INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL – DACC
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

CAROLINA DUTRA NICHELE

ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO À UM SOLO RESIDUAL SILTE ARGILOSO COM VISTAS À MELHORIA DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL – DACC
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

CAROLINA DUTRA NICHELE

ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO À UM SOLO RESIDUAL SILTE ARGILOSO COM VISTAS À MELHORIA DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Dra. Fernanda Simoni Schuch

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Nichele, Carolina Dutra
ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO À UM SOLO RESIDUAL SILTE ARGILOSO COM VISTAS À MELHORIA DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS / Carolina Dutra Nichele ; orientação de Fernanda Simoni Schuch. - Florianópolis, SC, 2020.
90 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.
Inclui Referências.

1. Fibra PET. 2. Solo melhorado. 3. Densidade do solo. 4. Cisalhamento direto. I. Schuch, Fernanda Simoni . II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO À UM SOLO RESIDUAL SILTE ARGILOSO COM VISTAS À MELHORIA DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

CAROLINA DUTRA NICHELE

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de outubro de 2020

Banca Examinadora:

Profa. Fernanda Simoni Schuch, Dra Orientadora
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Fábio Krueger da Silva
PROFESSOR
SIAPE 1695463
IFSC - Campus Florianópolis
(assinatura)
Fábio Krueger da Silva

Prof. Fábio Krueger da Silva, Dr.
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Prof. Gustavo Rodolfo Perius, Me.
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
Gracieli Dienstmann
Data: 12/11/2020 21:54:56-0300
CPF: 056.422.359-07

Profa. Gracieli Dienstmann, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais Marcos e Roseli.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela força e coragem para superar todos os desafios que surgiram durante a graduação e o trabalho de conclusão.

À meus pais Marcos e Roseli, pelo apoio e confiança de que tudo isso seria possível, por todo o carinho e valores passados, devo tudo que sou a vocês. Essa conquista é nossa!

À meu irmão Mathias, tios, tias, primos, primas, amigos e colegas de trabalho que sempre me deram palavras de força e incentivo nos momentos difíceis dessa caminhada.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina IFSC pela oportunidade, por todos os conhecimentos adquiridos e pela infraestrutura disponibilizada ao longo da graduação. Orgulho de ter feito parte dessa instituição pública e de alta qualidade de ensino;

À minha orientadora Professora Fernanda Simoni Schuch, que durante esses dois semestres não mediu esforços para que o trabalho tivesse o seu melhor desempenho, sempre com muita paciência e dedicação nas assessorias, muito obrigada professora, sem você nada disso seria possível.

À minha parceira de laboratório Letícia Alves Pereira, que topou a loucura de fazer um TCC em laboratório sabendo que seriam tardes longas (noites também) dedicadas aos ensaios de caracterização, além das conversas incentivadoras quando achávamos que não concluiríamos os afazeres no prazo.

À empresa Cordoaria Brasil pela disponibilidade em doar a fibra PET para a realização do trabalho, assim como ao Engenheiro Mário pela recepção e explicações durante a visita à fábrica.

Ao técnico do laboratório de solos e materiais do IFSC Rafael, pelos conselhos e auxílio durante os ensaios laboratoriais.

Ao colega de curso, Guilherme Hickel, pelo auxilio durante as rupturas na prensa EMIC do laboratório do IFSC.

Á professora Andrea Betioli, pela ajuda em encontrar a fábrica de fibra assim como na elaboração das análises estatísticas.

Ao laboratório de Engenharia Civil da Unisul, por ter aberto as suas portas para a realização do ensaio de cisalhamento e principalmente à técnica Franciely pela disposição e dedicação.

Aos professores Fábio Krueger da Silva, Gustavo Rodolfo Perius e Gracieli Dienstmann por terem aceitado o convite para participar da banca e pelos conselhos durante o projeto de trabalho de conclusão.

Aos profissionais do DACC do IFSC que durante esses seis anos de curso, compartilharam de seus conhecimentos e experiências, obrigada por acreditarem no meu potencial.

Aos meus colegas de curso, por toda a amizade e companheirismo nesses árduos anos de estudos, principalmente a Ana Paula Hatsumi Correa que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis da graduação assim como nos mais felizes também, obrigada ami, que nossa amizade perdure para além da faculdade.

À todos que de alguma forma contribuíram para o êxito desse trabalho, muito obrigada!

“Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz somente até onde os outros foram” (Alexander Graham Bell)

RESUMO

Dada a crescente produção de resíduos provenientes do alto consumo de produtos industriais, aliada a incorreta destinação final, o déficit de materiais de baixo custo e alta potencialidade para uso na área da construção civil, faz-se necessário o estudo de resíduos que possam ser incorporados nos materiais desse mercado, aliando assim, questões ambientais com a necessidade de novos insumos na construção civil. Assim, o presente trabalho faz a avaliação de melhorias das propriedades de um solo silte argiloso reforçado com fibra de Polietileno Tereftalato - PET. Para isso, após a caracterização do solo, realizou-se misturas de fibra PET ao solo em diferentes teores (0%; 0,5%; e 1,0) e, avaliou-se as mudanças provocadas no comportamento físico e mecânico do compósito. Para tanto, moldou-se corpos de prova que foram submetidos a~~os~~ ensaios de compactação, compressão simples não confinada e, cisalhamento direto (para alguns teores, 0% e 1%). Os resultados obtidos mostraram que, comparando-se o solo com adição (0,5% e 1%) ao solo sem adição (0%), obteve-se diminuição da massa específica aparente seca máxima e um aumento na tensão máxima de ruptura pós-pico para o teor de 0,5% e, para 1,0% de adição o compósito obteve diminuição da massa específica aparente seca máxima, aumento de tensão máxima a compressão e uma maior resistência pós-pico e para os parâmetros de cisalhamento, obteve um aumento no ângulo de atrito interno e diminuição da coesão.

Palavras-Chave: Fibra PET. Solo melhorado. Densidade do solo. Cisalhamento direto.

ABSTRACT

Due to increasing production of waste derived from the high consumption of industrial products combined with the incorrect final disposal, the deficit of low-cost materials and high potential for use in the area of civil construction, it is necessary to study residues that can be incorporated in the materials of this market, thus combining environmental issues with the need for new inputs in civil construction. Thus, the present work evaluates improvements in the properties of a clay silt soil reinforced with Polyethylene Terephthalate - PET fiber. For this, after the characterization of the soil, PET fiber mixtures were made to the soil in different levels (0%; 0.5%; and 1.0) and, the changes caused in the physical and mechanical behavior of the composite were evaluated. For this, specimens were molded and submitted to the compaction tests, simple unconfined compression and direct shear (for some contents, 0% and 1%). The results obtained showed that, comparing the soil with addition (0.5% and 1%) to the soil without addition (0%), it was obtained a decrease in the maximum dry specific density and an increase in the maximum rupture stress after -peak for 0.5% content and, for 1.0% addition, the composite obtained a decrease in the maximum dry specific gravity, an increase in maximum compression stress and a greater post-peak strength and for the shear parameters, obtained an increase in the internal friction angle and a decrease in cohesion.

Keywords: PET fiber. Improved soil. Soil density. Direct shear test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Preenchimento do solo 23
Figura 2 - Diagrama Trilinear 26
Figura 3 - Terminologia do sistema unificado 27
Figura 4 - Carta de plasticidade 28
Figura 5 - Esquema classificação unificada 29
Figura 6 - Conjunto peneiras 31
Figura 7 - Ensaio de sedimentação 32
Figura 8 - Limite de Atterberg dos solos 33
Figura 9 - Aparelho de Casagrande para determinação de LL 34
Figura 10 - Ensaio limite de plasticidade 34
Figura 11 - Conjunto de Proctor 36
Figura 12 - Ensaio de compressão simples não confinada 37
Figura 13 - Ensaio cisalhamento direto 38
Figura 14 - Cadeias químicas da PET 40
Figura 15 - Flake 41
Figura 16 - Chips de PET 41
Figura 17 - Matriz de multifilamentos 42
Figura 18 - Carreteis de fibra 42
Figura 19 - Corte da fibra 43
Figura 20 - Fibra de PET cortada 43
Figura 21 - Fibra de sisal 46
Figura 22 - Fibra de carbono 46
Figura 23 - Fibra de vidro 47
Figura 24 - Fibra de amianto 47
Figura 25 - Fibra de aço 48
Figura 26 - Diagrama 51
Figura 27 - Local da coleta do solo 52
Figura 28 – Perfil do solo de acordo com laudo de sondagem SPT 53
Figura 29 - Perfil do terreno de coleta 54
Figura 30 - Mapa geológico de Santa Catarina 54
Figura 31 - A fibra PET 55
Figura 32 - Determinação da massa específica da fibra PET 56

Figura 33 - Compactador motorizado de Proctor e CBR Contenco..... 57
Figura 34 - Corpo de prova moldado com o compactador motorizado Contenco . 58
Figura 35 - Corpo de prova após pesagem e retirada de amostras 58
Figura 36 - Homogeneização da mistura solo-fibra..... 59
Figura 37 - Homogeneização da mistura solo-fibra..... 60
Figura 38 - a,b,c) Molde 100/50mm e corpo de prova..... 61
Figura 39 - a,b) Corpo de prova para moldagem ensaio de cisalhamento..... 62
Figura 40 - a) Prensa EMIC DL30000 e b) corpo de prova 63
Figura 41 - Gráfico de deformação prensa EMIC..... 64
Figura 42 - a, b, c e d) Moldagem dos corpos de prova cúbicos..... 65
Figura 43 - Corpo de prova saturado 66
Figura 44 - Velocidade de ensaio..... 67
Figura 45 - Equipamento de cisalhamento direto Matest 67
Figura 46 - Frações granulométricas do solo 69
Figura 47 - Curvas de Compactação..... 71
Figura 48 - Teor de fibra PET x Densidade Seca Máxima..... 72
Figura 49 - Gráfico Tensão x Deformação..... 74
Figura 50 - Corpos de prova após a ruptura a) solo natural b) adição 0,5% e c) 1,0% 76
Figura 51 - Gráfico tensão cisalhante x deformação horizontal do solo natural 77
Figura 52 - Gráfico deformação vertical x deformação horizontal do solo natural. 78
Figura 53 - Gráfico tensão cisalhante x deformação horizontal do solo fibra 78
Figura 54 - Gráfico deformação vertical x deformação horizontal do solo natural. 79
Figura 55 - Envoltória de Mohr Couloumb para 10% de deformação – Amostra solo 0% de adição..... 80
Figura 57 - Envoltória de Mohr Couloumb para 10% de deformação – Amostra solo fibra 1% 80
Figura 58 - Corpos de prova após ensaio a)solo natural e b)solo fibra 81

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Índices de Atterberg solos brasileiros 35
Tabela 2 - Energias de compactação 37
Tabela 3 - Teores de fibra de autores de trabalhos com fibra PET 55
Tabela 4 - Quantificação corpos de prova 62
Tabela 5 - Propriedades físicas da fibra 68
Tabela 6 - Frações granulométricas do solo natural 70
Tabela 7 - Resultados ensaio de compactação 71
Tabela 8 - Quantidade de material para moldagem dos corpos de prova para compressão simples 73
Tabela 9 - Tensão máxima de ruptura para os corpos de prova 73
Tabela 10 - Determinação do índice de vazios das amostras 74
Tabela 11 - Módulo de elasticidade médio de pico e 2mm pós-pico 75
Tabela 12 - Resultado teste de *Duncan* 76
Tabela 13 - Índices físicos 82
Tabela 14 - Quadro resumo dos resultados obtidos na caracterização mecânica. 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Material
c	Intercepto coesivo total
CBR	California Bearing Ratio
Cc	Coeficiente de compressão
Cc	Coeficiente de curvatura
cm	Centímetro
Cu	Coeficiente de uniformidade
D10	Diâmetro efetivo
D30	Diâmetro correspondente a 30 % passante
D60	Diâmetro correspondente a 60 % passante
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IP	Índice de Plasticidade
kg	Quilograma
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
m	Metro
mm	Milímetro
Mpa	Megapascal
N	Newton
NBR	Norma brasileira
SC	Santa Catarina
Wotm	Umidade ótima

LISTA DE SÍMBOLOS

°	Grau
γd	Peso específico aparente seco
δg	Densidade real dos grãos
σ	Tensão total
τ	Tensão cisalhante
ϕ	Ângulo de atrito interno
α	Ângulo de atrito interno
φ	Ângulo de atrito total

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Justificativa 19
1.2 Objetivos 21
1.3 Estrutura do Trabalho 22

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 23
2.1 O solo 23
2.1.1 Estado do solo 23
2.1.2 Classificação dos solos 25
2.1.2.1 Classificação Trilinear ou Textural 26
2.1.2.2 Classificação Unificada 26
2.2 Ensaios laboratoriais 29
2.2.1 Massa Específica 30
2.2.2 Análise Granulométrica 30
2.2.2.1 Peneiramento 30
2.2.2.2 Sedimentação 31
2.2.3 Índice de Consistência (limites de Atterberg) 32
2.2.4 Compactação 35
2.2.5 Ensaio de compressão não confinado 37
2.2.6 Ensaio de Cisalhamento Direto 38
2.3 Polietileno Tereftalato (PET) 39
2.3.1 Características da PET 39
2.3.2 Processo produtivo da fibra PET 41
2.4 Melhoria, reforço e estabilização dos solos 43
2.4.1 Solo fibras 44
2.4.1.1 Fibras Naturais 45
2.4.1.2 Fibras Minerais 46
2.4.1.3 Fibras Metálicas 48
2.4.1.4 Fibras Poliméricas 48

3 METODOLOGIA DA PESQUISA 51
3.1 Materiais utilizados na pesquisa 52

3.1.1 O solo 52
3.1.2 A fibra de Polietileno Tereftalato (PET) 55
3.2 Método de Laboratório 56
3.2.1 Ensaios de caracterização 56
3.2.2 Ensaio de compactação 57
3.2.3 Mistura e moldagem dos corpos de prova do ensaio de compressão simples e cisalhamento direto 59
3.2.4 Ensaio de compressão simples não confinada 63
3.2.5 Análise estatística dos resultados de compressão simples 64
3.2.6 Ensaio de cisalhamento direto 64

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 68
4.1 Caracterização física 68
4.1.1 Fibra PET 68
4.1.2 Solo 68
4.2 Compactação 70
4.3 Compressão simples 73
4.3.1 Tensões máximas de ruptura 73
4.3.2 Comportamento tensão x deformação 74
4.3.3 Análise estatística 76
4.4 Cisalhamento direto 77

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 83

REFERÊNCIAS 86

1 INTRODUÇÃO

O solo é um dos materiais mais abundantes na natureza e é frequentemente usado na construção civil. Porém, nem sempre o material disponível no local da obra atenderá as especificações de projeto, e assim, surge a necessidade do uso de jazidas próximas para atender as especificações de projeto ou então, um melhoramento das propriedades do solo disponível na localidade.

O melhoramento de solo é feito de acordo com as propriedades a serem reforçadas, podendo receber adição de cal, cimento ou fibras. Na natureza temos diversos exemplos de reforço no solo: abrigo de animais, ninhos de pássaros e estabilização de taludes através das raízes das árvores (BENJAMIN, 2006).

O uso de materiais para o reforço de solos para uso geotécnico teve início há milhares de anos, sendo mais comum o uso de materiais vegetais fibrosos. A construção mais antiga com uso de reforço em construções, é o Zigurate, construído em 2100 a.C pelo rei Ur na Mesopotâmia que consiste em várias plataformas sobrepostas que variam de 10 e 20 metros de altura, reforçadas com raízes. Outro registro é de 1500 d.C no Peru, onde os Incas usaram misturas de lã e argila para reforçar as calçadas do Templo do Sol e da Lua (BENJAMIN, 2006).

Segundo Girardello (2010), Henri Vidal, engenheiro francês, iniciou na década de 60 um conceito de reforço da engenharia moderna, descrito como terra-armada, onde a interação entre o solo e os membros de reforço – tiras metálicas planas colocadas horizontalmente no solo – era feita exclusivamente por atrito devido ao peso próprio.

Em contrapartida, segundo Feuerharmel (2000), o uso das fibras para reforço de solos, nos moldes que conhecemos atualmente teve os estudos iniciados a pouco mais de quatro décadas. A técnica desenvolvida primordialmente consistia em inclusões discretas e orientadas das fibras no solo, só depois iniciou-se as inclusões aleatoriamente distribuídas.

Atualmente a técnica de solo reforçado com fibras é alvo de diversas pesquisas, seja com fibras naturais, sintéticas ou poliméricas e com os mais variados tipos de aplicações.

Inserindo o conceito de solo reforçado com fibras nos dias atuais, onde diversos resíduos são produzidos sem ter uma destinação correta e que acabam sendo descartados no meio ambiente, acarretando diversos problemas como:

poluição de rios, agravamento de situações de enchentes além da contaminação do lençol freático (SENEZ, 2016).

Um material muito usado pelos brasileiros e com grande taxa de destinação incorreta, são as garrafas de Polietileno Tereftalato mais conhecido como PET, um material que leva aproximadamente 100 anos para se decompor. No ano de 2016, a ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET publicou um Censo que mostra que no ano de 2015, 274 mil toneladas de PET foram reciclados, representando apenas 51% do total de PET produzido no país. Dessa taxa de PET reciclado, 25,7% são utilizados nas indústrias têxteis; 25,7% em embalagens para alimentos e não alimentos e 28,6% em resinas insaturadas e alquídicas tendo uma menor parcela para produção de lâminas e chapas, fitas de arquear e outros.

Além dos usos citados anteriormente, tem sido cada vez mais comum a utilização desse material em trabalhos geotécnicos, sendo algo bastante promissor e que pode trazer uma redução nos problemas ambientais gerados por esse resíduo, além disso, têm como consequência um maior investimento em pesquisas nesse assunto, pois para que o uso de PET nesse caso seja possível, é necessário que haja um estudo amplo do comportamento da mistura solo-PET e de suas características físicas, químicas e ambientais (LUCARELLI, 2018).

Sendo assim, tem-se como problema de pesquisa as seguintes questões: há melhoria de alguma propriedade de solo pela adição de fibra de PET ao solo?; Qual(is) melhorias são observadas pela adição de fibra PET no solo?; De quanto é essa melhoria?

Buscando contribuir para que a destinação do PET para obras geotécnicas seja possível, este trabalho buscará um melhor entendimento da interação solo-PET, analisando fatores que podem influenciar nas propriedades geotécnicas do solo.

1.1 Justificativa

Com o aumento do valor das matérias primas utilizados na construção civil e com a diminuição dos recursos ambientais, é de extrema importância que se busque materiais de baixo custo e com boa qualidade para uso na construção civil.

Na geotecnia existe a necessidade de incorporação de materiais no solo para que se alcancem as propriedades específicas, de modo a enquadrar o material

ao uso vigente, pois os recursos estão cada vez mais escassos e nem sempre o material a disposição atenderá os requisitos necessários. Segundo Mitchell e Katti (1981), existem diversas técnicas de melhoria de solo: compactação, consolidação por pré-carregamento com ou sem drenos verticais, injeção de materiais estabilizantes, estabilização por processos físico-químicos e reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes (geotêxteis, fibras, tiras, grelhas,etc).

Trazendo a melhoria de solos para um contexto sustentável, torna-se cada vez mais comum a utilização de materiais que seriam descartados no meio ambiente para a produção de um novo subproduto que possa ser utilizado para outras aplicações, e assim atender a demanda de consumo para obras geotécnicas.

