

DÉBORAH CASTRO E ALMEIDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SISTEMAS DE SOLOS
REFORÇADOS COM GEOTÊXTEIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga
Coorientador: Taciano Oliveira da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A447a
2021 Almeida, Déborah Castro e, 1995-
Análise do comportamento mecânico de sistemas de solos
reforçados com geotêxteis / Déborah Castro e Almeida. –
Viçosa, MG, 2021.
69 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 59-69.

1. Mecânica do solo. 2. Geotêxteis. 3. Resistência de
materiais. 4. Cisalhamento dos solos - Resistência.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

DÉBORAH CASTRO E ALMEIDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SISTEMAS DE SOLOS
REFORÇADOS COM GEOTÊXTEIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2021.

Assentimento:

Déborah Castro e Almeida
Autora

Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

*Dedico este trabalho
A Jesus Cristo, meu
Senhor e Salvador.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo.

Aos meus pais, Cober e Janaina, por me ensinarem os meus principais valores e pelo incentivo, apoio e suporte familiar que são fundamentais em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

Ao Lucas, meu amigo e companheiro, que trouxe apoio e alegria para esse período.

Aos meus irmãos, Daniel e Rebecca, por serem meus primeiros amigos e por todo companheirismo durante a vida.

Aos meus avós, Eber e Corina, por serem um esteio familiar e pelas constantes orações pela minha vida.

À Mara, Fernando e André, por me deixarem fazer parte do seu cotidiano e por me inserirem em sua família de forma tão generosa.

Ao professor Heraldo Nunes Pitanga, pela confiança em mim depositada, apoio, dedicação e orientação ao longo desse trabalho.

À professora Dra. Marcela Giacometti Avelar, pelo apoio técnico e colaboração imprescindível para a realização deste trabalho.

Aos amigos Kamila Lunz, Géssica Pereira e Mateus Henrique, pelas discussões e sugestões que engrandeceram este trabalho. Ao professor Roberto Aguiar, pelo apoio, conselhos e incentivo.

A todos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela atenção e disponibilidade sempre que necessário. Aos colegas do mestrado e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

À UFV e ao Departamento de Engenharia Civil (DEC), pela possibilidade de alcançar mais um grau acadêmico e pelo ensino de excelência desde a graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

*“Quem pôs a sabedoria no íntimo, ou quem deu
à
mente o entendimento?” JÓ 38:36*

*“Deus é que tem sabedoria e poder;
a ele pertencem o conselho
e o entendimento.” JÓ 12:13*

RESUMO

ALMEIDA, Déborah Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Análise do comportamento mecânico de sistemas de solos reforçados com geotêxteis.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientador: Taciano Oliveira da Silva.

Esta pesquisa teve por objetivo principal avaliar, a partir de experimentos laboratoriais, o comportamento mecânico de sistemas solo-geotêxtil, tendo como variáveis diferentes geotêxteis de reforço, solos, posições de inserção do reforço geossintético e energias de compactação. A análise do efeito da inserção dos geotêxteis nas propriedades mecânicas dos solos investigados foi baseada nos dados derivados dos ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) e de Resistência ao Cisalhamento Direto (τ_{pico}). Foram avaliados os comportamentos, frente aos mecanismos de reforço, de três diferentes solos. Foram também realizadas análises estatísticas das variáveis em estudo, aplicando-se testes de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney. De um modo geral, os resultados mostraram uma tendência de incremento da RCNC dos solos reforçados comparativamente aos não reforçados. Para o cenário que envolveu a avaliação do comportamento de diferentes solos, esse incremento foi dependente da mobilização do reforço, gerada pelas características de atrito do sistema responsáveis pela transferência de tensão do solo para o geotêxtil. Em relação aos distintos geotêxteis aplicados e às diferentes posições de localização destes elementos, notou-se que tais fatores não exerceram efeitos estatisticamente significantes sobre o parâmetro RCNC. Já quando analisadas as diferentes energias de compactação, observou-se que o aumento dessa energia levou ao incremento do contato do geossintético com o solo, aumentando as forças de atrito de interface e gerando maiores acréscimos de RCNC. Quando analisados os resultados referentes aos ensaios de resistência ao cisalhamento direto, percebeu-se que as mudanças de energia de compactação, solo e geotêxtil não exerceram efeitos estatisticamente significantes sobre o parâmetro τ_{pico} e que a inserção de geotêxteis não influenciou significativamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos sistemas estudados.

Palavras-chave: Solo-Geotêxtil. Geotêxteis. Resistência à Compressão Não Confinada. Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

ALMEIDA, Déborah Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2021.
Analysis of the mechanical behavior of soil systems reinforced with geotextile.
Adviser: Heraldo Nunes Pitanga. Co-Adviser: Taciano Oliveira da Silva.

The main objective of this research was to evaluate, experimentally, the mechanical / geotechnical behavior of soil-geosynthetic systems, evaluating the factors that may influence the different effects produced by different geotextiles, soils and the position of the reinforcement within the specimens. The experimental program included the performance of physical, chemical and mineralogical characterization tests of the three soils and the determination of the optimal compaction parameters through the Proctor compaction tests in standard, intermediate and modified energies. Having defined the optimal compaction parameters, test specimens were molded with and without the insertion of three geotextiles, two geotextile and one nonwoven geotextile. The analysis of the effect of the insertion of geotextiles on the mechanical properties of the investigated soils was based on the RCNC test and Shear Resistance (τ) test. The behaviors, with the reinforcement mechanisms, of soils with different granulometries and properties were evaluated, using soils being identified as Solo VS, Solo BR and Solo AERO and classified according to the MCT methodology as non-lateritic sandy (NA'), lateritic clay (LG ') and non-lateritic clay (NG'), respectively. In addition, statistics of the variables under study were analyzed, using the Kruskal-Wallis and Mann-Whitney tests. The characteristics of different reinforcement insertion positions were also analyzed. Overall, the results showed a trend of increasing unconfined compressive strength of reinforced mixtures compared to non-reinforced mixtures. Concerning the different soils, this increase was dependent on the mobilization of the reinforcement, generated by the friction characteristics of the system that lead to the transfer of tension from the soil to the reinforcement element. Regarding the different geotextiles and the different positions of location of these elements, it was noted that such predictors do not have significant effects on the RCNC parameter. When analyzing different compaction energies, it was observed that the growth of compaction energy led to an increase in the contact of the geosynthetic with the soil, increased as a protection against interface friction, and generating greater increases in RCNC. The τ tests showed the results the changes in compaction energy, soil and geotextile did

not have significant effects on the parameter τ and that the insertion of geotextiles did not complementarily influence the parameters of shear strength of the systems studied. In relation to the parameters, it was noted that the increase in the level of normal stress factors promoted the increase of shear stress.

Keywords: Soil-reinforced. Geosynthetics. Geotextiles. Unconfined Compressive Strength. Shear-Tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismo de restrição lateral provindo do geossintético.	23
Figura 2 – Mecanismo de melhoria da capacidade de carga com geossintético.....	24
Figura 3 – Mecanismo correspondente ao “Efeito Membrana” no geossintético.....	24
Figura 4 – Transferência de tensões de cisalhamento na interface solo-reforço.	27
Figura 5 – Talude de coleta de solo investigado na pesquisa: Solo BR.....	30
Figura 6 – Talude de coleta de solo investigado na pesquisa: Solo VS.....	31
Figura 7 – Talude de coleta de solo investigado na pesquisa: Solo AERO.....	31
Figura 8 – Geotêxteis empregados na pesquisa (aumento 10x): (a) Geotêxtil tecido T55; (b) Geotêxtil tecido T25; (c) Geotêxtil não tecido agulhado NT10.....	32
Figura 9 – Posicionamento do geotêxtil no interior dos corpos de prova do ensaio RCNC: (a) corpo de prova sem geotêxtil; (b) geotêxtil posicionado à 1/3 da base do corpo de prova (H/3); (c) Geotêxtil posicionado à 2/3 da base do corpo de prova (2H/3)	36
Figura 10 – Curva granulométrica do solo VS.....	38
Figura 11 – Curva granulométrica do solo BR.....	39
Figura 12 – Curva granulométrica do solo AERO	39
Figura 13 – Difratoograma correspondente ao solo BR	43
Figura 14 – Difratoograma correspondente ao solo VS	43
Figura 15 – Difratoograma correspondente ao solo AERO	44
Figura 16 – Microfotografia de amostra do Solo VS obtida no MEV (aumento 40x) .	45
Figura 17 – Microfotografia de amostra do Solo BR obtida no MEV (aumento 5000 x) .	45
Figura 18 – Microfotografia de amostra do Solo AERO obtida no MEV (aumento 3000 x)	45
Figura 19 – Curvas de compactação do Solo BR.....	46
Figura 20 – Curvas de compactação do Solo VS.....	46
Figura 21 – Curvas de compactação do Solo AERO	47
Figura 22 – Comparação entre os resultados de RCNC do solo BR.....	48
Figura 23 – Comparação entre os resultados de RCNC do solo VS.....	48
Figura 24 – Comparação entre os resultados de RCNC do solo AERO	49
Figura 25 – Planos de ruptura de ensaio RCNC para corpos de prova de solo BR. .	51
Figura 26 – Planos de ruptura de ensaio RCNC para corpos de prova de solo VS. .	51

Figura 27 – Planos de ruptura de ensaio RCNC para corpos de prova de solo AERO	52
Figura 28 – Diagrama de Caixa comparando a variabilidade da RCNC para as duas energias de compactação utilizadas nesta pesquisa.	53
Figura 29 – Diagrama de Caixa comparando a variabilidade da RCNC para os três solos utilizados nesta pesquisa.	54
Figura 30: Resistência ao cisalhamento de pico (τ_{pico}) para os corpos de prova do solo BR.	55
Figura 31: Resistência ao cisalhamento de pico (τ_{pico}) para os corpos de prova do solo VS.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos geotêxteis empregados neste trabalho.....	32
Tabela 2 – Ensaio de caracterização geotécnica.	34
Tabela 3 – Sistemas de classificação dos solos empregados na pesquisa.	34
Tabela 4 – Caracterização geotécnica dos solos pesquisados	38
Tabela 5 – Classificações textural e geotécnicas tradicionais dos solos pesquisados	40
Tabela 6 – Resultados da classificação MCT para os solos da pesquisa	41
Tabela 7 – Resultado da análise química dos solos obtidos por FRX.....	42
Tabela 8 – Parâmetros de compactação para as amostras de solo VS, BR e AERO	47
Tabela 9 – Testes de Mann-Whitney para RCNC	49
Tabela 10 – Testes de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney para RCNC.....	50
Tabela 11 – Testes de Mann-Whitney para RCNC	56
Tabela 12 – Testes de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney para τ_{pico}	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AERO	Solo referente à amostra coletada nas proximidades do Aeroporto de Viçosa
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Biotita
BR	Solo referente à amostra coletada à margem da Rodovia BR 120
D	Dolomita
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios – X
FRX	Fluorescência de Raios-X
Gi	Gibbsita
Go	Goethita
H	Hematita
IP	Índice de Plasticidade
K	Caulinita
kPa	kilopascal
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
M	Microclínio
MCT	Miniatura Compactada Tropical
ME	Método de Ensaio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NT10	Geotêxtil Não Tecido 10
ppm	Partes por milhão
Q	Quartzo
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
T25	Geotêxtil Tecido 25-25
T55	Geotêxtil Tecido 55-55
TRB	Transportation Research Board
UFV	Universidade Federal de Viçosa

VS Solo referente à amostra coletada nas proximidades da Vila Secundino
W Wollastonita.
Wót Teor de umidade ótimo.
 γ_d Peso específico aparente seco.
 $\gamma_{d\text{máx}}$ Peso específico aparente seco máximo.

LISTA DE SÍMBOLOS

∅ Diámetro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA	19
1.3	OBJETIVOS	21
1.3.1	Objetivo Geral	21
1.3.2	Objetivos Específicos.....	21
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Materiais.....	30
3.1.1	Solos	30
3.1.2	Geotêxteis.....	31
3.2	Métodos	33
3.2.1	Coleta e preparação das amostras de solo.....	33
3.2.2	Ensaio	34
3.2.2.1	Caracterização física e classificações geotécnicas	34
3.2.2.2	Análises química, mineralógica e morfológica	35
3.2.2.3	Ensaio de compactação	35
3.2.2.4	Ensaio de resistência à compressão não-confinada.....	35
3.2.3	Análises estatísticas	36
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Caracterização e Classificação dos solos	38
4.2	Ensaio de Compactação	46
4.3	Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada.....	48
4.4	Ensaio de Cisalhamento Direto.....	54
5.	CONCLUSÕES.....	58
	REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, a procura por materiais alternativos em obras de infraestrutura tem crescido consideravelmente. Esse crescimento se deve à constante busca pela superação de desafios na implantação de grandes obras civis, em locais ou terrenos que apresentam características geotécnicas inadequadas. Diante do exposto, os materiais sintéticos ocupam espaços significativos, unindo as características de simplicidade em relação aos aspectos construtivos às suas múltiplas funções de atuação (MARTINS, 2000; VILAR E BUENO, 2008; MARQUES E SILVA, 2020).

Embora os geossintéticos tenham sido introduzidos no Brasil na década de 1970, apenas duas décadas depois começaram a ser usados mais amplamente em obras de infraestrutura na engenharia civil. Atualmente, esses materiais são cada vez mais utilizados devido às vantagens que estes proporcionam. Em comparação com as soluções tradicionais, os aspectos que conduzem ao aumento do uso de geossintéticos incluem versatilidade, facilidade de uso, excelente desempenho e baixo custo (COSTA et al., 2008; BANDEIRA E SILVA, 2019).

O geotêxtil pode ser caracterizado pelo arranjo textural entre as fibras e/ou filamentos, pela natureza do polímero presente, pela tecnologia de fabricação e pelas suas aplicações geotécnicas (KOERNER, 1998). Considerando-se o seu potencial de aplicação geotécnica como elemento de reforço, Benjamim (2006) afirma que o processo de reforço consiste na inserção de elementos com resistência à tração elevada, no maciço de solo. Em termos gerais, a técnica de reforço de solos fundamenta-se na união de materiais com funções complementares e propriedades distintas, sendo eles o solo, que comumente apresenta boa resistência à compressão, e o reforço, que apresenta elevada resistência à tração. A utilização de elementos de reforço leva a uma redistribuição das tensões e deformações do maciço, podendo resultar em um maciço mais resistente e menos deformável comparado ao maciço de solo natural (BENJAMIN, 2006; MENDES, PALMEIRA E MATEUS, 2007; PALMEIRA, 2009).

O desempenho global de um solo reforçado com geossintético está relacionado a fatores como as propriedades do solo, do reforço geossintético e da

interface solo-geossintético, sendo a interação solo-reforço fundamental para o comportamento das estruturas de solo reforçado (MARTINS, 2000; PALMEIRA, 2009).

