontravam na condição parcialmente saturados (umidade ótima). Para a realização desses ensaios, as tensões confinantes adotadas foram de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa, sendo considerada uma deformação axial da ordem de 15% e uma velocidade máxima de 1mm/min.

4 Resultados da pesquisa

4.1 Caracterização geotécnica

A partir de ensaios laboratoriais e de acordo com as classificações geotécnicas, o solo é argiloso medianamente plástico, segundo a Highway Research Board (HRB), e a argila é inorgânica de mediana plasticidade com baixa compressibilidade conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Observou-se ainda que, pelo ensaio CBR, o material apresenta baixa capacidade de suporte quando compactado.

A caracterização completa do solo esta apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização geotécnica do solo

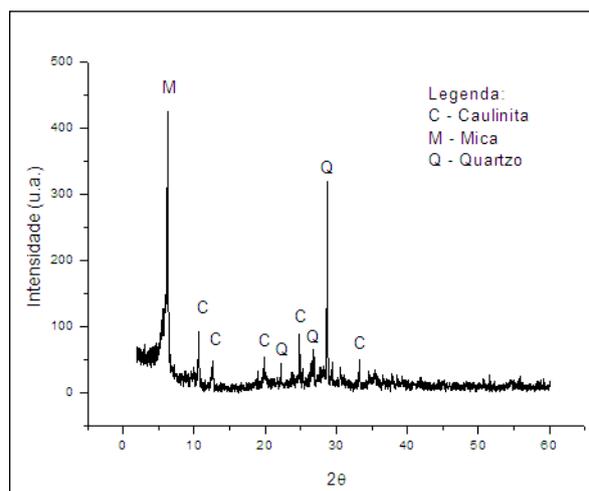
Distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos	Areia (%)	48,31
	Silte (%)	18,19
	Argila (%)	29,55
Peso específico dos grãos do solo (kN/m ³)		27,70
Índice de Suporte Califórnia (CBR)		0
Limites de Atterberg	LL (%)	36
	LP (%)	24
	IP (%)	12
Classificação	HRB	A-6
	SUCS	CL
Curva de compactação - energia normal	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	16,89
	Umidade ótima (%)	18,9
Curva de compactação - energia intermediária	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	17,74
	Umidade ótima (%)	14,6
Curva de compactação - energia modificada	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	19,13
	Umidade ótima (%)	12,3
Fluorescência de raios X (EDX)	SiO ₂ (%)	47,70
	Al ₂ O ₃ (%)	17,40
	Fe ₂ O ₃ (%)	15,60
	Outros (%)	1,30
	PF (%)	3,00

Fonte: Elaboração própria (2020)

A caracterização físico-químico-mineralógica deu-se por meio dos ensaios de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (EDX). Os resultados de EDX constataram a presença de óxidos de silício, alumínio e ferro, os quais podem ter contribuído para a classificação do solo pesquisado como medianamente plástico. A partir do ensaio de DRX, foram identificados os minerais caulinita, mica, e quartzo na constituição do solo (Figura 1).

Conforme a análise do difratograma, a presença de quartzo – mineral primário – é explicada pela resistência ao intemperismo, enquanto que a quantidade discreta de caulinita corrobora para a baixa plasticidade. Com relação à mica, Fonseca *et al.* (2005) afirmaram que o teor influencia na resistência ao cisalhamento de solos tropicais, uma vez que quanto maior a porcentagem de mica, menor a resistência ao cisalhamento de pico e menor é o ângulo de atrito residual. Portanto, a presença dos minerais micáceos pode ter contribuído para a baixa capacidade de suporte dos solos.

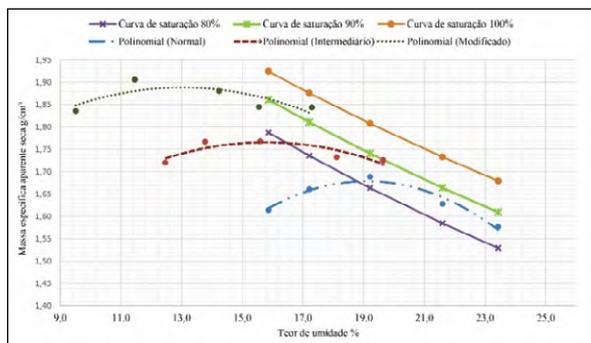
Figura 1 – Difratograma de raios X do solo



Fonte: Elaboração própria (2020)

Os resultados dos ensaios de compactação, de acordo com a ASTM D698/2012, revelaram que o peso específico máximo ($g_{m\acute{a}x}$) e a umidade ótima (w) do solo para as energias normal, intermediária e modificada, foram de 16,89 kN/m³ e 18,9%, 17,74 kN/m³ e 14,6%, 19,13 kN/m³ e 12,3%, respectivamente (Figura 2).