Diversos estudos já foram realizados com a incorporação de resíduos no solo, entre os resíduos, o Polietileno Tereftalato (PET). As pesquisas visam esclarecer as melhorias que o material traz ao solo com aplicação nas mais diversas áreas da geotecnia, sendo alguns deles: Bento (2006) onde afirmou que as fibras atuam combatendo a propagação da expansão da matriz do solo e propiciando sua desagregação em lugar da ruptura em bloco; Pinto et al. (2010) chegaram em resultados de Índice de Suporte Califórnia superiores ao valor mínimo de ISC que é da ordem de 2%, no aterro da rodovia que foi objeto de estudo; Assis e Melo (2012) com os resultados obtidos afirmam que de acordo com os ensaios de ISC e expansão a adição de PET trouxe melhorias para as propriedades do solo; Santos e Silva (2015) chegaram a resultados onde pode-se concluir que a adição de fibras é eficiente no combate das fissuras no solo; Campello (2016) obteve uma redução de 60% nos recalques medidos na matriz arenosa com a adição de PET; Oliveira et al. (2016) obtiveram resultados onde pode-se perceber uma diminuição da umidade ótima e da massa específica seca máxima, além da diminuição da expansão do solo no ensaio de ISC; May e Silva (2016) obtiveram uma melhora na resistência ao cisalhamento do solo de predominância arenosa, além da diminuição da expansão do solo; Lucarelli (2018) concluiu que a adição de fibra ao solo acarreta uma diminuição do peso específico aparente seco da mistura em comparação a um solo natural, além de um aumento no suporte de ISC e diminuição da expansão; e Pont et al. (2019) afirmam que a adição de fibras ao solo se mostra eficiente nas propriedades mecânicas pós-fissuração, onde ela melhora a ductilidade e coesão do solo.

O método de mistura solo fibra tem-se mostrado eficiente quando usado em solos cimentados ou não, devido a melhoria das propriedades mecânicas que é capaz de conferir ao solo, principalmente os aumentos de resistência, ductilidade e da tenacidade, e a diminuição da queda de resistência pós-pico (LEUCÁDIO, 2005).

Então, é relevante o crescente desenvolvimento de pesquisas analisando a viabilidade do uso de resíduos de PET como reforço de solos para a melhoria de características geotécnicas, sendo um uso economicamente viável e além disso sustentável pois dá ao resíduo um destino útil, reduzindo assim, a destinação desse material para a natureza.

Nesse aspecto, é de válida importância o estudo de reforço de solos com fibras PET, pois além de contribuir para resoluções de problemas técnicos ajuda também, na resolução de problemas ambientais.

1.2 Objetivos

A pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento mecânico de um solo silte argiloso da região da grande Florianópolis, melhorado com fibras de Polietileno Tereftalato (PET) com distribuição aleatória.

Dado o objetivo geral, tem-se os objetivos específicos:

i. Verificar alterações de massa específica aparente máxima e umidade ótima provocadas pela inserção da fibra PET no solo silte argiloso compactado, variando-se as quantidades de fibra;
ii. Medir possíveis alterações de tensão máxima de ruptura e tensão pós pico provocadas pela inserção da fibra PET no solo silte argiloso compactado, variando-se as quantidades de fibra;
iii. Observar se há alterações no ângulo de atrito interno e no fator coesão de um solo silte argiloso compactado, provocadas pela inserção da fibra PET, variando-se as quantidades de fibra.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 partes, conforme descrição abaixo:

a) Introdução geral: considerações iniciais sobre o uso das misturas solo-fibras no decorrer da história e atualmente como reforço de solos, justificativa da relevância do presente estudo, e os objetivos gerais e específicos;

b) Fundamentação teórica: introdução do assunto solo-fibra, abordando os ensaios laboratoriais mais utilizados para caracterização do solo, apresentação do Polietileno Tereftalato desde a sua composição química até o processo de produção da fibra e definição dos conceitos de melhoria, reforço e estabilização dos solos e os diversos tipos de solo-fibra existentes até o compósito solo-fibra PET;

c) Definição do método da pesquisa do solo com adição de dois teores de fibra PET 0,5% e 1,0% com o objetivo de avaliar se há ganhos de parâmetros de resistência à compressão e ao cisalhamento direto. São definidos os ensaios realizados para caracterização do solo e da fibra além das informações do local de retirada da amostra deformada de solo.

d) Resultados da caracterização e classificação do solo. Avaliação da influência da adição das fibras de Polietileno Tereftalato (PET) de distribuição aleatória na resistência a compressão simples e cisalhamento através dos ensaios realizados e comparação com os resultados do natural; e

e) Considerações finais onde são expostas as conclusões finais acerca do trabalho desenvolvido ao longo do semestre e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão revisadas literaturas pertinentes ao tema de pesquisa, que servirão como embasamento teórico para a realização dos ensaios e aplicação de metodologias. A formação geológica do solo, parâmetros geotécnicos, reforço de solo com adição de resíduos estudadas por outros pesquisadores e ensaios laboratoriais serão temas abordados a seguir.

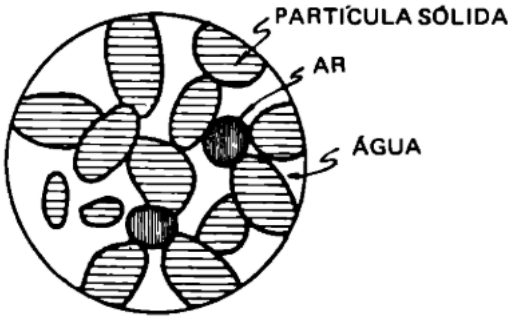
2.1 O solo

O solo é consequência de uma decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre que sofreu diversas modificações e decomposições. Nos próximos tópicos serão apresentados os estados do solo e os tipos de classificação.

2.1.1 Estado do solo

O solo em massa, é um conjunto de partículas sólidas tendo vazios ou aberturas de vários tamanhos. Esses vazios podem ser preenchidos com água ou ar, totalmente ou parcialmente (CAPUTO, 1988), conforme figura 1.

Figura 1 - Preenchimento do solo



Fonte: Caputo (1988)

Segundo Pinto (2006), denominam-se *fases* as partículas sólidas, água e ar e o comportamento do solo será influenciado pela quantidade relativa de cada uma destas. São empregadas diversas relações para expressar as proporções entre as mesmas.

As propriedades do solo são influenciadas também pelo estado em que o solo se encontra e para defini-lo, utilizam-se índices que irão correlacionar peso e volume das três fases. Esses índices são descritos a seguir:

a) Umidade: relação entre o peso da água e o peso dos sólidos, é expressa pela letra *w.* É determinado em laboratório.

b) Índice de vazios: relação entre o volume de vazios e o volume total e é expresso pela letra *e.* É calculado a partir de outros índices, conforme equação 1.

$$e = \frac{\gamma_S}{\gamma_d} - 1 \quad (1)$$

Sendo:

γ_S = peso específico dos grãos;

γ_d = peso específico aparente seco.

c) Grau de saturação: relação entre o volume de água e volume de vazios e é determinado através de cálculos, conforme equação 2, expresso pela letra *S*.

$$S = \frac{\gamma_S . w}{e \times \gamma_w} \ [\%] \quad (2)$$

Sendo:

e = índice de vazios;

w = umidade;

γ_S = peso específico dos grãos;

γ_d = peso específico da água.

d) Peso específicos dos sólidos ou dos grãos: relação entre o peso dos grãos e o seu volume, expresso pelo símbolo γ_S. É determinado em laboratório.

e) Peso específico da água: Adota-se sempre como 10kN/m³, mesmo que esse valor varie um pouco de acordo com a temperatura e de acordo com a concentração de minerais, expresso por γ_w.

f) Peso específico natural: relação entre peso total do solo e seu volume total, expresso por γ_n. É determinado em laboratório.

g) Peso específico aparente seco: relação entre peso dos sólidos e volume total. Seria o peso específico que o solo teria caso fosse possível o solo ficar seco sem variação de volume, expresso por γ_d. Calculado a partir do peso específico natural e da umidade, conforme equação 3.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+w} \quad (3)$$

Sendo:

γ_S = peso específico dos grãos;

w = teor de umidade;

h) Peso específico aparente saturado: seria o peso específico que o solo teria caso fosse possível o solo ficar saturado sem variação de volume, expresso por γ_{sat} e de pouca aplicação prática. Conforme equação 4.

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e.\gamma_w}{1+e} \quad (4)$$

Sendo:

γ_S = peso específico dos grãos;

e = índice de vazios;

γ_w = peso específico da água.

i) Peso específico submerso: peso específico do solo quando submerso, expresso por $\gamma_{sub,}$ é igual ao peso específico natural menos o peso específico da água.

2.1.2 Classificação dos solos

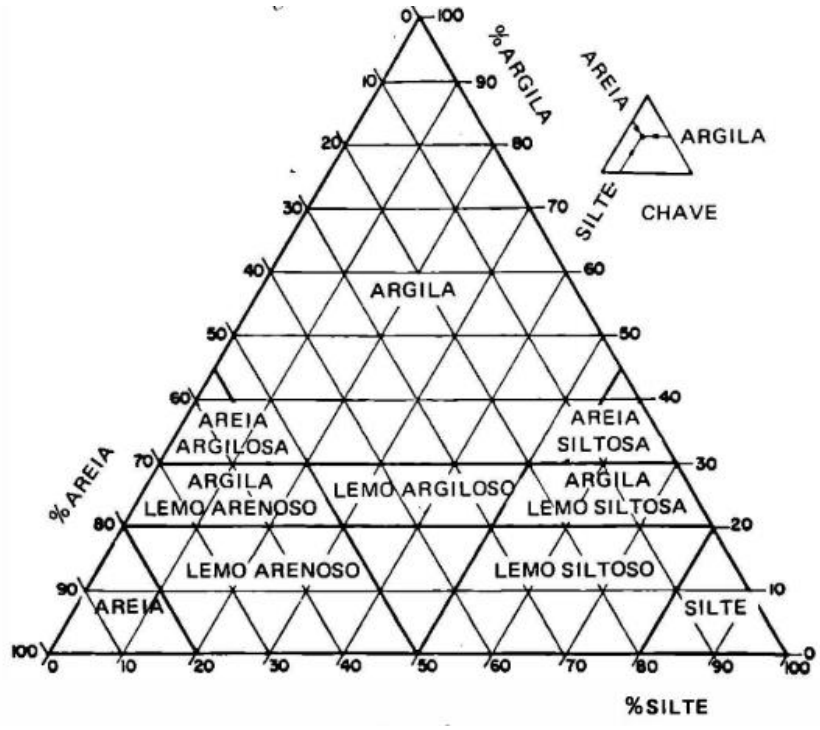
Sob o ponto de vista da engenharia, a classificação do solo permite que o comportamento do solo em questão seja previsível ou pelo menos, possibilita uma análise adequada do problema (PINTO, 2006).

Existem diversas maneiras de se classificar um solo, como pela origem, pela evolução, presença ou não de matéria orgânica, etc. A classificação baseada no tipo e no comportamento das partículas é o mais utilizado na engenharia de solos, tendo como objetivo a definição de grupos de solos que apresentam características e comportamentos semelhantes sob os interesses da engenharia civil. Nesses sistemas, são geralmente empregados os sistemas de composição granulométrica e os limites ~~de~~ de Atterberg (PINTO, 2006).

2.1.2.1 Classificação Trilinear ou Textural

A classificação trilinear é feita através de um diagrama dividido em zonas, cada uma correspondendo a um tipo de solo. A identificação é realizada em função das porcentagens dos principais constituintes do solo, as três frações granulométricas: areia, silte e argila, como exemplificado na figura 2 (CAPUTO, 1988).

Figura 2 - Diagrama Trilinear



Fonte: Caputo (1988)

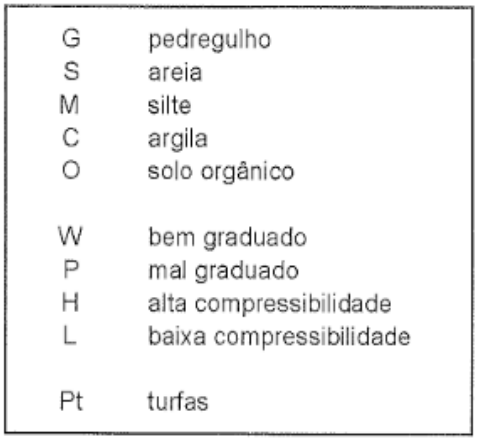
Então, um ponto no diagrama, determinado pelas coordenadas triangulares das porcentagens das frações, representa o solo. Como exemplo, na figura 6, um solo com 20% de silte, 60% de argila e 20% de areia, é classificado como um solo argiloso.

2.1.2.2 Classificação Unificada

O sistema de classificação unificado foi desenvolvido inicialmente pelo professor Arthur Casagrande para obras de aeroportos, porém seu emprego foi generalizado e atualmente é usado principalmente pelos geotécnicos de obras de barragens de terra (PINTO, 2006).

Nessa classificação, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, como apresentado na figura 3.

Figura 3 - Terminologia do sistema unificado



G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Fonte: Pinto (2006)

Para fazer essa classificação, utiliza-se a porcentagem de finos presente no solo, sendo considerado material fino o que passa na peneira número 200 (0,075mm). Caso a porcentagem seja menor que 50, o solo será de granulação grosseira (G ou S) e se for superior a 50, será de granulação fina (M,C ou O). Com uma granulação grosseira, o solo terá a classificação de pedregulho ou areia, de acordo com a fração granulométrica predominante. Após essa identificação, é necessário conhecer a característica secundária do solo. Caso a porcentagem de material passante na peneira nº 200 for inferior a 5%, deve-se verificar a sua composição granulométrica. Os solos granulados podem ser caracterizados como bem-graduados ou mal graduados (PINTO, 2006).

Sob o ponto de vista da engenharia, um solo bem graduado confere um melhor comportamento ao solo, onde os grãos menores preenchem os vazios dos grãos maiores, tendo assim um maior entrosamento, aumentando a resistência e diminuindo a compressibilidade (PINTO, 2006).

Segundo Caputo (1988), define-se na curva granulométrica os parâmetros diâmetro efetivo e grau de uniformidade. Onde o diâmetro efetivo d_{ef} corresponde a 10% em peso total, de todas as partículas menores que ele e o coeficiente de uniformidade Cu é a divisão entre os diâmetros correspondentes a 60% (d_{60}) e 10% (d_{ef}) na curva granulométrica, conforme a equação 5. O autor Pinto (2006), refere-se ao diâmetro efetivo como d_{10}.

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{ef}} \quad (5)$$

Essa equação indica a falta de uniformidade, pois quanto menor o valor resultante da equação, mais bem graduado é o solo. Consideram-se solos bem graduados quando $C_u<5$ e mal graduados quando $C_u>15$, além disso podem ser considerados de uniformidade média quando $5<C_u<15$ (CAPUTO, 1988).

Pode-se ainda, definir o coeficiente de curvatura do solo, calculado através da equação 6.

$$Cc = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} x d_{10}} \quad (6)$$

Sendo que o d_{30} é o diâmetro correspondente a 30% e define-se um solo bem graduado quando C_c está entre 1 e 3.

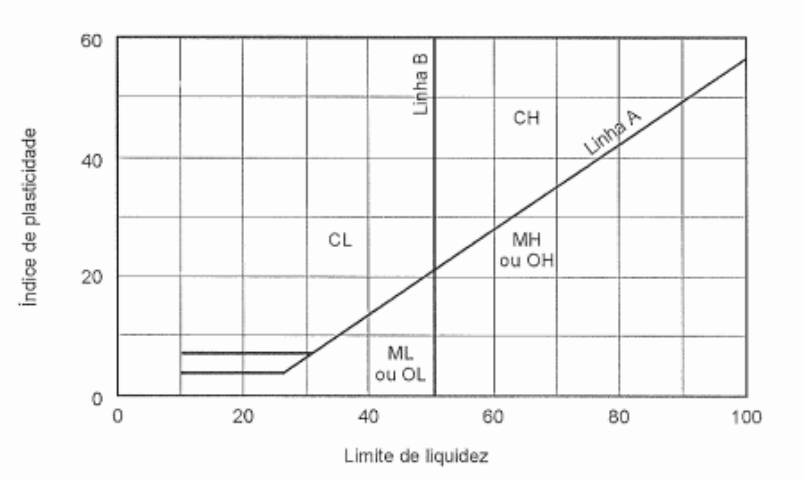
Segundo Pinto (1988), quando o solo tem predominância de fração fina, será classificado como silte (M), argila (C) ou então como solo orgânico (O). Essa classificação não será determinada pela porcentagem das frações silte e argila, pois são os índices de consistência que determinam o comportamento argiloso do solo.

Casagrande notou que ao colocar o IP (índice de plasticidade) em função do LL (limite de liquidez) num gráfico, os solos com comportamento argiloso ficavam localizadas acima de uma reta inclinada, chamada linha A, os solos orgânicos e siltosos ficam abaixo da linha A, como representado na figura 5. Sendo que a reta da linha A é definida pela equação 7.

$$IP = 0{,}73.(LL - 20) \quad (7)$$

Sendo que no seu trecho inicial, substituísse por uma faixa horizontal que corresponde a IP de 4 a 7.

Figura 4 - Carta de plasticidade



Fonte: Pinto (2006)

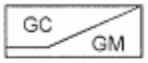
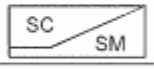
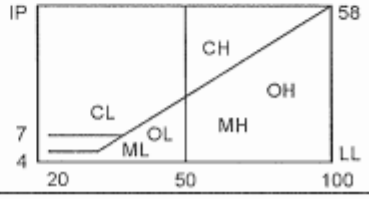
Então, para classificar o solo, basta localizar o ponto correspondente ao par LL e IP na carta de plasticidade.

O sistema considera também uma classificação secundária, onde poderão ser de alta compressibilidade (H) ou de baixa compressibilidade (L), pois quanto maior o seu limite de liquidez, mais compressível será o solo. Para areias e pedregulhos, essa classificação secundária é desconsiderada. Quando os índices indicarem um ponto muito próximo as linhas A ou B (ou sobre a faixa de IP 4 a 7), consideramos um caso intermediário e a classificação poderá ser dupla, como por exemplo SC-SM e CL-CH (PINTO, 2006).

Esse sistema de classificação considera a classificação de um solo muito orgânico onde existe muita fibra vegetal em decomposição, como turfa (Pt).

A classificação pode ser resumida conforme figura 5.

Figura 5 - Esquema classificação unificada

<table>
<tr><td rowspan="8">% P #200 < 50</td><td rowspan="4">G > S : G</td><td rowspan="2">% P #200 < 5</td><td>GW CNU > 4 e 1 < CC < 3</td></tr>
<tr><td>GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">% P #200 > 12</td><td>GC
GM</td><td rowspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>5 < #200 < 12</td><td>GW-GC, GP-GM, etc.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">S > G : S</td><td rowspan="2">% P #200 < 5</td><td>SW CNU > 6 e 1 < CC < 3</td></tr>
<tr><td>SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">% P #200 > 12</td><td>SC
SM</td><td rowspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>5 < #200 < 12</td><td>SW-SC, SP-SC, etc.</td></tr>
<tr><td rowspan="6">% P #200 > 50</td><td rowspan="2">C</td><td>CL</td><td rowspan="6"> 
</td></tr>
<tr><td>CH</td></tr>
<tr><td rowspan="2">M</td><td>ML</td></tr>
<tr><td>MH</td></tr>
<tr><td rowspan="2">O</td><td>OL</td></tr>
<tr><td>OH</td></tr>
</table>

Fonte: Pinto (2006)

2.2 Ensaios laboratoriais

A caracterização física do solo é feita normalmente através dos ensaios: análise granulométrica, determinação dos limites de consistência e a determinação da densidade das partículas sólidas. A caracterização mecânica pode ser realizada através do ensaio de compactação, compressão simples e cisalhamento direto. Todos estes, serão descritos nos tópicos a seguir.