Com base na importância de se conhecer parâmetros quantificadores das respostas mecânicas de sistemas de solos reforçados e de se conhecer os fatores intervenientes que influenciam o desempenho dessas estruturas, surge o interesse em se desenvolver pesquisas e observações relacionadas ao comportamento mecânico, sob a perspectiva geotécnica, desses sistemas, visando contribuir no estado da arte.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em um solo reforçado, diversos fatores podem influenciar no desempenho de sua estrutura. Um desses fatores é a interação solo-reforço, que pode ser muito complexa, dependendo da natureza e propriedades do reforço e do solo (PALMEIRA, 2009; GÓNGORA E PALMEIRA, 2016).

Algumas normas técnicas sobre projetos para estruturas reforçadas com geossintético recomendam o uso de solos granulares. Essas diretrizes são baseadas na má drenagem de solos de granulação fina, que pode levar à perda de resistência ao cisalhamento do solo. Porém, solos com granulometria fina reiteradamente apresentam bons parâmetros de resistência ao cisalhamento (PATIAS, 2005; BENJAMIN, BUENO E ZORNBERG, 2007), realçando à necessidade de estudos que avaliem a utilização de solos não granulares em estruturas reforçadas com geossintéticos.

Outro parâmetro que influencia nas propriedades de uma estrutura solo-reforço é o comportamento mecânico dos geossintéticos. Os parâmetros mecânicos dos geotêxteis dependem do material sintético utilizado na sua confecção e do processo de fabricação da manta. Geralmente, geotêxteis tecidos, cuja manta assume uma configuração estrutural ordenada, transmitem diretamente aos fios os esforços de tração, apresentando uma resposta mais rápida às solicitações impostas, e não gerando grandes deformações iniciais. Em contrapartida, os não-tecidos, devido à configuração aleatória dos fios, admitem uma deformação inicial até que os seus fios resistam efetivamente ao esforço aplicado (PALMEIRA, 1981; BUENO, CONTANZI E ZORNBERG, 2005; BECKER E NUNES, 2015).

Jones (2000) concluiu que geotêxteis mais rígidos levam a maiores tensões no solo e no reforço, já que o equilíbrio de tensões é atingido com menores deformações. Zheng et al. (2021) ainda constatam que a rigidez à tração do reforço interfere fortemente nas características dos solos reforçados por geossintéticos. Mendes, Araújo e Palmeira (2007) também verificam uma profunda influência da rigidez do reforço nas propriedades de estruturas reforçadas, indicando que, correntemente, a maior rigidez do reforço leva a uma maior mobilização de forças de tração.

Monte (2016) atesta que o uso do reforço se mostra eficiente quando este é posicionado em regiões que apresentam deformações devidas aos esforços de tração e quando orientado na direção principal destas deformações. Com base nas proposições de Love (1929), sabe-se que há o espraiamento de tensões em profundidade, ou seja, os valores das tensões verticais diminuem com a profundidade. Sendo assim, percebe-se que reforços inseridos em diferentes posições recebem solicitações distintas. Sieira (2003) ainda afirma que, para que haja o correto melhoramento do desempenho do solo, o geotêxtil deve ser solicitado à tração devido às tensões impostas.

Apesar das diversas contribuições de pesquisas que buscam avançar no conhecimento do comportamento mecânico/geotécnico de solos reforçados por geossintéticos, sabe-se que tais sistemas possuem comportamentos complexos que justificam investigações adicionais. Como visto, são diferentes os fatores que influenciam na eficiência da aplicação do reforço geossintético, os quais não se restringem às características mecânicas do geossintético e do solo. Diante disso e considerando que a busca por materiais alternativos é crescente em obras civis, dado que a extração de materiais convencionais e a exploração de depósitos naturais são onerosas (VILAR E BUENO, 2008), salienta-se a necessidade de estudos que contribuam para o conhecimento técnico-científico relacionado aos sistemas de solos reforçados por geossintéticos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Sabendo-se que geotêxteis produzidos a partir de matérias-primas diferentes apresentam propriedades distintas e considerando o fato, segundo Patias (2005), que fatores como a granulometria, morfologia e composição químico-mineralógica do solo interferem nas características mecânicas de solos reforçados com geossintéticos, o presente trabalho teve como objetivo geral analisar, a partir de análises estatísticas e ensaios de resistência à compressão não-confinada (RCNC), o efeito da inserção de três geotêxteis em três solos de diferentes granulometrias, sendo o reforço geotêxtil colocado em duas posições distintas no interior do solo compactado, além de analisar, a partir de análises estatísticas e ensaios de cisalhamento (τ), o efeito da inserção de três geotêxteis em dois solos de diferentes granulometrias.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos desta pesquisa, relacionados ao objetivo geral, citam-se:

- Avaliar, estatisticamente, o comportamento mecânico de solos e de sistemas solo-geotêxtil, através do ensaio de Resistência à Compressão Não-Confinada e Resistência ao cisalhamento;
- Analisar, a partir de análises estatísticas, as diferenças de comportamento mecânico de sistemas solo-geossintético, considerando-se diferentes tipos de geotêxteis e diferentes posições de inserção do reforço;
- Analisar, por meio de testes estatísticos, a influência da utilização de diferentes solos tropicais no comportamento mecânico de sistemas solo-geotêxtil;
- Analisar, por meio de testes estatísticos, a influência da utilização de energias de compactação no comportamento mecânico de sistemas solo-geotêxtil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Introdução

Na engenharia civil, a construção de pavimentos e obras geotécnicas tradicionais requer materiais que cumpram as exigências das normas de construção. Contudo, muitas vezes os materiais disponíveis não atendem a essas especificações. Por isso, há uma constante busca por alternativas construtivas que intentem sanar esse problema (NAEINI E MIRZAKHANLARI, 2009; NAEINI E MOAYED, 2009).

A utilização de solo reforçado por geossintéticos tem sido amplamente difundida na construção de muros de contenção, aterros, barragens de terra, viadutos, camadas estruturais de pavimentos e outras aplicações de engenharias geotécnica e de pavimentação (CHOUDHARY, JHAM E GILL, 2011). Isso porque, segundo Perkins (1999), os mecanismos de atuação mecânica do reforço podem gerar um crescimento nas tensões efetivas principais e, assim, aumentar a rigidez do maciço quando há uma interação adequada entre o solo e o geossintético.

Em relação aos geossintéticos utilizados em pavimentos, esses são usados em estradas pavimentadas e não pavimentadas para reforçar o subleito ou a camada de base, no intuito de melhorar o seu desempenho frente às solicitações impostas pelo tráfego de veículos e pelas intempéries (NAIR E LATHA, 2009). Os geotêxteis, em particular, podem ser utilizados com a finalidade de redistribuir as cargas no maciço devido a sua elevada resistência à tração e, assim, aumentar a capacidade de carga dos maciços reforçados (AGGARWAL, 2011). Sua utilização também pode levar à melhoria do desempenho do pavimento, proporcionando o aumento da vida útil, a redução da espessura das camadas estruturais e a minimização dos custos de manutenção (KUMAR E RAJKUMAR, 2012).

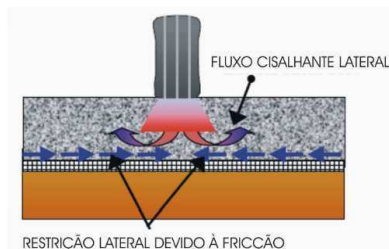
Diversas pesquisas constataam que o comportamento mecânico de uma estrutura de solo reforçado por geossintético depende, intrinsecamente, da interação entre esses materiais e de suas respectivas características (BENDER E BARENBERG, 1978; KINNEY E BARENBERG, 1982; PERKINS, 1999; HOLTZ et al., 1998; BENJAMIN, BUENO E ZORNBERG, 2007; ANTUNES, 2008; PALMEIRA, 2009; ZORNBERG, 2013; MONTE, 2016; GÓNGORA E PALMEIRA, 2016; MARQUES E SILVA, 2020). No caso dos geotêxteis, sabe-se ainda que tal interação só é possível quando há o processo de ancoragem com uma mobilização progressiva do atrito solo-

geotêxtil, e que as características de interação solo-reforço são fortemente influenciadas pela granulometria do solo, rugosidade do geotêxtil, tensão confinante e características de contato entre esses materiais (DOUGLAS E KELLY, 1986; BOURDEAU et al., 1988; PENHA, 1999; MONTE, 2016; GÓNGORA E PALMEIRA, 2016; MARQUES E SILVA, 2020).

2.2 Mecanismo de atuação do reforço geossintético

A função reforço é regida pela interação entre as camadas de solo e de geossintético, e, basicamente, é caracterizada por três mecanismos distintos (Perkins, 1999). Historicamente, a principal função de reforço atribuída aos geossintéticos em pavimentos e obras geotécnicas está relacionada à restrição lateral ou ao confinamento. Este mecanismo foi inicialmente descrito por Bender e Barenberg (1978) e posteriormente elaborado por Kinney e Barenberg (1982). A utilização do geossintético em uma camada de solo permite que se desenvolva atrito na interface entre o geossintético e o solo, gerando um mecanismo de resistência ao esforço de cisalhamento nessa interface. Essa tensão cisalhante é transmitida do solo para o geossintético, que é, então, tracionado. A rigidez à tração do geossintético limita as deformações laterais na camada de solo, atuando no retardamento do desenvolvimento da deformação de tração lateral na base adjacente ao geossintético. Assim, basicamente, este mecanismo de reforço corresponde à redução direta do espriamento lateral (BENDER E BARENBERG, 1978; KINNEY E BARENBERG, 1982; HOLTZ et al., 1998; PERKINS, 1999; ANTUNES, 2008; ZORNBERG, 2013; MONTE, 2016). A Figura 1 apresenta o respectivo mecanismo de reforço.

Figura 1 – Mecanismo de restrição lateral provindo do geossintético.

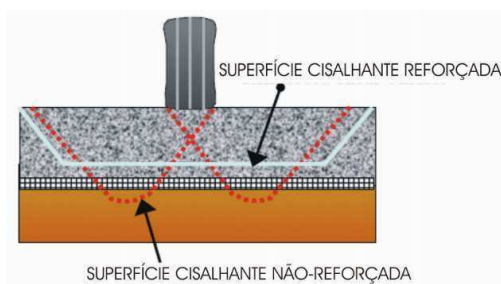


Fonte: ANTUNES (2008).

Outro mecanismo é o aumento da capacidade de suporte gerada pelo reforço. Esse mecanismo é alcançado pois o geossintético gera uma maior absorção das

cargas aplicadas, oferecendo uma capacidade de carga superior ao solo. O reforço gerado pelo geossintético pode reduzir as tensões de cisalhamento e fornecer confinamento vertical. Além disso, o geossintético torna a camada reforçada mais rígida, levando a uma distribuição de tensões verticais mais uniforme (HOLTZ et al., 1998; PERKINS, 1999; ANTUNES, 2008; ZORNBERG, 2013; MONTE, 2016). A Figura 2 apresenta o respectivo mecanismo de reforço.

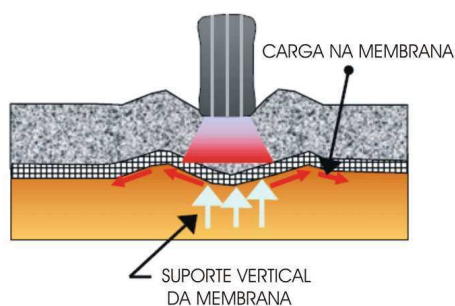
Figura 2 – Mecanismo de melhoria da capacidade de carga com geossintético.



Fonte: ANTUNES (2008).

Por fim, o terceiro mecanismo de reforço é baseado no conceito de um aumento das tensões verticais resultante de cargas desenvolvidas em uma membrana deformada. Este efeito é induzido por deformações verticais causadas por cargas solicitantes. Os geossintéticos, devido a sua elevada rigidez à tração, mobilizam esforços de tração e reduzem a tensão vertical sobre a camada adjacente (PERKINS, 1999; ANTUNES, 2008; ZORNBERG, 2013; MONTE, 2016). A Figura 3 apresenta o respectivo mecanismo de reforço.

Figura 3 – Mecanismo correspondente ao “Efeito Membrana” no geossintético.



Fonte: ANTUNES (2008).

2.3 Fatores que influenciam no comportamento mecânico de solos reforçados

Sabe-se que a técnica de solos reforçados tem sido amplamente reconhecida como uma alternativa a projetos convencionais de estruturas geotécnicas. Tal técnica envolve a inclusão de reforço, como geossintéticos, entre as camadas de solo compactado, oferecendo resistência à tração ao maciço de solo. Neste processo, os geossintéticos interceptam as superfícies potenciais de ruptura que tendem a se formar no interior da estrutura de solo, desenvolvendo forças de tração e fornecendo estabilidade ao maciço de solo (PALMEIRA, 2009; MORSY E ZORNBERG, 2021).

A interação solo-reforço é o princípio para o comportamento estrutural dos solos reforçados, porém tal interação está relacionada, entre outras coisas, a fatores como as propriedades do solo e do reforço, carga aplicada e posição de inserção do reforço na amostra de solo (MARTINS, 2000; PALMEIRA, 2009; KOERNER, 2012; INFANTE et al., 2016).

2.3.1 Interação Solo - Reforço

A interação solo-reforço é extremamente importante para o projeto e desempenho de estruturas de solo reforçado. Considera-se que essa interação pode ser muito complexa, dependendo da natureza e das características do reforço e do solo (PALMEIRA, 2009; MEHRAD E REZA, 2011; VANGLA E LATHA, 2015; PRAVEEN E KURREN, 2020).

De acordo com Praveen e Kurren (2020), a interação entre o solo e os materiais geossintéticos é influenciada pelas forças de atrito interfacial desenvolvidas entre eles, sendo esta interação um dos fatores que regem o comportamento de estruturas de solo reforçado. Além disso, alguns autores indicam que o mecanismo de falha relacionado a estruturas de solo reforçado por geossintéticos pode ocorrer pelo deslizamento na interface solo-geotêxtil. Sendo assim, a estabilidade do solo reforçado depende da transferência de carga que ocorre entre o maciço e o reforço, devido à aderência entre ambos (PATIAS, 2005; MEHRAD E REZA, 2011; VANGLA E LATHA, 2015).

Edil, Bosscher e Sundberg (2006) estudaram a influência do tamanho do grão e da rugosidade da superfície do reforço no comportamento de transferência de

tensões de cisalhamento na interface solo-geossintético. Eles concluíram que o aumento da rugosidade da interface solo-reforço leva a um acréscimo na resistência da interface. Além disso, observaram que a zona de transferência da tensão de cisalhamento cresce com o aumento da rugosidade da interface.

Patias (2005) verificou o desempenho de inclusões de reforços no que se refere a parâmetros de resistência ao cisalhamento. Nesse estudo, observou-se que o aumento da resistência de um maciço reforçado ocorre através da transferência de carga existente entre o maciço e as inclusões de reforço. Martins (2000) destaca que a tensão cisalhante desenvolvida na interface é mobilizada pelo deslocamento relativo do sistema solo-reforço.