Figura 2 – Curvas de compactação e saturação do solo

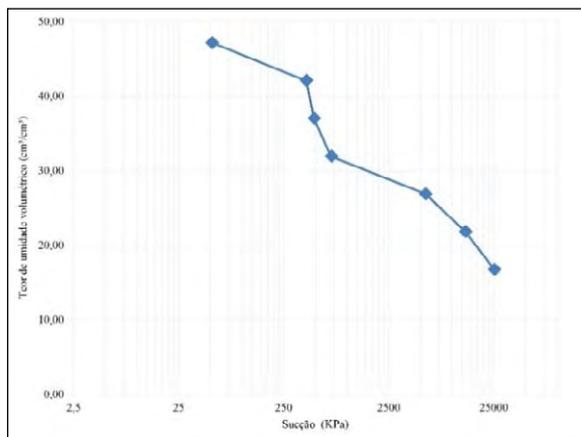


Fonte: Elaboração própria (2020)

4.2 Curva característica

A curva característica, obtida pela relação da sucção matricial com a umidade volumétrica, é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Curva característica – umidade volumétrica x sucção matricial



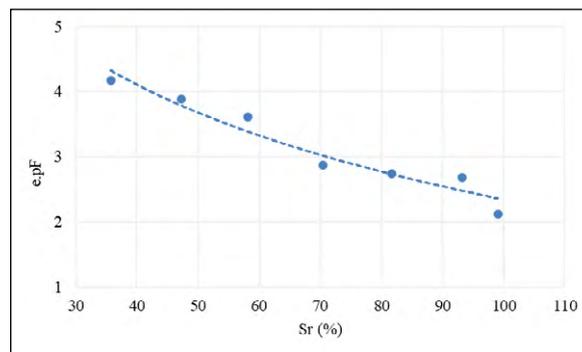
Fonte: Elaboração própria (2020)

Os valores de sucção matricial do solo variaram entre 50 kPa e 25000 kPa, resultados próximos aos obtidos pelo método do papel filtro para o solo arenoso compactado estudado por Soto (2004). A curva característica obtida possui trechos distintos: ora se observa grande variação de sucção com pequena variação de umidade, ora ocorre pequena variação de sucção com elevada variação de umidade. Tal fenômeno pode ser atribuído ao fato do solo analisado ser bem graduado, podendo – em certos pontos – a fração fina existente reter uma maior quantidade de água com a sucção.

Diversos são os parâmetros que alteram o comportamento da curva de sucção. Silva (2015) enfatiza que o percentual e a composição mineralógica da fração fina são fatores relevantes para a posição relativa, forma e inclinação da curva de retenção da água no solo. A variação iônica influencia na forma da curva característica, uma vez que a interação entre as partículas e as forças de ligação e de retenção de água proporcionaram perda brusca de umidade para determinados valores de sucção.

A Figura 4 apresenta a curva característica transformada obtida pelas relações da sucção (pF) multiplicada pelo índice de vazios (e) e o grau de saturação, ou seja, uma curva representativa para os diferentes índices de vazios em uma mesma distribuição de poros. De modo geral, é possível estimar que o comportamento da curva característica de retenção de água estava associado à condição física (presença ou não de macroporos), sendo afetadas ainda pela composição química e mineralógica do solo pesquisado.

Figura 4 – Curva característica transformada



Fonte: Elaboração própria (2020)

4.3 Ensaio de compressão simples

Os resultados dos ensaios de compressão simples do solo natural e solo estabilizado com diferentes teores de cal e cimento estão dispostos na Tabelas 5 e 6.