2.2.1 Massa Específica

Como já descrito anteriormente, a massa específica é uma característica dos sólidos, sendo a relação entre o peso e volume das partículas do solo. É definida através de ensaio laboratorial com uso do picnômetro padronizado pela ABNT NBR 6458.

Sendo colocado um peso conhecido de solo no picnômetro e completado com água, verificando o peso total do conjunto. Sabe-se então que a massa do picnômetro, mais a massa do solo, menos a massa do conjunto solo e água, o valor resultante é o volume de água que foi substituída pelo solo, sendo então o volume do solo. A norma brasileira que padroniza esse ensaio é a ABNT NBR 6458.

De acordo com Pinto (2006), a massa especifica varia pouco de um solo para outro e sozinho não permite a identificação precisa do solo, mas é necessário para que se possa realizar o cálculo de outros índices. Esse parâmetro nos solos fica próximo à 2,7 g/cm³, sendo que quando não se dispõe do valor especifico do solo a ser estudado, se adota esse valor. Grãos de areia normalmente apresentam valores de 2,65 g/cm³ enquanto argilas lateríticas podem chegar a 3,0 g/cm³ em virtude da disposição de sais de ferro.

2.2.2 Análise Granulométrica

Conforme a NBR 7181 a análise granulométrica é feita em duas etapas: peneiramento e sedimentação, a segunda etapa apenas em solos finos. O peso seco do material que passa no peneiramento em cada peneira é considerado como porcentagem que passa e o material retido nas peneiras é a porcentagem retida, que será destinado então, ao ensaio de sedimentação (PINTO, 2006).

2.2.2.1 Peneiramento

Para compor a curva granulométrica da parte de peneiramento, uma amostra de solo é submetida ao peneiramento fino, com o material passante na peneira 2,0mm e lavado na peneira 0,075mm, a partir disso, o peneiramento é feito nas peneiras 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,25mm, 0,15mm e 0,075m; e o peneiramento grosso, onde só é realizado quando existirem grãos retidos na peneira 2,0mm, a partir

disso o material é peneirado nas peneiras 50mm, 38mm, 25mm, 19mm, 9,5mm e 4,8mm, como na figura 6. A partir disso, calcula-se a porcentagem retida em cada peneira e monta-se a curva granulométrica. A norma que padroniza esse ensaio é a ABNT NBR 7181.

Figura 6 - Conjunto peneiras

Fonte: da autora

2.2.2.2 Sedimentação

Quando existe a necessidade de se conhecer mais sobre a distribuição granulométrica da fração fina de solo, realiza-se o ensaio de sedimentação que é baseado na Lei de Stokes: a velocidade de queda das partículas esféricas atingem um valor limite em um fluido, que dependerá do peso específico do material da esfera, peso específico do fluido, viscosidade do fluido e do diâmetro da esfera, conforme equação 8 (PINTO, 2006).

$$U = \frac{\gamma s - \gamma w}{18 x \mu} x D^2 \quad (8)$$

Onde:

γ_s = peso específico do sólido;

γ_w = peso específico do fluido;

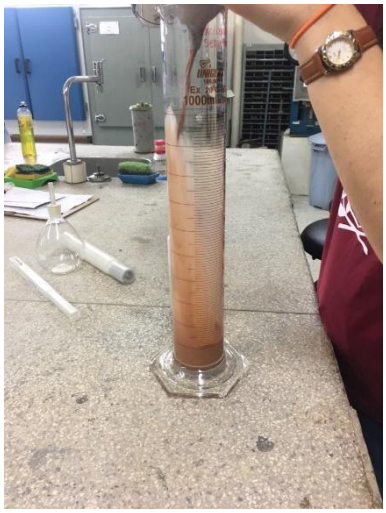
μ = viscosidade do fluido;

D = diâmetro da esfera.

Ao se depositar um solo em água, as partículas irão se depositar no fundo com velocidades diferentes de queda, que são proporcionais ao quadrado de seus diâmetros. A partir do momento que a suspensão é deixada em repouso, a densidade

se iguala em toda a profundidade, porém, com o passar do tempo as partículas maiores se depositam no fundo, fazendo com que a densidade na parte superior seja menor. Em um certo momento e certa profundidade, a densidade existente e a inicial indicarão a porcentagem de grãos com diâmetro inferior ao determinado pela lei de Stokes. Essas densidades dos materiais em suspensão são medidas com o uso de um densímetro que indica também a profundidade correspondente, com várias medidas do densímetro ao longo de um período de tempo, constituirão uma curva granulométrica, complementando a parte que foi construída pelo peneiramento. A figura 7 ilustra o ensaio. A norma que padroniza esse ensaio é a ABNT NBR 7181 (PINTO, 2006).

Figura 7 - Ensaio de sedimentação



Fonte: da autora

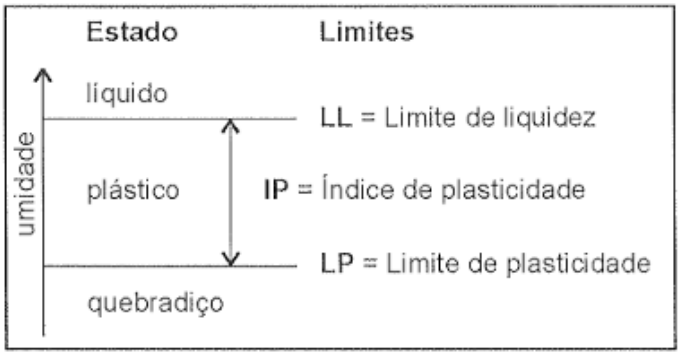
2.2.3 Índice de Consistência (limites de Atterberg)

Apenas a distribuição granulométrica não é o suficiente para caracterizar um solo, principalmente em relação a fração fina, a sua fração fina é muito importante para uma caracterização precisa. Porém para a mesma porcentagem de fração de argila, o solo poderá variar suas características de acordo com os tipos de minerais que o constituem, o que torna o estudo dos minerais-argilas muito complexo. Então, a engenharia adotou um método de identificação da influência das partículas argilosas, que consiste em uma análise indireta que se baseia no comportamento do solo na presença de água. Essa análise baseia-se nos índices propostos pelo

engenheiro químico Atterberg que foi adaptado e padronizado pelo professor Arthur Casagrande (PINTO, 2006).

Esses limites são baseados na verificação de que o solo argiloso varia a suas características conforme seu teor de umidade. Quando a sua umidade é alta, se comporta como um líquido, quando perde parte dessa umidade se torna plástico e quando mais seco fica quebradiço. Essas mudanças de umidade, satisfazem as mudanças de estado, demonstradas na figura 8, que são o Limite de Plasticidade (LP) e o Limite de Liquidez (LL) dos solos.

Figura 8 - Limite de Atterberg dos solos



Fonte: Pinto (2006)

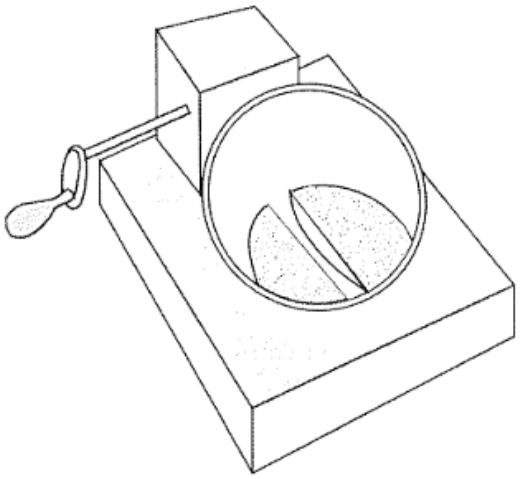
A faixa entre o LL e o LP é definida como Índice de Plasticidade (IP) do solo, que é definido pela equação 9.

$$IP = LL - LP \tag{9}$$

Normalmente são apresentados apenas os valores de LL e IP como índice de consistência dos solos, sendo o LP usado apenas para determinar o IP.

Conforme Pinto (2006), o LL será determinado a partir da umidade do solo que será medida através da medição do número de golpes que o solo leva para fechar uma ranhura em uma concha metálica, conforme figura 9. Esse ensaio é padronizado pela ABNT NBR 6459.

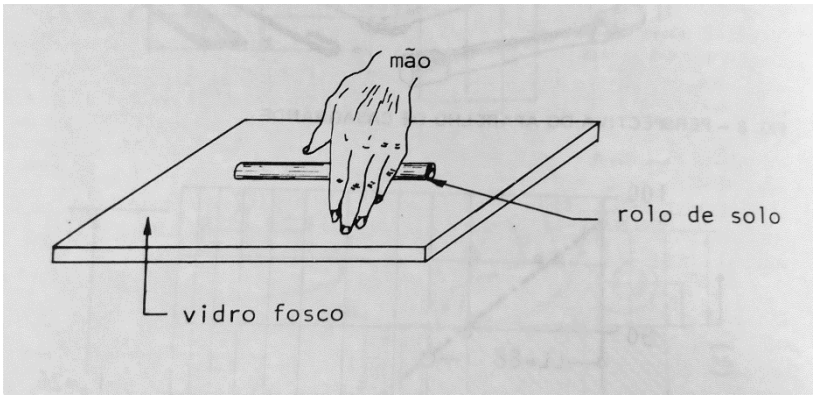
Figura 9 - Aparelho de Casagrande para determinação de LL



Fonte: Pinto (2006)

Já o LP é definido através do menor teor de umidade que possibilita a moldagem de um cilindro de 3mm de diâmetro com as mãos, sem que ele se parta, conforme figura 10. Esse ensaio é padronizado pela ABNT NBR 7180.

Figura 10 - Ensaio limite de plasticidade



Fonte: Vargas (1981)

A partir dos valores encontrados com os ensaios, podemos caracterizar o solo. Na tabela 1 são apresentados alguns solos típicos brasileiros.

Tabela 1 - Índices de Atterberg solos brasileiros

Solos	LL %	IP %
Residuais de arenito (arenosos finos)	29-44	11-20
Residual de gnaisse	45-55	20-25
Residual de basalto	45-70	20-30
Residual de granito	45-55	14-18
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	120	80
Argila porosa vermelha de São Paulo	65 a 85	25 a 40
Argilas variegadas de São Paulo	40 a 80	15 a 45
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20 a 40	5 a 15
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	64	42

Fonte: Pinto (2006)

2.2.4 Compactação

Em 1983 o engenheiro Ralph Proctor publicou suas observações sobre compactação de aterros, sendo assim, o início da técnica é creditado a ele. Nessa publicação mostrou que ao aplicar uma certa quantidade de energia de compactação, seja com equipamentos de campo ou um soquete sobre o solo contido em moldes, a massa específica do solo final é em função do seu teor de umidade no momento da moldagem. Quando a compactação é feita com uma baixa umidade, o número de vazios não diminuiu significativamente devido ao grande atrito entre as partículas do solo. Quando a umidade está mais alta, a água funciona como um lubrificante, fazendo com que as partículas tenham uma melhor acomodação e assim, formam um conjunto mais compacto (PINTO, 2006).

Durante a compactação as quantidades de água e solo são constantes, a massa específica irá variar devido a eliminação de ar dos vazios, que é facilitada pois, ao ter um teor de umidade menor o ar se encontra na forma de canalículos intercomunicados e quando o teor de umidade é elevado a massa específica será maior pois a água irá diminuir o atrito. Em um certo teor de umidade o ar não é mais expulso pela compactação, pois o nível de saturação é elevado e o ar está envolto por água. Assim, define-se que para uma energia de compactação aplicada e um certo teor de umidade (umidade ótima), teremos uma massa específica aparente seca máxima ou uma densidade seca máxima (PINTO, 2006).

A partir das considerações de Proctor, padronizou-se como ensaio de compactação conhecido como Ensaio de Proctor. No Brasil a norma que padroniza esse ensaio é a ABNT NBR 7182, realizado com os instrumentos da figura 11.

Figura 11 - Conjunto de Proctor

Fonte: da autora

A partir dos dados obtidos pelo ensaio, desenha-se a curva de compactação, que é representada pela massa específica aparente seca em função da umidade. Essa curva irá definir a umidade ótima do solo para uma respectiva massa específica aparente seca.

A norma estabelece algumas alternativas de ensaio como: com e sem reuso de material, com e sem secagem prévia do solo e ensaio com pedregulho. Todas essas opções de ensaio podem alterar os resultados finais, mas são permitidos pela norma.

Além das alternativas de ensaio, temos também a opção de variação de energia de compactação, ou seja, variação no tamanho do molde do corpo de prova e peso do soquete, como na tabela 2.

Tabela 2 - Energias de compactação

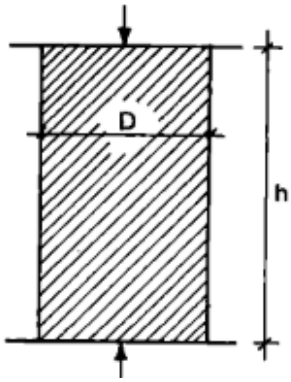
Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador mm	63,5	63,5	63,5
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

Fonte: adaptado de ABNT NBR 7182/2016

2.2.5 Ensaio de compressão não confinado

De acordo com Pinto (2006), ensaios de compressão não confinados ou ainda, ensaios de compressão simples, são realizados com um carregamento axial no corpo de prova sem que se aplique um confinamento, sendo o corpo de prova cilíndrico posicionado no centro de dois pratos da prensa (figura 12). A resistência mobilizada será em função da tensão efetiva existente no corpo de prova, e consequentemente, terá resultado igual ao dos ensaios não drenados.

Figura 12 - Ensaio de compressão simples não confinada



Fonte: Caputo (1988)

O resultado do ensaio indicará a resistência ao cisalhamento do solo para baixas tensões totais, onde simplificadamente é considerada como metade da tensão desviadora máxima e tende a diminuir conforme a umidade do solo aumenta (PINTO,2006).

Geralmente o ensaio é realizado com uma velocidade de carregamento que provoca a ruptura entre 10 a 15 minutos de ensaio. Durante o ensaio não há condições

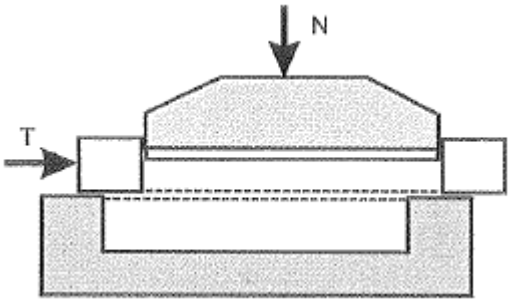
de drenagem, ou seja, não há dissipação das tensões neutras que são provocadas pelo carregamento.

2.2.6 Ensaio de Cisalhamento Direto

Segundo Caputo (1988) a resistência ao cisalhamento do solo é o que define a capacidade deste em suportar cargas e manter a sua estabilidade, ou seja, ao extrapolar essa resistência a massa de solo se rompe.

O ensaio de cisalhamento direto é o ensaio mais antigo e simples para a determinação da resistência ao cisalhamento. O ensaio consiste em um corpo de prova colocado em uma caixa dividida horizontalmente em duas metades, aplicam-se então, uma força vertical ao corpo de prova e uma força tangencial na parte superior do corpo de prova, provocando um deslocamento e medindo-se então, a força resistida pelo solo, conforme ilustrado na figura 13 (PINTO, 2006).

Figura 13 - Ensaio cisalhamento direto



Fonte: Pinto, 2006

Ao longo do ensaio de cisalhamento, a tensão de cisalhamento é representada em função do deslocamento horizontal, no sentido do cisalhamento. O deslocamento vertical também é registrado ao longo do ensaio, que indicará se houveram deformações positivas (compressão) ou negativas (expansão) (PINTO, 2006).

O ensaio deve ser realizado de forma drenada, com o auxílio de duas pedras porosas que são alocadas no topo superior e inferior do corpo de prova. Além disso o ensaio pode ser executado sob tensão ou deformação controlada (CAPUTO,1988).

Com a área do corpo de prova, as cargas verticais e horizontais aplicadas e a deformação lateral relativa, são encontrados os parâmetros de tensão de

cisalhamento, tensão normal e taxa de deformação, de acordo com o tempo do ensaio. Esses resultados são apresentados através de um gráfico “tensão de compressão x deformação axial específica (BROERING E SILVA, 2018)

Conforme Das (2007), este ensaio possui algumas deficiências relacionadas à confiabilidade dos resultados, pois o solo rompe em um plano pré-estabelecido, que seria o plano de separação da caixa de cisalhamento. Além disso, a distribuição da resistência ao cisalhamento sobre a superfície de cisalhamento do corpo de prova submetido ao ensaio não é uniforme.

Atualmente não temos norma brasileira padronizando o ensaio, utilizou-se então a estrangeira ASTM D3080/2011.

2.3 Polietileno Tereftalato (PET)

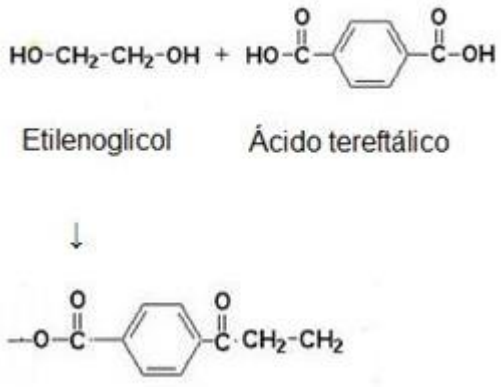
Neste item serão apresentadas as características físicas da PET, assim como o processo produtivo da fibra PET.

2.3.1 Características da PET

O polietileno tereftalato, mais conhecido como PET, é um polímero termoplástico que é derivado do poliéster. Uma característica do material termoplástico é a sua capacidade de deformação quando aquecido e torna-se cada vez mais fluido de acordo com o calor a que é exposto, podendo então, ser moldado e solidificado novamente, sem alterar a sua estrutura original. Devido a esta característica podem ser reciclados diversas vezes sem que as propriedades físicas sejam perdidas (SENEZ, 2016).

Segundo Mano e Mendes (2001), os primeiros registros do uso de PET datam de 1941, onde dois químicos britânicos Whinfield e Dickson descobriram o material através da reação entre dois monômeros, o ácido tereftálico (um sólido incolor com ponto de fusão próximo aos 140ºC) e o etilenoglicol (álcool líquido quando em temperatura ambiente com ponto de ebulição aos 197ºC). Conforme a figura 14.

Figura 14 - Cadeias químicas da PET



Fonte: LUZ (2019)

Segundo Senez (2016) o PET chegou ao Brasil em 1988 com aplicações na indústria têxtil, sendo que apenas nos anos 90 é que o mercado começou a utilizar esse material para a produção de embalagens, sendo predominante o uso em embalagens de bebidas gaseificadas. O material revolucionou o mercado, pois ao contrário do vidro que era utilizado até então, é um material leve, à prova d'água e com excelentes propriedades mecânicas, além de ser reciclável.

Porém, sendo um material reciclável não poderá ser utilizado em embalagens que estejam em contato com o produto embalado, exigência essa realizada pela Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, pois o PET quando reciclado pode acabar sofrendo contaminações que podem prejudicar a saúde do consumidor. Então, o material é utilizado na indústria têxtil, resinas insaturadas, camadas externas de embalagens, fabricação de cordas, vassouras, etc (BRASIL, 1998).

Para a produção de fibras para a indústria têxtil, de cordas e até mesmo uso em argamassas, concretos e solos, a PET passa por um processo de produção que será descrito a seguir, com base na visita realizada na fábrica Cordoaria Brasil localizada no município de Itajaí no dia 26 de setembro de 2019, sendo esse processo o da fibra multifilada.