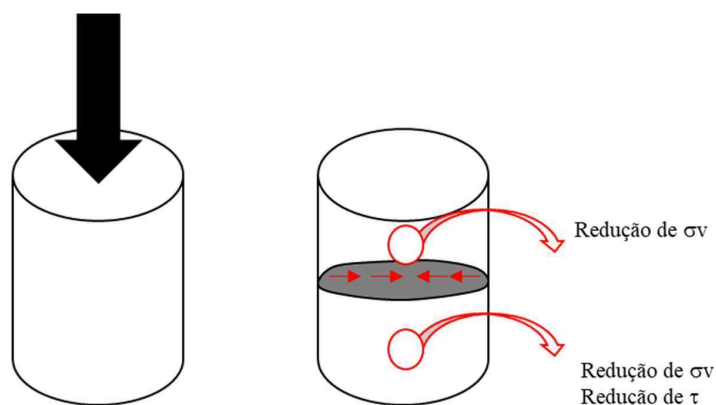
Alagiyawanna et al. (2001) realizaram testes de arrancamento de geossintéticos em sistemas solo-reforço e concluíram que a mobilização da tensão de aderência solo-reforço depende da deformação do reforço, em que a tensão de aderência aumenta linearmente até que o geossintético se deforme de 3% a 4%. Assim, a tensão de aderência diminui até a ruptura do elemento de reforço. Essa redução foi observada quando o deslizamento ocorreu na interface solo-reforço.

Infante et al. (2016), através de ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo reforçadas com geossintéticos, concluíram que fatores como o tamanho de partícula dos solos, a densidade dos solos e o tipo de geossintético podem influenciar nas características da interação solo-reforço.

Praveen e Kurren (2020) investigaram as características de transmissão de esforços na interface entre um solo areno-argiloso e diferentes tipos de elementos de reforço. Neste estudo, os autores observaram que a superfície plana de geotêxteis pode não ser capaz de fornecer a aderência suficiente entre as partículas de solo e o reforço geossintético.

A interação entre as camadas de solo e de geossintético pode causar uma mudança no estado de tensões e de deformações do solo, levando a uma distribuição mais ampla da tensão vertical na camada de solo abaixo do reforço geossintético. Outro mecanismo de reforço em solos reforçados é o aumento da capacidade de suporte alcançado pela maior absorção das cargas aplicadas, tornando, assim, a camada reforçada mais rígida e levando a uma distribuição de tensões verticais mais uniforme (Figura 4) (HOLTZ et al., 1998; PERKINS, 1999; ANTUNES, 2008; ZORNBERG, 2013; MONTE, 2016; PLÁCIDO, 2016).

Figura 4 – Transferência de tensões de cisalhamento na interface solo-reforço.



Fonte: Adaptado de ZORNBERG (2013).

Com base no exposto, observa-se que a interação solo-geossintético é de extrema importância para os mecanismos de reforço desenvolvidos em estruturas de solo reforçado com geossintético. Conseqüentemente, os mecanismos de reforço e os fatores que influenciam suas características devem ser estudados e reconhecidos.

2.3.2 Tipo de Solo

O desempenho da estrutura de solo reforçado depende do atrito ou aderência entre o solo e o material de reforço. Portanto, dependendo do tipo de solo, a eficiência no desempenho do elemento de reforço será maior (PATIAS, 2005; OLIVEIRA et al., 2016; PIEROZAN, 2018).

Teixeira (2003) afirma que solos granulares bem graduados apresentam uma resistência maior que os solos mal graduados. Segundo o autor, além dos solos bem graduados apresentarem um melhor intertravamento entre os seus grãos, os grãos maiores deslizam com maior dificuldade quando solicitados pelos elementos de reforço. Os grãos maiores movimentam-se em direção aos grãos menores, formando progressivamente uma massa firme entre o solo e o elemento geossintético, aumentando assim a resistência do sistema.

Segundo Benjamin (2006), a insuficiência de desempenho do solo não granular ocorre devido ao fato de que um baixo ângulo de atrito interno resulta em maiores forças horizontais resistidas pelo material de reforço, levando a um menor atrito de interface.

Diversos estudos e orientações referentes à utilização de solos granulares em estruturas reforçadas têm origem em países de clima temperado (EHLICH, 1998; ELIAS et al., 2001; KOERNER E SOONG, 2001; ZORNBERG, 2013). Esses locais apresentam condições específicas em que os solos finos, geralmente de origem sedimentar, comumente apresentam elevados graus de plasticidade e de saturação, gerando baixa resistência e elevada deformabilidade (EHLICH, 1998). Contudo, pode-se dizer que os solos tropicais possuem peculiaridades pedogenéticas se comparados aos solos de clima temperado. Os solos lateríticos, por exemplo, comumente possuem elevada resistência mecânica e estabilidade química (PATIAS, 2005).

Desse modo, verifica-se que as características do solo influenciam diretamente na transferência de cargas para o elemento de reforço e que tal transferência é fundamental para o comportamento mecânico das estruturas reforçadas.

2.3.3 Tipo de Reforço

Diversos estudos indicam que o comportamento mecânico dos geossintéticos interfere no comportamento estrutural do solo reforçado (PALMEIRA, 1981; EHLICH, 1998; JONES, 2000; BUENO, CONTANZI E ZORNBERG, 2005; BENJAMIN, 2006; HUFENUS et al., 2006; MENDES, PALMEIRA E MATEUS, 2007; BECKER E NUNES, 2015).

O tipo de reforço utilizado influencia diretamente na magnitude dos deslocamentos e na mobilização de tensões no reforço. A rigidez à tração do reforço interfere nas características dos solos reforçados, sendo que geotêxteis mais rígidos induzem a uma maior mobilização de forças de tração e em maiores tensões no solo e no reforço (EHLICH, 1998; JONES, 2000; BENJAMIN, 2006; MENDES, PALMEIRA E MATEUS, 2007; MIRMORADI E EHLICH, 2015).

Palmeira (1981), Bueno, Contanzi e Zornberg (2005) e Becker e Nunes (2015) destacam que os parâmetros mecânicos dos geotêxteis dependem do processo de fabricação do elemento e dos materiais sintéticos utilizados em sua fabricação. Esses autores indicam que os geotêxteis tecidos apresentam uma resposta rápida às tensões impostas e não produzem grandes deformações iniciais.

Por outro lado, devido à configuração aleatória dos fios, os geotêxteis não tecidos permitem a deformação inicial até que os fios resistam efetivamente à força aplicada.

Clancy e Naughton (2010) e Portelinha (2012) afirmam que geotêxteis não tecidos, por possuírem funções de drenagem interna, favorecem no processo de interação solo-reforço, salientando os casos onde são utilizados solos de baixa permeabilidade e a drenagem interna não é alcançada pelo próprio solo.

Cabe ainda destacar que a eficácia do elemento de reforço também é definida pela devida transmissão de carga aos materiais. Koerner (2012) afirma que o comportamento em relação à tensão-deformação de alguns geotêxteis pode ser afetado pelo confinamento do solo, principalmente em geotêxteis não tecidos. Mendes, Palmeira e Mateus (2007) concluem que a rigidez à tração de um geotêxtil não tecido pode ser aumentada por causa do confinamento em uma massa de solo.

2.3.4 Efeitos de Compactação

A compactação de um solo é o processo que visa reduzir o volume de vazios do solo e conseqüentemente melhorar suas características, como permeabilidade, resistência ao cisalhamento, compressibilidade e absorção de água (BENJAMIN, 2006). Em estruturas de solo reforçado, as características de compactação do sistema podem influenciar na mobilização do reforço. Teixeira (2003) e Ferreira (2007) constataram em seus estudos que a elevação do grau de compactação do solo causou um aumento progressivo na resistência ao arrancamento de estruturas solo-reforço. Isto ocorreu porque houve uma melhora do contato do geossintético com o solo, incrementando as forças de atrito de interface.

Oliveira et al. (2016), através de ensaios de resistência à compressão não confinada, mostraram que o acréscimo de resistência devido à inserção do reforço não foi proporcional ao aumento da energia de compactação. A resposta mecânica do sistema solo compactado-reforço depende do tipo de solo considerado e da energia de compactação adotada no ensaio, ressaltando a interferência desses fatores na interação solo-reforço.

Kakuda (2005) constatou em sua pesquisa que o aumento no grau de compactação proporciona maiores valores de resistência ao arrancamento em estruturas solo-reforço e que maiores valores no grau de compactação resultam a maiores deslocamentos localizados para arrancar um elemento de reforço.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para atendimento aos ensaios de laboratório do programa experimental desta pesquisa foram utilizadas amostras de solos tropicais e geotêxteis tecidos e não tecidos.

3.1.1 Solos

No programa experimental desta pesquisa foram utilizados três diferentes solos, sendo eles:

- a) Solo BR: solo residual maduro de grande extensão territorial no relevo do município de Viçosa-MG, que apresenta uma coloração vermelho-amarelada, blocos bem individualizados e aspecto poroso. Amostra de solo coletada do horizonte B de um talude de corte localizado à margem da Rodovia BR 120, nas proximidades do trevo de acesso ao campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV) (Figura 5), com coordenadas geográficas de Latitude $20^{\circ}47'31.74''S$ e Longitude $3.42^{\circ}50'17.96''W$;

Figura 5 – Talude de coleta de solo investigado na pesquisa: Solo BR



Fonte: A autora (2021).

- b) Solo VS: solo residual jovem (saprolítico) de coloração acinzentada. Amostra de solo coletada de um talude de corte localizado na Vila Secundino, no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV)

(Figura 6), com coordenadas geográficas de Latitude $20^{\circ}45'47.82''S$ e Longitude $42^{\circ}51'29.76''O$;

Figura 6 – Talude de coleta de solo investigado na pesquisa: Solo VS



Fonte: A autora (2021).

- c) Solo AERO: solo residual jovem de grande extensão territorial no relevo do município de Viçosa-MG, apresentando uma coloração rosada. Amostra de solo coletada do horizonte C de um talude de corte localizado à margem da Rodovia BR 120, nas proximidades do Aeroporto de Viçosa - MG (Figura 7), com coordenadas geográficas de Latitude $20^{\circ}45'19,80'' S$ e Longitude $42^{\circ}50'26,30'' W$.

Figura 7 – Talude de coleta de solo investigado na pesquisa: Solo AERO



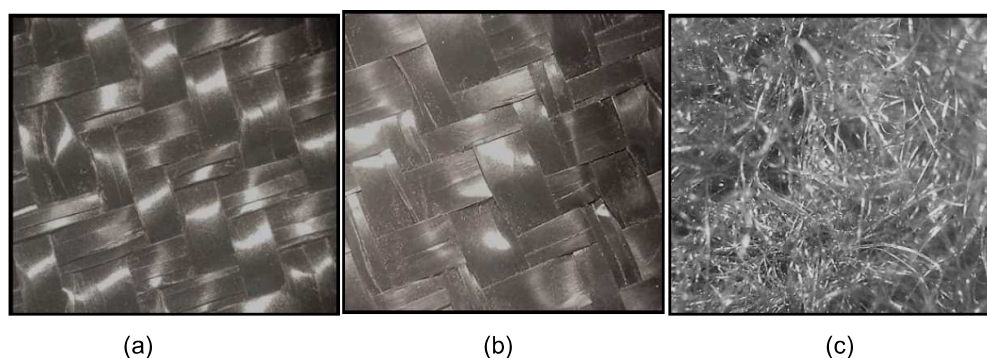
Fonte: A autora (2021).

3.1.2 Geotêxteis

Os geotêxteis analisados nesta pesquisa, apresentados na Figura 8, foram duas amostras de geotêxteis tecidos biaxiais constituídos de laminetes de polipropileno, denominados neste estudo por meio das siglas T55 (Figura 8a) e T25

(Figura 8b), e uma amostra de geotêxtil não tecido agulhado de poliéster, representado pela sigla NT10 (Figura 8c).

Figura 8 – Geotêxteis empregados na pesquisa (aumento 10x): (a) Geotêxtil tecido T55; (b) Geotêxtil tecido T25; (c) Geotêxtil não tecido agulhado NT10.



Fonte: A autora (2021).

As características tecnológicas destes geotêxteis, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos geotêxteis empregados neste trabalho

PROPRIEDADE		T55	T25	NT10
Espessura Nominal (mm)		0,93	0,66	1,99
Massa por unidade de área (g/m ²)		244	117	210
Resistência à tração nominal (kN/m)	Direção longitudinal	55	25	10
	Direção transversal	55	25	9
Deformação na resistência à tração nominal (%)	Direção longitudinal	≤ 15	≤ 15	>50
	Direção longitudinal	≤ 15	≤ 15	>50

Fonte: A autora (2021).

Em relação aos geotêxteis foram utilizados dois geotêxteis tecidos (T55 e T25) e um geotêxtil não tecido (NT10). Sabe-se que geotêxteis não tecidos fornecem a função de drenagem ao maciço reforçado e que a melhor qualidade de drenagem leva a uma melhor estabilidade dos solos reforçados ao dissipar as pressões de água dos poros (PORTELINHA E ZORNBERG, 2017).

Vê-se ainda que os geotêxteis utilizados nesta pesquisa possuem distintas resistências à tração nominal, sendo o geotêxtil T55 aquele que apresenta o maior valor deste parâmetro e o geotêxtil NT10 o que apresenta o menor valor de resistência à tração nominal. Acredita-se que a rigidez à tração do reforço interfere nas

características dos solos reforçados por geossintéticos, onde, correntemente, a maior rigidez do reforço leva a uma maior mobilização de forças de tração do mesmo, implicando na inibição do desenvolvimento de tensões de tração no solo e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas do solo reforçado (MENDES, ARAÚJO E PALMEIRA, 2007; ZHENG ET AL., 2021).

Por fim, observa-se que o geotêxtil NT10 possui maior deformação na resistência à tração nominal quando comparado aos demais geotêxteis estudados. Lopes e Shukla (2015) afirmam que a mobilização da resistência ao cisalhamento entre solos e geotêxteis é um fenômeno bidimensional e é fortemente afetada pela extensibilidade dos geotêxteis. Geotêxteis são materiais extensíveis, e os deslocamentos ao longo destes reforços possuem dois componentes, um correspondente ao movimento relativo entre o reforço e o solo circundante (deslocamento por cisalhamento na interface solo-reforço) e outro devido ao alongamento do reforço. Sendo assim, o maior grau de deformação do geotêxtil leva a uma mobilização da resistência da interface menos eficaz (PINHO – LOPES E LOPES, 2021).

3.2 Métodos

Os métodos contemplados no programa experimental de pesquisa visaram principalmente a caracterização e classificação geotécnica dos solos, as caracterizações química, mineralógica e morfológica dos solos, a determinação dos parâmetros ótimos de compactação dos solos e a determinação das propriedades mecânicas dos solos reforçados com diferentes geotêxteis e não reforçados.

3.2.1 Coleta e preparação das amostras de solo

Para atendimento ao programa experimental desta pesquisa, foram coletadas amostras deformadas representativas dos solos AERO, BR e VS, de acordo com a NBR 9604 (ABNT, 2016a). Posteriormente, foram preparadas amostras conforme as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016b) para a realização dos ensaios de caracterização geotécnica.

3.2.2 Ensaio

3.2.2.1 Caracterização física e classificações geotécnicas

A Tabela 2 apresenta os ensaios e as respectivas normas técnicas referentes à caracterização geotécnica utilizada nesta pesquisa.