Para o solo estabilizado com cal, verificou-se que a resistência à compressão simples aumenta com o acréscimo de 3%, 4% e 5% desse aditivo em cura úmida e com acréscimo de 5% em cura ao ar livre. Entretanto, para o teor de 6% em cura úmida, há um decréscimo no valor de resistência, embora mantendo-se com valor próximo a resistência de pico (293,02 kPa). Isso possibilitou inferir que o ganho de resistência tende a estabilizar para teores acima de 5%,

proporcionando uma melhora no comportamento mecânico do solo de 240 kPa e, por comparação, que o maior ganho de resistência ocorreu para o solo com cura ao ar livre. Esse acréscimo foi de 94,05% (261,63 kPa) quando confrontado com o solo puro na mesma condição de cura.

Tabela 5 – Variação da resistência à compressão simples do solo natural e estabilizado com teores de cal e cimento aos 7 dias (cura úmida)

Amostra	Resistência à compressão	Desvio padrão (kPa)
	Cura úmida	
Solo natural	53,00	-
Solo - 3% cal	221,02	83,61
Solo - 4% cal	251,46	98,83
Solo - 5% cal	293,02	119,61
Solo - 6% cal	279,97	113,08
Solo - 5% cimento	437,70	191,95
Solo - 7% cimento	773,01	359,60

Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 6 – Variação da resistência à compressão simples do solo natural e estabilizado com teores de cal e cimento aos 7 dias (cura ao ar livre)

Amostra	Resistência à compressão	Desvio padrão (kPa)
	Cura ao ar livre	
Solo natural	278,18	-
Solo - 3% cal	-	-
Solo - 4% cal	-	-
Solo - 5% cal	539,81	130,82
Solo - 6% cal	-	-
Solo - 5% cimento	1208,46	465,14
Solo - 7% cimento	1386,52	554,17

Fonte: Elaboração própria (2020)

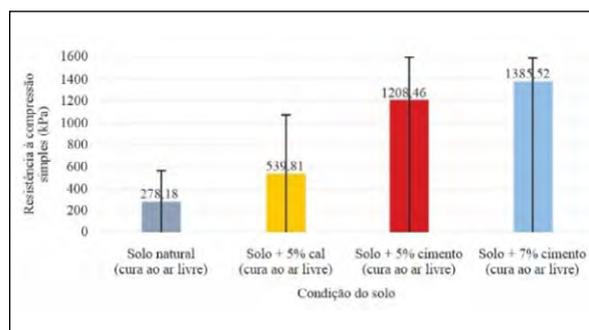
Para todos os teores de cimento estudados, ocorreram significativos ganhos de resistência na condição de cura ao ar livre em relação a cura úmida, constatando-se que, para a amostra sem adição de cimento, houve um acréscimo de 225,18 kPa, para a amostra com teor de 5% um ganho de 770,76 kPa e para a modificação com inserção de 7% de cimento o ganho foi de 613,51 kPa.

Para a condição de cura ao ar livre, a amostra com 5% de teor de cimento apresentou um ganho de resistência de 334,41% (930,28 kPa) quando comparada ao solo natural. Porém, o aumento de resistência à compressão simples mais significativo (398,43%, ou seja, 1.108,34 kPa) foi o da amostra com teor de 7% de cimento.

Ao comparar os resultados dos corpos de prova submetidos à cura ao ar livre nas condições de teores de 5% e 7% de cimento, verifica-se que o teor de 7% proporcionou um valor 14,73% maior de capacidade de suporte, ou seja, 178,06 MPa.

Em relação ao aumento de resistência à compressão simples observada para os solos estabilizados com cal e cimento, quando comparados ao solo natural, é importante ressaltar o efeito da sucção nas amostras estabilizadas. Na Figura 5, é possível verificar um comparativo dos valores de resistência à compressão simples para as diferentes condições de estabilização do solo.

Figura 5 – Comparação da resistência à compressão simples para o solo ensaiado



Fonte: Elaboração própria (2020)

As maiores elevações de resistência mecânica foram observadas na estabilização com cimento, em especial, para o teor de 7% e cura ao ar livre, atingindo um valor de resistência à compressão simples de 1.386,52 kPa. A necessidade da elevada quantidade de cimento para estabilizar o solo em análise está relacionada ao teor de umidade da mistura, a temperatura de cura e ainda ao teor de argila presente na distribuição granulométrica do solo.