2.3.2 Processo produtivo da fibra PET

O processo inicia com a coleta e separação das garrafas, que são enviadas em fardos para a reciclagem. Após passar por um processo de seleção, lavagem, moagem e secagem, obtém-se um subproduto chamado *flake*, como na figura 15.

Figura 15 - Flake

Fonte: da autora

O *flake* é classificado em categorias A, B, C dependendo da qualidade das garrafas que foram moídas, características como idade do material e exposição a intempéries acabam diminuindo a qualidade do subproduto.

A partir disso, o *flake* é enviado para aquecimento, fundido a 300ºC e logo em seguida filtrado para eliminar qualquer tipo de sólido (pedras, metais, etc), resfriado com água e granulado em pequenos pedaços, chamado de *chips* de PET, conforme figura 16.

Figura 16 - Chips de PET

Fonte: SUMEET (2019)

Após a obtenção do *chips*, esse material é encaminhado para um processo de extrusão a 260ºC, sendo transformado em uma pasta e enviados para uma bomba, passando por microfuros na matriz ilustrada na figura 17, após a passagem pela matriz os fios entram em contato com o ar para que resfriem. Então são reunidos em tambores.

Figura 17 - Matriz de multifilamentos

Fonte: da autora

Dos tambores as fibras passam pelo processo de ensimagem, onde é aplicado diretamente nas fibras um óleo que garante que o material não sofra modificações quanto a estática e aumenta a coesão e lubricidade entre os filamentos e assim, facilita as operações subsequentes. Após, são encaminhadas para o processo de estiragem, onde o diâmetro da fibra é reduzido e a resistência à tração da fibra é aumentada. Na sequência a fibra é enrolada em carreteis, conforme figura 18 e encaminhada para o processo de corte.

Figura 18 - Carreteis de fibra

Fonte: da autora

O corte é feito por uma máquina que permite definir o comprimento das fibras, conforme figura 19; a partir do corte a fibra está pronta para ser encaminhada a sua utilização final, com o aspecto mostrado na figura 20.

Figura 19 - Corte da fibra

Fonte: da autora

Figura 20 - Fibra de PET cortada

Fonte: da autora

2.4 Melhoria, reforço e estabilização dos solos

Define-se como estabilização de solos o processo de aferir ao solo uma resistência maior a desgastes, cargas ou erosão. Essa estabilização pode ser feita através de compactação, correção da granulometria e da plasticidade do solo; ou ainda, a adição de materiais que lhe dê uma maior coesão, proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos. A aplicação desse solo melhorado, normalmente é

necessária em situações onde não se disponha de material com resistência adequada para ser usada em base de pavimentos, reforços de fundação, melhoria nas atividades de escavação e estabilização de taludes (VARGAS, 1981).

Segundo Casagrande (2001), os termos melhoria ou reforço de solos referem-se à utilização de processos físicos e/ou químicos para melhorar as propriedades mecânicas do solo, sendo que a resistência será aumentada e a compressibilidade e permeabilidade diminuída. O termo melhoria costuma-se usar quando associado a tratamentos químicos no solo e o termo reforço quando adicionados materiais que possuam resistência à tração elevadas (fitas metálicas, mantas, geogrelhas, malhas de aço, fibras, etc) como em obras de taludes e aterros.

Os processos de estabilização podem receber a classificação de temporários, permanentes e permanentes com adição de novos materiais. O primeiro, consiste em uma estabilização temporária, ou seja, apenas durante uma fase da obra. A permanente é o melhoramento através de compactação e tratamento térmico; e o melhoramento com adição, combina a compactação com a adição de um novo material, como cal e cimento, injeção de materiais estabilizantes, pré-carregamento, reforço com tiras metálicas ou geossintéticos (VAN IMPE,1989 *apud* CASAGRANDE,2001). Nesta pesquisa realiza-se a última forma de melhoramento descrito a partir da adição de fibra PET, como segue explicado no subitem abaixo.

2.4.1 Solo fibras

Segundo Bento (2006) a mistura solo-fibra caracteriza-se como materiais compósitos, que é basicamente um produto resultante da mistura de dois ou mais materiais que constituem um conjunto polifásico, o qual apresenta duas fases: as fibras e matriz em que as fibras estão incluídas, sendo que as propriedades do conjunto serão melhores dos que as de seus componentes separados. É um material heterogêneo, sendo a fibra resistente ao esforço externo (constituinte descontínuo) e a matriz, que oferece o meio de transferência dos esforços (constituinte contínuo).

A fibra pode ser de diversos tamanhos e características, podendo estar misturada na matriz de forma ordenada ou aleatória. Tem-se fibras de materiais orgânicos e inorgânicos, com formas irregulares ou regulares, fibrosas achatadas ou fibras curtas, mas todas devem ter características em comum: resistência, maleabilidade ou rigidez. Em resumo, acrescentam reforço mecânico à matriz, sendo

essa interação fibra-matriz o fator que determinará o comportamento do compósito (BENTO, 2006).

A fibra tem como principal função reforçar mecanicamente a matriz, funcionando como ponte de transferência dos esforços através das fissuras, que garante uma resistência mesmo após o surgimento das referidas fissuras. Ao surgirem as primeiras fissuras em um compósito sem fibras a abertura contínua dessa levará a peça ao colapso. Porém, em compósitos com a presença da fibra na matriz, essa fissura é retardada e a ruptura se torna um processo progressivo, pois as pontes formadas pelas fibras que absorveram parte das solicitações criam uma fissuração mais distribuída (TANESI, 1997 *apud* BERNARDI, 2003).

No reforço de solos variados tipos de fibras podem ser usadas. As características das fibras estão diretamente ligadas ao material do qual foram feitas e ao seu processo de fabricação, características estas que afetaram o comportamento do compósito. O entendimento do mecanismo de interação matriz-reforço é fundamental, além da definição da fibra a ser usada (FEUERHARMEL, 2000).

O solo-fibra pode ser utilizado em diversas áreas da engenharia e geotecnia, mais facilmente encontrado em reforço de solo para camadas de pavimento, base para fundações superficiais, sistemas de cobertura de aterro sanitários, estabilização de taludes, etc.

As fibras podem ser divididas em quatro grandes classificações: naturais, minerais, metálicas e poliméricas e serão detalhadas a seguir.

2.4.1.1 Fibras Naturais

Segundo Bento (2006) as fibras naturais foram as primeiras a serem usadas como reforço na história da humanidade. Sua maioria provém de origem vegetal, onde destacam-se: bambu, juta, coco, linho e sisal. A mais utilizada devido a sua alta tenacidade resistência é a fibra de sisal, conforme figura 21. É produzida a partir da planta originária da América Central, *Agave sisalana,* o sisal.

Figura 21 - Fibra de sisal

Fonte: Penna Firme Comercial (2019)

Porém são materiais que apresentam uma baixa durabilidade e são afetadas pela umidade e por possuírem uma alta absorção de água, colaboram para que ocorra fissuração devido à retração diferencial (BERNARDI,2003).

2.4.1.2 Fibras Minerais

Segundo Bento (2006), dentre as diversas fibras minerais existentes, as fibras que mais se destacam são as de vidro, de carbono e de amianto.

As fibras de carbono (figura 22) têm o valor econômico mais elevado em comparação com as outras, porém seu excelente desempenho em conjunto com baixa densidade acaba deixando o custo como uma importância secundária. Uma dificuldade na utilização dessa fibra é a ocorrência de reações químicas entre os materiais da matriz que pode levar a ruptura do compósito.

Figura 22 - Fibra de carbono

Fonte: SANTOS (2016)

As fibras de vidro (figura 23) são formadas por centenas de filamentos justapostos e podem ser fabricadas a partir de variados tipos de vidro, sendo a maioria produzida com vidro tipo E, que confere a fibra baixa resistência a ataque de álcalis, sendo o vidro suscetível à umidade e a presença de defeitos o que acaba diminuindo a resistência a tração da fibra.

Figura 23 - Fibra de vidro

Fonte: SANTOS (2019)

E a fibra de amianto (figura 24) possui um elevado módulo de elasticidade e resistência a tração, porém, por sua manipulação trazer danos à saúde humana foi proibida em diversos países.

Figura 24 - Fibra de amianto

Fonte:YUMA (2017)

2.4.1.3 Fibras Metálicas

As fibras mais utilizadas desse tipo são as de aço (figura 25), pois possuem elevados módulo de elasticidade e resistência a tração. Podem ter problemas com a corrosão dependendo do meio em que são inseridas. Possuem formatos variados o que pode influenciar na aderência com a matriz (BENTO, 2006).

Figura 25 - Fibra de aço

Fonte: Neomatex (2019)

2.4.1.4 Fibras Poliméricas

Dentre as diversas fibras, Bento (2006) afirma que a família das fibras poliméricas é a mais promissora devido a sua grande variedade de fibras. Por serem compostas por polímeros, apresentam diversos comportamentos e denominações, o que dá origem a diversas fibras.

Feuerharmel (2000) explica que atualmente temos diversos formatos de fibras poliméricas para aplicação em reforço de solos: as fibriladas que possuem um formato trançado quando são esticadas transversalmente para que se “abram” durante o processo de mistura com o solo; o Texsol que é um filamento contínuo distribuído aleatoriamente dentro do solo e ainda segundo Bento (2006), podem ser em forma de laminetes apresentando um filamento único.

Os tipos quanto a composição de fibras poliméricas mais comuns são: de polietileno, polipropileno, de polimiada e de poliéster e serão descritas a seguir.

As fibras de polietileno são descritas por Bento (2006) como fibras de baixo módulo de elasticidade, onde são fracamente aderidas à matriz cimentada mas

possuem uma resistência alta aos álcalis. Possuem uma alta durabilidade, mas com maiores deformações de fluência quando comparadas às fibras de polipropileno.

As fibras de polipropileno ao serem submetidas ao aumento de temperatura adquirem uma consistência plástica, denominadas então como termoplásticas. São constituídos de longas séries de cadeias de moléculas polimerizadas, onde são separadas entre si para que possa ocorrer um deslizamento de umas sobre as outras (HOLLAWAY, 1994). Feuerharmel (2000) afirma que esse tipo de fibra possui uma grande flexibilidade e tenacidade, onde seu módulo de elasticidade é algo como 8 GPa e sua resistência a tração é de aproximadamente 400 Mpa.

A fibra de polimiada segundo Hollaway (1994) possui alta resistência e módulo de elasticidade, isso devido ao seu processo de fabricação que reforça as moléculas. Tem uma resistência cinco vezes maior que o aço por unidade de peso, tem uma excelente estabilidade térmica e dimensional, possui uma resistência ao desgaste considerável e também ao calor. Porém sua baixa resistência a compressão, torna-as mais suscetíveis a quebra ou dobra.

E por fim, as fibras de poliéster, que conforme Bento (2006) é um material que apresenta alta densidade, rigidez e resistência. Suas características são muito parecidas com a do polipropileno, mas com maior custo. Um poliéster mais conhecido atualmente é o Polietileno Tereftalato, a PET, matéria prima para a produção de garrafas de bebidas gaseificadas. Cada vez mais o consumo desse material tem crescido e em paralelo a preocupação com a disposição final desse resíduo. Uma das soluções encontradas, é a reciclagem, sendo a fibra PET um material proveniente dessa solução.

Diversas pesquisas e trabalhos já foram realizados com a utilização de PET para reforço de solos. Prietto et al. (1999) realizou um trabalho onde utilizou fibras com comprimentos de 12,24 e 36mm com variação de teores 0,1% a 0,9% de fibra em relação a massa seca de solo, os resultados encontrados mostraram que o comprimento da fibra não influenciou nos resultados, mas sim as porcentagens de teor; Já Feuerharmel (2000) realizou um trabalho onde misturas de solo, cimento e fibra com variações de teores de 0% e 0,5% com comprimentos de 0mm, 12mm e 36mm e concluiu que, para solos argilosos o teor e comprimento das fibras influenciou nos resultados de resistência ao cisalhamento e a energia de deformação absorvida; Lucarelli (2018) estudou o comportamento da mistura solo, cimento e fibra com largura de 2mm, comprimento 1mm e teor de 1% em relação ao peso seco da mistura solo-

fibra e concluiu que a inclusão das fibras gera uma diminuição no peso específico aparente seco máximo da mistura e aumento na resistência ao cisalhamento direto, onde os valores de intercepto de coesão e de ângulo de atrito, são maiores do que os obtidos para o natural. No quadro 1 é apresentado um resumo dos resultados.

Quadro 1 - Resumo dos resultados

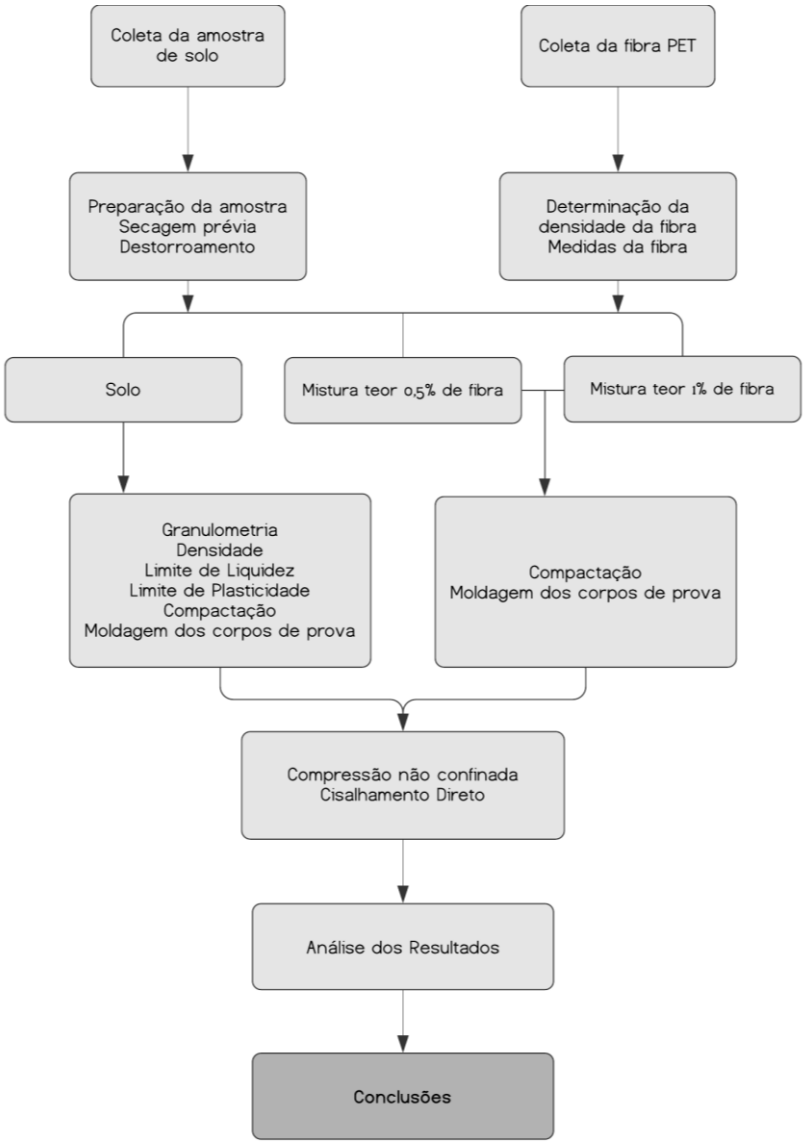
Autor	Compósito	Comprimento da fibra	Teores	Resultados
Prietto et al (1999)	Solo + fibra	12,24 e 36mm	0,1% a 0,9%	Comprimento da fibra não influenciou nos resultados, mas os teores sim.
Feuerharmel (2000)	Solo + cimento + fibra	12 e 36mm	0% a 0,5%	Influência nos resultados de resistência ao cisalhamento e energia de deformação absorvida.
Lucarelli (2018)	Solo + cimento + fibra	2 mm	1%	Diminuição no peso específico aparente seco máximo e aumento da resistência ao cisalhamento direto.

Fonte: da autora

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este trabalho foi desenvolvido em quatro etapas. Primeiramente, realizou-se a coleta do solo e da fibra PET assim como a caracterização através dos ensaios de laboratório dos mesmos. Na segunda procedeu-se com a mistura do solo à fibra buscando a homogeneização dos materiais e posterior moldagem dos corpos de prova. A partir dos corpos de prova moldados, iniciou-se a terceira etapa onde foram realizados os ensaios para verificação da influência da fibra PET na mistura. A partir dos dados coletados na terceira etapa, foram feitas as análises e discussões dos resultados. Na figura 26 é apresentada a sequência das atividades desenvolvidas nas etapas.

Figura 26 - Diagrama



Fonte: da autora

Na sequência apresenta-se as características do solo utilizado, da fibra PET e o método de pesquisa laboratorial.

3.1 Materiais utilizados na pesquisa

Para o desenvolvimento da pesquisa é imprescindível a coleta do solo a ser estudado e da fibra. A coleta do solo ocorreu numa região do município de São José/SC e a fibra foi doada pela empresa Cordoaria Brasil de Itajaí/SC. Nos tópicos a seguir as informações serão detalhadas.

3.1.1 O solo

Para a presente pesquisa, utilizou-se solo coletado no município de São José, estado de Santa Catarina (SC), Brasil (figura 27), em terreno localizado no Bairro Barreiros como mostra a figura abaixo.

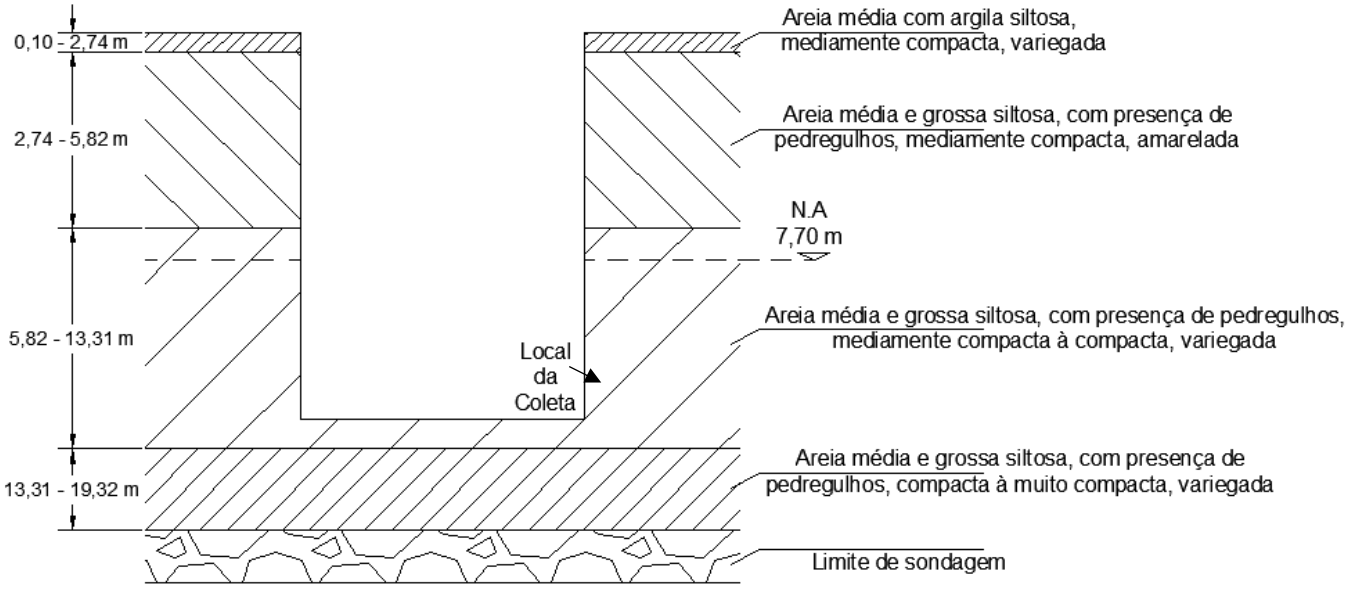
Figura 27 - Local da coleta do solo

Fonte: Google Maps (2019)

Realizou-se a coleta no ponto de latitude 27°34’33”S e longitude 48°36’22’O, com uma elevação de 20 metros, no dia 25 de setembro de 2019 em terreno onde se estava iniciando uma obra. O solo foi coletado a uma profundidade

de 10 metros em relação ao nível da rua. Na figura 28 pode ser observado o croqui do laudo de sondagem realizado e cedido pela construtora. A coleta do solo usado na pesquisa foi realizada no ponto SP-02 da sondagem. O laudo apontou um solo arenosa siltosa com presença de pedregulhos.