Tabela 2 – Ensaio de caracterização geotécnica.

IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS	NORMA
Análise Granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016c)
Massa Específica dos Sólidos	ME 093 (DNER, 1994a)
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016d)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016e)

Fonte: A autora (2021).

Os solos foram classificados de acordo com sua textura e com os sistemas tradicionais de classificação geotécnica, a saber, Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e Transportation Research Board (TRB). Considerando-se as peculiaridades dos solos tropicais, também foi aplicada a metodologia de classificação MCT – Miniatura Compactado Tropical (NOGAMI E VILLIBOR, 1981). A Tabela 3 apresenta os sistemas de classificação utilizados e as respectivas normas técnicas referentes.

Tabela 3 – Sistemas de classificação dos solos empregados na pesquisa.

IDENTIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO	NORMA
Textural	NBR 6502 (ABNT, 1995)
Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)	D 2487 – 11 (ASTM, 2011)
Transportation Research Board (TRB)	M 145 - 91 (AASHTO, 2008)
Miniatura Compactado Tropical (MCT)	CLA 259 (DNER, 1996)

Fonte: A autora (2021).

3.2.2.2 Análises química, mineralógica e morfológica

Com o intuito de complementar as caracterizações geotécnicas com a identificação dos elementos e compostos químicos, dos minerais e da morfologia das partículas dos solos investigados, foram realizados, respectivamente, os ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.2.2.3 Ensaio de compactação

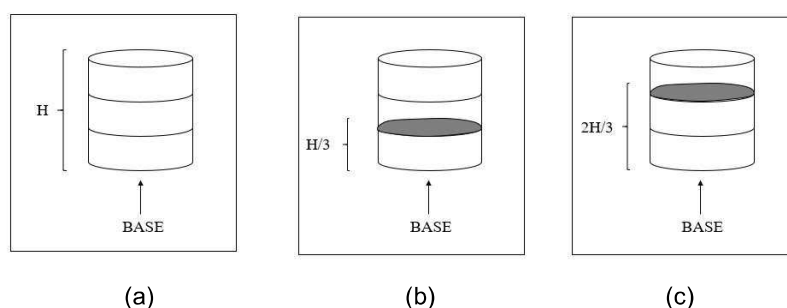
Para a determinação da curva de compactação e dos parâmetros ótimos de compactação (teor ótimo de umidade – $W_{ót}$ e peso específico aparente seco máximo - $\gamma_{dmáx}$) dos solos investigados, nas energias Proctor normal e modificado, seguiu-se o protocolo prescrito pela NBR 7182 (ABNT, 2016f).

3.2.2.4 Ensaio de resistência à compressão não-confinada

Os ensaios de Resistência à Compressão Não-Confinada (RCNC) foram realizados para as amostras de solo reforçadas e não reforçadas conforme a metodologia determinada pela NBR 12770 (ABNT, 1992).

Em relação à posição de colocação dos geotêxteis, esses foram inseridos entre as camadas compactadas em duas configurações distintas: entre a primeira e a segunda camadas compactadas (Figura 9b), isto é, a 1/3 da base do cilindro (H/3); após a segunda camada compactada, a 2/3 da base do cilindro (2H/3) (Figura 9c). Para tanto, decidiu-se compactar tanto as amostras sem reforço quanto as reforçadas em três camadas.

Figura 9 – Posicionamento do geotêxtil no interior dos corpos de prova do ensaio RCNC: (a) corpo de prova sem geotêxtil; (b) geotêxtil posicionado à 1/3 da base do corpo de prova ($H/3$); (c) Geotêxtil posicionado à 2/3 da base do corpo de prova ($2H/3$)



Fonte: A autora (2021).

3.2.3 Análises estatísticas

Inicialmente, realizou-se a verificação da Normalidade dos dados por meio de testes de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov, através da utilização do software estatístico Minitab 16®. Na interpretação deste teste, verificou-se o parâmetro valor prova (valor-p, p-value ou significância), que pode ser interpretado como a medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição Normal, de modo que: (i) se $\text{valor-p} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , ou seja, não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição Normal; (ii) se $\text{valor-p} > \alpha$, não se rejeita H_0 , ou seja, a distribuição Normal é uma distribuição possível para o conjunto de dados em questão. O teste de Normalidade foi realizado com grau de confiança de 95% [nível de significância (α) de 5%].

Foram ainda realizados testes não paramétricos uma vez que os resultados não apresentaram distribuição normal ($p < 0,05$). O teste de Kruskal-Wallis é um método não paramétrico utilizado para comparar três ou mais populações. Ele é usado para testar a hipótese nula de que todas as populações possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos duas das populações possuem funções de distribuição diferentes. Se o $\text{valor-p} \leq 0,05$, então a hipótese nula pode ser rejeitada. Neste aspecto, o teste de Kruskal-Wallis foi realizado para verificar se houve diferença significativa entre as médias dos parâmetros analisados [Resistência à Compressão Não-Confinada (RCNC) e Resistência ao Cisalhamento de Pico (τ_{pico})], considerando-se a interveniência dos fatores solo e geotêxtil.

O teste de Mann-Whitney é baseado nos postos dos valores obtidos combinando-se duas amostras. Se o valor de p for menor ou igual ao nível de significância (0,05),

rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que a diferença entre as medianas da população é estatisticamente significativa. Neste aspecto, o teste de Mann-Whitney foi realizado para verificar se houve diferença significativa entre as médias dos parâmetros analisados [Resistência à Compressão Não-Confinada (RCNC) e Resistência ao Cisalhamento de Pico (τ_{pico})], considerando-se a interveniência dos fatores posição de inserção do geotêxtil e energia de compactação aplicada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização e Classificação dos solos

Na Tabela 4, apresenta-se o resultado da caracterização geotécnica dos solos empregados na pesquisa.

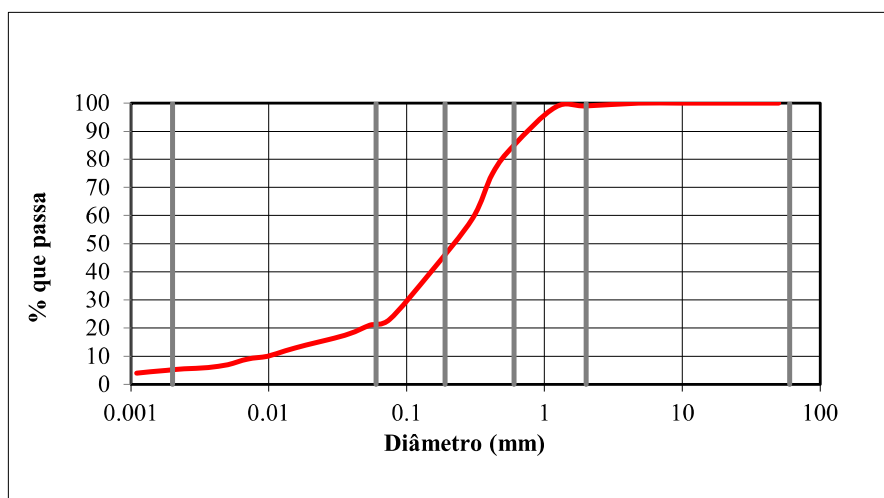
Tabela 4 – Caracterização geotécnica dos solos pesquisados

CARACTERÍSTICA GEOTÉCNICA	SOLO		
	BR	VS	AERO
Frações granulométricas (%)			
Areia Grossa $0,6 \leq \varnothing < 2,0$ mm	3	15	1
Média $0,2 \leq \varnothing < 0,6$ mm	16	40	5
Fina $0,06 \leq \varnothing < 0,2$ mm	9	26	19
Silte $0,002 \leq \varnothing < 0,06$ mm	7	16	42
Argila $\varnothing < 0,002$ mm	65	3	33
Peso específico dos sólidos - γ_s (kN/m ³)	27,43	25,32	29,53
Limite de Liquidez – LL (%)	66	26	70
Limite de Plasticidade – LP (%)	37	23	35
Índice de Plasticidade – IP (%)	29	3	35

Fonte: A autora (2021).

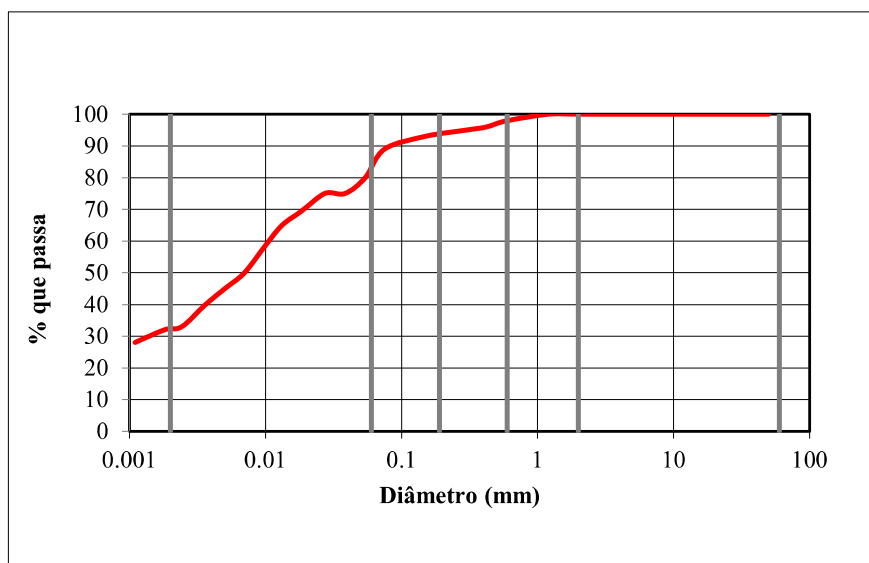
As Figuras 10, 11 e 12 representam as curvas granulométricas dos solos VS, BR e AERO, respectivamente.

Figura 10 – Curva granulométrica do solo VS



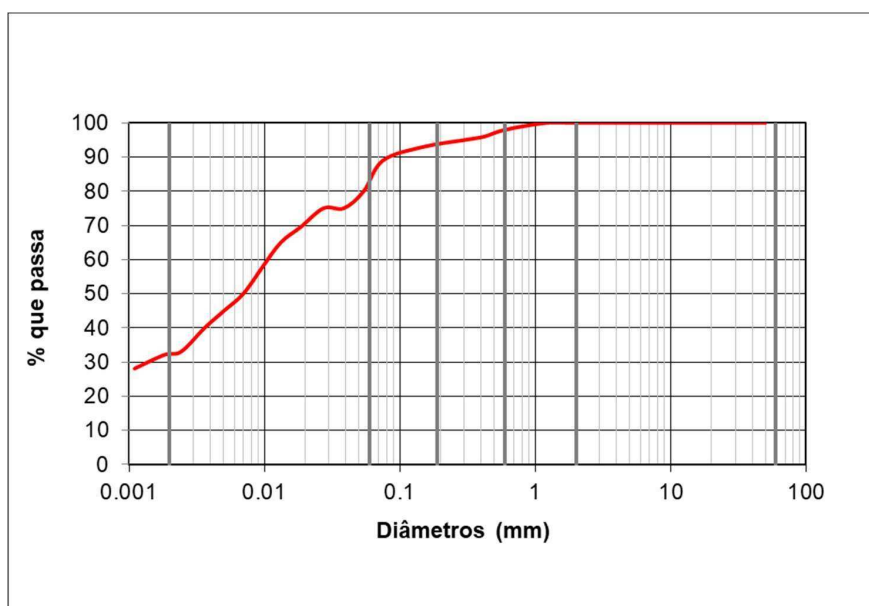
Fonte: A autora (2021).

Figura 11 – Curva granulométrica do solo BR



Fonte: A autora (2021).

Figura 12 – Curva granulométrica do solo AERO



Fonte: A autora (2021).

A classificação textural e as classificações geotécnicas tradicionais dos solos (SUCS e TRB) encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificações textural e geotécnicas tradicionais dos solos pesquisados

CLASSIFICAÇÃO	SOLO		
	BR	VS	AERO
TEXTURAL	Argila arenosa com um pouco de silte	Areia média siltosa com vestígios de argila	Silte argilo-arenoso
SUCS	CH (argila com areia)	SM (areia siltosa)	MH (Silte argiloso de alta compressibilidade)
TRB	A-7-5 (17)	A-2-4 (0)	A-7-5 (20)

Fonte: A autora (2021).

A partir dos resultados apresentados, percebe-se que o solo BR possui características predominantemente argilosas, o solo VS características arenosas e o solo AERO características siltosas. Sabe-se que o desempenho da estrutura de solo reforçado depende do atrito ou aderência entre o solo e o material de reforço, portanto, dependendo do tipo de solo, a eficiência no desempenho do elemento de reforço será maior (PATIAS, 2005; OLIVEIRA et al., 2016; PIEROZAN, 2018).

Acredita-se que solos granulares bem graduados apresentam uma resistência maior que os solos mal graduados. Por solos bem graduados apresentarem um melhor intertravamento entre os seus grãos, os grãos maiores deslizam com maior dificuldade quando solicitados pelos elementos de reforço. Os grãos maiores movimentam-se em direção aos grãos menores, formando progressivamente uma massa firme entre o solo e o elemento geossintético, aumentando assim a resistência do sistema (TEIXEIRA, 2003).

Tem-se ainda que solos não granulares, a exemplo dos solos BR e AERO, podem possuir insuficiência de desempenho devido ao fato de que um baixo ângulo de atrito interno resulta em maiores forças horizontais resistidas pelo material de reforço, levando a um menor atrito de interface (BENJAMIN, 2006; PRAVEN E KUREEN, 2020).

Os resultados relacionados à classificação MCT para os solos utilizados na pesquisa encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da classificação MCT para os solos da pesquisa

SOLO	CLASSIFICAÇÃO MCT
BR	LG' (Laterítico Argiloso)
VS	NA' (Não-Laterítico Arenoso)
AERO	NG' (Não - Laterítico Argiloso)

Fonte: A autora (2021).

Em relação à classificação MCT dos solos estudados, vê-se que o solo BR é um solo laterítico, enquanto os solos VS e AERO são solos não lateríticos. Sabe-se que solos tropicais, sobretudo os de comportamento laterítico, quando devidamente compactados na umidade ótima e peso específico seco máximo da energia adotada, adquirem baixa permeabilidade e elevada capacidade de suporte. Esses solos ainda, comumente, apresentam elevadas resistência mecânica e estabilidade química (PATIAS, 2005; NETTERBERG, 2014; FREITAS et al., 2017).

Com o intuito de complementar as caracterizações geotécnicas, a Tabela 7 apresenta as análises químicas dos solos BR, VS e AERO, respectivamente, realizadas por meio do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX).

Constatou-se que a amostra de solo BR é composta basicamente por dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido férrico, enquanto as amostras de solos VS e AERO são constituídas principalmente pelos compostos sílica e alumina.