Soares (2005) relata que o comportamento de deformabilidade e de resistência dos solos não saturados pode ser influenciado pela retenção de água, composição granulométrica, composição mineralógica, estrutura do solo e efeito da temperatura. Os componentes químicos, cal e cimento, inseridos ao

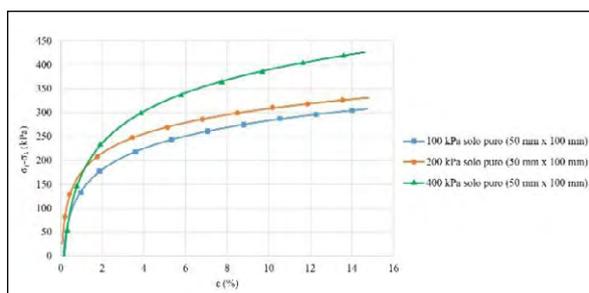
solo estudado contribuíram para a diminuição dos índices de vazios e para a diferença nas forças de adsorção de água, aumentando o potencial de sucção e, conseqüentemente, melhorando o comportamento mecânico do solo. Enfatiza ainda que a umidade afeta sensivelmente a resistência mecânica do solo, uma vez que a sucção varia inversamente com o teor de umidade. Portanto, o efeito da sucção contribuiu para o ganho de resistência das amostras conservadas em cura ao ar livre.

4.4 Ensaio de compressão triaxial

4.4.1 Solo puro

A Figura 6 apresenta os resultados gráficos das diferenças de tenções principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) em função das deformações axiais (ϵ %), obtidas para os ensaios de amostras de solo puro com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Figura 6 – Curvas tensão x deformação - solo puro (50 mm x 100 mm)



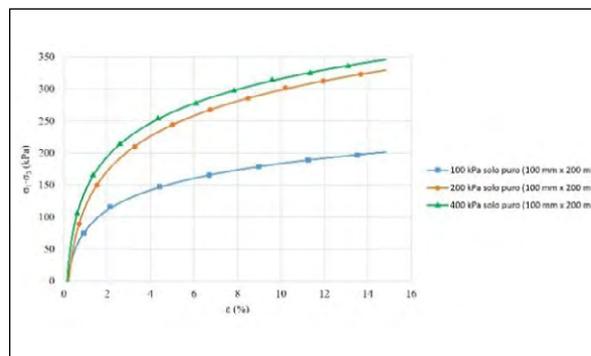
Fonte: Elaboração própria (2020)

Os resultados dos ensaios triaxiais para amostras de solo puro demonstraram que a tensão desviadora cresce com as deformações axiais até atingir um valor de resistência máxima. Na seqüência, a tensão desviadora tende a se estabilizar em torno de um valor que é definido como resistência residual.

Apesar das amostras de solo puro não apresentarem valores de pico e planos de ruptura bem definidos, é possível observar que as tensões máximas, para as amostras ensaiadas com tensões de confinamento de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa, ocorrem a partir de grandes deformações axiais, sendo – para este caso – acima de 10%.

A Figura 7 apresenta os resultados da relação tensão-deformação obtidos a partir dos ensaios triaxiais realizados em amostras de solo puro com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Figura 7 – Curvas tensão x deformação - solo puro (100 mm x 200 mm)



Fonte: Elaboração própria (2020)

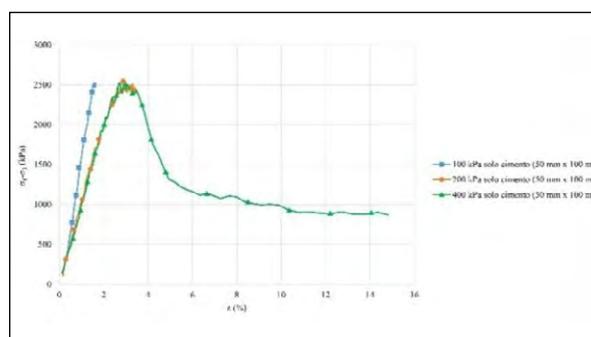
O valor da resistência máxima, para a amostra ensaiada com tensão confinante de 200 kPa, indicou um aumento de resistência de 64,11% quando comparada com a amostra ensaiada com tensão confinante 100 kPa. Entretanto, o aumento de tensão confinante de 200 kPa para 400 kPa não indicou ganho considerável de tensão desviadora (1,23%), sendo a resistência máxima, para as duas amostras, próximo a 345 kPa.