Figura 28 – Perfil do solo de acordo com laudo de sondagem SPT



Fonte: adaptado do laudo de sondagem

O terreno se encontra em zona urbana nos mapeamentos de classificação dos solos da Emprapa e IBGE, porém, pelas características analisadas in loco, sondagem e ensaios laboratoriais o solo apresenta características de um solo residual.

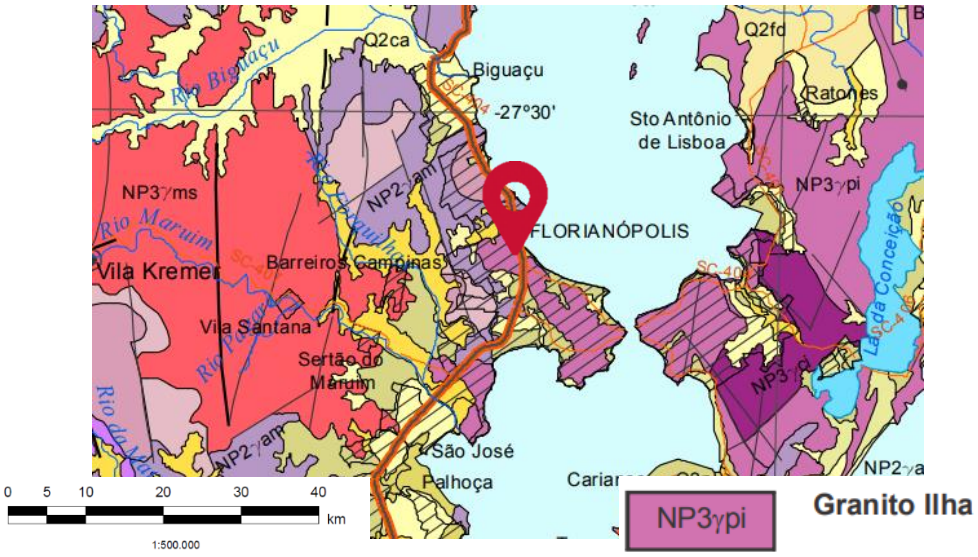
Foi realizada a coleta de uma amostra deformada - ou seja, houve destruição de estrutura durante a operação da coleta, porém, foram mantidas as dimensões e proporções dos constituintes do solo – com o auxílio de pás e picaretas, ensacou-se e levou-se a amostra ao Laboratório de Solos e Tecnologia de Materiais (LSTM), onde armazenou-se o material em tonéis, sem preservação da umidade, até o momento da realização dos ensaios. Na figura 29 é apresentado o perfil parcial do local de retirada do solo.

Figura 29 - Perfil do terreno de coleta

Fonte: da autora

Através do mapa geológico de Santa Catarina da CPRM Serviço Geológico do Brasil de 2014, figura 30, o solo apresenta característica geológica de um Granito da Ilha da Era Proterozóica e época Neoproterozoica, granito alcalinos tardi pós-colisionais Tipo A. Esse tipo de solo apresenta coloração cinza a rósea.

Figura 30 - Mapa geológico de Santa Catarina



Fonte: WILDNER et al, 2014

3.1.2 A fibra de Polietileno Tereftalato (PET)

No desenvolvimento da pesquisa utilizou-se fibras PET produzidas pela empresa Cordoaria Brasil - localizada na cidade de Itajaí/SC – obtidas a partir de garrafas de plástico, conforme etapas descritas no item 2.3.2. As etapas citadas na revisão bibliográficas tiveram base na visita realizada pela autora ao visitar a fábrica para realizar a coleta do material a ser usado no estudo.

As fibras foram adicionadas no solo com teores de 0,5% e 1,0% em relação ao peso seco do solo (g). As fibras (figura 31) apresentam comprimento de 15 mm.

Figura 31 - A fibra PET

Fonte: da autora

O teor de fibra a ser utilizado na pesquisa foi definido com base em ~~outros~~ trabalhos que utilizaram fibra PET como reforço. Na tabela 3 são apresentados os valores. O comprimento da fibra utilizada foi arbitrado de acordo com o comprimento produzido pela fábrica que doou o material para o estudo.

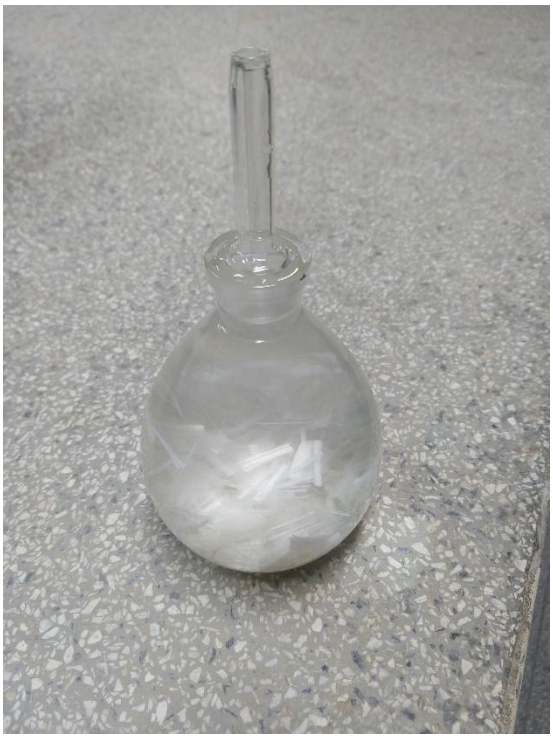
Tabela 3 - Teores de fibra de autores de trabalhos com fibra PET

Autores	Teores (%)	Comprimento (mm)
Prietto et all. (1999)	0,1 a 0,9	12,24 e 36
Feuerharmel (2000)	0,5	12 e 36
Casagrande (2001)	0,25 - 0,5 - 0,75	6; 12 e 24
Bento (2006)	0,25 - 0,5	5 e 10
Santos e Silva (2015)	0,4	10
Senez (2016)	0,5	38 e 56
Lucarelli (2018)	0,5 e 1	2 e 4

Fonte: da autora

Realizou-se a determinação da massa específica da fibra de acordo com a ISO 1183-1/2004 parte 1, pelo método B que utiliza o picnômetro (figura 32).

Figura 32 - Determinação da massa específica da fibra PET



Fonte: da autora

3.2 Método de Laboratório

Nos sub-itens a seguir apresenta-se os métodos utilizados nos ensaios e procedimentos realizados durante o estudo experimental.

3.2.1 Ensaios de caracterização

Para a caracterização do solo, realizou-se os ensaios de granulometria com uso de defloculante, limites de Atterberg e determinação da massa específica dos grãos.

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação com defloculante, sendo executada de acordo com a norma ABNT NBR 7181. O defloculante utilizado foi o hexametafosfato de sódio. O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6458:2016 e a determinação dos limites de liquidez e plasticidade seguiram o prescrito pelas normas ABNT NBR 6459:2016 e 7180:2016, respectivamente.

3.2.2 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado conforme prescrito na norma ABNT NBR 7182 para o natural e solo com os dois teores de fibra, objetivando a determinação da umidade ótima e densidade seca máxima.

Realizou-se 3 ensaios de compactação, um para cada teor de adição sendo 0% o solo sem adição, com adição de 0,5% de fibra e com adição de 1% em fibra. O solo seco foi seco em estufa em função das condições atmosféricas das semanas de ensaio que não possibilitaram a secagem ao ar. Os corpos de prova foram moldados com reuso de material e energia de compactação normal, com o auxílio do compactador motorizado da marca Contenco, apresentado na figura 33.

Figura 33 - Compactador motorizado de Proctor e CBR Contenco

Fonte: da autora

De acordo com as especificações da ABNT NBR 6457, o cilindro utilizado foi o de CBR. Assim, o equipamento foi configurado da seguinte forma: altura de queda 457 mm, peso de queda 4.536 g e sapata em formato de pizza. Realizou-se um estudo comparativo entre um cilindro moldado de forma manual e mecânica como intuito de

verificar se o equipamento disponível no LSTM produzia um corpo de prova (CP) com as mesmas características do moldado à mão com o cilindro grande e pilão grande. Os resultados mostrar não haver diferença significativa, portanto, adotou-se a moldagem mecânica para esta pesquisa. Nas figuras 34 e 35 são apresentados corpos de prova moldados pelo equipamento.

Figura 34 - Corpo de prova moldado com o compactador motorizado Contenco

Fonte: da autora

Figura 35 - Corpo de prova após pesagem e retirada de amostras

Fonte: da autora

3.2.3 Mistura e moldagem dos corpos de prova do ensaio de compressão simples e cisalhamento direto

Para realizar os ensaios de avaliação de parâmetros mecânicos, foi necessário moldar corpos de prova de solo natural e solo-fibra com duas variações de teores. Sendo estas, 0,5% e 1,0% de fibras em relação ao peso seco de solo.

A mistura foi realizada de forma manual com o solo seco em estufa, acrescentando as fibras aos poucos no solo, depois acrescentou-se a água, de forma a homogeneizar a mistura evitando a formação de grumos, conforme figuras 36 e 37. A homogeneização da mistura manual foi dificultosa, pois ao se inserir água ocorria a formação de grumos, que foram desmanchados um a um para não ocorrer a concentração heterogênea da água. Iniciando com o solo seco, foi onde se obteve a melhor homogeneização da mistura.

Figura 36 - Homogeneização da mistura solo-fibra

Fonte: da autora

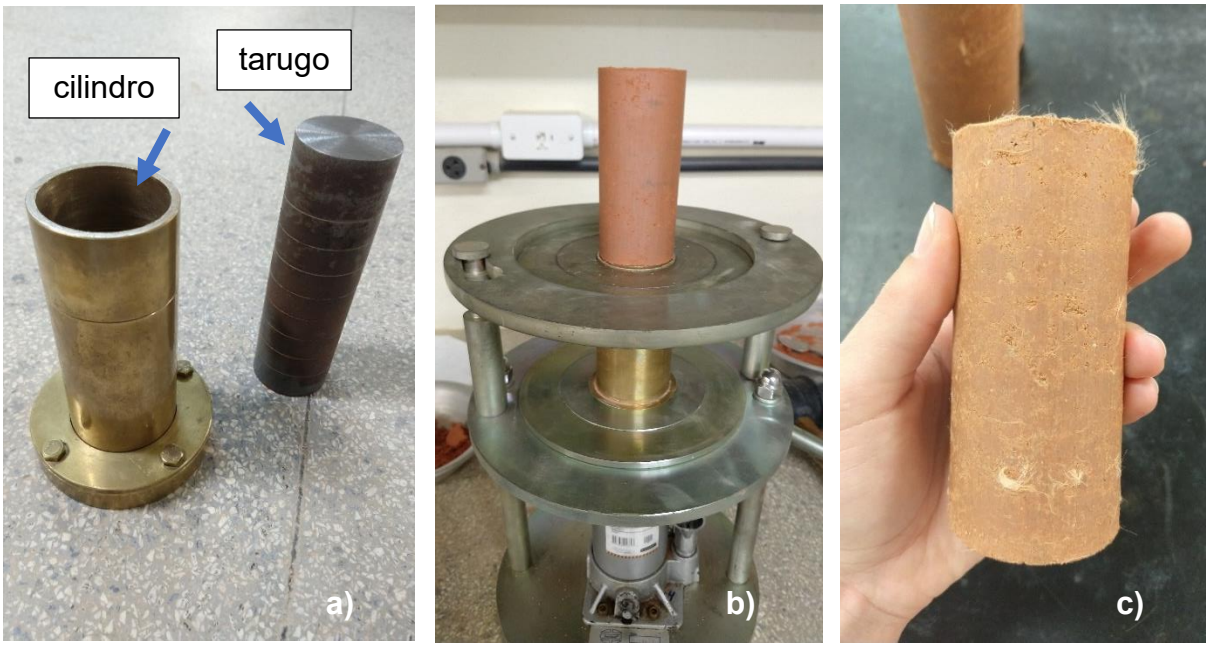
Figura 37 - Homogeneização da mistura solo-fibra

Fonte: da autora

Para a realização dos ensaios, moldou-se corpos de prova (CPs) com o solo natural e as misturas em sua umidade ótima e densidade máxima seca, determinados a partir do ensaio de compactação para cada teor.

Para o ensaio de compressão simples, os CPs foram moldados com o cilindro e o tarugo Harvard Miniature da marca CONTENCO, nas dimensões 50/100mm, com volume de 215,98cm³, este molde foi escolhido em função da relação que deve ser obedecida de altura igual a duas vezes o diâmetro da base, possibilitando sua utilização direta no ensaio de compressão simples, nem necessitar de retífica. A compactação foi realizada de maneira manual estática, através da prensagem das camadas com o auxílio de um tarugo metálico com marcações laterais correspondentes as alturas das camadas, conforme figura 38.

Figura 38 - a,b,c) Molde 100/50mm e corpo de prova



Fonte: da autora

Sendo que a moldagem foi realizada em 7 camadas de massa iguais de solo, determinadas a partir da fórmula 11 abaixo descrita:

$$M_w = \gamma_{s\,máx} \times (1 + w).V \qquad (11)$$

Onde:
Mw = massa total de solo na umidade ótima

γs máx = Massa específica aparente seca máxima (g/cm³);

w = Umidade ótima do material;

V = Volume do cilindro (cm³).

Para o ensaio de cisalhamento direto, foram moldadas amostras para os teores de fibra no cilindro de CBR, estando os compósitos em sua umidade ótima e densidade seca máxima de acordo com respectivo ensaio de compactação, com o auxílio do compactador mecânico. Destes, retirou-se 3 corpos de prova quadrados de cada teor para a realização do ensaio de cisalhamento, conforme figura 39, moldados com molde metálico com dimensões 60mm de lado e 20mm de altura.

Figura 39 - a,b) Corpo de prova para moldagem ensaio de cisalhamento

Fonte: da autora

Considerando-se a necessidade de moldar três corpos de prova por teor de cada ensaio, foram moldados 9 corpos de prova para os ensaios de compressão. Devido a disponibilidade do laboratório, para o ensaio de cisalhamento direto foram moldados corpos de prova apenas para os teores de 0% e 1,0% de fibra. Com isso, foram moldadas 2 amostras no cilindro de CBR para cada teor e destes foram retirados 3 corpos de prova quadrados por teor para realizar o ensaio de cisalhamento direto. Para o ensaio de compactação moldou-se corpos de prova até se encontrar a umidade ótima de cada teor, totalizando 21 corpos de prova moldados, conforme contabilizado na tabela 4.

Tabela 4 - Quantificação corpos de prova

MATERIAL / ENSAIO	COMPACTAÇÃO	COMPRESSÃO SIMPLES	CISALHAMENTO DIRETO
SOLO (0%)	7	3	3
MISTURA 0,5%	9	3	-
MISTURA 1,0%	5	3	3
TOTAL	**21**	**9**	**6**

Fonte: da autora

3.2.4 Ensaio de compressão simples não confinada

O ensaio de compressão axial simples não confinado é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Norma Brasileira de Referência (NBR) 12770. Os corpos de prova foram moldados com dimensão de 100/50mm nos teores de 0%, 0,5% e 1,0% de adição de fibra, com compactação manual estática, na umidade ótima.

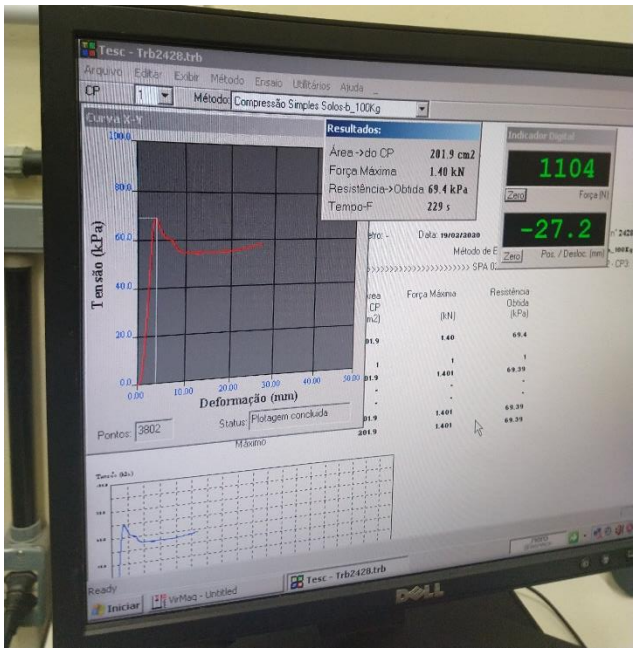
A ruptura foi realizada com a prensa EMIC DL30000 com célula de carga de 5 kN, velocidade de ensaio de 1mm/min, não excedendo os 15 minutos de ensaio definidos em norma, conforme figuras 40. Não foram utilizados extensômetros para a medição de deformação, os dados de deformação utilizados são os medidos pela célula de carga, a partir do deslocamento da parte superior da prensa.

Figura 40 - a) Prensa EMIC DL30000 e b) corpo de prova

Fonte: da autora

Uma vez comprimidos os corpos de prova o equipamento obtem-se o deslocamento vertical e a pressão exercida durante o deslocamento. Estes dados são utilizados para determinar a tensão máxima de ruptura e a tensão pós-pico apresentadas nos resultados, conforme figura 41.

Figura 41 - Gráfico de deformação prensa EMIC



Fonte: da autora

3.2.5 Análise estatística dos resultados de compressão simples

Com os resultados obtidos no ensaio de compressão foram analisadas através dos gráficos de tensão x deformação gerados, as tensões máximas de ruptura dos corpos de prova para cada teor. A partir fez-se uma análise estatística.

A análise estatística foi realizada de acordo com a sequência apresentada por Prudêncio (2016), onde é aplicado o teste de *Bartlett* para verificar a hipótese se igualdade entre as variâncias dentro dos grupos. Se a hipóteses de igualdade das variâncias for rejeitada, esses grupos não podem ser analisados em conjunto, e sim combinado em pares. Se a hipótese de igualdade das variâncias for aceita dentro dos grupos, é dado prosseguimento na análise de igualdade entre os grupos, que é realizada por meio do quadro ANOVA. Caso seja rejeitada a hipótese de igualdade entre os grupos, a verificação de qual média difere das demais, é realizada pelo teste de *Duncan.*

3.2.6 Ensaio de cisalhamento direto

Realizou-se o ensaio de acordo com a norma estrangeira ASTM D3080/2011 que padroniza o ensaio, de forma consolidada drenada.

Segunda a norma ASTM D3080/2011, devem ser preparadas 3 amostras no mínimo, para cada teor, de um único CP. Caso não seja possível, deverão ser moldados de amostras similares do material.