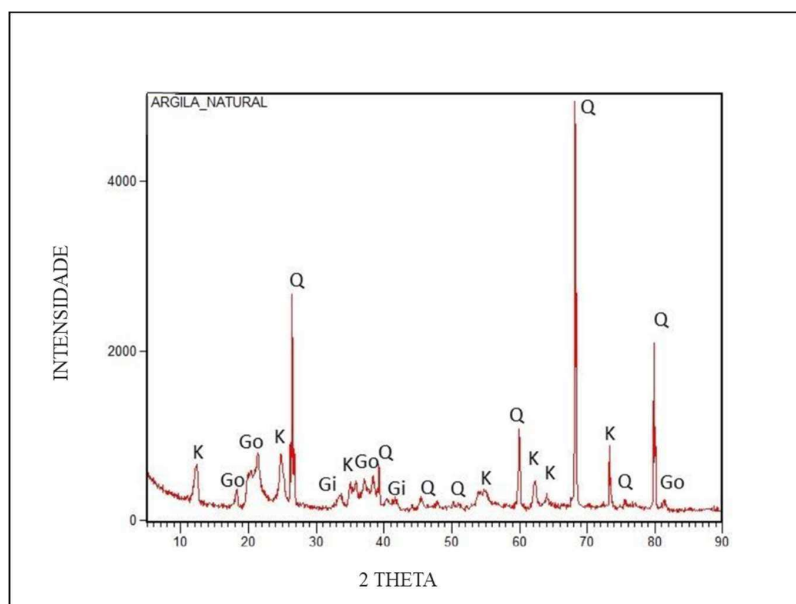
As Figuras 13, 14 e 15 apresentam a identificação das fases cristalinas das amostras de solos BR, VS e AERO, respectivamente, feita por meio do ensaio de Difração de Raios-X (DRX). Os seguintes minerais foram identificados: quartzo (Q), caulinita (K), gibbsita (Gi), goethita (Go), Microclínio (M), Biotita (B), Hematita (H), Wollastonita (W) e Dolomita (D).

Tabela 7 – Resultado da análise química dos solos obtidos por FRX

Solos	Compostos químicos	Unidade	Resultado
BR	Óxido de Alumínio	%	36,40
	Dióxido de Silício	%	32,93
	Óxido Férrico	%	22,99
	Dióxido de Titânio	%	3,31
	Óxido de Cálcio	%	0,21
	Óxido Sulfúrico	%	0,11
VS	Dióxido de Silício	%	52,25
	Óxido de Alumínio	%	40,18
	Pentóxido de Fósforo	%	0,43
	Óxido Férrico	%	2,54
	Óxido de Potássio	%	2,36
	Óxido de Cálcio	%	0,30
	Dióxido de Titânio	%	0,23
	Cloro	%	0,11
AERO	Óxido de Alumínio	%	32,179
	Dióxido de Silício	%	38,766
	Óxido Férrico	%	21,529
	Dióxido de Titânio	%	2,591

Fonte: A autora (2021).

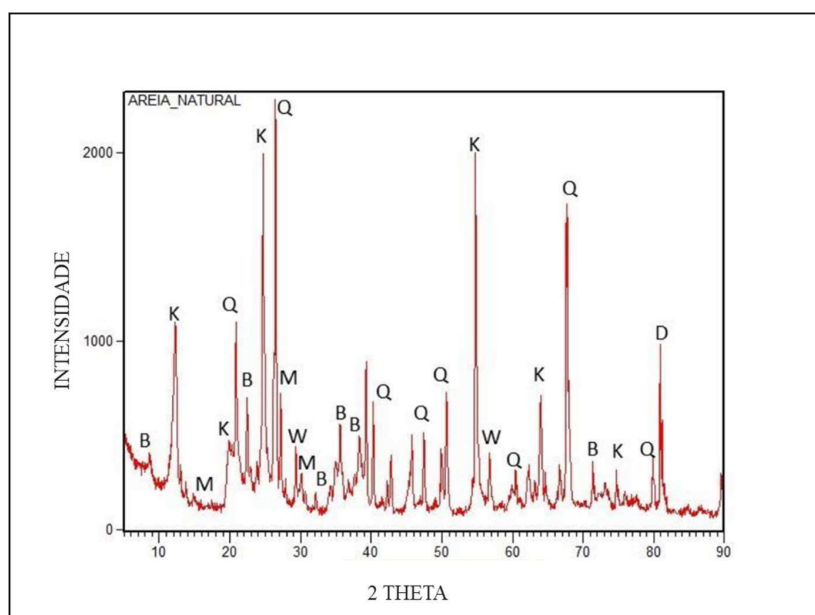
Figura 13 – Difratoograma correspondente ao solo BR



Fonte: A autora (2021).

O solo BR (Figura 13), em sua fração argila, é composto basicamente de quartzo. O padrão de DRX, além do quartzo, apresenta também picos associados à caulinita, gibbsita e goethita, sendo a fase cristalina caulinita predominante.

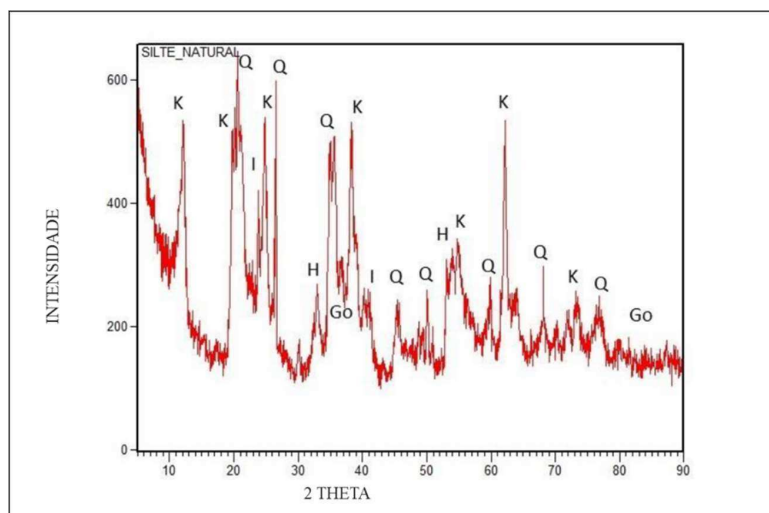
Figura 14 – Difratoograma correspondente ao solo VS



Fonte: A autora (2021).

Em relação ao solo VS (Figura 14), verifica-se a predominância das fases quartzo e caulinita. O difratograma exibe também picos de microclínio, biotita, wollastonita e dolomita.

Figura 15 – Difratograma correspondente ao solo AERO



Fonte: A autora (2021).

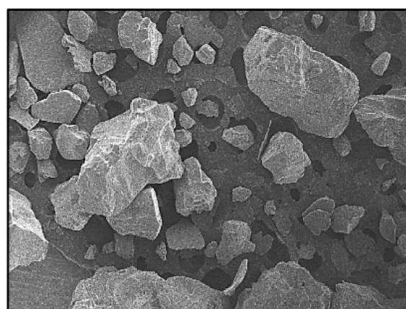
Por fim, quando observado o solo AERO (Figura 15), pode-se notar novamente a predominância das fases quartzo e caulinita, exibindo também picos de goethita e hematita.

Em relação aos minerais presentes nas amostras de solos investigados, ressalta-se que os grãos de quartzo possuem grande estabilidade química e elevada dureza (MITCHELL e SOGA, 2005; RENARD, LAGABRILLE E MARTIN, 2018), enquanto a caulinita é um argilomineral caracterizado por possuir um arranjo estrutural do tipo 1:1, constituído de camadas de tetraedros de sílica e de octaedros de alumina que são ligadas através de ligações químicas do tipo pontes de hidrogênio que impedem sua separação e, conseqüentemente, restringem a entrada de moléculas de água, limitando a expansão volumétrica (MITCHELL E SOGA, 2005; RENARD, LAGABRILLE E MARTIN, 2018).

As morfologias das amostras dos solos empregadas podem ser analisadas a partir das Figuras 16, 17 e 18, obtidas através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Verifica-se que a amostra de solo VS (Figura 16) é composta por partículas de diferentes formatos, onde os grãos de quartzo são, provavelmente, os de maiores diâmetros, volumétricos e de geometria aproximadamente hexagonal, com

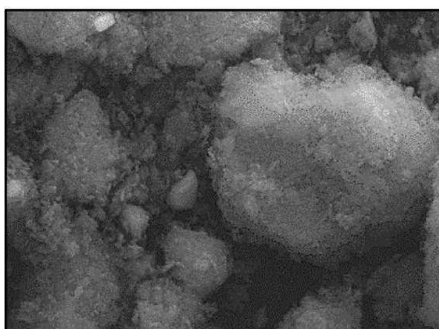
arestas definidas. Em sua superfície, pode-se observar os cristais de caulinita, que possuem menores dimensões e aspecto granular.

Figura 16 – Microfotografia de amostra do Solo VS obtida no MEV (aumento 40x)



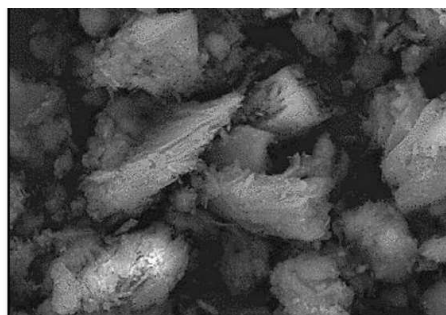
Fonte: A autora (2021).

Figura 17 – Microfotografia de amostra do Solo BR obtida no MEV (aumento 5000 x).



Fonte: A autora (2021).

Figura 18 – Microfotografia de amostra do Solo AERO obtida no MEV (aumento 3000 x)



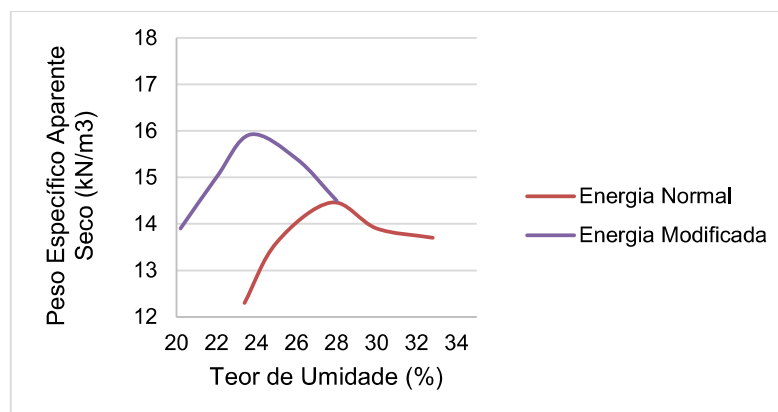
Fonte: A autora (2021).

Observa-se, nas amostras dos solos BR (Figura 17) e AERO (Figura 18), a existência de grãos volumétricos, possivelmente de quartzo, além das partículas lamelares de caulinita. Os agregados entre as estruturas de maiores dimensões podem ser compostos por goethita e gipsita, no caso do solo BR, e de goethita e hematita, para o solo AERO.

4.2 Ensaio de Compactação

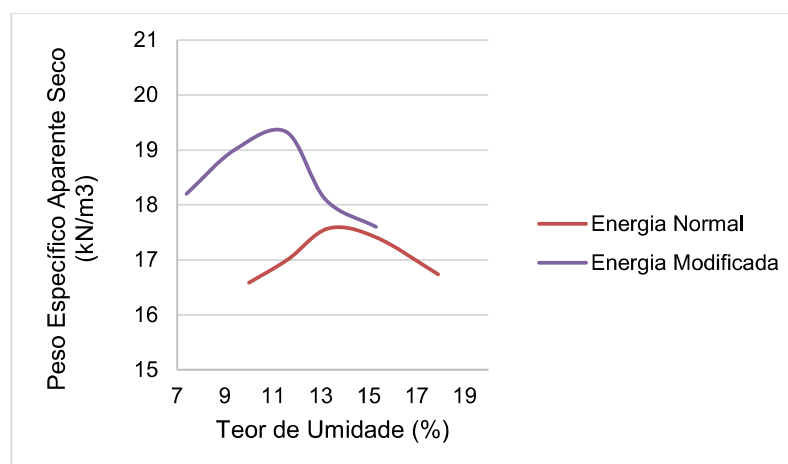
As Figuras 19, 20 e 21 representam as curvas de compactação para os solos BR, VR e AERO, respectivamente.

Figura 19 – Curvas de compactação do Solo BR



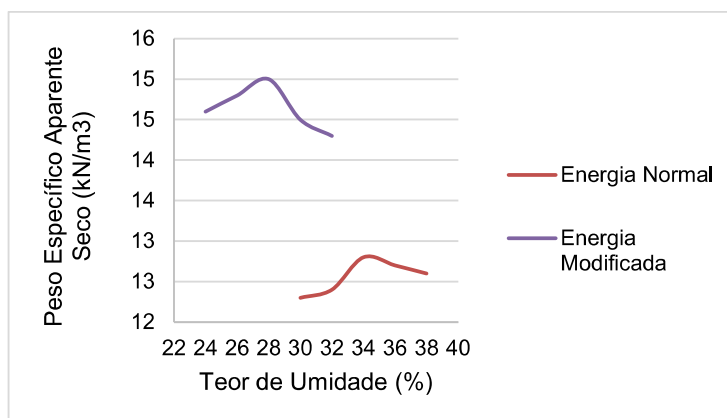
Fonte: A autora (2021).

Figura 20 – Curvas de compactação do Solo VS



Fonte: A autora (2021).

Figura 21 – Curvas de compactação do Solo AERO



Fonte: A autora (2021).

A Tabela 8 exibe os resultados dos correspondentes parâmetros ótimos de compactação obtidos

Tabela 8 – Parâmetros de compactação para as amostras de solo VS, BR e AERO

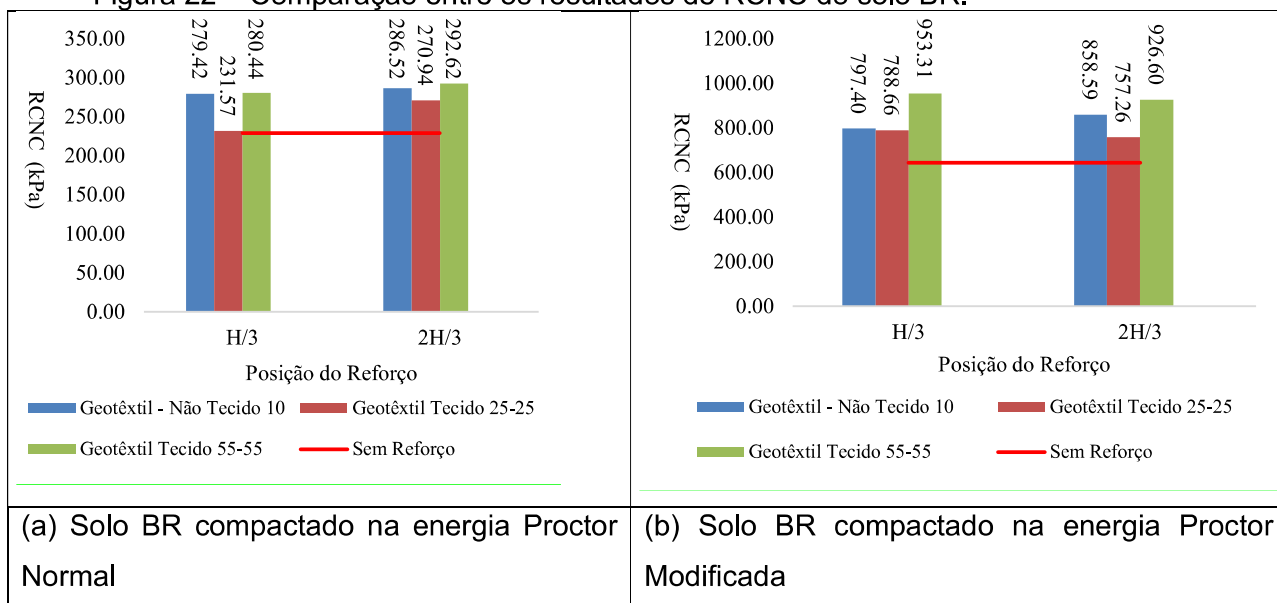
Amostras de Solos	Parâmetros de compactação		
	Energia	Wót (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)
VS	NORMAL	14,04	17,63
	MODIFICADA	11,55	19,33
BR	NORMAL	27,73	14,46
	MODIFICADA	23,68	15,92
AERO	NORMAL	33,82	12,82
	MODIFICADA	27,69	14,96

Fonte: A autora (2021).