4.4.2 Solo estabilizado

4.4.2.1 Estabilização com cimento

Os resultados dos ensaios de compressão triaxial para o solo estabilizado, realizados apenas para amostras com teor de 7% de cimento, encontram-se na Figura 8.

Figura 8 – Curvas tensão x deformação - solo estabilizado com 7% de cimento (50 mm x 100 mm)



Fonte: Elaboração própria (2020)

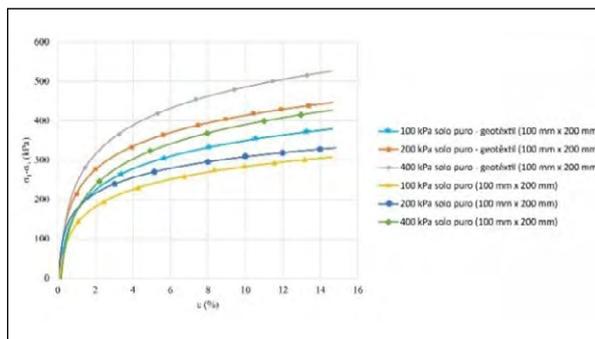
A partir do desenvolvimento das deformações axiais, observa-se a redução acentuada da resistência, desempenho típico de uma ruptura frágil. A resistência

de pico obtida para o solo com 7% de cimento, considerando a maior tensão confinante (400kPa), foi de, aproximadamente, 2600 kPa, superando os resultados alcançado para o solo puro (50 mm x 100 mm) de 400 kPa.

4.4.2.2 Solo reforçado com geotêxtil

A Figura 9 apresenta a relação tensão-deformação axial para amostras de solo reforçadas com geotêxtil em comparação com a amostras de solo natural (50 mm x 100 mm) sob pressões confinantes de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

Figura 9 – Curvas tensão x deformação – solo puro (100 mm x 200 mm) e solo reforçado com geotêxtil (100 mm x 200 mm)



Fonte: Elaboração própria (2020)

Para a maior tensão confinante aplicada (400 kPa), o acréscimo da resistência máxima do solo reforçado foi de, aproximadamente, 12% em comparação ao solo natural. Os resultados obtidos para o solo com geotêxtil indicaram que o nível de tensão imposta sobre a amostra desempenha um papel importante no aumento da resistência mecânica.

De acordo com Tafreshi e Asakereh (2007), o efeito benéfico do geotêxtil para aumentar a resistência do conjunto solos-reforço ocorre quando as amostras são submetidas a altas tensões, ao passo que, para um nível baixo de tensões, a rigidez da amostra pode diminuir.

Os resultados tensão-deformação para o solo reforçado com geotêxtil e o formato da amostra ao fim do ensaio apresentaram comportamento de ruptura do tipo plástica, sem pico de resistência bem definido e com deformação radial após ruptura (Figura 10).

Figura 10 – Solo reforçado com geotêxtil após realização do ensaio triaxial



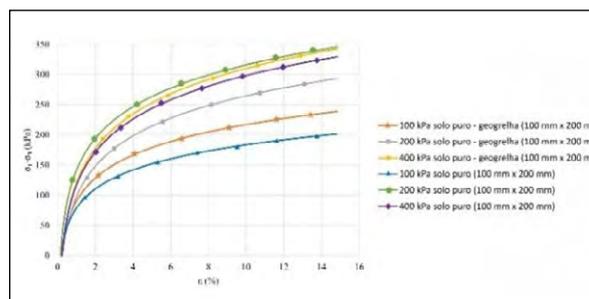
Fonte: Elaboração própria (2020)

De acordo com Patias (2005), os geotêxteis modificam o comportamento do solo durante o processo de cisalhamento, melhorando a condição de ruptura do material.

4.4.2.3 Solo reforçado com geogrelha

A Figura 11 apresenta os resultados da relação tensão-deformação axial obtidos para amostras de solo reforçado com geogrelha e solo natural.