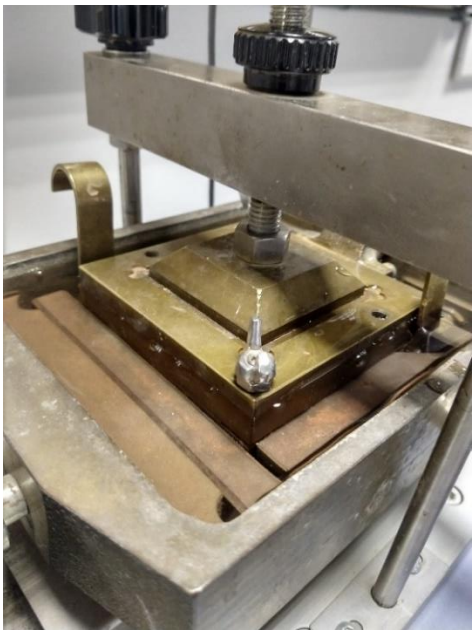
Obteve-se os CPs para a realização dos ensaios com a cravação de um molde metálico na amostra moldada no cilindro de CBR, ou seja, amostra compactada em umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, sendo retirados 3 corpos de prova da amostra cilíndrica, conforme figura 42.

Figura 42 - a, b, c e d) Moldagem dos corpos de prova cúbicos

Fonte: da autora

A amostra estava saturada (figura 43) durante o ensaio para eliminar a poropressão negativa devido a tensão superficial e também para evitar a evaporação da água do corpo de prova durante o ensaio (ASTM D3080/2011).

Figura 43 - Corpo de prova saturado

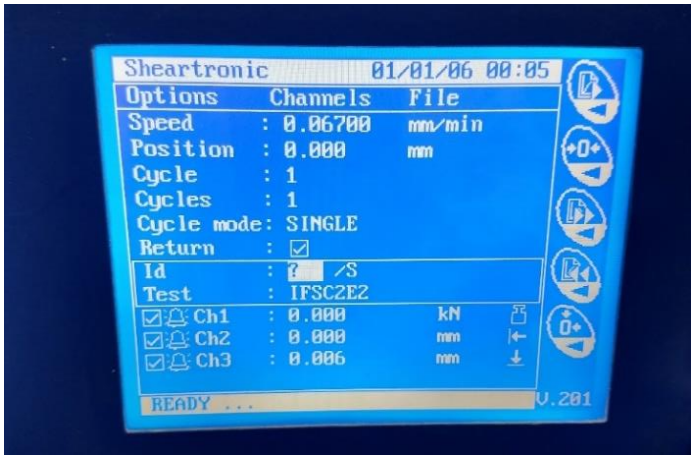


Fonte: da autora

Moldou-se as amostras ensaiadas com adição nos teores de 0% de fibra e 1% de fibra, devido a disponibilidade do laboratório da UNISUL, uma vez que o LSTM do IFSC dispõe deste equipamento para a realização do ensaio. Como a UNISUL gentilmente disponibilizou a laboratorista e o equipamento para a realização de dois ensaios de cisalhamento, definiu-se os teores com base na expectativa de maior diferença nos resultados. Este foi o único ensaio realizado com equipamento fora do LSTM do IFSC para esta pesquisa.

O ensaio foi realizado com 3 estágios de carregamento vertical (28 kPa, 83 kPa e 139 kPa) em condição lenta para que houvesse drenagem do material, de modo que a poro pressão fosse dissipada. A velocidade de ensaio foi de 0,067 mm/min, conforme figura 44.

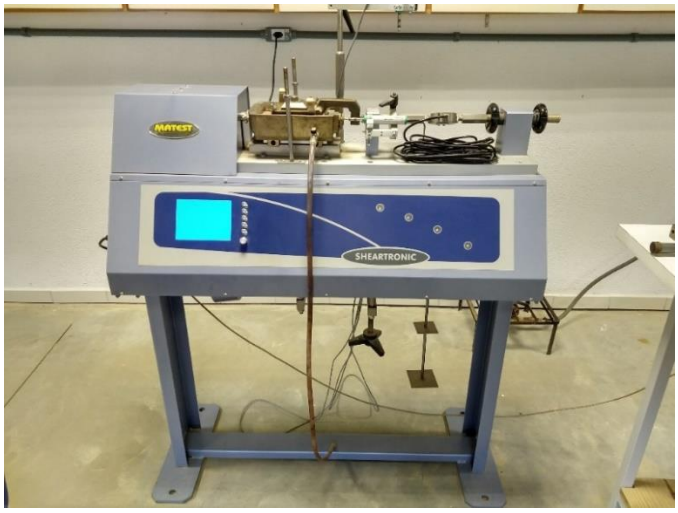
Figura 44 - Velocidade de ensaio



Fonte: da autora

O ensaio foi realizado com o equipamento da MATEST, conforme figura 45.

Figura 45 - Equipamento de cisalhamento direto Matest



Fonte: da autora

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em laboratório das amostras de solo e amostras de solo-PET. Com os resultados é possível compreender o comportamento mecânico das misturas e como a adição da fibra PET pode influenciar nos parâmetros de resistência do solo e com nisso, serão feitas as análises necessárias para interpretação desses resultados.

4.1 Caracterização física

Nesse item serão apresentadas as características dos materiais usados no compósito, fibra PET e solo.

4.1.1 Fibra PET

Com base no ensaio do picnômetro e medidas realizadas, na tabela 5 são apresentadas características físicas da fibra PET utilizada.

Tabela 5 - Propriedades físicas da fibra

Propriedades físicas	
Estado físico	**sólido**
Massa Específica	**1,34 g/cm³**
Comprimento	**15 mm**

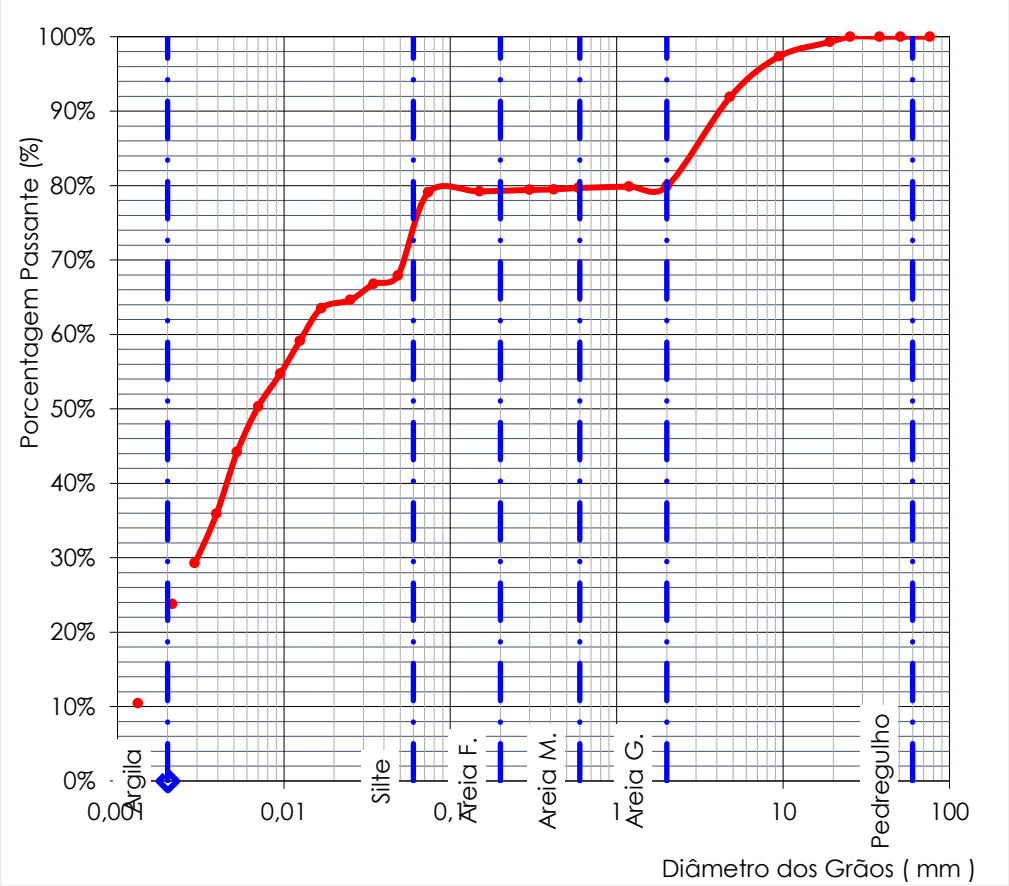
Fonte: da autora

4.1.2 Solo

Com os ensaios de caracterização física obteve-se as frações granulométricas do solo em seu estado natural, apresentando 20,12% de pedregulho, 0,8% de areia, 55,32% de silte e 23,76% de argila, representados no gráfico da figura 46. A escala padronizada adota para determinar as proporções foi a da ABNT.

Como pode ser percebido, a caracterização realizada no laboratório diferiu do laudo de sondagem por SPT, tanto pelo resultado do ensaio quanto pela avaliação tátil visual da amostra em laboratório

Figura 46 - Frações granulométricas do solo



Fonte: da autora

Com base na curva granulométrica é possível determinar dois parâmetros: o coeficiente de uniformidade (Cu) e o coeficiente de curvatura do solo (Cc). O solo estudado apresentou um coeficiente de uniformidade de 9,40, ou seja, medianamente uniforme e coeficiente de curvatura igual a 0,51 sendo um solo mal graduado. Com isso, conclui-se que o solo apresenta uma média variação nos diâmetros dos grãos e uma má distribuição das proporções ao longo da curva granulométrica.

Realizou-se também o ensaio de Limites de Atterberg onde obteve-se os limites de plasticidade e liquidez e com isso, o índice de plasticidade. Além disso, foi realizado o ensaio de determinação de massa específica do solo, os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Frações granulométricas do solo natural

Análise Granulométrica (%)						Limites de Consistência (%)			Massa Específica (g/cm³)
Pedregulho	Areia			Silte	Argila	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)	
	Grossa	Média	Fina						
20,12	0,21	0,46	0,13	55,32	23,76	43	26	17	2,653

Fonte: da autora

O solo apresentou mais de 12% de finos na sua constituição, então, foi classificado de acordo com a carta de plasticidade com base nos índices de consistência. Para classificar o solo de acordo com a carta de plasticidade, é necessário calcular o índice de plasticidade. Com base nesse cálculo, o solo estudado apresenta um índice de plasticidade 17, ou seja, um solo muito plástico. Tendo LL 43 e IP 17, o solo é classificado pela carta de plasticidade como uma argila de baixa compressibilidade.

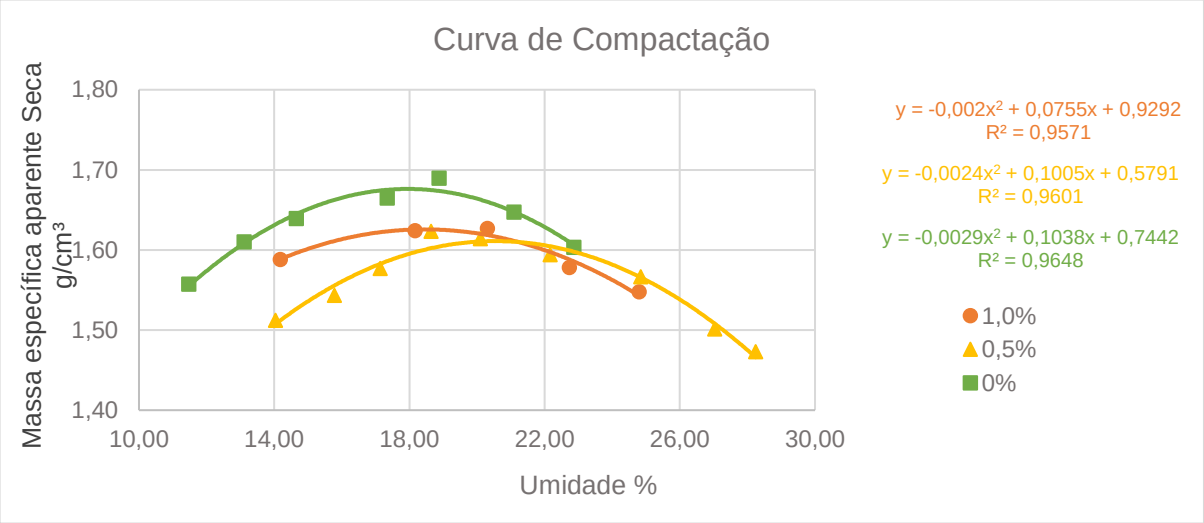
A classificação do solo realizada de acordo com o método de Classificação Textural com uso do diagrama trilinear, obteve a caracterização como um Solo Silte Argiloso. Pela Classificação Unificada o solo possui mais de 50% de material passante na peneira #200 então possui granulação fina e é classificado como Argila de Baixa Compressibilidade (CL).

Durante o decorrer do trabalho o solo residual será chamado de silte argiloso.

4.2 Compactação

A figura 47 apresenta as curvas de compactação obtidas a partir do ensaio de natural 0%, solo com 0,5% e 1,0% de fibra PET, mediante emprego do esforço de compactação correspondente ao especificado pela energia de Proctor Normal.

Figura 47 - Curvas de Compactação



Fonte: da autora

O solo natural apresentou uma umidade ótima de 17,89% para uma massa específica aparente seca máxima de 1,67 g/cm³. O compósito com adição de 1,0% de fibra apresentou umidade ótima mais próxima do solo natural com 18,87% e massa específica aparente seca máxima de 1,64 g/cm³, já o compósito com 0,5% de fibra teve umidade ótima de 20,94% e massa específica aparente seca máxima de 1,63 g/cm³. Os resultados são apresentados na tabela 7 abaixo.

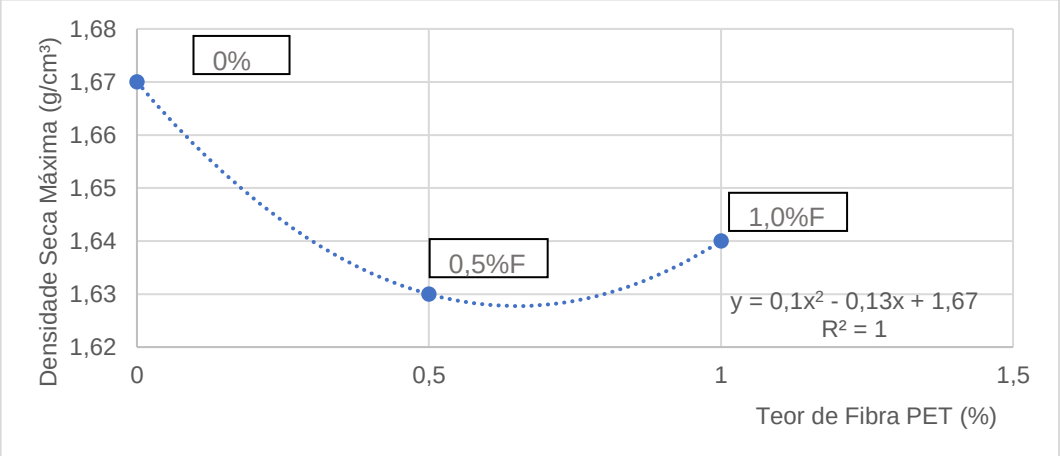
Tabela 7 - Resultados ensaio de compactação

Amostra	w_{otm} (%)	γ_{dmax} (g/cm³)
0,0%	17,89	1,67
0,5%	20,94	1,63
1,0%	18,87	1,64

Fonte: da autora

De acordo com as curvas de compactação geradas a partir dos ensaios nos três teores de fibra (0%, 0,5% e 1,0%), pode-se perceber que quando comparados os resultados com adição de fibra de forma individual com o de solo sem fibra, a massa específica aparente seca máxima do compósito é menor do que a de solo sem fibra. Na figura 48 é apresentado um gráfico correlacionando esses dados.

Figura 48 - Teor de fibra PET x Densidade Seca Máxima



Fonte: da autora

Lucarelli (2018) e May e Silva (2016) obtiveram resultados parecidos e afirmam que este resultado pode ser explicado pela ocupação dos vazios, que seriam preenchidos pelos grãos de solo na compactação, pelas fibras que são menos densas se comparadas com as partículas do solo. Então, a diminuição da densidade das misturas em relação ao solo natural se dá em virtude do fato das fibras serem mais leves que os grãos de solo.

Porém, percebe-se que para o teor de 0,5% isso não pode ser afirmado, pois possui uma menor quantidade de fibra do que a mistura de 1,0%. Deve-se levar em consideração que a adição de fibras foi realizada de forma manual e com distribuição aleatória para moldagem dos corpos de prova, então, algumas camadas de compósito podem ter maior teor de fibra do que a mistura feita inicialmente, podendo assim, ter influenciado no resultado final.

É possível deduzir que as fibras podem constituir uma barreira física ao rearranjo dos grãos sólidos do solo durante a aplicação de carga de compactação, assim, restringindo a possibilidade de incremento da massa de grãos sólidos por volume unitário do sistema. A fibra pode absorver parte da energia de compactação que seria aplicada nos grãos de solo, reduzindo assim, a eficiência da compactação do compósito. (LUCARELLI, 2018)

4.3 Compressão simples

Como descrito na metodologia, os corpos de prova foram moldados em sete camadas com auxílio do tarugo metálico no molde Harvard Miniature, então, foram calculadas com a fórmula 12 as quantidades de material para cada camada. A tabela 8 apresenta as quantidades de material usadas para moldar os corpos de prova de cada teor.

Tabela 8 - Quantidade de material para moldagem dos corpos de prova para compressão simples

Teor de Fibra	h ótima	ɣ s máx	Volume (cm^3)	Mw (g)	M água (g)	M compósito (g)	7 camadas (g)
0,0%	0,179	1,673	215,98	426,01	64,67	361,34	60,86
0,5%	0,209	1,631	215,98	426,07	73,76	352,31	60,87
1,0%	0,189	1,642	215,98	421,51	66,93	354,58	60,22

Fonte: da autora

4.3.1 Tensões máximas de ruptura

Como descrito no método da pesquisa, rompeu-se 3 corpos de prova de cada teor de adição de fibra, totalizando 9 resultados, sendo que a tensão máxima alcançada deve ser dividida por dois, os quais são apresentados na tabela 10:

Tabela 9 - Tensão máxima de ruptura para os corpos de prova

		0,0%	0,5%	1,0%
Tensão máxima de ruptura (MPa)	CP1	0,2495	0,2045	0,3360
	CP2	0,2275	0,2495	0,3040
	CP3	0,2715	0,2350	0,3765
	Média	*0,249*	*0,229*	*0,339*

Fonte: da autora

Para o teor de 0,0% de adição, ou seja, solo natural, obteve-se uma média de tensão máxima de 0,249 MPa, para adição de 0,5% uma média de 0,229 MPa e para adição de 1,0% uma tensão máxima de 0,339 MPa.

Antes de realizar a ruptura dos CPs, pesou-se as amostras a fim de determinar o índice de vazios destes, conforme tabela 10.