4.3 Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada

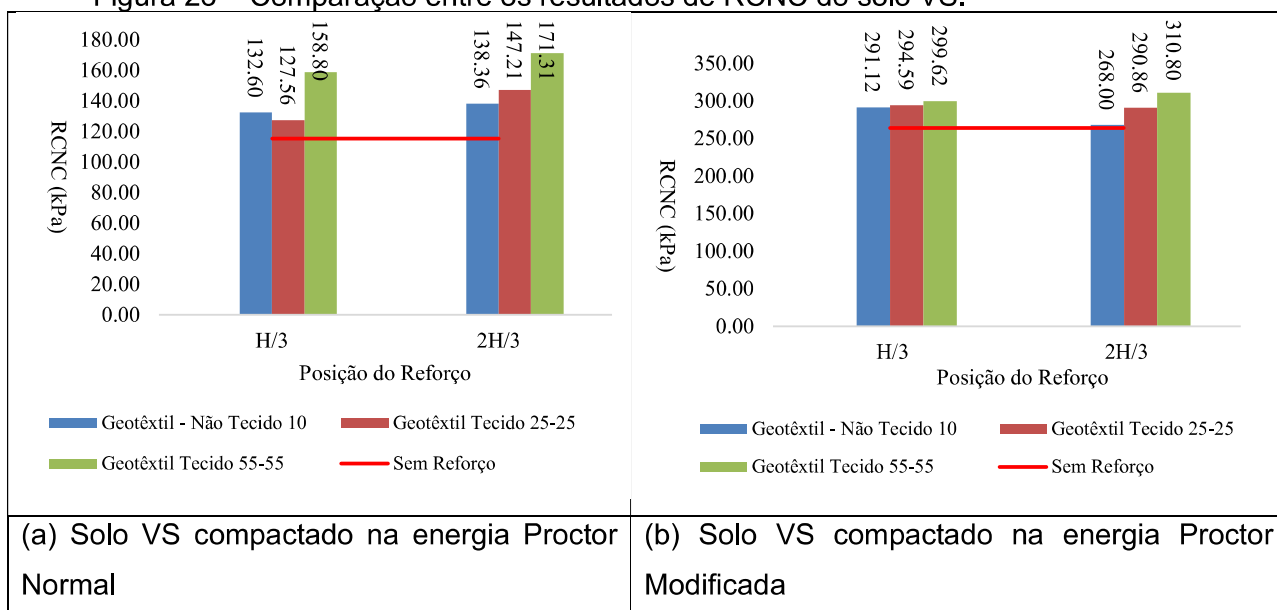
As Figura 22, 23 e 24 apresentam, respectivamente, os resultados de RCNC para as amostras de solo BR, VS e AERO nas energias de compactação Proctor normal e Proctor modificado, nas condições previstas neste trabalho.

Figura 22 – Comparação entre os resultados de RCNC do solo BR.



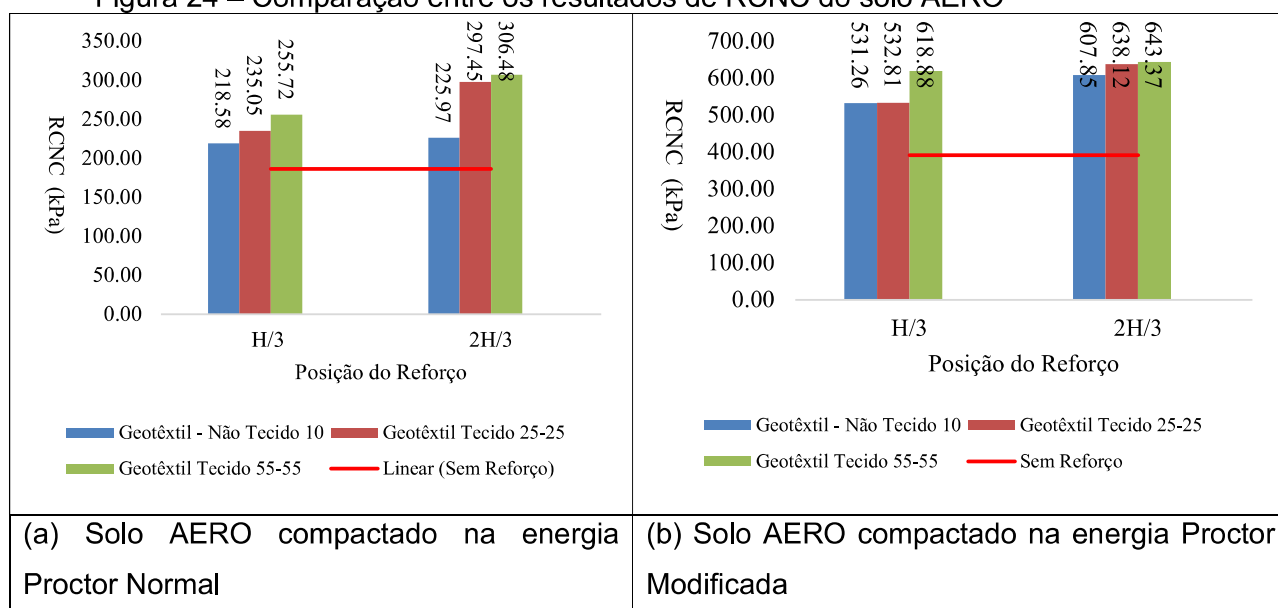
Fonte: A autora (2021).

Figura 23 – Comparação entre os resultados de RCNC do solo VS.



Fonte: A autora (2021).

Figura 24 – Comparação entre os resultados de RCNC do solo AERO



Fonte: A autora (2021).

Para melhor compreender a influência da inserção de geotêxteis na RCNC, aplicou-se o teste de Mann-Whitney, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Testes de Mann-Whitney para RCNC

FATOR	VALOR-P
INSERÇÃO DO GEOTÊXTIL	0,306

* Nível de significância de 5%, valor-p \leq 0,05.

Fonte: A autora (2021).

Aplicou-se ainda o teste de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney, conforme apresentado na Tabela 10, para avaliar os fatores energia de compactação, solo, posição de inserção do geotêxtil e tipo de geotêxtil na RCNC.

Através da análise realizada, percebe-se que as diferenças entre as medianas de RCNC dos corpos de prova com e sem a inserção de geotêxteis são estatisticamente iguais. Nota-se ainda, ao analisar os resultados da Tabela 8, que a diferença entre os valores de RCNC é estatisticamente significativa (valor-p \leq 0,05) em relação aos fatores energia de compactação e solo, isto é, estatisticamente, esses fatores interferem ou influenciam a RCNC. Já quando houve a mudança da posição de inserção do geotêxtil ou a variação do próprio elemento de reforço, os valores-

p foram maiores que 5%, evidenciando que os dois fatores não exerceram efeitos estatisticamente significantes sobre o parâmetro RCNC.

Tabela 10 – Testes de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney para RCNC

FATOR	TESTES DE KRUSKAL-WALLIS VALOR P	TESTES DE MANN-WHITNEY VALOR-P
Energia de compactação	-	0,000*
Solo	0,009*	-
Posição	-	0,558
Geotêxtil	0,542	-

* Nível de significância de 5%, valor-p \leq 0,05.

Fonte: A autora (2021).

Considerando os ensaios RCNC, sabe-se que a ruptura do maciço é caracterizada pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo. Portanto, existe uma camada de solo em torno da superfície de cisalhamento que perde suas características durante o processo de ruptura, formando assim a zona cisalhada. Inicialmente, há a formação da zona cisalhada e, em seguida, desenvolve-se a superfície de cisalhamento (GERSCOVICH, 2010).

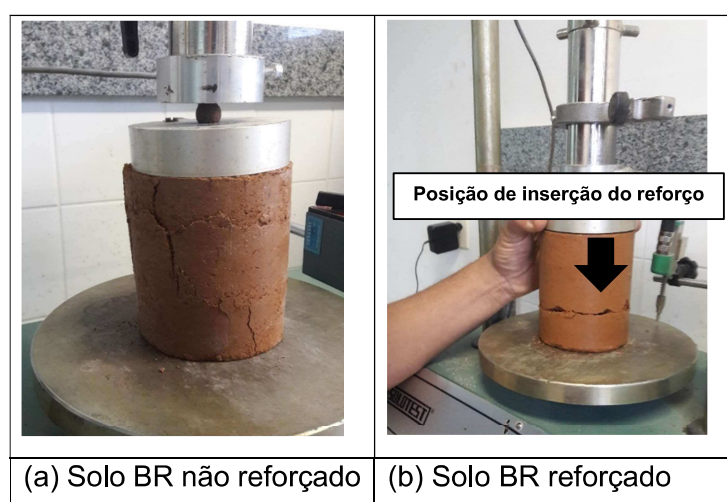
Avaliando os ensaios RCNC para amostras reforçadas, sabe-se que, quando estas estão submetidas a uma tensão vertical, há a ruptura por cisalhamento. Quando tais estruturas são submetidas a solicitações de compressão, ocorrerá uma transferência de esforços entre o solo e o reforço, gerando tensões de tração no geotêxtil. Quando o geotêxtil possui adequada aderência com o solo e ancoragem compatível com a solicitação, tal processo de interação permite que as tensões transferidas pelo solo sejam completamente mobilizadas pelos reforços, incrementando as tensões suportadas (PORTELINHA, 2012; PLÁCIDO, 2016).

Considerando que o reforço deve estar suficientemente ancorado no solo para resistir aos esforços de tração solicitados ao maciço e que, para que ocorra a devida ancoragem e conseqüente desenvolvimento dos mecanismos de reforço, é necessário que se tenha um comprimento de ancoragem fora da área carregada, ou seja, em um ensaio RCNC, o comprimento disponível para a ancoragem é aquele comprimento onde o geotêxtil não é solicitado (MARTINS, 2000; TEIXEIRA, 2003; NAEINI E

MIRZAKLANLARI, 2008). Infere-se que os diferentes geotêxteis empregados em distintas posições não promoveram a adequada ancoragem do sistema, deficiência essa que pode ter levado à falta da completa transmissão de tensões do solo para o geotêxtil, levando assim à não diferença estatística entre as RCNC para os corpos de prova não reforçados e reforçados por diferentes geotêxteis em distintas posições.

Observa-se em conjunto, nas Figuras 25 a 27, as respectivas imagens de ensaios RCNC dos sistemas investigados para os solos não reforçados e reforçados, salientando a mudança dos planos de ruptura para as configurações supracitadas.

Figura 25 – Planos de ruptura de ensaio RCNC para corpos de prova de solo BR.



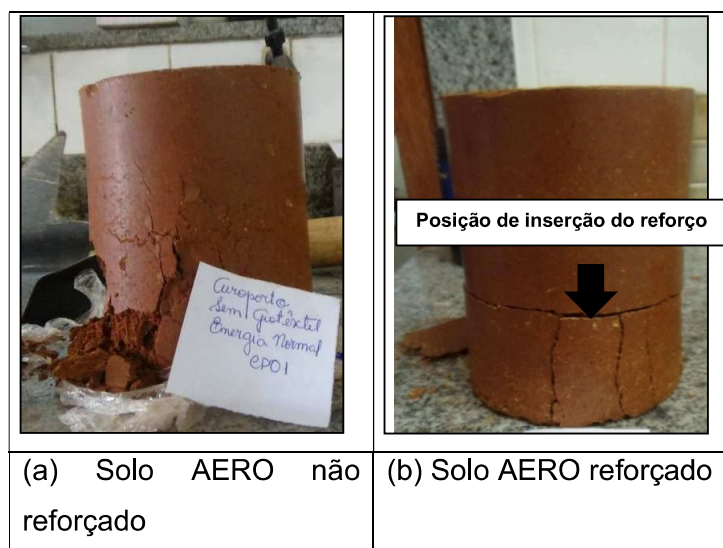
Fonte: A autora (2021).

Figura 26 – Planos de ruptura de ensaio RCNC para corpos de prova de solo VS.



Fonte: A autora (2021).

Figura 27 – Planos de ruptura de ensaio RCNC para corpos de prova de solo AERO

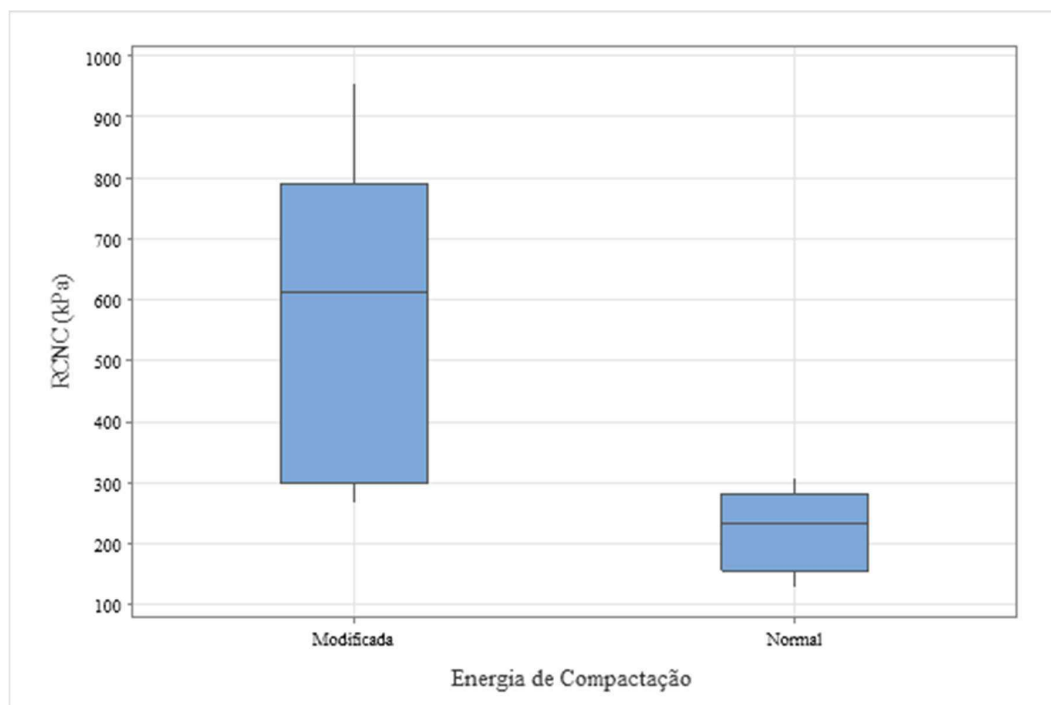


Fonte: A autora (2021).