Figura 11 – Curvas tensão x deformação – solo puro (100 mm x 200 mm) e solo reforçado com geogrelha (100 mm x 200 mm)



Fonte: Elaboração própria (2020)

O solo reforçado com geogrelha também apresentou uma ruptura de comportamento plástico. Para o nível de confinamento de 400 kPa, o corpo de prova obteve o maior valor de tensão desviadora, aproximadamente, 354 kPa, com tendência de manter o ganho de resistência mecânica mesmo após atingir 15% de deformação axial. Para a maior tensão confinante aplicada (400 kPa), o acréscimo da resistência máxima, no solo reforçado com geogrelha, não foi significativo, aproximadamente, 2,60%, quando comparado ao solo natural.

O estudo considerou a resistência não drenada do solo, no qual uma eventual ruptura sucederia antes de ocorrer qualquer drenagem. O comportamento do solo pesquisado poderia sofrer alterações caso os testes de compressão triaxial tivessem permitido a drenagem (ensaios do tipo CD e CU).

4.5 Influência da sucção em ensaios de compressão triaxial

Com relação aos resultados de resistência ao cisalhamento obtidos para as condições do solo ensaiado (solo natural, solo estabilizado quimicamente e solo reforçado), é importante evidenciar a influência da sucção na capacidade de suporte do solo pesquisado. Uma vez que as amostras foram ensaiadas na umidade de moldagem (umidade ótima), determinou-se que o solo natural apresentava um grau de saturação de 82%. Associando este resultado com a curva característica de sucção *versus* grau de saturação, verificou-se que o solo puro apresentava uma sucção de 475 kPa.

Freitas Neto (2008) e Georgetti (2010) avaliaram a resistência ao cisalhamento de solos tropicais por meio de ensaios triaxiais. Comparando os resultados obtidos para o solo saturado e o solo não saturado com elevado valor de sucção, os autores observaram acréscimos tanto da coesão quanto do ângulo de atrito para a condição de solo não saturado, demonstrando a influência significativa da sucção na resistência mecânica dos solos.

Neste estudo, é importante evidenciar que, para o ensaio de compressão triaxial do tipo UU, o volume das amostras variou devido à compressão do ar, uma vez que elas se encontravam parcialmente saturadas. Assim, em virtude da compressibilidade dos poros de ar, o grau de saturação das amostras aumentou, aproximando-se da condição de saturação do solo.

Para os solos estabilizados quimicamente, é importante ressaltar que as amostras estavam com

umidade ótima diferente do solo natural. Dessa forma, a inserção de cimento ao solo contribuiu para o aumento do potencial de sucção e, conseqüentemente, para o ganho de resistência mecânica, uma vez que ocasionou diminuição dos índices de vazios. Segundo Oliveira (2004), quanto maior a sucção inicial do corpo de prova, maior a resistência mecânica e menor a deformação axial na ruptura. Esse fato pode ser analisado na curva tensão-deformação para o solo com cimento, na qual a tensão máxima de ruptura corresponde a uma deformação axial na ordem de 3%, sendo inferior as deformações axiais obtidas para o solo puro e solo reforçado (acima de 10%).

Os solos ensaiados com a inserção de geossintéticos, possivelmente, apresentaram variado valor de sucção quando comparado ao solo natural. Estudos realizados por Pereira (2010) e Teixeira (2003) comprovaram a influência das variações nas condições de umidade sobre a resistência ao arrancamento da geogrelha e, conseqüentemente, na resistência ao cisalhamento do conjunto solo-reforço.

5 Conclusão/Considerações

Por meio da análise dos resultados obtidos na presente pesquisa, conclui-se que:

- A cal hidratada e o cimento Portland CP V ARI podem ser utilizados como estabilizantes químicos para o solo estudado. Entretanto, observou-se acréscimos mais significativos de resistência para as amostras ensaiadas com cimento, sendo a resistência à compressão simples influenciada pelo tipo de cura na qual a amostra é submetida. Os ensaios de resistência mecânica indicaram que a inserção do teor de 7% de cimento apresentou uma ação cimentante das partículas do solo, permitindo a formação de um esqueleto rígido e interconectado, tornando maior a resistência do sistema;
- O ensaio de compressão triaxial, para as amostras reforçadas com geotêxtil e geogrelha, mostrou que a resistência máxima apenas é atingida para deformações axiais da ordem de 10%. A resistência máxima foi maior para o solo com geotêxtil, quando comparada ao solo referência, confirmando o efeito benéfico do geotêxtil para aumentar a resistência ao cisalhamento do conjunto solo-reforço. Para maior tensão confinante aplicada, obteve-se o maior valor de tensão desviadora, tendendo a permanecer o ganho de resistência mesmo após atingir 15% de deformação axial.