Tabela 10 - Determinação do índice de vazios das amostras

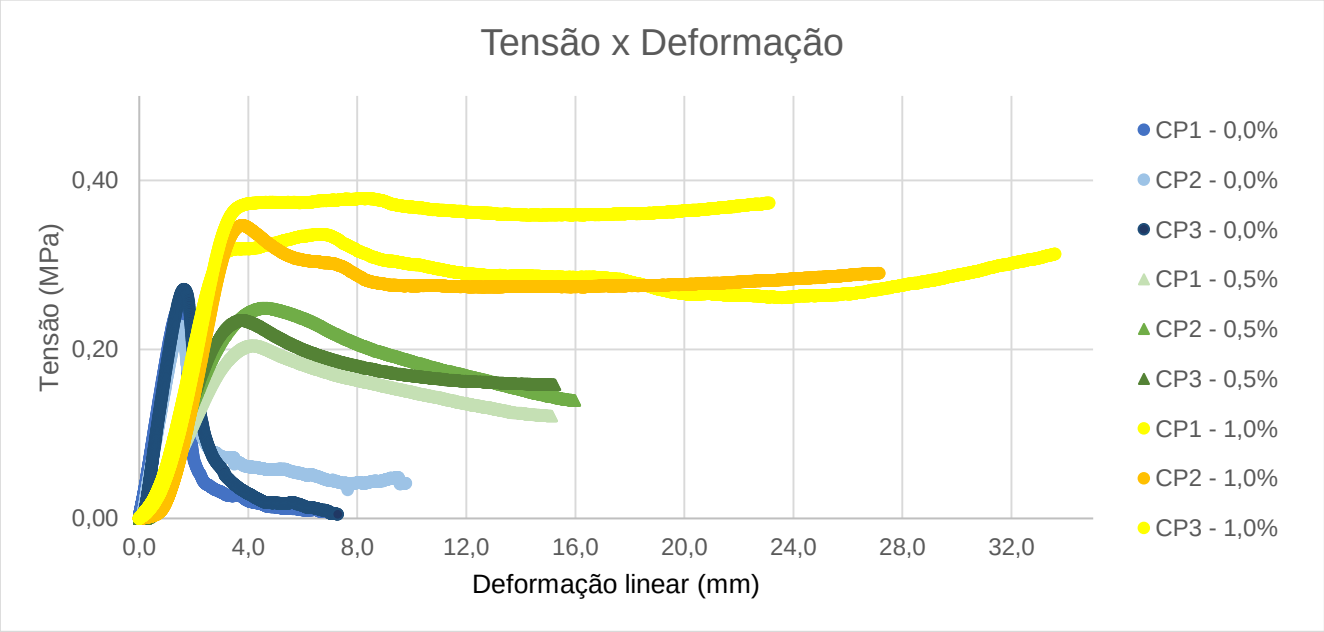
Amostra	Massa específica aparente seca (g/cm³)	Índice de Vazios	Índice de Vazios Médio
0%	1,668	0,590	0,590
	1,657	0,601	
	1,680	0,579	
0,5%F	1,571	0,688	0,684
	1,589	0,670	
	1,566	0,694	
1,0%F	1,594	0,664	0,654
	1,608	0,650	
	1,611	0,647	

Fonte: da autora

4.3.2 Comportamento tensão x deformação

A partir dos dados de ruptura gerados durante o ensaio foi possível gerar gráficos de tensão x deformação para cada mistura e seus respectivos teores conforme apresentado no gráfico da figura 49 abaixo onde é possível visualizar o comportamento do compósito em cada teor de adição.

Figura 49 - Gráfico Tensão x Deformação



Fonte: da autora

É possível perceber que após a resistência de pico, as misturas de solo com adição de fibra apresentaram uma a resistência, após a máxima, superior aos corpos de prova de solo natural. Essa resistência após a ruptura do compósito é chamada de resistência pós-pico. Feuerharmel (2000) afirma que com a adição de fibra ao solo adquire-se uma capacidade de absorção de energia em função das deformações sofridas pelo material, ou seja, a fibra passa a resistir às cargas aplicadas ao corpo de prova.

Quanto aos parâmetros de tensão máxima, o solo fibra apresentou um ganho significativo apenas no compósito de teor 1% sendo que para o de 0,5% a tensão máxima a compressão atingida foi menor do que a de solo natural. A baixa tensão máxima a compressão do compósito com 0,5% de adição de fibra, pode estar relacionado a uma má homogeneização, sabendo que a mistura e moldagens foram feitas de forma manual.

Com os dados do ensaio, também é possível avaliar o módulo de elasticidade do compósito, conforme tabela 11

Tabela 11 - Módulo de elasticidade médio de pico e 2mm pós-pico

TEOR DE FIBRA	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO (kN/m³)
0%	368,23
0,50%	137,99
1,00%	244,12

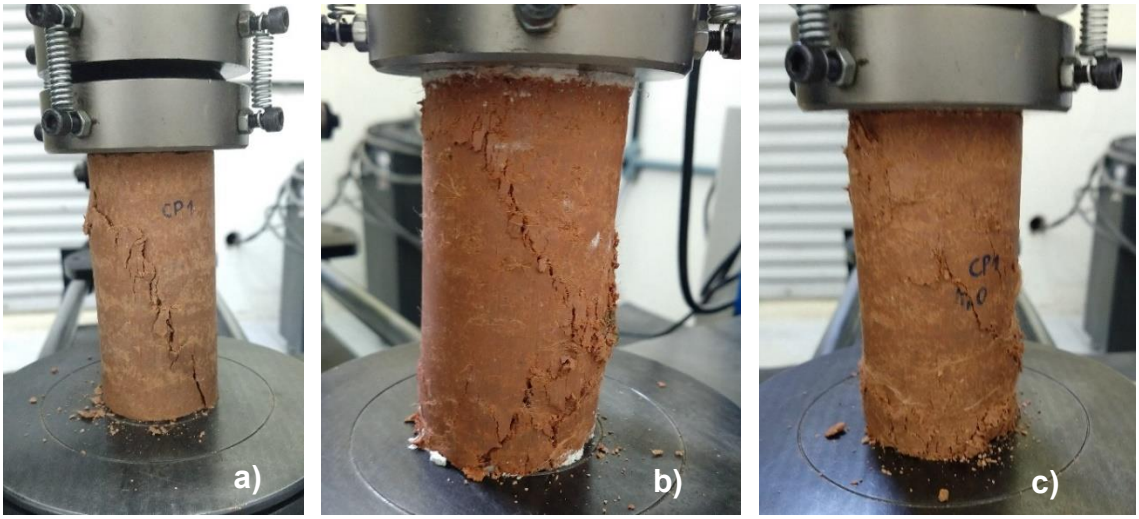
Fonte: da autora

Fica evidente que com a adição de fibra ao solo, o módulo de elasticidade diminui, pois, da mesma forma que a tensão de ruptura é elevada a deformação também é maior com a fibra no solo, diminuindo assim, o módulo de elasticidade.

Segundo Hannant (1994), isso se deve a capacidade da fibra de manter as interfaces das fissuras, causadas no corpo de prova, unidas. Assim, aumentando a ductibilidade, contribuindo também para os aumentos de resistência, da deformação de ruptura e tenacidade do compósito.

Na figura 50 é possível verificar o comportamento dos corpos de prova 0% de fibra, adição de fibra com teor de 0,5% e 1,0% respectivamente, após a ruptura:

Figura 50 - Corpos de prova após a ruptura a) solo natural b) adição 0,5% e c) 1,0%



Fonte: da autora

4.3.3 Análise estatística

Como apresentado no item 4.3.1, moldou-se 9 corpos de prova e obteve-se a média dos valores encontrados através do ensaio, sendo: 0% com 0,499 MPa, solo fibra 0,5% 0,459 MPa e o solo fibra 1% com 0,678 MPa.

No teste de *Bartlett*, foi realizada a comparação entre as médias onde o F (13,14) é maior que o Fα (5,14), houve então, a necessidade de verificar qual das médias se diferenciava mais das demais. Para isso foi realizado o teste de *Duncan*.

O teste de *Duncan* com 95% de probabilidade de acerto, mostrou que as amostras de solo e solo fibra com 0,5% de teor, não diferem entre si significativamente, porém, a amostra de solo quando testada com o resultado de solo fibra 1% teve significativa diferença e solo fibra 0,5% com solo fibra 1%, também. Sendo que a amostra 0% testada com 1%F teve a maior diferença significativa. Na tabela 12 é apresentado um resumo dos resultados do teste.

Tabela 12 - Resultado teste de *Duncan*

Teste de *Duncan*		
0%	0,5%F	Não diferem
0%	1,0%F	Diferença Significativa
1,0%F	0,5%F	Diferença Significativa

Fonte: da autora

4.4 Cisalhamento direto

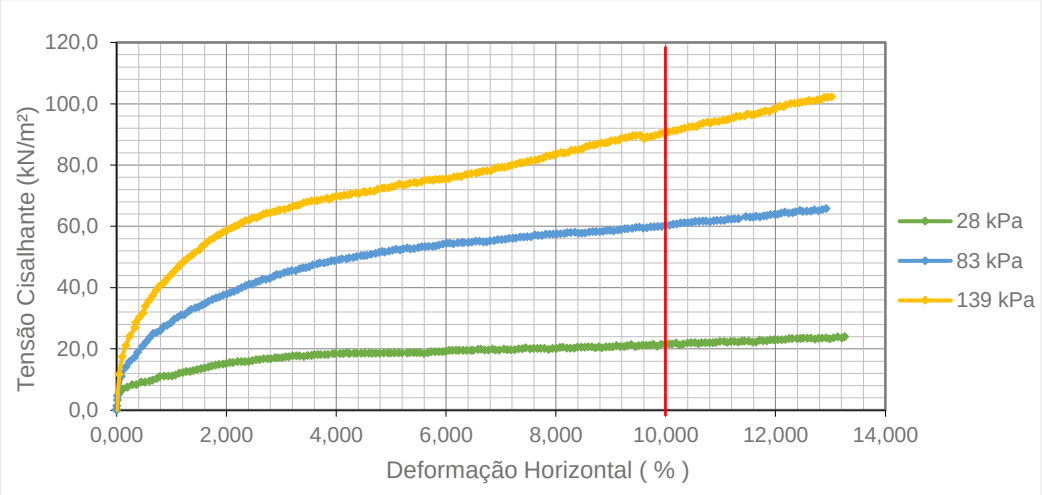
Através do ensaio de cisalhamento direto consolidado drenado, obteve-se as curvas de tensão cisalhante x deformação horizontal e deformação vertical x deformação horizontal para os três estágios de ensaio (28 kPa, 83 kPa e 139 kPa).

Através das curvas é possível montar a envoltória de Mohr Coulomb para as diferentes misturas e a partir dela obter os valores de coesão e ângulo de atrito interno, os quais são parâmetros imprescindíveis para cálculos de fundações, estabilidade de taludes e outros parâmetros de engenharia (MAY E SILVA, 2016).

A seguir será apresentada a envoltória de Mohr Coulomb de cisalhamento direto do corpo de prova com 0% de fibra e solo fibra com 1% de adição, que foram feitas de acordo com os dados do ensaio nos 3 estágios de carregamento, convencionando para análise a deformação horizontal de 10%.

Na figura 51 é apresentada a curva de tensão cisalhante x deformação horizontal do solo natural nos três estágios do ensaio.

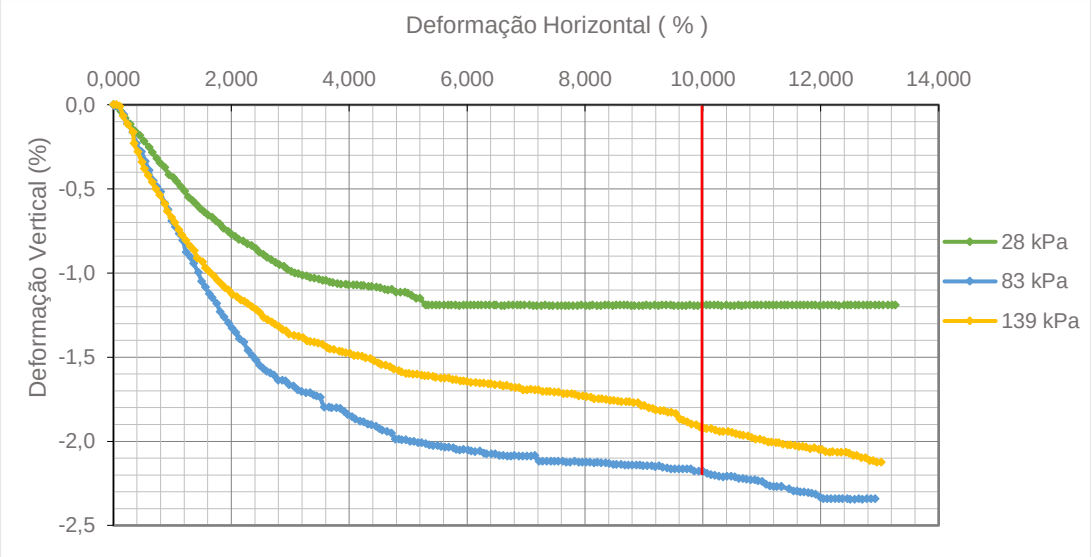
Figura 51 - Gráfico tensão cisalhante x deformação horizontal do solo natural



Fonte: da autora

Juntamente com as curvas de tensão são geradas as curvas de deformação vertical x deformação horizontal do solo sem adição de fibra nos 3 estágios de carregamento, conforme figura 52.

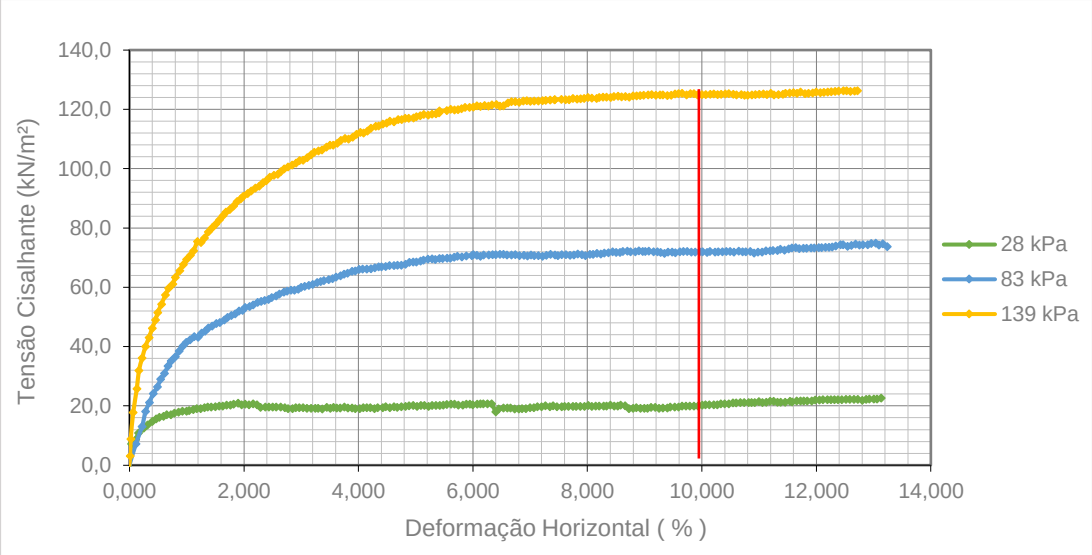
Figura 52 - Gráfico deformação vertical x deformação horizontal do solo natural



Fonte: da autora

Na figura 53 é apresentada a curva de tensão cisalhante x deformação horizontal do solo-fibra com 1% de adição três estágios do ensaio.

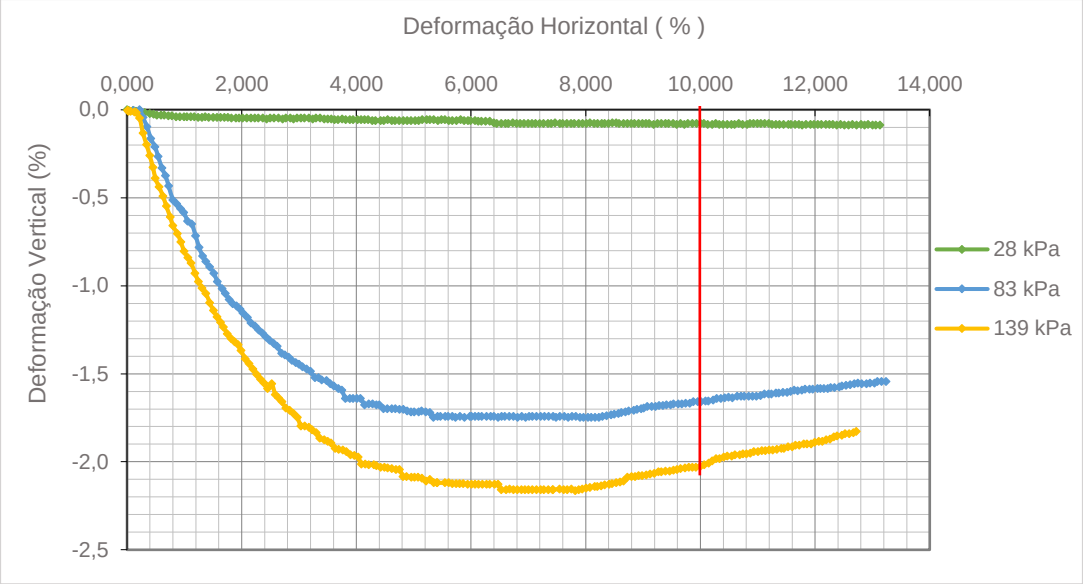
Figura 53 - Gráfico tensão cisalhante x deformação horizontal do solo fibra



Fonte: da autora

Juntamente com as curvas de tensão geram-se as curvas de deformação vertical x deformação horizontal do solo com adição de fibra no teor de 1%, nos 3 estágios de carregamento, conforme figura 54.

Figura 54 - Gráfico deformação vertical x deformação horizontal do solo natural



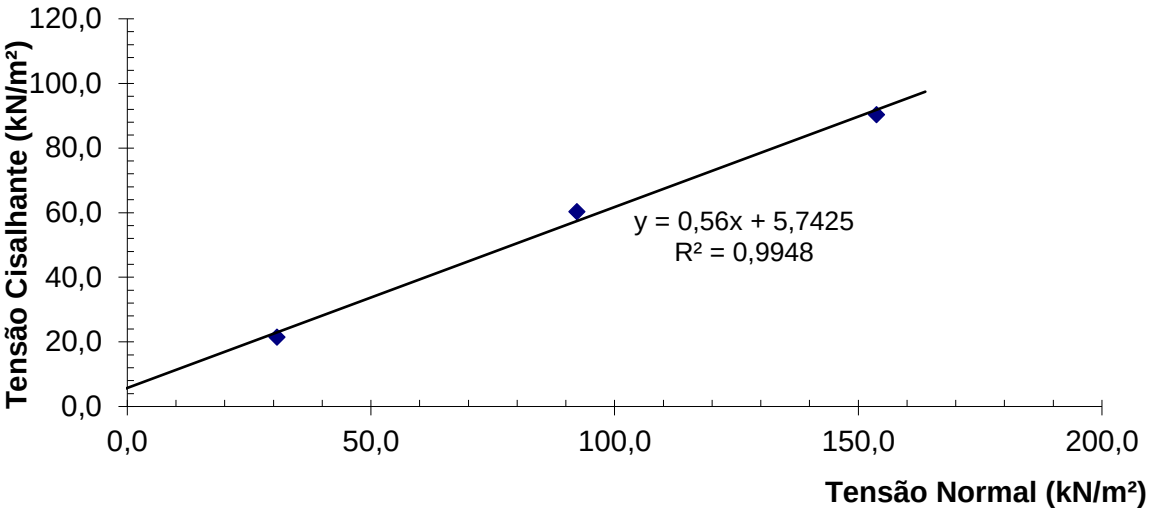
Fonte: da autora

Através dos gráficos obtidos com o ensaio é possível afirmar que o solo natural apresentou crescimento contínuo da resistência mobilizada, não apresentando estabilização da curva. Com a adição da fibra ao solo, os resultados apresentaram maior resistência que o solo natural com curva de comportamento que caracteriza crescimento contínuo e estabilização da resistência.

Como pode ser observado nos gráficos, o compósito não apresenta um valor máximo pronunciado, ou seja, não há pico. Então, para analisar os resultados de forma homogênea, foi estabelecida a deformação horizontal de 10% para a coleta de valores de tensão normal e tensão cisalhante em cada estágio de carregamento.