A Figura 28 mostra o diagrama de caixa comparando a variabilidade do RCNC para as duas energias de compactação utilizadas nesta pesquisa. A partir deste diagrama, pode-se concluir que as amostras compactadas na energia de compactação Proctor modificado apresentaram maior variabilidade no parâmetro RCNC do que aquelas compactadas na energia Proctor normal. Tem-se que uma solicitação menor ou menos eficiente do reforço em solos reforçados compactados a elevados níveis de energia de compactação pode resultar da maior severidade dos danos provocados durante a compactação do solo sobre o geotêxtil (AZAMBUJA, 1999).

Infere-se então que a maior variabilidade da RCNC constatada nos ensaios envolvendo corpos de prova compactados na energia Proctor modificado se dá pelas distintas características granulométricas dos solos estudados, que possivelmente implicaram em diferentes danos aos geotêxteis quando compactados a uma energia de compactação de maior magnitude. Quando geotêxteis sofrem danos, esses perdem suas características originais de resistência à tração, conduzindo a uma mobilização menos eficiente de sua função de reforço (PINHO-LOPES E LOPES, 2021).

Figura 28 – Diagrama de Caixa comparando a variabilidade da RCNC para as duas energias de compactação utilizadas nesta pesquisa.

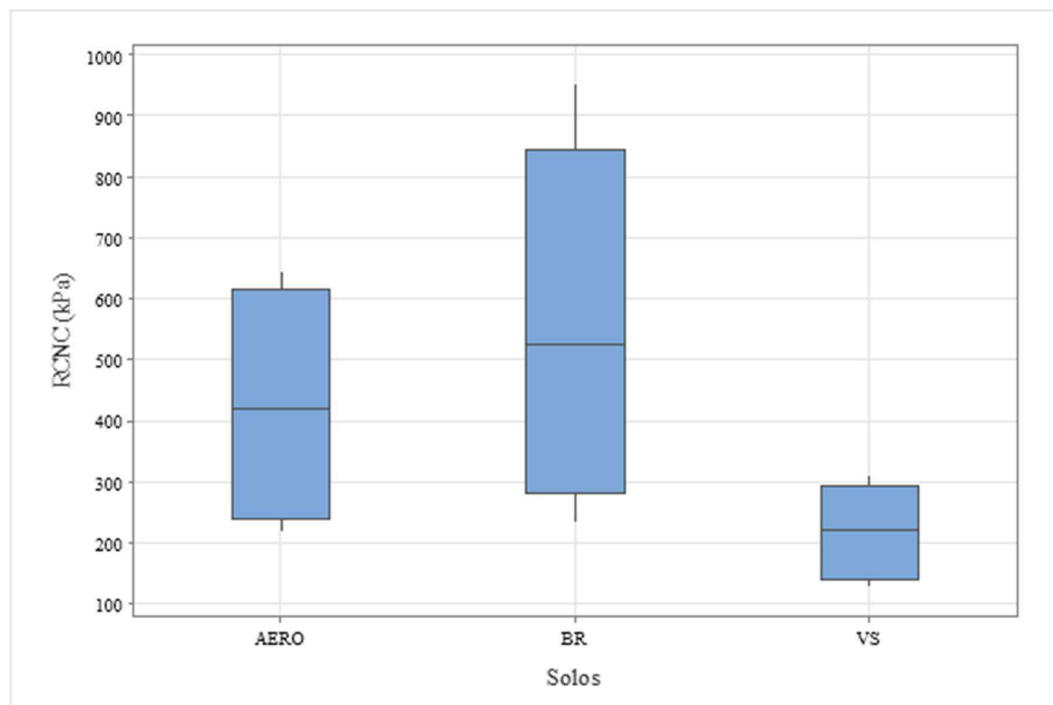


Fonte: A autora (2021).

Vê-se através do diagrama de caixa, comparando os três solos utilizados nesta pesquisa (Figura 29), que as amostras de solo BR e AERO apresentaram maior variabilidade no parâmetro RCNC do que as amostras de solo VS.

Sabe-se que, em solos de alta permeabilidade, a drenagem interna do sistema solo-geotêxtil é alcançada pelo próprio solo e que em solos de baixa permeabilidade a variação dos geotêxteis influencia no processo de interação solo-reforço. Considere-se, ainda, que diferentes geotêxteis fornecem distintas funções de drenagem e que a ausência da adequada drenagem resulta em armazenamento adicional de umidade na interface solo-geossintético e consequente prejuízo no processo de interação solo-geotêxtil (CLANCY E NAUGHTON, 2010; PORTELINHA, 2012). Assim, acredita-se que a maior variabilidade no parâmetro RCNC apresentada pelos solos AERO e BR são dadas pelas distintas interações solo-reforço geradas pelas diferentes drenagens internas proporcionadas pelas características dos geotêxteis.

Figura 29 – Diagrama de Caixa comparando a variabilidade da RCNC para os três solos utilizados nesta pesquisa.



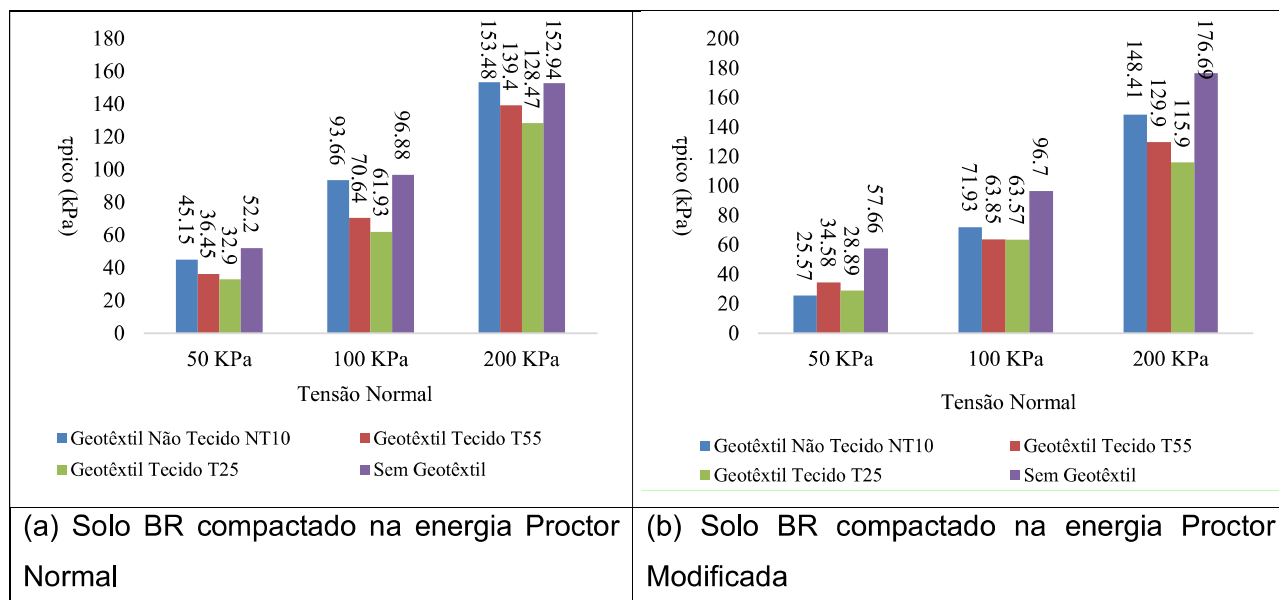
Fonte: A autora (2021).

4.4 Ensaio de Cisalhamento Direto

Neste estudo, realizaram-se análises estatísticas com base nos resultados obtidos por Avelar (2020). Em sua pesquisa, a autora realizou ensaios de cisalhamento direto (τ) de amostras de solo compactadas nas energias do Proctor normal e modificado. A autora analisou ainda corpos de prova sem e com a inserção de três geotêxteis, sendo dois geotêxteis tecidos (T55 e T25) e um geotêxtil não tecido (NT10). Foram avaliados os comportamentos, frente aos mecanismos de reforço, de solos com diferentes granulometrias e propriedades, utilizando os solos VS e BR.

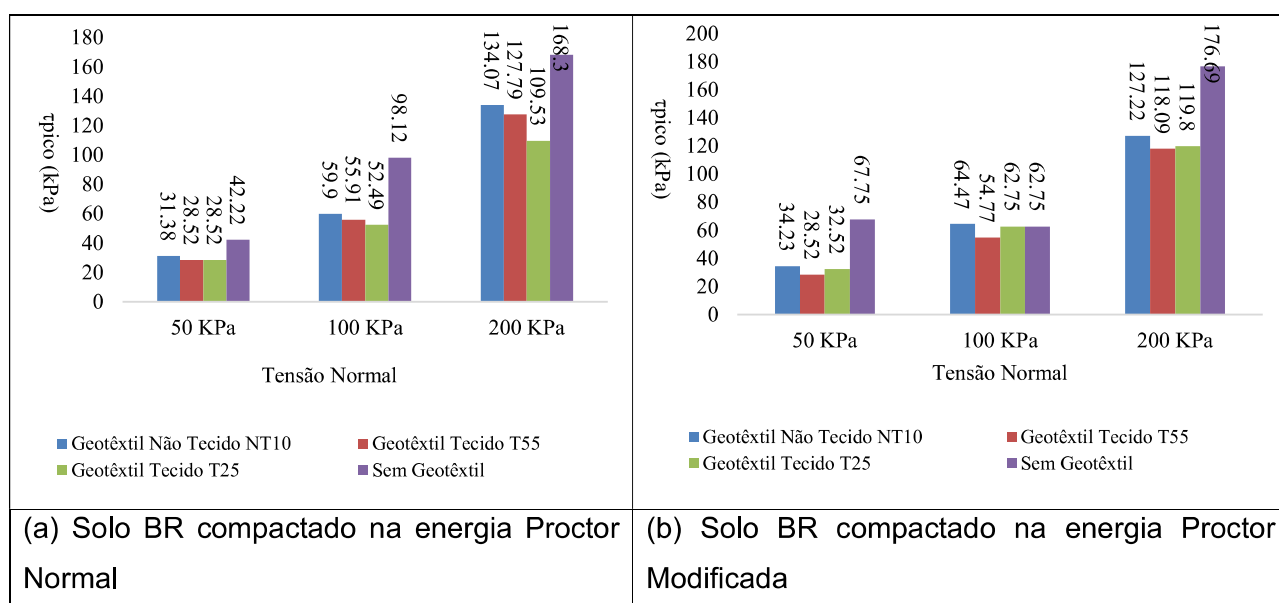
As Figuras 30, 31 e 32 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto para as amostras de solo BR e VS nas energias de compactação Proctor normal e Proctor modificado.

Figura 30: Resistência ao cisalhamento de pico (τ_{pico}) para os corpos de prova do solo BR.



Fonte: AVELAR (2020).

Figura 31: Resistência ao cisalhamento de pico (τ_{pico}) para os corpos de prova do solo VS.



Fonte: AVELAR (2020).

Para melhor compreender a influência da inserção de geotêxteis na τ_{pico} , aplicou-se o teste de Mann-Whitney, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Testes de Mann-Whitney para τ_{pico}

FATOR	VALOR-P
INSERÇÃO DO GEOTÊXTIL	0,063

* Nível de significância de 5%, valor-p $\leq 0,05$.

Fonte: A autora (2021).

Aplicou-se ainda o teste de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney, conforme apresentado na Tabela 12, para avaliar os fatores energia de compactação, solo e tipo de geotêxtil na τ_{pico} .

Tabela 12: Testes de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney para τ_{pico}

FATOR	TESTES DE KRUSKAL-WALLIS VALOR P	TESTES DE MANN- WHITNEY VALOR-P
Energia de compactação	-	0,826
Solo	0,296	-
Geotêxtil	0,683	-

* Nível de significância de 5%, valor-p $\leq 0,05$.

Fonte: A autora (2021).

Nota-se que a inserção de diferentes geotêxteis não influenciou significativamente nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos sistemas estudados. Percebe-se ainda que, para as mudanças de solo, geotêxtil e energia de compactação, os valores-p foram maiores que 5%, evidenciando que os três fatores não exerceram efeitos estatisticamente significantes sobre o parâmetro τ_{pico} .

Considerando que a interação solo-geotêxtil é fundamental para a mobilização da resistência ao cisalhamento de interface e que, em um ensaio de cisalhamento direto, a resistência da interface é mobilizada pelo deslizamento da massa de solo em relação ao geossintético (AFONSO, 2009; RAMAIAH, RAMANA E DATTA, 2017), considera-se que a inserção de diferentes geotêxteis nos distintos solos estudados não promoveu completa interação entre os materiais, levando à deficiência do atrito de interface e conseqüente insuficiência na mobilização da resistência ao

cisalhamento, resultando no não acréscimo de τ_{pico} para os diferentes sistemas estudados. Essa deficiência pode ter sido causada pela inadequada aderência na interface solo-reforço. A ausência de aderência na interface pode atuar como um plano de deslizamento potencial. Isso pode ser entendido observando-se o fato de que os valores do coeficiente de atrito da interface são tipicamente menores que a unidade para muitos tipos de geotêxteis (DENINE ET AL., 2016; JOTISANKASA E RURGCHASRI, 2018).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente programa experimental de pesquisa, conclui-se que:

- ✓ Os resultados realçaram a não diferença estatística entre as RCNC para os corpos de prova não reforçados e reforçados por diferentes geotêxteis em distintas posições. Realçando que diferentes geotêxteis empregados em distintas posições podem não promover adequada ancoragem do sistema solo-reforço quando analisado o parâmetro RCNC, essa deficiência de ancoragem leva à falta da completa transmissão de tensões do solo para o geotêxtil;
- ✓ Os resultados indicaram que as características de permeabilidade do solo e a variação dos geotêxteis influenciam no processo de interação solo-reforço;
- ✓ Conclui-se, ainda, que diferentes geotêxteis fornecem distintas funções de drenagem e que a ausência da adequada drenagem resulta em armazenamento adicional de umidade na interface solo-geossintético e conseqüente prejuízo no processo de interação solo-geotêxtil, influenciando diretamente na transferência de cargas para o elemento de reforço, sendo tal transferência fundamental para o comportamento mecânico das estruturas reforçadas;
- ✓ Distintas características granulométricas dos solos compactados em elevadas energias de compactação implicam em diferentes danos aos geotêxteis;
- ✓ A ausência da completa interação entre os materiais leva à deficiência do atrito de interface e conseqüente insuficiência na mobilização da resistência ao cisalhamento, resultando no não acréscimo de τ_{pico} .

REFERÊNCIAS

AFONSO, M. R. F. L. **Ensaio De Corte Directo Na Caracterização Da Interface Solo-Geossintético**: efeito da variação da tensão normal. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

AGGARWAL S. Soil Stabilization Techniques for Road Construction. In: **Geotechnical Engineering: Ground Improvement Technique**, Ludhiana (Índia): AICTE, v.211, p. 24-34, 2011.

ALAGIYAWANNA, A.M.N.; SUGIMOTO, M.; SATO, S.; TOYOTA, H. Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation. **Geotextiles And Geomembranes**, Niigata, n. 19, p. 483-207, ago. 2001.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **M 145 - 91**: Standard Specification for Classification of Soil sand Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. AASHTO, Washington, D.C.,2008. 9p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS(ASTM). **D 2487 - 11**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA, ASTM International: 2011. 11p.

ANTUNES, L. G. S. **Reforço de pavimentos rodoviários com geossintéticos**. 2008.158 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo coesivo—determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5p.d

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro**: ABNT, 1995. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5p.e

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 12p.c

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 10p.f

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9p.a

AVELAR, G. M. **Abordagem experimental da interação solo tropical – reforço geossintético sob a perspectiva de aplicação em obras de terra**. 2020. 283 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

AZAMBUJA, E. Determinação da Resistência admissível dos geossintéticos empregados como reforço em muros ou taludes íngremes. **1º Curso Catarinense – Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente**, Florianópolis, 1999.

BANDEIRA, M. D. O.; SILVA, L. C. A. F. M. **Evolução do emprego de geossintéticos em obras rodoviárias nos últimos 20 anos**. 2019. 13 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semiárido, Caraúbas, 2019.

BECKER, L.; NUNES, A.L.L.S. Influence of soil confinement on the creep behavior of geotextiles. **Geotextiles And Geomembranes**. [S.L.], v. 43, n. 4, p. 351-358, ago. 2015.

BENDER, D.A.; BARNBERG. Design of soil-fabric-aggregate systems. **Transportation Research Record**. v.671, p. 64- 75, 1978

BENJAMIM, C. V. S.; BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G. Field monitoring evaluation of geotextile-reinforced soil-retaining walls. **Geosynthetics International**. [S.L.], v. 14, n. 2, p. 100-118, abr. 2007.

BENJAMIN, C. V. S. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. 2006. 294 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BOURDEAU, P.L. CHAPUIS, J.; HOLTZ, R.D. Effect of anchorage and modulus in geotextiles- reinforced unpaved roads. **Geotextiles and Geomembranes**. v.7 n.3. p. 221-230. 1998.

BUENO, B. S., COSTANZI, M. A. E ZORNBERG, J. G. Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles. **Geosynthetics International**. 12, No. 6, 276–287, julho. 2005

CHOUDHARY, A.K.; JHAM, J.N.; GILL, K.S. Improvement in CBR Values of Expansive Soil-Subgrades Using Geosynthetics. In: **Geotechnical Engineering: Ground Improvement Technique**, Ludhiana (Índia) : AICTE, 211. p. 155-164, 2011.

CLANCY, J.; NAUGHTON, P. J. Pullout resistance of a novel multifunctional geosynthetic in fine grained marginal fills. In: IX International Conference On Geosynthetics, 2010, **Proceedings...** Guarujá, São Paulo, Brasil, 2010, p. 679-682.

COSTA, C.M. L.; LODI, P.C.; COSTA, Y. D. J.; BUENO, B. S. Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. **Polímeros**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 158-169, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO).

DENINE; DELLA; DLAWAR; SADOK; CANOU; DUPLA. Effect of Geotextile Reinforcement on Shear Strength of Sandy Soil: laboratory study. **Studia Geotechnica Et Mechanica**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 3-13, 1 dez. 2016. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/sgem-2016-0026>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. CLA **ME 259**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro: DNER, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093**: Solos - Determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994.a

DOUGLAS, R.A. KELLY, M.A. Geotextile reinforced unpaved logging roads the effects of anchorage. **Geotextiles and Geomembranes**. v.4. p. 93 -106. 1986.

EDIL, Tuncer B.; BOSSCHER, Peter J.; SUNDBERG, Aaron J.. Soil-Structure Interface Shear Transfer Behavior. **Geomechanics II**, [S.L.], 28 ago. 2006. American Society of Civil

EHRlich, M. Geossintéticos em estruturas de contenção e taludes íngremes. **II Curso sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**, São Paulo, v. 2, p. 18, 1998.

ELIAS, V.; CHRISTOPHER, B.R.; BERG, R.R. **Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines**. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. n. FHWA-NHI-00-043. 394p. 2001.

ESMAILI, D.; HATAMI, K.; MILLER, G. A. Influence of matric suction on geotextile reinforcement-marginal soil interface strength. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 42, n. 2, p. 139-153, abr. 2014.

FERREIRA, J.A.Z. **Estudo do reforço de pavimentos com ensaios de arrancamento em equipamento de pequenas dimensões**. 2007. 114 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2007.

FREITAS, C.M.; TSUHA, C.H.C.; VILAR, O.M. **Briefing: Compacted soil columns for collapsible lateritic soil improvement**. ICE PUBLISHING. 2017

GERSCOVICH, D. M. S. **Estruturas de Contenção: Muros de Arrimo**. Rio de Janeiro: UERJ, 2010.

GÓNGORA, I. A. M. G.; PALMEIRA, E. M. Assessing the Influence of Soil-Reinforcement Interaction Parameters on the Performance of a Low Fill on Compressible Subgrade. Part II: influence of surface maintenance. **International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering**. [S.L.], v. 2, n. 1, 26 dez. 2016.

GUEDES, V. C. P. **Estudo Da Influência Da Compactação, Do Tipo E Inclinação Da Face No Comportamento De Muros De Solo Reforçado**. 2004. 472 F. Dissertação (Mestrado) - Curso De Engenharia Civil, Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio De Janeiro, 2004.

HOLTZ, R.D, CHRISTOPHER, B.R.; BERG, R.R. Geosynthetic design and construction guidelines. **Federal Highway Administration**. Washington, DC, FHWA-HI-98-038, p. 460, 1998.

HUFENUS, R; RUEEGGER, R; BANJAC, R; MAYOR, P; SPRINGMAN, S; BRONNIMANN, R. Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. **Geotextiles And Geomembranes**. [S.L.], v. 24, n. 1, p. 21-37, fev. 2006.

INFANTE, D. J. U.; MARTINEZ, G. M. A.; ARRUA, P. A.; EBERHARDT, M. Shear Strength Behavior of Different Geosynthetic Reinforced Soil Structure from Direct Shear Test. **International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering**, [S.L.], v. 2, n. 2, 30 maio 2016. Springer Science and Business Media LLC.

JONES, C. J. F. P. Geosynthetics in reinforced structures. **EuroGeo**. Second European Geosynthetics conference, Bologna. 2000.

JOTISANKASA; RURGCHAISRI. Shear strength of interfaces between unsaturated soils and composite geotextile with polyester yarn reinforcement. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 46, n. 3, p. 338-353, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.12.003>.

KAKUDA, F. M.. **Estudos de Ensaios de arrancamento de geogrelha com utilização de equipamento reduzido**. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

KINNEY, T.C.; BARENBERG, E.J. The Strengthening Effect of Geotextiles on Soil-Geotextile-Aggregate Systems. **Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles**. Vol. 2, p. 347-352, Agosto. 1982.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 3rd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1984.

KOERNER, R. M. Designing with geosynthetics. **Xlibris Corporation**. v. 1, p. 508, 2012.

KOERNER, R. M.; SOONG, T. Geosynthetic reinforced segmental retaining walls. **Geotextiles e Geomembranes**. Barking, v. 19, p. 359-386, 2001.

KOERNER, R.M.; SOONG, T. Geosynthetic reinforced segmental retaining wall. **Geotextiles and Geomembranes**, Barking Essex. v.19. p; 359 -386. 2001.

KUMAR, P. S.; RAJKUMAR, R. Effect of Geotextile on CBR Strength of Unpaved Road with Soft Subgrade. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. Bund. J, v. 17, p. 1355-1363, 2012.

LOVE, A.E.H. The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. **Philosophical Transaction of the Royal Society Serie A**. v.228, p.377-420, 1929.

MARQUES, G. S.; SILVA, J. L. Interaction Between a Lateritic Soil and a Non-woven Geotextile in Different Moisture Conditions. **Frontiers In Built Environment**. [S.L.], v. 6, 16 jul. 2020.

MARTINS, C.C. **Análise e reavaliação de estruturas em solos reforçados com geotêxteis**. 2000. 270 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

MEHRAD M.; REZA Z. M. Influência do reforço geossintético nas características de resistência ao cisalhamento do subleito de duas camadas. **Acta Geotechnica Slovenica** , v. 8, n. 1, pág. 39-49, 2011.

MENDES, M. J. A.; ARAÚJO, G. L. S.; PALMEIRA, E. M. Previsão de deformações em muros de solos reforçados com geotêxteis utilizando valores de rigidez obtidos em laboratório para condições de confinamento. **CMNE/CILAMCE**. Porto, jun. 2007.

MENDES, M. J. A.; PALMEIRA, E. M.; MATHEUS, E. Some factors affecting the in-soil load–strain behaviour of virgin and damaged nonwoven geotextiles. **Geosynthetics International**. v. 1, p. 39–50, 2007.

MENDES, M. J. **Comportamento Carga-Alongamento de Geotêxteis não tecidos submetidos a tração confinada**. 2006. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

MIRMORADI, S.H.; EHRLICH, M. Modeling of the compaction-induced stress on reinforced soil walls. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 82-88, fev. 2015.

MITCHELL, J.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3^a ed. 592 p. 2005.

MONTE, L. A. C. **Reforço de estradas não pavimentadas com geossintéticos: requisitos geotécnicos e métodos de dimensionamento**. 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Do Porto, Porto, 2016.

MORSY, A. M.; ZORNBERG, J. G. Soil-reinforcement interaction: stress regime evolution in geosynthetic-reinforced soils. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 323-342, fev. 2021.

NAEINI S. A.; MIRZAKHANLARI M. The Effect of Geotextile and Grading on the Bearing Ratio of Granular Soils. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, Bund. J , v. 13, p. 2-10, 2009.

NAEINI, S. A.; MOAYED, R. Effect of Plasticity Index and Reinforcement on the CBR Value of Soft Clay. **International Journal Of Civil Engineerng**. v. 7, n. 2, p. 124-130, jun. 2009.

NAIR, A.M.; LATHA G. M. Bearing resistance of geosynthetic reinforced soil-aggregate systems. **Geotide**, Guntur (Índia), v. 12, n. 560, p. 185-188, 2009.

NETTERBERG, F. **Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements**. Council for Scientific & Industrial Research, ASANDRA, South Africa, 2014.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. A new soil classification for road engineering purposes. In: **Proceedings of Brazilian Syposium on Tropical Soils**. Rio de Janeiro, RJ. p. 30-40. 1981.

O' KELLY B. C.; NAUGHTON U. G. T. O. J. On the interface shear resistance of a novel geogrid with in-plane drainage capability. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 26, p. 357-362, 2008.

OLIVEIRA, L. A.; VIANA, P. M. F.; SANTOS, D. C. R.; REIS, E. F. Uso de geossintéticos como reforço em estradas não pavimentadas. **Engenharia Agrícola**. [S.L.], v. 36, n. 3, p. 546-557, jun. 2016.

OLIVEIRA, L.V.C.; CARMO, A.K.F.; FONTES, G.A.A.; SOL, R.R.S.; PITANGA, H.N.; SILVA, T.O. Resistência à Compressão Simples de Solos residuais Compactados Reforçados com Geossintético. In: XVII Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: ABMS, 8p.

PALMEIRA, E. M. Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis. **Geotextiles And Geomembranes**. [S.L.], v. 27, n. 5, p. 368-390, out. 2009.

PALMEIRA, E. M. **Utilização de geotêxteis como reforço de aterros sobre solos moles**. 1981. 282 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1981.

PATIAS, J.. **Avaliação do uso de solos não convencionais em estruturas de solo reforçado**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PENHA, M. J. A. Z. **Algumas Considerações a Respeito da Resistência ao Cisalhamento na Interface Solo Argiloso - Geotêxtil Não-Tecido**. 1999. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PERKINS, S.W. Mechanical Response of Geosynthetic-Reinforced Flexible Pavements, **Geosynthetics International**. Vol. 6, No. 5, pp. 347-382, 1999.

PIEROZAN, R. C. **Estudo da resistência de interface de tiras metálicas e poliméricas em diferentes solos**. 2018. 287 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Brasília, Brasília, 2018.

PINHO-LOPES; LOPES. Soil-geosynthetic interaction in inclined-plane shear and geosynthetic short-term tensile response – Influence of installation damage. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 274, p. 122018, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122018>.

PLÁCIDO, R. R. **Análises de campo e laboratório do comportamento ao longo do tempo de muros de solos tropicais finos reforçados com geossintéticos**. 2016. 399 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PORTELINHA, F. H. M. **Avaliação experimental da influência do avanço do umedecimento no comportamento de muros de solos finos reforçados com geotêxteis não tecidos**. 2012. 297 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PORTELINHA, F.H.M.; ZORNBERG, J.G.. Effect of infiltration on the performance of an unsaturated geotextile-reinforced soil wall. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 211-226, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.02.002>.

PRAVEEN, G.V.; KURRE, Pandu. Large direct shear testing to evaluate the interaction behaviour of murrum soil and geosynthetics for the reinforced soil construction. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], set. 2020. Elsevier BV.

RAMAIAH, B.J.; RAMANA, G.V.; DATTA, Manoj. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. **Waste Management**, [S.L.], v. 68, p. 275-291, out. 2017. Elsevier BV.

RENARD, M.; LAGABRILLE, Y.; MARTIN, E. **Eléments de géologie**. 16^a ed. Sciences Sup. French, 1152p. 2018.

SIEIRA, A. **Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha**. 2003. 377 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

TEIXEIRA, S. H. C.. **Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados**. 2003. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2003.

VANGLA, PrashanthP.; LATHA, G.ali MadhaviM. Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology. **International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering**, [S.L.], v. 1, n. 1, 15 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC

VILAR, O. M. e BUENO, B. S. Some topics regarding the influence of nonsaturation on the behavior of reinforced soil structures built with tropical soils. **in Proceedings of the First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition**. Cancun, 272–280. 2008.

ZHENG, G.; YU, X.; ZHOU, H.; YANG, X.; GUO, W.; YANG, P. Influence of geosynthetic reinforcement on the stability of an embankment with rigid columns embedded in an inclined underlying stratum. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 180-187, fev. 2021.

ZORBERG, J. G. Sistemas de pavimentos reforçados con geosintéticos. **Ingeniería civil**. v. 171, p. 5- 25, 2013.

ZORNBERG, J. G.; KANG, Y. Pullout of geosynthetic reinforcement with in-plane drainage capability. **Geosynthetic Research and Development in Progress**, GRI-18, 2005.