De um modo geral, as inserções do geotêxtil não tecido e da geogrelha podem ser consideradas alternativas viáveis para melhorar a resistência mecânica de um solo de baixa capacidade de suporte. A técnica de estabilização química do solo proporcionou melhor comportamento mecânico quando comparada com as técnicas de reforço com geossintéticos. Entretanto, as condições das poropressões e sobrecargas no solo, além dos aspectos econômicos e ambientais, não foram considerados nas análises desta pesquisa, sendo estes fatores condicionantes para definição da técnica que proporciona melhor resistência mecânica a um solo com baixa capacidade de suporte. A realização de ensaios triaxiais do tipo drenados (CD e CU) também são importantes para uma análise mais criteriosa dos parâmetros de resistência do solo, assim como os ensaios de cisalhamento direto e arrancamento, que ajudariam a fornecer resultados de projeto mais conservadores, contribuindo, assim, para a segurança das obras geotécnicas.

REFERÊNCIAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. **Dosagem das misturas de solo-cimento - normas de dosagem.** Estudo Técnico ET-35. São Paulo, 1986.

ABIKO, A. K. **Estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza da casca de arroz e de resíduos cerâmicos.** 1987. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1987.

ABINT – Associação Brasileira das Indústrias Tecidos Técnicos. **Curso Básico de Geotêxteis.** 2001.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12553:** Solo – Geotêxtil. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – Especificação. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319:** Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12236:**

Geossintéticos – Ensaio de punção estático (punção CBR). Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9863-1:** Geossintéticos – Determinação da espessura a pressões especificadas. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9864:** Geossintéticos – Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos. Rio de Janeiro, 2013.

AGUIAR, L. A. **Contribuições para a Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados para uso em Barragens.** 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2166:** Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Philadelphia, USA, 2016.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2850:** Test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils. Philadelphia, USA, 2015.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4491:** Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity. Philadelphia, USA, 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4533:** Standard test method for trapezoid tearing strength of geotextiles. Philadelphia, USA, 2015.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4751:** Standard test method for determining apparent opening size of a geotextile. Philadelphia, USA, 2012.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4833:** Standard test method for index puncture resistance of geomembranes and related products. Philadelphia, USA, 2013.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6637:** Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method. Philadelphia, USA, 2015.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D698**: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). Philadelphia, USA, 2012.

AVESANI NETO, J. O.; BUENO, B.S. Estabilização de Encostas com Muros de Gravidade de Geocélula. *In*: 5ª CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2009, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 2009, v.1, p.309-316.

AVASANI NETO, J. O.; FUTAI, M. M. Aspectos gerais do uso de geossintéticos em reforço de aterros sobre solos moles. *In*: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2016, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: ABMS, 2016.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal**: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

CARRETTA, M. S.; MATTOS, J. R. G. **Influência da estabilização química na capacidade de suporte e expansão de um solo laterítico do município de Vera Cruz-RS**. *In*: IX SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL. Caxias do Sul, 2017.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-Cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceeding of the Institute of Civil Engineering**. nº 2, pp. 82-89, 1992.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of marble dust on strength and durability of Rice husk ash stabilised expansive soil. **Construction and building materials**, [s.l.], v. 25, n. 9, p. 3768–3772, 2011.

CRUZ, M. L. S. Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2004.

DIAS, J. J. F. M. S. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

EUROSOILSTAB. **Desenvolvimento de Métodos de Projeto e Construção para Estabilizar Solos orgânicos macios, Guia de Projeto Estabilização de solos moles, industrial e materiais**. [s.l.]: [s.n.], 2002.

FERREIRA, F. B. **Comportamento das interfaces solo – geossintético**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em materiais e processos de construção) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.