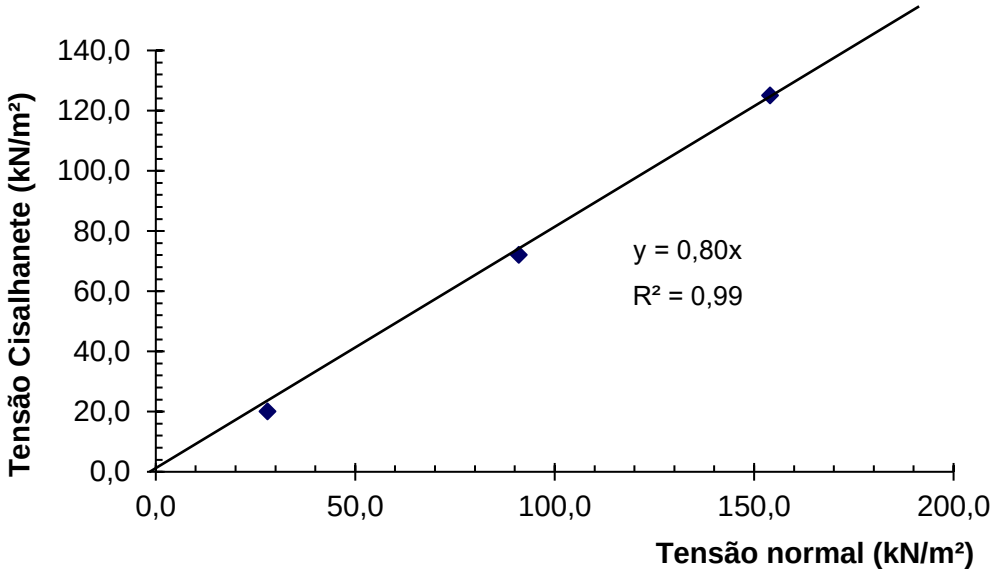
Com isso, obteve-se a envoltória de Mohr Couloumb para solo natural 0% e solo fibra com teor de 1%, respectivamente nas figuras 55 e 56.

Figura 55 - Envoltória de Mohr Couloumb para 10% de deformação – Amostra solo 0% de adição



Fonte: da autora

Figura 56 - Envoltória de Mohr Couloumb para 10% de deformação – Amostra solo fibra 1%



Fonte: da autora

A coesão teve uma diminuição ao inserir a fibra passando de 6,8 kN/m² para 0 kN/m² enquanto obteve-se ganho no ângulo de atrito interno, pois, de 20,40º do solo natural, passou para 38,66º com a adição de fibra PET.

O solo fibra apresentou tensões cisalhantes superiores ao solo natural, assim como o ângulo de atrito interno, isso pode ser explicado pela ação da fibra no ensaio, pois ao serem solicitadas com a ruptura da matriz, estas passam a absorver

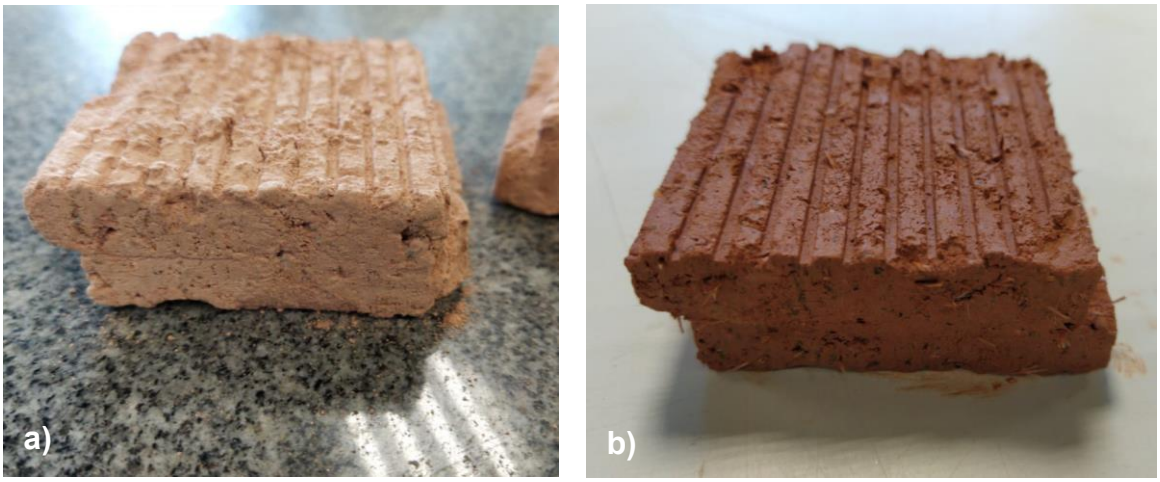
as tensões, ou seja, os esforços são transmitidos dos grãos de solo para as fibras aumento a tensão de cisalhamento e o ângulo de atrito.

Além disso, foi possível verificar que o parâmetro de intercepto de coesão foi anulado com a adição de fibra. Isso pode ser explicado pelo fato de que no solo natural o efeito da compactação acaba influenciando bastante o comportamento das curvas de resistência, pois curvas de resistência de solos compactados não apresentam um padrão convencional. Sendo esse padrão, para solos normalmente adensados, com um crescimento contínuo das tensões e estabilização e deformações de compressão; e para solos pré-adensados um crescimento de tensões até pico seguido de queda, com deformações de compressão seguidas de expansão. Com a adição da fibra a compactação perdeu um pouco a sua eficiência, e as curvas acabaram sendo mais próximas às de um solo normalmente adensado. Isso justifica a queda na coesão, pois solos normalmente adensados possuem coesão nula.

Conforme Anagnostopoulos et al. (2013), a adição de fibra desempenha um papel importante no aumento da resistência ao cisalhamento do solo, porém, esta, tende a aumentar somente até uma porcentagem ideal, após isso, os parâmetros de cisalhamento tendem a diminuir ou a se manter inalterados.

Na figura 58 é possível visualizar o comportamento do corpo de prova após o ensaio.

Figura 57 - Corpos de prova após ensaio a)solo natural e b)solo fibra



Fonte: da autora

Na tabela 13 abaixo são apresentados os índices físicos encontrados com os parâmetros de ensaio, pelo software do equipamento. É importante salientar que o

ensaio de cisalhamento não foi realizado no mesmo dia da moldagem das amostras no cilindro de CBR.

Tabela 13 - Índices físicos

Estágio	CP	Teor de Umidade (%)	Peso específico natural (kN/m³)	Peso específico seco (kN/m³)	Densidade real das partículas (g/cm³)	Índice de vazios
1	1 - 0%F	19,30%	16,57	13,89	2,65	0,91
2	2 - 0%F	19,16%	16,23	13,62	2,65	0,95
3	3 - 0%F	19,05%	16,22	13,63	2,65	0,95
1	1 - 1,0%F	19,88%	18,01	15,03	2,653	0,77
2	2 - 1,0%F	19,17%	17,35	14,56	2,653	0,82
3	3 - 1,0%F	19,30%	18,04	15,12	2,653	0,75

Fonte: da autora

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos com os ensaios laboratoriais, neste capítulo apresentam-se as principais conclusões.

É possível afirmar que, com a adição de fibras ao solo, proporciona-se o desenvolvimento de um novo material geotécnico, com características próprias e melhorias nos parâmetros mecânicos.

O solo natural apresentou uma umidade ótima de 17,89% para uma densidade seca máxima de 1,67 g/cm³. O compósito com adição de 1,0% de fibra apresentou umidade ótima mais próxima do solo natural com 18,87% e densidade seca máxima de 1,64 g/cm³, já o compósito com 0,5% de fibra teve umidade ótima de 20,94% e densidade seca máxima de 1,63 g/cm³.

Observou-se uma pequena variação da densidade seca máxima do solo (na ordem de 2%) se compararmos valores de amostras com 0% de adição para com os de 0,5% e 1%. A diminuição da densidade das misturas em relação ao solo natural se dá em virtude do fato das fibras serem mais leves que os grãos de solo, ou seja, a massa especifica seca máxima diminui com o aumento do teor de fibra deixando o compósito mais leve, sugerindo o uso desse material para aterro de solos moles. Sugere-se realizar o ensaio de CBR para averiguar a variação volumétrica das misturas em pesquisas futuras.

No ensaio de compressão simples, observou-se que, para o teor de 0,0% de adição, ou seja, solo natural, obteve-se uma média de tensão de 0,249 MPa com índice de vazios médio de 0,590, para adição de 0,5% uma média de 0,229 MPa com índice de vazios médio de 0,684 e para adição de 1,0% uma tensão de 0,339 MPa com índice de vazios médio de 0,654. Percebeu-se que com a adição de fibras no teor de 0,5% houve uma queda de tensão a compressão que pode estar relacionada a um maior índice de vazios dos corpos de prova, talvez algum problema não identificado na moldagem dos CPs, enquanto para o teor de 1% houve aumento da tensão, devido a capacidade de absorção de energia da fibra em função das deformações sofridas pelo material, ou seja, a fibra passa a resistir às cargas aplicadas ao corpo de prova. Além das influências na tensão, o solo fibra apresentou uma maior tensão pós-pico, isso se deve a capacidade da fibra de manter as interfaces das fissuras, causadas no corpo de prova, unidas, funcionando como ponte de transferência dos esforços através das fissuras, que garante uma resistência mesmo após o surgimento das

referidas fissuras. Ao surgirem as primeiras fissuras em um compósito sem fibras a abertura contínua dessa levará a peça ao colapso. Porém, em compósitos com a presença da fibra na matriz, essa fissura é retardada e a ruptura se torna um processo progressivo, pois as pontes formadas pelas fibras que absorveram parte das solicitações criam uma fissuração mais distribuída. Além disso, houve uma diminuição no módulo de elasticidade com a adição da fibra, devido a maior tensão de ruptura e maior deformação.

No ensaio de cisalhamento direto, na equação apresentada pela envoltória de Mohr-Coulomb, a coesão teve seu valor diminuído ao se inserir a fibra passando de 6,8 kN/m² para 0 kN/m² enquanto obteve-se ganho no ângulo de atrito interno, de 20,40º do natural, passou para 38,66º com a adição de fibra PET. A redução no intercepto de coesão é explicado pelo fato da amostra ter sido compactada, que faz com que o compósito se comporte com um material normalmente adensado. Já o aumento do ângulo de atrito interno se dá pela mesma razão do aumento das tensões cisalhantes, a fibra passa a resistir aos esforços submetidos ao compósito melhorando essa propriedade mecânica do solo.

Na tabela 14 são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos de forma resumida.

Tabela 14 - Quadro resumo dos resultados obtidos na caracterização mecânica

	Densidade dos grãos (g/cm³)	Compactação		Tensão máxima média de ruptura compressão (MPa)	Cisalhamento Direto	
		Wotm (%)	γdmax (g/cm³))		Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
S	2,653	17,89	1,67	0,249	6,80	20,40
0,5%F		20,94	1,63	0,229	-	-
1,0%F		18,87	1,64	0,339	0	38,66

Fonte: da autora

Por fim, após muitas tentativas, testes e análises de dados, sugere-se para trabalhos futuros:

a) Realizar ensaios com diferentes comprimentos de fibra PET para avaliar se os comprimentos influenciarão nos resultados encontrados;

b) Inserir diferentes teores de fibra, abaixo de 0,5% e acima de 1,0% para verificar se para esses diferentes teores o compósito se comportará de maneira diferente ao encontrado nessa pesquisa;

c) Verificar a porcentagem ideal de adição de fibras PET em que o compósito apresenta melhorias nos parâmetros de cisalhamento;

d) Realizar ensaios de compressão triaxial para avaliar diferentes parâmetros mecânicos do compósito;

e) Realizar ensaio de cisalhamento direto para diferentes teores de fibra, inclusive de 0,5% que não foi realizado nessa pesquisa;

f) Incorporar a fibra PET a diferentes tipos de solo para avaliar se em algum deles a fibra tem um melhor desempenho;

g) Avaliar a viabilidade operacional e econômica em obras de geotecnia.

REFERÊNCIAS

ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; TZETZIS, D.; BERKETIS, K. Shear strength behavior of polypropylene fibre reinforced cohesive soil, **Geomechanics and Geoengineering: AnInternational Journal,** 2013.

ASSIS, S. R. H.; MELO, R. A. Viabilidade técnica do uso de misturas de solo e pet granulado em camadas de pavimentos. In: 18ª RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2012, São Luis. **Anais 18ª RPU**, São Luis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **10º Censo da reciclagem do PET no Brasil**. Disponível em: http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3. Acesso em: 06 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6457**: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6502**: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **7181**: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **7182**: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. PA, USA, 2011.

BENJAMIN, Carlos Vinícius dos Santos. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil.** 2006. 326 f. Tese (Doutorado em geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BENTO, Priscila Fiochi **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos.** 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BERNARDI, Stefania Tesi **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar.** 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa **Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.

BRASIL. Secretaria de Vigilância Sanitária. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância Sanitária. **Portaria nº 987, de 08 de dezembro de 1998**. 1998. Disponível em:http://portal.anvisa.gov.br/documents/33916/390501/ALIMENTOS%2BPORTARIA%2BN%25C2%25BA%2B987%252C%2BDE%2B08%2BDE%2BDEZEMBRO%2B1998.pdf/89be7b21-e8a5-4de9-af9e-3f26c6a1cef4. Acesso em: 11 set. 2020.

BROERING, Wellington Borba *et al*. **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS EM SOLOS RESIDUAIS DE BIGUAÇU/SC**. 2018. 326 f. Curso de Engenharia Civil, DACC, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CAMPELLO SENEZ, Phillipe **Comportamento De Uma Areia Reforçada Com Fibras De Polietileno Tereftalato (Pet)**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2016.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1988.

CASAGRANDE, M.D.T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001, 95p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CHIOSSI, N. **Geologia de Engenharia**. 3 ed ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
COMERCIAL, Penna Firme. **Fibra de Sisal Forro**. Disponível em: https://www.comercialpennafirme.com.br/Fibra-de-Sisal-Forro. Acesso em 12 out.2019

CONSOLI, N. C. et al. **Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. Geotechnique**, v. 62, n. 2, p. 177–183, 2012.
CRISTELO, Nuno. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal - capítulo 4.** 2001. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola

de Engenharia da Universidade do Minho, Portugal, 2001.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **Propriedades de Engenharia de Solos Residuais Compactados da Região Sul do Brasil.** São Paulo. 1969.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. Ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno**. 2000. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
GIRARDELLO, Vinícius. **Ensaios de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. 2010. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

FORTES, Rita Moura. **Noções de solos**. 2016. Disponível em: http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material%20de%20apoio/1_NOCOES_DE_SOLOS.pdf. Acesso em: 09 set. 2020.

HANNANT, L. (1994) – **Fibre-reinforced Cements and Concretes** – London, 2ed. – 518p.

HOLLAWAY, L. **Polymers and polymers composites**. In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and behavior. 2ed., London: J. M. Illston/E & FN Spon, 1994. p.321-358.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **1183-3**: Plastics — Methods for determining the density of non-cellular plastics — Part 1: Immersion method, liquid pyknometer method and titration method. 2004.

LEUCÁDIO, Gislene Aparecida S. **Reforço de Solo Laterítico com Fibras de Sisal de Distribuição Aleatória, Tratadas Superficialmente com EPS Reciclado.** 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Ouro Preto, 2005.

LUCARELLI, Daniely Camargo **Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de Polietileno Tereftalato (PET) de distribuição aleatória.** 2018. 169 f. Dissertação (*Magister Scientiae*) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

LUZ, Ana Maria **Poliéster.** Disponível em: https://www.infoescola.com/compostos-quimicos/poliester/. Acesso em 12 out.2019
MANO, E.B., MENDES, L.C. **Introdução a polímeros**. 2nd ed., Ed Edgard Blucher Ltda, p.118, 2001.

MARAGON, M. **Capítulo 5 – Resistência ao cisalhamento dos solos**, dezembro 2018. 40p. Notas de aula.

MAY, Daniela Cristina; SILVA, Franciely Espindola da. **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE UM SOLO RESIDUAL DE GRANITO COMPACTADO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. 2016. 130 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MITCHELL, J.K.; KATTI, R.K. **Soil improvement. State-of-the-art report**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 10., 1981, Stockholm. Proceedings …Rotterdam: A. A. Balkema, 1981. v.4, p.261-317.

NEOMATEX, **Fibra de aço para concreto projetado.** Disponível em: https://www.neomatex.com.br/fibra-aco-concreto-projetado.html. Acesso em 12 out.2019

OLIVEIRA, T. G.; PEREIRA, E. L.; MENDES, G. C.; DUARTE, A. P.; SOARES, C. C. Avaliação do Uso de Fibras de Garrafas PET como Reforço de Solos Compactados.In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG**, Belo Horizonte, 2016.

PENA, Rodolfo F. Alves.**"Solo"**; *Brasil Escola*. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/geografia/o-solo.htm. Acesso em 02 de outubro de 2019.

PEREIRA, Reginaldo Sérgio **Viabilidade Técnica Do Emprego De Resíduos Da Indústria De Celulose Para Construção De Estradas Florestais.** 2011. 356 f. Tese (*Doctor Scientiae*) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
PINTO, Carlos. De Souza **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, L. E. M.; MELO, R. A.; ASSIS, S. R. H. Estudo de viabilidade do uso de resíduo pet em obra rodoviária. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2010, Bauru**. Anais-congresso brasileiro de gestão ambiental**, Bauru, 2010, p.1-6.

POLETO, Cristiano; MERTEN, Gustavo Henrique **Qualidade dos Sedimentos. 2 ed.** Porto Alegre : ABRH, 2013.

PONT, G. M. D.; BELCHIOR, I. M. R. M.; ARNS, P. Análise do Comportamento Mecânico de Misturas de um Solo Argiloso com Fibras de PET e Cal Hidratada. **XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região**, p. 9, 2019.
POPP, J. H. **Geologia geral**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

PRIETTO, P.D. MONTARDO, J. P., CONSOLI, N.C. (1999). **Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada Reforçada com Fibras PET**. Geossintéticos 99, Rio de Janeiro – RJ, p.199-206.

PRUDÊNCIO JR., L.R.. **Métodos estatísticos.** Notas de aula, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFSC, 2016.

RIBEIRO, Amanda Gonçalves. **"Medidas de dispersão: variância e desvio padrão"**; *Brasil Escola*. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/matematica/medidas-dispersao-variancia-desvio-padrao.htm. Acesso em 02 de setembro de 2020.

SANTOS, Fábio. **Fibra de Carbono 10 Curiosidades que talvez você não saiba.** Disponível em: https://revistabikeup.com.br/fibra-de-carbono-10-curiosidades-que-talvez-voce-nao-saiba/. Acesso em 12 out.2019

SANTOS, Jaqueline R.; SILVA, Tomás J. L. **Análise de viabilidade de utilização de solo tropical com a adição de fibras PET em sistemas de cobertura de aterros sanitários.** 86 f. 2015. Monografia de projeto final em Engenharia Civil - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2015.

SANTOS, Luiz Ricardo **Fibra de Vidro.** Disponível em: https://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-vidro/. Acesso em 12 out.2019

Solos de São Paulo. **CAMBISSOLOS.** Disponível em: http://www.iac.sp.gov.br/solossp/pdf/Cambissolos.pdf. Acesso em:23.out.2019.

SUMMET, Industries Limited **Pet Chips.** Disponível em: http://www.sumeetindustries.com/index.php/wpcproduct/pet-chips/. Acesso em:06.out.2019.

WICANDER R. & MONROE, J.S. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo, Cengage Learning, 508p. 2009.

WILDNER W. et al, **Mapa geológico do estado de Santa Catarina**, Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

YUMA. **[AMIANTO-ASBESTO] ¡Cuidado! ¿lo has consumido?** Disponível em: https://www.taringa.net/+ciencia_educacion/amianto-asbesto-cuidado-lo-has-consumido_vqi6s. Acesso em 12 out.2019