FONSECA, A. P.; LACERDA, W. A.; FUTAI M. M.; AGUIAR, V. N. Influência do teor de mica na resistência ao cisalhamento residual em taludes de solos saprolíticos de gnaíse. *In*: 4ª CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS – COBRAE, 2005, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2005, p.205-212.

FOPPA, D. **Análise de variáveis chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

FREITAS NETO, O. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

FRITSCHER, S. V.; SANTOS, V. R. Avaliação da resistência à compressão simples de misturas solo-cimento-cinza de casca de arroz. *In*: IX SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 2017, Caxias do Sul. **Anais** [...]. Caxias do Sul, 2017.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GHADIR, P.; RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and building materials**, [s.l.], v. 188, p. 361-371, 2018.

GUEDES, S. B. **Estudo do desempenho mecânico de um solo-cimento microreforçado com fibras**

sintéticas para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

HUANG, J.; HAN J. 3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetic-reinforced deep mixed column-supported embankment. **Geotextiles and Geomembranes**, [s.l.], v.27, p.272-280, 2009.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C.; LEAL, A. D. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada.** Relatório de Pesquisa (CCR-ND-SCH-RTF-SET) – Agência Nacional de Transportes Terrestres, Brasília, 2014.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics.** 6 ed., vol. 1. Xlibris Press, 2012.

LATIFI, N. *et al.* Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 827–836, 2017.

LOCH, F. C. **Barreiras de solos estabilizados com cal e cimento para proteção ambiental.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicada à pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MALLELA, J.; QUINTUS, H.V.; SMITH, K.L. **Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design.** Final Report Submitted to The National Lime Association. 36 p. Arlington, US: NLA, 2004.

MARINHO, F.A.M. A técnica do papel filtro para a medição de sucção. *In:* ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: UFRGS, 1995 p.112-125.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R. **Influence of time between mixing and compaction on properties of lime stabilized expansive clay.** High. Res. Board, Bull. 304, Washington, DC, 1961.

NICHOLSON, P. G. **Soil Improvement and Ground Modification Methods.** Butterworth-Heinemann, 2014.

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PATIAS, J. **Avaliação do uso de solos não convencionais em estruturas de solo reforçado.** 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PAULA, A. M. V. **Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2003.

PEREIRA, V. R. **Influência da pressão da água intersticial na resistência ao arrancamento de geogrelha em solo coesivo.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PLÁCIDO, R. R. **Análises de campo e laboratório do comportamento ao longo do tempo de muros de solos tropicais finos reforçados com geossintéticos.** 2016. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

QUARIGUASI, J. B. F.; GONCALVES, H. B. B.; OLIVEIRA, F. H. L.; AGUIAR, M. F. P. Estudo da capacidade de suporte da estabilização de solos para pavimentação rodoviária. *In:* COBRAMSEG. XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2018, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: [s.n.], 2018.

RACANA, N; GOURVES, R; GREDIAC, M. **Mechanical behaviour of soil reinforced with geocells.** International Symposium on Earth Reinforcement. Japão, 2001.

RAMOS, L. B. da S. **Estudo do ganho de resistência e da estabilização química pela adição do coproduto KR no melhoramento de solos argilosos.**

2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANDRONI, S., CONSOLI, N. C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos. *In*: 15º CONGRESSO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: 15º Congresso de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, p. 97-186.

SILVA, A. M. **Estudo de parâmetros de compactação proctor no comportamento mecânico do solo.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SOARES, R. M. **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SOTO, M. A. **Comparação de Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaios de Solos Não Saturados.** 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TAFRESHI, M.S.N.; ASAKEREH, A. Strength evaluation of wet reinforced silty sand by triaxial test. **International Journal of Civil Engineerng**, [s.l.], v. 5, p. 274-283, 2007.

TEIXEIRA, S. H. C. **Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

USACE – United States Army Corp Engineers. **Soil stabilization for pavements - Mobilization Construction.** U. S. Army Corps of Engineers, Washington, 1984.

VIERO, A. C. **Geodiversidade do Estado de Santa Catarina: Programa geológico do Brasil.** Porto Alegre: CPRM, 2016.

VILLALBA, K. N. M. **Durabilidade, Rigidez e Avaliação do Ciclo de Vida de um Solo Estabilizado com Cal.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa