



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE GARRAFAS DE PET PARA REFORÇO DE
UM SOLO ARGILOSO

Silmara Nunes Dantas

São Cristóvão
(2022)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE GARRAFAS DE PET PARA REFORÇO DE
UM SOLO ARGILOSO

Silmara Nunes Dantas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante

São Cristóvão
(2022)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

(SILMARA NUNES DANTAS)

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 28/07/2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante
Orientador (Presidente/PROEC-UFS)

Prof. DSc. Patrício José Moreira Pires
(Externo – 1º Examinador/UFES)

Prof. DSc. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida
(Interno – 2º Examinador/PROEC-UFS)

Dedico este trabalho a minha mãe,
meu pai (in memoriam),
irmãos e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela providência, cuidado e, acima de tudo, pelo Amor incondicional que manifesta por mim todos os dias, amor esse que nunca permitiu que eu desistisse da caminhada ao esbarrar nas pedras pelo caminho. Além disso, por ter sido meu refúgio e meu sustento, pois sei que essa conquista é fruto da sua infinita misericórdia.

A minha mãe, por todo amor, dedicação e incentivo. A senhora é minha maior fonte de perseverança e motivação.

Aos meus irmãos, por todo carinho, preocupação e por não medir esforços para me ajudar.

Aos meus sobrinhos, por me proporcionarem alegria quebrando os momentos de estresse.

A minha prima Mirelle, por todo incentivo e por se fazer sempre presente.

Ao meu orientador, Erinaldo Cavalcante, pela orientação, dedicação, disposição em ajudar e por transmitir seus conhecimentos e experiência durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor DSc. Guilherme Almeida, por ser sempre muito solícito durante a realização dos ensaios, não medindo esforços em ajudar e esclarecer dúvidas.

Aos técnicos do Geopav, Willami Santos e Luiza Ramos, por toda dedicação e disposição em ajudar, os ensaios sem vocês não teriam o mesmo rendimento.

Aos meus companheiros de laboratório, Larissa Oliveira, Leandro Souza, Lucila Sales e Mariana Fontes por todo auxílio durante a realização dos ensaios. Vocês tornaram a árdua rotina do laboratório mais leve e descontraída.

Aos meus amigos, que sempre se fizeram próximos e que me ajudaram em oração e, a todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

A todos, minha eterna gratidão.

“Até aqui nos ajudou o Senhor.”
(1 Samuel – 7:12)

RESUMO

A produção e o consumo de produtos dispostos em embalagens de politereftalato de etileno (PET) vêm crescendo de forma muito expressiva ao longo das últimas décadas devido ao crescimento populacional, que, por sua vez, aumentam a demanda e o consumo por produtos industrializados. Com isso, a geração de resíduos não degradáveis cresce a cada dia, e representa um grande problema ambiental, pois as embalagens plásticas possuem um longo tempo de decomposição, necessitando de grandes espaços para serem dispostas em aterros, além do que muitas vezes elas são descartadas inadequadamente na natureza. Portanto, sabe-se que a reutilização de resíduos tende a minimizar os impactos ambientais, preservando os recursos naturais, e contribuindo com as ações de sustentabilidade ambiental. Por outro lado, na Geotecnia, muitas vezes são encontrados problemas na execução de obras quando as propriedades do solo disponível no local não atendem aos critérios exigidos para o projeto. Ou seja, quando o solo natural não se enquadra nas especificações técnicas para determinada aplicação, é necessário o emprego de alguma técnica para melhoria das suas propriedades. Neste contexto, o emprego de materiais recicláveis, incluindo os poliméricos, tem sido crescente na engenharia geotécnica para reforço de solos. Diante deste cenário, esta pesquisa propõe o uso de resíduos de garrafas PET como uma solução alternativa para a melhoria da resistência ao cisalhamento de um solo de matriz argilosa. Para isso, avaliou-se os efeitos da inclusão de PET, nas formas micronizado e filete, em diferentes teores e comprimentos, no comportamento mecânico de um solo argiloso, a partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão não confinada, cisalhamento direto e compressão triaxial adensado não drenado (CU). Além destes, analisou-se também seus efeitos na condutividade hidráulica das misturas em relação à matriz. Os resultados obtidos para todos os ensaios de resistência mostraram que tanto o PET micronizado quanto o PET filete agregou melhoria na resistência das misturas em relação ao solo puro. Verificou-se que os dois tipos de PET contribuíram de forma mais significativa com incrementos na parcela coesiva da matriz, sendo que o PET filete predominantemente promoveu maior aumento no valor da coesão/intercepto coesivo das misturas em relação ao solo puro, quando comparado ao PET micronizado. Dos teores e comprimentos testados, o de 5% para o PET micronizado, assim como, a combinação teor de 0,5% com comprimento de 15 mm para o PET filete foram os que se mostraram mais adequados em conferir maiores ganhos de resistência ao solo, especialmente a coesiva. Quanto à condutividade hidráulica, os resultados obtidos evidenciaram que o PET tornou as misturas mais permeáveis quando comparadas à matriz não reforçada. Portanto, conclui-se que a utilização de PET (micronizado e filete) como reforço de um solo argiloso tem viabilidade técnica, pois além de contribuir com a resistência, possibilita uma ação mitigadora dos sérios impactos gerados pelos resíduos desse material, uma vez que sugere uma destinação mais nobre para esse passivo ambiental, muitas vezes descartado inadequadamente na natureza.

Palavras-chave: Politereftalato de etileno; Reforço de solo; Comportamento mecânico.

ABSTRACT

The production and consumption of products disposed in polyethylene terephthalate (PET) packaging has been growing very significantly over the last few decades due to population growth, which, in turn, increases the demand and consumption of industrialized products. As a result, the generation of non-degradable waste grows every day, and represents a major environmental problem, as plastic packaging has a long decomposition time, requiring large spaces to be disposed of in landfills, in addition to which they are often discarded inappropriately in nature. Therefore, it is known that the reuse of waste tends to minimize environmental impacts, preserving natural resources, and contributing to environmental sustainability actions. On the other hand, in Geotechnics, problems are often encountered in the execution of works when the properties of the soil available at the site do not meet the criteria required for the project. That is, when the natural soil does not fit the technical specifications for a given application, it is necessary to employ some technique to improve its properties. In this context, the use of recyclable materials, including polymeric ones, has been increasing in geotechnical engineering for soil reinforcement. Given this scenario, this research proposes the use of PET bottle waste as an alternative solution to improve the shear strength of a clay matrix soil. For this, the effects of the inclusion of PET, in micronized and fillet forms, in different contents and lengths, on the mechanical behavior of a clayey soil were evaluated, based on the results of unconfined compressive strength, direct shear and triaxial compression consolidated undrained (CU). In addition to these, their effects on the hydraulic conductivity of the mixtures in relation to the matrix were also analyzed. The results obtained for all resistance tests showed that both the micronized PET and the PET fillet added an improvement in the resistance of the mixtures in relation to the pure soil. It was found that the two types of PET contributed more significantly with increases in the cohesive portion of the matrix, and the PET fillet predominantly promoted a greater increase in the value of cohesion/cohesive intercept of the mixtures in relation to pure soil, when compared to PET micronized. Of the contents and lengths tested, the 5% content for micronized PET, as well as the combination of 0.5% content with a length of 15 mm for the PET fillet were the ones that proved to be the most suitable in providing greater gains in soil resistance, especially the cohesive. As for hydraulic conductivity, the results obtained showed that PET made the mixtures more permeable when compared to the non-reinforced matrix. Therefore, it is concluded that the use of PET (micronized and fillet) as a reinforcement of a clayey soil is technically viable, because in addition to contributing to resistance, it enables a mitigating action of the serious impacts generated by the residues of this material, since it suggests a nobler destination for this environmental liability, often inappropriately discarded in nature.

Keywords: Polyethylene terephthalate; Soil reinforcement; Mechanical behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representações esquemáticas das diversas características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.	28
Figura 2: Princípio básico do funcionamento do solo reforçado. (a) Elemento de solo sem reforço (b) Elemento de solo com reforço.....	34
Figura 3: Representação esquemática de matriz com fibras descontínuas submetidas à carregamento axial.....	35
Figura 4: Métodos de síntese do PET.....	37
Figura 5: Evolução do índice de reciclagem do PET.	42
Figura 6: Aplicação do PET reciclado.....	43
Figura 7: Tiras de PET utilizadas.	44
Figura 8: Resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada para diferentes teores de tiras de PET para (a) solo argiloso e (b) solo arenoso.....	45
Figura 9: Resultados dos ensaios de compressão triaxial adensado não drenado (CU), para pressão de confinamento de 100 kPa, com diferentes teores de tiras de PET para (a) solo argiloso e (b) solo arenoso.....	46
Figura 10: Amostra do solo argiloso utilizado.	53
Figura 11: Imagem de satélite do ponto de coleta das amostras de solo em São Cristóvão/SE.	54
Figura 12: Aspectos visuais do PET micronizado.....	55
Figura 13: Imagem do PET filete.	55
Figura 14: Etapas de preparação das garrafas PET para confecção dos filetes.....	56
Figura 15: Etapas da preparação do PET filete: (a) formação dos fios de PET, (b) fios de PET obtidos e acessórios utilizados (tesoura e régua) para confecção dos filetes, (c) filetes. .	56
Figura 16: Croqui do filetador confeccionado.....	57
Figura 17: Fluxograma das etapas do programa experimental.....	58
Figura 18: Procedimento para preparação da mistura solo-PET filete.....	63
Figura 19: Misturas ensacadas e etiquetadas.....	64
Figura 20: Procedimento para moldagem dos corpos de prova por compactação dinâmica....	65
Figura 21: Corpos de prova moldados para o ensaio de resistência à compressão não confinada no dessecador antes do rompimento.....	66
Figura 22: Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão não confinada.	67
Figura 23: Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. (a) massa de solo inserida no anel; (b) pressão aplicada com o auxílio de régua metálica; (c) pressão aplicada para compactar a massa por igual; (d) conferência da massa específica aparente seca máxima almejada; (e) acabamento da superfície e (f) corpo de prova compactado.	68

Figura 24: Corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto armazenados no dessecador.	69
Figura 25: Extração dos corpos de prova de cisalhamento direto.	69
Figura 26: Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto.	71
Figura 27: Corpo de prova das misturas solo-PET filete revestido com tiras de papel antes de ser envolvido com a membrana.	74
Figura 28: Equipamento triaxial utilizado nesta pesquisa.	75
Figura 29: Etapas realizadas no ensaio de permeabilidade, (a) compactação do corpo de prova, (b) corpo de prova compactado, (c) preparação da base do permeâmetro, (d) aplicação do papel filtro sobre a camada de areia, (e) corpo de prova posicionado sobre a base e sobreposto por papel filtro e uma camada de areia grossa, (f) cilindro preenchido com água, (g) inserção da tampa superior, (h) processo de saturação, (i) execução do ensaio, (j) extração do corpo de prova.	76
Figura 30: Curva granulométrica do solo puro.	77
Figura 31: Curva granulométrica do PET micronizado.	78
Figura 32: Curvas granulométricas do solo puro e das misturas solo-PET micronizado contendo os teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco.	79
Figura 33: Composições granulométricas do solo puro e das misturas solo-PET micronizado.	81
Figura 34: Valores de densidade real dos grãos do solo puro, do PET micronizado e das misturas solo-PET micronizado.	82
Figura 35: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET micronizado.	84
Figura 36: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET filete contendo o material polimérico nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e comprimento de 5mm.	85
Figura 37: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET filete contendo o material polimérico nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e comprimento de 10mm.	86
Figura 38: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET filete contendo o material polimérico nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e comprimento de 15mm.	86
Figura 39: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado.	89
Figura 40: Coesão obtida para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco.	91
Figura 41: Corpos de prova após rompimento; (a) solo puro; (b) solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5%.	92
Figura 42: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com comprimento de 5mm.	93
Figura 43: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com comprimento de 10mm.	93

Figura 44: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com comprimento de 15mm.....	94
Figura 45: Valores de coesão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% em relação à massa de solo seco e com os comprimentos de 5, 10 e 15mm.....	96
Figura 46: Corpos de prova após rompimento: (a) solo puro; (b) solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 1,0% e comprimento de 15mm; (c) superfície da fissura do corpo de prova solo-PET levemente reduzida.	97
Figura 47: Comparação dos valores de coesão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5%, respectivamente, em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm.....	98
Figura 48: Envoltórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.....	99
Figura 49: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição de umidade natural.	100
Figura 50: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição de umidade natural.	100
Figura 51: Envoltórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com os comprimentos de 5, 10 e 15mm, ensaiados em condição de umidade natural.	102
Figura 52: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição de umidade natural.	103
Figura 53: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição de umidade natural.	103
Figura 54: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados em condição de umidade natural.	105
Figura 55: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados em condição de umidade natural.	105
Figura 56: Envoltórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.....	107

Figura 57: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição previamente inundada.	108
Figura 58: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição previamente inundada.	108
Figura 59: Envoltórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com os comprimentos de 5, 10 e 15mm, ensaiados em condição previamente inundada.	110
Figura 60: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição previamente inundada.	111
Figura 61: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição previamente inundada.	111
Figura 62: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e ensaiados em condição previamente inundada.	113
Figura 63: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e ensaiados em condição previamente inundada.	113
Figura 64: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados para as condições de umidade natural e previamente inundada.	114
Figura 65: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material o polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados para as condições de umidade natural e previamente inundada.	115
Figura 66: Envoltória de resistência obtida para o solo puro em termos de tensões totais. ...	116
Figura 67: Envoltória de resistência obtida para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco em termos de tensões totais.	116
Figura 68: Envoltória de resistência obtida para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm em termos de tensões totais.	117
Figura 69: Envoltória de resistência obtida para o solo puro em termos de tensões efetivas.	118
Figura 70: Envoltória de resistência obtida para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco em termos de tensões efetivas.	118

Figura 71: Envoltória de resistência obtida para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm em termos de tensões efetivas.	119
Figura 72: Valores de coesão e intercepto coesivo obtidos nos ensaios de resistência para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm) em relação à massa de solo seco.	122
Figura 73: Valores de ângulo de atrito interno obtidos nos ensaios de resistência para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm) em relação à massa de solo seco.	122
Figura 74: Coeficientes de permeabilidade obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete, contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), respectivamente, ambos em relação à massa de solo seco. ..	124
Figura 75: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico no teor de 5% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.....	135
Figura 76: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.....	136
Figura 77: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.	136
Figura 78: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.....	137
Figura 79: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.	137
Figura 80: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.....	138
Figura 81: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.	138
Figura 82: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.....	139
Figura 83: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm ensaiados em condição de umidade natural.	140
Figura 84: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de	

0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm, ensaiados em condição de umidade natural.	140
Figura 85: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm ensaiados em condição de umidade natural.	141
Figura 86: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm, ensaiados em condição de umidade natural.	141
Figura 87: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm ensaiados em condição de umidade natural.	142
Figura 88: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm, ensaiados em condição de umidade natural.	142
Figura 89: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.	143
Figura 90: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.	144
Figura 91: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.	144
Figura 92: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.	145
Figura 93: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.	145
Figura 94: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.	146
Figura 95: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.	146
Figura 96: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.	147
Figura 97: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5%	

em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm ensaiados em condição previamente inundada.....	148
Figura 98: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm, ensaiados em condição previamente inundada.....	148
Figura 99: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm ensaiados em condição previamente inundada.....	149
Figura 100: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm, ensaiados em condição previamente inundada.	149
Figura 101: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm ensaiados em condição previamente inundada.....	150
Figura 102: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm, ensaiados em condição previamente inundada.	150
Figura 103: Curvas $\sigma_1 - \sigma_3$ versus deformação axial obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5%, em relação à massa de solo seco, para as pressões de confinamento de 100, 200, 400 e 600 kPa...	151
Figura 104: Curvas $\sigma_1 - \sigma_3$ versus deformação axial obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5%, em relação à massa de solo seco, e com comprimento de 15 mm para as pressões de confinamento de 100, 200, 400 e 600 kPa.	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do PET.	38
Tabela 2: Propriedades mecânicas do PET em contraposição com as do PP e as do PVC.....	39
Tabela 3: Resistência do PET a determinados agentes agressivos.....	39
Tabela 4: Resultados dos ensaios para o solo puro e reforçado com tiras de PET de (15 x 25 mm) em diferentes teores.	49
Tabela 5: Resultados dos ensaios com solo puro e reforçado com 0,4% de tiras de PET com diferentes comprimentos (a largura da tira é constante 15 mm).....	50
Tabela 6: Resumo dos resultados obtidos nas pesquisas mencionadas, nas quais vários autores utilizaram o PET como reforço de solo.	52
Tabela 7: Dimensões e teores do material polimérico reciclado que foram utilizados nas misturas Solo-PET.....	59
Tabela 8: Nomenclaturas adotadas para o solo puro e para cada mistura solo-PET ensaiada.	59
Tabela 9: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão não confinada.....	66
Tabela 10: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de cisalhamento direto.....	71
Tabela 11: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de compressão triaxial (CU).....	74
Tabela 12: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de permeabilidade.	76
Tabela 13: Valores dos limites de Atterberg obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado.	83
Tabela 14: Parâmetros ótimos de compactação obtidos para o solo puro e para cada mistura solo-PET micronizado.	84
Tabela 15: Parâmetros ótimos de compactação obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo os teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com 5, 10 e 15 mm de comprimento.	87
Tabela 16: Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), em relação à massa de solo seco, em termos de tensões totais.	117
Tabela 17: Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), em relação à massa de solo seco, em termos de tensões efetivas.	119
Tabela 18: Resumos dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), respectivamente, ambos em relação à massa de solo seco, para todos os ensaios realizados.	121

Tabela 19: Valores médios de tensão de ruptura e coeficientes de variação obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado.	133
Tabela 20: Valores médios de tensão de ruptura e coeficientes de variação obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete.	134
Tabela 21: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado em condição de umidade natural.	135
Tabela 22: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete em condição de umidade natural.	139
Tabela 23: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado em condição previamente inundada.	143
Tabela 24: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete em condição previamente inundada.	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BHET	Tereftalato de Bis (2 – Hidroxietileno)
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CD	Ensaio Triaxial Adensado Drenado
CH	Argila de Alta Plasticidade
CU	Ensaio Triaxial Adensado não Drenado
DMT	Tereftalato de Dimetileno
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EG	Etilenoglicol
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compactado Tropical
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PET	Politereftalato de Etileno
PETG	Tereftalato de Polietileno Glicol
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
RCS	Resistência à Compressão Simples
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UU	Ensaio Triaxial não Adensado não Drenado
TRB	Transportation Research Board
TPA	Ácido Tereftálico Purificado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
1.2	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	24
1.3	OBJETIVOS	25
1.3.1	Geral	25
1.3.2	Específicos.....	25
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	SOLOS REFORÇADOS.....	26
2.1.1	Materiais Compósitos	28
2.2	SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS	29
2.2.1	Tipos de Fibras Empregadas como Reforço	30
2.2.1.1	Fibras naturais.....	30
2.2.1.2	Fibras minerais.....	31
2.2.1.3	Fibras metálicas	31
2.2.1.4	Fibras poliméricas.....	32
2.3	MECANISMO DE INTERAÇÃO ENTRE A MATRIZ E AS FIBRAS	33
2.4	POLITEREFTALATO DE ETILENO	36
2.4.1	Propriedades do PET	38
2.4.2	PET e o Impacto Ambiental	40
2.4.3	Reciclagem do PET	41
2.5	USO DE RESÍDUOS DE PET COMO REFORÇO DE SOLOS.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1	MATERIAIS	53
3.1.1	Solo.....	53
3.1.2	Material Polimérico Reciclado Proveniente do PET	54
3.1.2.1	PET micronizado	54
3.1.2.2	PET filete	55
3.2	MÉTODOS	58
3.2.1	Caracterização Geotécnica e Compactação	60
3.2.1.1	Análise granulométrica	60
3.2.1.2	Densidade real dos grãos	60
3.2.1.3	Limites de Atterberg	61
3.2.1.4	Ensaio de Compactação.....	61
3.2.2	Ensaio de Resistência.....	62
3.2.2.1	Ensaio de resistência à compressão não confinada.....	62
3.2.2.2	Ensaio de cisalhamento direto.....	67

3.2.2.3	Ensaio de compressão triaxial adensado não drenado (CU).....	72
3.2.3	Ensaio de Permeabilidade.....	75
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	77
4.1.1	Análise Granulométrica	77
4.1.2	Densidade Real dos Grãos	82
4.1.3	Limites de <i>Atterberg</i>	82
4.1.4	Ensaio de Compactação	83
4.1.4.1	Misturas solo-PET micronizado x solo puro	83
4.1.4.2	Misturas solo-PET filete x solo puro	85
4.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA.....	89
4.2.1	Resistência à Compressão não Confinada	89
4.2.1.1	Ensaio realizado com o solo puro e com as misturas solo-PET micronizado	89
4.2.1.2	Ensaio realizado com o solo puro e com as misturas solo-PET filete	92
4.2.2	Cisalhamento Direto	98
4.2.2.1	Ensaio realizado em condição de umidade natural	98
4.2.2.1.1	<i>Amostras do solo puro e solo-PET micronizado</i>	<i>98</i>
4.2.2.1.2	<i>Amostras do solo puro e solo-PET filete</i>	<i>101</i>
4.2.2.1.3	<i>Comparação dos parâmetros de resistência obtidos para o solo puro e para as amostras solo-PET micronizado e filete em condição de umidade natural</i>	<i>104</i>
4.2.2.2	Ensaio realizado em condição previamente inundada	106
4.2.2.2.1	<i>Amostras do solo puro e solo-PET micronizado</i>	<i>106</i>
4.2.2.2.2	<i>Amostras do solo puro e solo-PET filete</i>	<i>109</i>
4.2.2.2.3	<i>Comparação dos parâmetros de resistência obtidos para o solo puro e para as amostras solo-PET micronizado e filete.....</i>	<i>112</i>
4.2.2.3	Comparação entre os ensaios realizados para a condição de umidade natural e previamente inundada.....	114
4.2.3	Ensaio de Compressão Triaxial Adensado não Drenado (CU).....	116
4.2.3.1	Envoltórias de resistência do solo puro e das misturas solo-PET micronizado e filete em termos de tensões totais	116
4.2.3.2	Envoltórias de resistência do solo puro e das misturas solo-PET micronizado e filete em termos de tensões efetivas	118
4.2.4	Análise Conjunta da Resistência ao Cisalhamento do Solo e das Misturas	120
4.3	ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	123
4.3.1	Amostras de Solo Puro e Misturas Solo-PET Micronizado e Filete	123
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	125
5.1	CONCLUSÕES	125
5.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

APÊNDICE A132
APÊNDICE B.....133
APÊNDICE C135
APÊNDICE D151

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O politereftalato de etileno (PET) é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo, tendo sua utilização em fibras têxteis, filmes biorientados, polímeros de engenharia e embalagens processadas por injeção-sopro. A introdução da primeira embalagem de PET no mundo teve início na década de 70 (ABIPET, 2012). No Brasil, a principal aplicação desse polímero foi na indústria de embalagem, envolvendo diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009).

Atualmente, percebe-se que a produção e o consumo de produtos dispostos em embalagens plásticas, tais como as de politereftalato de etileno vem crescendo de forma exorbitante devido ao crescimento populacional, que aumenta a demanda e o consumo por produtos industrializados, e com isso a geração de resíduos não degradáveis cresce a cada dia, ocasionando, dessa forma, impactos ambientais. Esses impactos são gerados simplesmente pelo fato de que a cada ano milhares de toneladas de garrafas PET são produzidas e descartadas, e além de apresentarem um longo tempo de decomposição, essas embalagens necessitam de grandes espaços para serem dispostas nos aterros, sem falar que muitas vezes elas acabam não tendo um descarte final de maneira correta.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2016), os resíduos gerados pelas embalagens de PET ainda são pouco aproveitados pela indústria da reciclagem, e isso é demonstrado no décimo censo da reciclagem do PET no Brasil, fornecido por essa associação, onde o volume de PET consumido no ano de 2015 foi de aproximadamente 537.000 toneladas, sendo que apenas 274.000 toneladas foram recicladas, ou seja, apenas 51% do PET consumido foi reciclado, dessa forma, nota-se o grande problema gerado pelos resíduos desse polímero que ainda se encontram sem fins de reciclagem e acabam sendo descartados em aterros sanitários e até mesmo lixões.

Portanto, é sabido que a reutilização de resíduos tende a minimizar os impactos ambientais, e de certa forma preserva os recursos naturais, e que nos dias atuais esta prática deve ser vista não como uma alternativa a ser realizada, mas sim como uma necessidade. Com isso, nos últimos anos pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de encontrar uma destinação final mais adequada para os resíduos oriundos de diversos setores da indústria.

Por outro lado, sabe-se que o solo natural é um material complexo, variável e por apresentar baixo custo é bastante utilizado como material de construção. Porém, na geotecnia, são encontrados muitos problemas na execução de obras, pelo fato de que muitas vezes as propriedades do solo natural encontrado no local não atendem aos requisitos de um projeto específico, a exemplo dos solos que apresentam baixa capacidade de suporte, matriz muito argilosa e compressível, tornando necessário nesse caso o engenheiro optar por uma das seguintes soluções para o problema: adequar o projeto às restrições impostas pelo solo local, remover a camada de solo que apresenta limitações em seu uso e substituí-la por um solo com melhores propriedades ou simplesmente tentar alterar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material que seja capaz de atender aos requisitos de um projeto específico (INGLES; METCALF, 1972).

Dentre as opções disponíveis, a alternativa de alterar as propriedades do solo existente tornou-se corriqueira por ser uma técnica economicamente viável. Essa técnica compreende a utilização de processos de compactação, mistura de solos (estabilização granulométrica), carregamento e/ou drenos verticais, estabilização através de processos físico-químicos, reforço de solo, entre outros.

Dentro deste contexto, a técnica de reforço de solos consiste na introdução de elementos de reforço resistente na massa de solo, tais como: geotêxteis, grelhas, fibras, tiras, entre outros, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos mesmos. Segundo Gray e Ohashi (1983) essa técnica caracteriza-se por ser eficaz e confiável para aumentar a resistência e a estabilidade dos solos.

O uso de materiais poliméricos para reforço de solos vem sendo estudado por diversos autores (FEUERHARMEL, 2000; CASAGRANDE, 2005; SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY, 2011; BOTERO *et al.*, 2015; MARTÍNEZ *et al.*, 2016; SENEZ; CASAGRANDE, 2016; ZUKRI; NAZIR; MENDER, 2017; LOUZADA; MALKO; CASAGRANDE, 2019; SALIMI; GHAZAVI, 2019) e mostram-se como elementos de reforço com grande potencial para a melhoria das propriedades mecânicas dos solos.

Diante do cenário, visando sugerir uma destinação mais nobre para os resíduos gerados pelas garrafas de politereftalato de etileno descartadas no meio ambiente sem fins de reciclagem e que causam sérios impactos na natureza. Além disso, com o intuito de oferecer uma solução a baixo custo para a execução de obras quando o solo natural local não apresenta características compatíveis com um projeto específico. A presente pesquisa propõe o uso de resíduos de garrafas PET como uma solução alternativa para a melhoria da resistência ao cisalhamento de um solo de matriz argilosa.

1.2 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O uso alternativo do PET reciclado como reforço de solos mostra-se bastante promissor, pois se trata de um material relativamente resistente e inerte. Pesquisas realizadas com esse polímero vêm mostrando o quanto é benéfica a utilização desse material para agregar melhores propriedades mecânicas aos solos e em outras aplicações da engenharia.

Estudos realizados com a adição de fibras e resíduos provenientes da reciclagem de garrafas PET como reforço de solos arenosos mostraram que as fibras desse material, bem como os resíduos utilizados promovem diversas melhorias. Por exemplo, trabalham à tração, geram intertravamento dos grãos dos solos, controlam a propagação de fissuras e melhoram significativamente a resistência à compressão e a tensão de ruptura, proporcionando, dessa forma, uma distribuição favorável das tensões no solo. Como consequência, ocorre aumento na resistência ao cisalhamento do solo, e além disso, a capacidade de absorção de energia do solo tende a aumentar, contribuindo assim para a redução dos recalques (SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY, 2011; SENEZ; CASAGRANDE, 2016; SALIMI; GHAZAVI, 2019).

Os benefícios obtidos com a adição de fibras e resíduos provenientes da reciclagem de garrafas PET como reforço de solos argilosos foram analisados por alguns autores. A literatura tem revelado que a utilização de fibras PET e de resíduos oriundos da reciclagem de garrafas de politereftalato de etileno funcionam como uma melhoria no tamanho do grão nesse tipo de solo, preenchendo os vazios e influenciando os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Em outras palavras, esses resíduos promovem melhorias nos parâmetros de resistência, o ângulo de atrito interno e a coesão, além de ocasionar redução na compressibilidade do solo (SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY, 2011; MARTÍNEZ *et al.*, 2016; ZUKRI; NAZIR; MENDER, 2017; LOUZADA; MALKO; CASAGRANDE, 2019).

Um estudo realizado com um solo siltoso com adição de fibras de PET como reforço mostrou que esse tipo de fibra ocasiona incremento na resistência ao cisalhamento da matriz de solo, gerando um aumento significativo na coesão e reduzindo a formação de fissuras (BOTERO *et al.*, 2015).

Portanto, visto que ainda é pouca a quantidade de pesquisas realizadas e de publicações científicas disponíveis a partir da utilização do PET como reforço de solos, a avaliação do comportamento mecânico de misturas solo-PET proposta nesta pesquisa de mestrado poderá contribuir de forma significativa para a disseminação dos benefícios oferecidos por esse tipo de resíduo ao solo. Além disso, como benefício secundário, mas de igual importância, é o fato de que o uso desse tipo de reforço pode impactar de maneira muito expressiva a sustentabilidade

ambiental, na medida em que está se buscando uma destinação adequada ao resíduo, evitando-se o seu descarte final de maneira incorreta, muitas vezes com deposições clandestinas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Avaliar a influência da inclusão de PET, nas formas micronizado e filete, no comportamento mecânico de um solo de matriz argilosa.

1.3.2 Específicos

- Verificar os efeitos da inclusão de PET (micronizado e filete) nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo reforçado quando comparado com a matriz não reforçada;
- Analisar os efeitos do teor para os dois tipos de PET e do comprimento para o PET filete na melhoria da resistência ao cisalhamento das misturas em comparação com o solo puro;
- Identificar o percentual mais adequado dos dois tipos de PET, bem como o comprimento ideal do PET filete, para o solo argiloso analisado;
- Avaliar os efeitos da adição de PET (micronizado e filete) na condutividade hidráulica das misturas em comparação com o solo puro.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente pesquisa de mestrado encontra-se dividida em cinco capítulos. No primeiro, são apresentadas as considerações iniciais, a relevância e justificativa da pesquisa e o objetivo do trabalho. No segundo, é apresentado um breve referencial teórico dos principais tópicos necessários para o entendimento da temática abordada nesta pesquisa. No terceiro, é apresentado o programa experimental idealizado para avaliar a influência da inclusão de PET, em duas formas distintas, no comportamento mecânico de um solo de matriz argilosa. No quarto, são apresentados os resultados obtidos com o programa experimental desenvolvido. Já no quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir do programa experimental, como também são feitas sugestões para futuras pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo inicia-se com uma breve revisão sobre a temática de solos reforçados, solos reforçados com fibras e do mecanismo de interação entre a matriz e as fibras, em seguida é apresentada uma revisão sobre o politereftalato de etileno e suas características, e por fim são mencionados estudos realizados com a utilização desse polímero como reforço de solos.

2.1 SOLOS REFORÇADOS

Na geotecnia são encontrados problemas na execução de obras quando as propriedades do solo natural encontrado no local não atendem às especificações de um projeto específico, por exemplo, quando existe a presença de solos com baixa capacidade de suporte, sendo necessário nesse caso, a utilização de técnicas de estabilização ou de reforço para melhoria das suas propriedades mecânicas antes do seu emprego na execução da obra.

A técnica de reforço de solo consiste na introdução de elementos de reforço na massa do solo, formando um material compósito, com o objetivo de obter melhoria nos parâmetros da matriz, isto é, nas suas propriedades mecânicas, e conseqüentemente, obter um material que apresente um comportamento melhor que não seria obtido com cada constituinte separadamente.

Sendo assim, entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos, podendo contribuir no aumento da resistência do solo tratado, na diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões na massa de solo (CASAGRANDE, 2005).

Segundo Gray e Ohashi (1983) o reforço de solos é uma técnica eficaz e confiável para aumentar a resistência e a estabilidade dos solos, sendo utilizada em várias aplicações, desde estruturas de contenção e aterros, até estabilização de subleito de pavimentos. Os elementos utilizados como reforço variam quanto à forma, ou seja, são utilizados em formas de tiras, chapas, grelhas, barras, fibras; quanto à textura (lisa ou rugosa) e também quanto à rigidez (elementos de elevada rigidez, a exemplo do aço, ou que apresentam baixa rigidez, a exemplo dos materiais poliméricos).

McGown *et al.* (1978) classificaram o reforço de solos em duas principais categorias, sendo elas: as inclusões idealmente inextensíveis e as inclusões idealmente extensíveis. As idealmente inextensíveis incluem tiras e barras metálicas de alto módulo que proporcionam aumento na resistência ao cisalhamento do solo, inibem as deformações e fazem com que o colapso do solo esteja condicionado ao rompimento do reforço. Enquanto que as inclusões idealmente extensíveis incluem fibras naturais e sintéticas de módulo relativamente baixo, raízes de plantas e materiais poliméricos, que por sua vez, fortalecem o solo e caracterizam-se por fornecer maior capacidade de extensão (ductilidade), menor perda de resistência ao cisalhamento pós-pico e maior resistência mecânica em comparação com o solo não reforçado.

O conceito de reforço de solo foi desenvolvido na década de 60 pelo arquiteto-engenheiro francês Henry Vidal, que patenteou uma de suas descobertas, a “Terra Armada”, onde provou que era possível aumentar a resistência ao cisalhamento de um solo através da inclusão de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que constituíam a face do maciço (ABRAMENTO *et al.*, 1998).

A princípio a técnica de reforço de solos baseava-se normalmente no uso de tiras de aço galvanizado longas e flexíveis com superfície lisa ou nervurada, mas com o passar do tempo e o desenvolvimento da técnica, outros tipos de reforço foram atraindo cada vez mais atenção e encontram um uso mais amplo na prática, a exemplo dos geossintéticos, que apresentam suas aplicações não apenas em drenagem e filtração, mas também como reforço de solo (GRAY; OHASHI, 1983).

O reforço de solo pode ser realizado utilizando inclusões contínuas previamente orientadas (a exemplo dos geotêxteis, geogrelhas, geocélulas, entre outros) ou usando inclusões discretas orientadas aleatoriamente. O primeiro método inclui a introdução de várias camadas de inclusão contínua de materiais geossintéticos, que por sua vez, aumentam a resistência à tração e ao cisalhamento do solo, mas em contrapartida, esse tipo de inclusão acaba sendo suscetível a gerar planos de fraqueza entre as camadas compactadas. Já no segundo método, os solos são reforçados com fibras distribuídas aleatoriamente na massa do solo, por meio de um processo de mistura adequado, o que faz com que ocorra uma melhor distribuição das tensões, não gerando planos de fraqueza e produzindo um incremento isotrópico de resistência na matriz (BOTERO *et al.*, 2015).

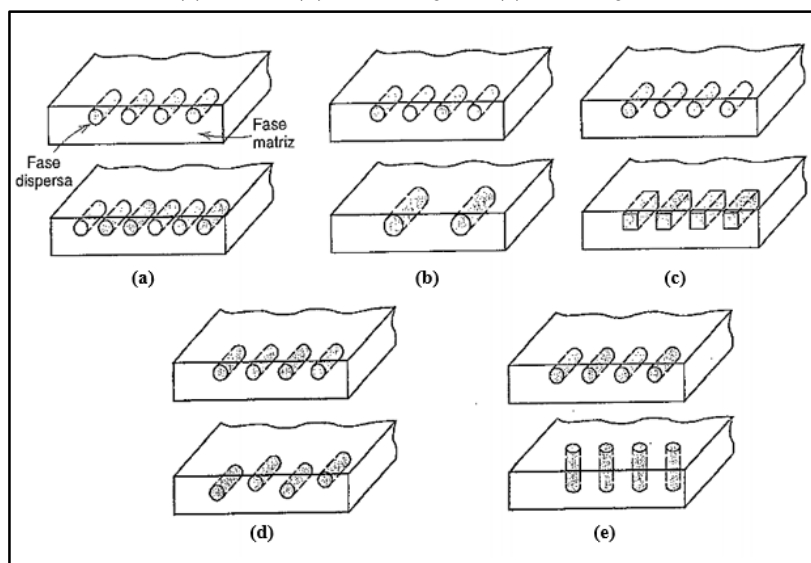
2.1.1 Materiais Compósitos

Visto que a técnica de reforço de solos consiste na introdução de elementos de reforço na massa de solo com o intuito de obter um material que apresente um desempenho melhor quando comparado com cada constituinte separadamente, dessa forma, o solo reforçado compreende um material compósito.

Um compósito consiste em um material multifásico feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou se forma naturalmente, onde as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta. Além disso, é um material que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constitui, e são criados para melhorar combinações de características mecânicas, tais como: rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambientais e a altas temperaturas (CALLISTER, 2002).

Segundo Callister (2002), muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases: uma é chamada de matriz, e consiste em uma fase contínua e que envolve a outra fase, chamada frequentemente de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa, ou seja, dos reforços. A geometria da fase dispersa, por sua vez, compreende a concentração inserida, o tamanho, a forma das partículas, a distribuição e sua orientação na matriz, conforme encontra-se apresentado na Figura 1.

Figura 1: Representações esquemáticas das diversas características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.



Fonte: CALLISTER (2002)

De acordo com Callister (2002), os materiais compósitos classificam-se em: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais. A fase dispersa para os compósitos reforçados com partículas tem eixos iguais, ou seja, as dimensões das partículas de reforço são aproximadamente as mesmas em todas as direções. Já para os compósitos reforçados com fibras, a fase dispersa tem a geometria de uma fibra, isto é, apresenta uma grande razão entre o comprimento e o diâmetro. Enquanto que os compósitos estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos, a exemplo dos compósitos laminares e dos painéis em sanduíche.

A orientação do reforço no compósito afeta a isotropia do sistema. Sendo assim, quando o reforço está na forma de partículas, com todas as dimensões aproximadamente iguais, o compósito se comporta como um material isotrópico, cujas propriedades são independentes da direção, já no caso em que o reforço compreende fibras curtas, mesmo estas não apresentando dimensões iguais, quando distribuídas aleatoriamente na matriz, pode-se considerar que o compósito apresenta um comportamento quase isotrópico (MARINUCCI, 2011).

Portanto, as características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades das fibras, mas também da magnitude da ligação interfacial entre as fases matriz-fibra, e para que exista um efetivo aumento da resistência e um enrijecimento do material compósito é necessário um certo comprimento crítico de fibra (CALLISTER, 2002).

2.2 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

O uso de fibras para reforçar solos é uma técnica bastante antiga. Na antiguidade, os incas já a utilizavam na construção de estradas para templos religiosos empregando pelos de vicunha misturados ao solo local. Há também indícios que hastes de bambu e junco foram empregadas no reforço de tijolos de barro e solos granulares para auxiliar na construção de diversas obras de terra. A pirâmide de Zigurate na mesopotâmia (1400 A.C) foi construída empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes (PALMEIRA, 1992; 2018).

Embora o emprego de fibras para reforço de solos tenha sido uma técnica utilizada desde a antiguidade, Botero *et al.* (2015) afirmam que somente nos últimos 50 anos verifica-se a realização de estudos sobre o comportamento de solos reforçados com diferentes tipos de fibras para avaliar o efeito destas principalmente em solos com baixa resistência ao cisalhamento. Entre os primeiros artigos publicados sobre o assunto está o trabalho de Woodhouse e Hanes (1967), citado por Gray e Ohashi (1983), no qual foi avaliado o efeito de raízes de plantas na

resistência ao cisalhamento do solo, bem como os estudos de Andersland e Khattak (1979), citado por Botero *et al.* (2015), cujos autores analisaram o efeito de fibras vegetais na resistência ao cisalhamento de um solo saturado com presença de caulinita.

Portanto, o fibroso, conforme denominado por Palmeira (1995), consiste na mistura de solo e fibras sintéticas, e a princípio teve sua utilização em pavimentação. Essa técnica encontra-se bastante difundida, onde verifica-se o seu emprego para aterros (BOTERO *et al.*, 2015), estabilização de taludes (SALIMI; GHAZAVI, 2019), fundações superficiais (SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY, 2011; MARTÍNEZ *et al.*, 2016), entre outros.

2.2.1 Tipos de Fibras Empregadas como Reforço

A literatura revela que vários tipos de fibras podem ser empregadas como reforço de solos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez, irão afetar o comportamento do material compósito, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação (CASAGRANDE, 2005).

Sendo assim, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma dessas duas fases para o comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregada, sendo que esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz de solo a ser reforçada e das características almejadas do material compósito resultante (FEUERHARMEL, 2000).

Além disso, Casagrande (2005) afirma que algumas características relevantes devem ser consideradas na escolha da fibra para reforço de materiais, ou seja, a fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável, não deve sofrer ataque de fungos, bactérias ou álcalis, não deve ser prejudicial à saúde humana e deve apresentar características físicas e mecânicas adequadas.

As fibras empregadas como reforço de solos podem ser classificadas em quatro grandes classes: naturais, minerais, metálicas e poliméricas.

2.2.1.1 Fibras naturais

As fibras naturais foram as primeiras fibras empregadas como reforço, e grande parte delas são de origem vegetal. Esse tipo de fibra é classificada de acordo com a planta de origem de onde são extraídas, sendo agrupadas em quatro grupos: fibras de caule (linho, juta, cânhamo,

kenaf, bagaço de cana); fibras de folha (sisal, rami, curauá, bananeira, abacaxi); fibras de semente (algodão, kapok) e fibras de fruto (coco, açaí) (FEUERHARMEL, 2000). De acordo com Hannant (2001) as fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho, cana de açúcar, entre outras.

Algumas dessas fibras caracterizam-se por atingir grandes resistências, a exemplo das fibras de bambu, que apresentam normalmente resistência à tração superior a 100 MPa e módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa (HANNANT, 2001).

Portanto, o principal problema a ser investigado no uso de fibras vegetais está na durabilidade dos compósitos formados, pois estas podem sofrer degradação pela ação de fungos e microorganismos (CASAGRANDE, 2005).

2.2.1.2 Fibras minerais

Segundo Taylor (1994) citado por Feuerharmel (2000), dentre as fibras minerais destacam-se as fibras de carbono, amianto e vidro. As fibras de carbono são baseadas na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza destes, apresentam alta resistência à tração, aproximadamente 2400 GPa, e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa, portanto, essas características tornam-se imprescindíveis para uma grande aderência entre a matriz e as fibras para que tal resistência seja mobilizada. As fibras de amianto, por sua vez, apresentam resistência à tração em torno de 1,0 GPa, módulo de elasticidade em torno de 160 GPa e caracterizam-se por apresentar uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento, porém seu uso por ser prejudicial à saúde, encontra-se proibido na construção civil. Já as fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos, sendo que os diâmetros destes filamentos são geralmente da ordem de 10 μm . Estas fibras são comumente produzidas a partir do vidro tipo E que é suscetível ao ataque dos álcalis.

2.2.1.3 Fibras metálicas

As fibras metálicas mais comuns são as de aço. Estas fibras conduziram a um número considerável de pesquisas como método de melhoria das propriedades mecânicas de materiais de construção. As fibras de aço utilizadas na construção civil apresentam fator de forma, ou seja, relação comprimento/diâmetro na faixa de 30 a 50, isto é, comprimento variando de 0,1 a 7,62 cm e diâmetro variando entre 0,13 e 0,9 mm. Caracterizam-se por apresentar resistência à

tração da ordem de 1100 MPa e módulo de elasticidade em torno de 200 GPa. Esse tipo de fibra possui uma grande variedade de formatos que contribuem para aumentar a resistência ao arrancamento. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arrancamento da fibra, mas não à sua ruptura, e dependendo do meio em que estão inseridas podem apresentar problemas de corrosão (CASAGRANDE, 2005).

2.2.1.4 Fibras poliméricas

As fibras poliméricas caracterizam-se por apresentar grande potencial de utilização como reforço de solos, e este fato está associado a diversidade de fibras existentes, ao grande desenvolvimento das indústrias químicas que proporcionou maior facilidade em sua obtenção em larga escala e por se tratar de materiais resistentes a agentes externos, ou seja, são materiais que apresentam propriedades compatíveis com a vida útil esperada das obras geotécnicas.

De acordo com Feuerharmel (2000), vários formatos de fibras poliméricas são empregados como reforço de solos, como exemplo tem-se as fibriladas, que são fibras que apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente e que são projetadas de tal forma que durante o processo de mistura com o solo estas se abrem.

Dentre as fibras poliméricas utilizadas como reforço, tem-se: as fibras de polipropileno, polietileno, poliamida e poliéster.

Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno caracterizam-se por possuir grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição, seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor módulo de elasticidade que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Estas fibras possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis e conferem aos materiais que são incorporadas um aumento substancial na resistência ao impacto (CASAGRANDE, 2005).

Fibras de polietileno

As fibras de polietileno apresentam baixo módulo de elasticidade e caracterizam-se por não conferir boa aderência à matriz cimentada. Em contrapartida, são altamente resistentes aos álcalis e possuem alta durabilidade, mas acabam apresentando grandes deformações por fluência, que podem ocasionar consideráveis elongações e deflexões ao longo do tempo se utilizadas como reforço de um compósito fissurado e que esteja sujeito ao constante carregamento de altas tensões. Contudo, como solução para o baixo módulo de elasticidade e baixa aderência, o polietileno de alta densidade tem sido desenvolvido (HANNANT, 2001).

Fibras de poliamida

A poliamida é um material polimérico formado por longas cadeias de moléculas. Essa configuração molecular da poliamida determina a resistência das fibras constituídas desse material. Ou seja, quando as moléculas são espiraladas e dobradas devido ao fato das longas cadeias, as fibras geralmente possuem baixa resistência e rigidez, mas quando suas moléculas são estendidas e reforçadas durante o processo de manufatura, estas conferem elevados valores de resistência e de módulo de elasticidade, a exemplo do Kevlar, uma fibra de poliamida aromática (TAYLOR, 1994 *apud* FEUERHARMEL, 2000).

O Kevlar possui estrutura anisotrópica, o que faz com que ele apresente maiores resistência e rigidez na direção longitudinal e apresente boa tenacidade. Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência à tração gira em torno de 2,65 GPa, enquanto que o seu módulo de elasticidade intermediário é de aproximadamente 64 GPa, e o Kevlar 49, mais resistente e rígido do que o anterior, o qual é utilizado em materiais compósitos de alto desempenho (HOLLAWAY, 2001).

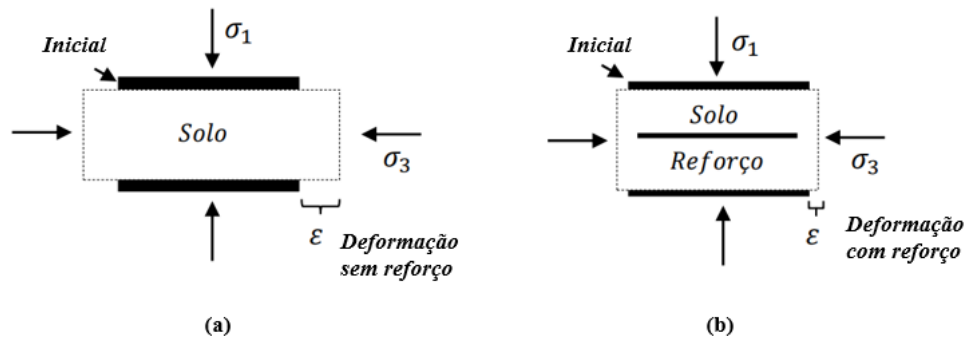
Fibras de poliéster

As fibras de poliéster caracterizam-se por apresentar alta rigidez e resistência. Essas fibras possuem aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações. O poliéster mais conhecido atualmente é o politereftalato de etileno, ou simplesmente PET (CASAGRANDE, 2005), um dos materiais objetos desta pesquisa.

2.3 MECANISMO DE INTERAÇÃO ENTRE A MATRIZ E AS FIBRAS

Os solos, em geral, caracterizam-se por apresentar baixa resistência à esforços de tração quando comparado com a sua resistência à esforços de compressão. Quando uma massa de solo é submetida à um carregamento vertical, esta sofre deformações verticais de compressão, bem como, deformações laterais de extensão (tração), conforme pode ser observado na Figura 2(a). Todavia, quando uma massa de solo se encontra reforçada, os movimentos laterais são limitados pela reduzida deformabilidade do reforço, conforme pode ser observado na Figura 2(b). Esta restrição de deformações ocorre devido ao desenvolvimento de esforços de tração no elemento de reforço, o que faz com que o solo se mova em relação ao reforço ocasionando tensões cisalhantes na interface solo/reforço (ABRAMENTO *et al.*, 1998).

Figura 2: Princípio básico do funcionamento do solo reforçado. (a) Elemento de solo sem reforço (b) Elemento de solo com reforço.



Fonte: Adaptado de ABRAMENTO *et al.* (1998)

De acordo com Abramento *et al.* (1998), as tensões cisalhantes desenvolvidas na interface solo/reforço são absorvidas pelo reforço, que por sua vez, é tracionado, causando uma redistribuição das tensões na massa de solo. Essa redistribuição de tensões gera uma parcela de confinamento interno adicional ao confinamento externo atuante. Sendo assim, a introdução de elementos de reforço ao solo apresenta uma influência similar a um aumento de confinamento, e o aumento da tensão lateral faz com que uma tensão axial mais elevada seja necessária para ocasionar a ruptura do solo por cisalhamento.

Portanto, para o caso de solos reforçados com fibras, o funcionamento das fibras como elementos de reforço é então comandado pelas características de deformabilidade do solo e pela forma de distribuição dessas deformações, que obviamente dependem do tipo de solicitação ao qual o solo está sendo submetido, sendo que as fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo, quando esta sofre deformações devido a solicitação de esforços externos (FEUERHARMEL, 2000).

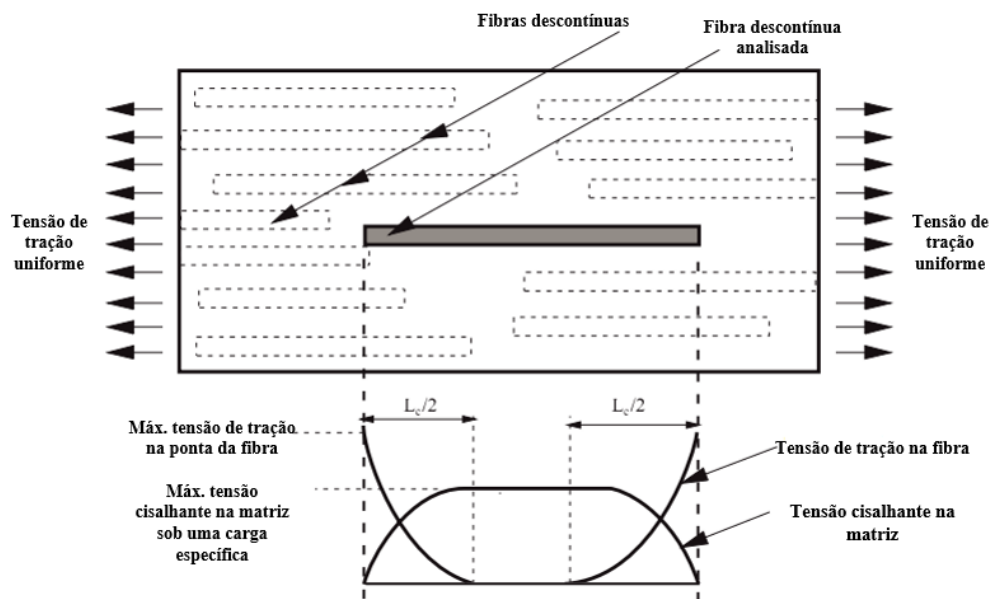
Hannant (2001) observou em compósitos cimentados reforçados com fibras que as fibras concentram os seus efeitos em agregar à matriz uma maior capacidade de absorção de energia e maior resistência do material no estado pós-fissuração. Segundo o autor, isso ocorre devido ao fato de que a deformação necessária para que se desenvolva fissuras na matriz é muito inferior à elongação que ocorre nas fibras, nas quais não se espera aumento da tensão de fissuração. A adição de fibras ao solo não evita a formação de fissuras, mas tende a controlar a sua propagação, gerando assim, um aumento da resistência à tração do compósito (TAYLOR, 1994 *apud* CASAGRANDE, 2005). Contudo, Hannant (2001) afirma que a propagação de fissuras é minimizada, até porque as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, o que

ocasiona melhorias nas propriedades mecânicas do compósito no estado pós-fissuração e o torna mais dúctil.

Segundo Hollaway (2001) o comprimento das fibras é fator determinante para definir o comportamento do compósito, visto que a eficiência da fibra em conferir rigidez e reforçar a matriz diminui à medida que o comprimento da fibra diminui. Logo, existe um comprimento crítico (L_c) no qual a resistência máxima da fibra é atingida, e além deste, não é mais possível mobilizar toda a resistência mecânica da fibra.

Contudo, quando um compósito contendo fibras descontínuas alinhadas uniaxialmente é submetido a um carregamento uniforme de tração paralelo à direção da fibra, existe uma determinada parte no final de cada comprimento finito da fibra e em torno da matriz onde os campos de tensão e deformação são modificados pela descontinuidade. Sendo assim, o comprimento de transferência crítico sobre o qual a tensão na fibra e na matriz é reduzida do seu valor máximo para zero é referido como metade do comprimento crítico da fibra ($L_c/2$). Portanto, para tal comprimento o carregamento é suportado pela matriz. A tensão máxima na fibra é atingida para o comprimento crítico (L_c) (HOLLAWAY, 2001). Conforme descrito, a distribuição de tensões que ocorre em um compósito com fibras descontínuas submetido a uma tensão axial é apresentada na Figura 3.

Figura 3: Representação esquemática de matriz com fibras descontínuas submetidas à carregamento axial.



Fonte: Adaptado de HOLLAWAY (2001)

O mecanismo de interação solo-fibras depende de vários fatores relacionados com a matriz e com o elemento de reforço. Quanto à matriz, esses fatores estão relacionados com a distribuição granulométrica do solo, seu índice de vazios e o grau de cimentação. Já quanto às fibras, destacam-se: o comprimento, a espessura, a rugosidade, o módulo de elasticidade e a capacidade de alongamento (CASAGRANDE, 2005).

2.4 POLITEREFTALATO DE ETILENO

O politereftalato de etileno é um polímero termoplástico da família dos poliésteres. Por ser termoplástico, esse polímero apresenta a vantagem de ao ser aquecido poder ser remoldado várias vezes sem ocorrer alterações na sua estrutura molecular, bem como nas suas propriedades.

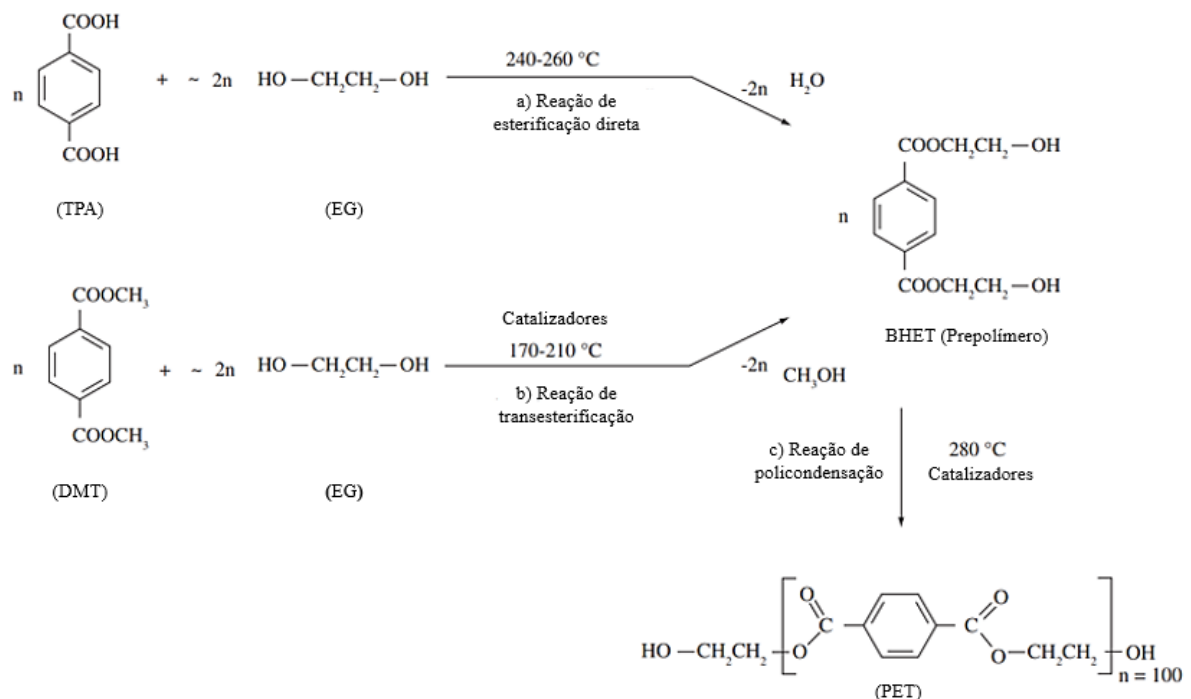
Segundo a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2012), a primeira amostra de politereftalato de etileno foi desenvolvida em 1941 por dois químicos britânicos, John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, após a segunda guerra mundial, para aplicações têxteis. Logo após, em 1962, o PET ganhou mais uma aplicação e passou a ser utilizado na indústria de pneus, enquanto que as primeiras embalagens confeccionadas com PET surgiram nos Estados Unidos e logo em seguida na Europa, apenas no início dos anos 70. O PET chegou ao Brasil em 1988 e seguiu uma trajetória semelhante ao resto do mundo, e embora seja muito conhecido através do seu uso em garrafas plásticas, esse material também iniciou sua trajetória na indústria têxtil, e apenas a partir de 1993 passou a ter uma forte expressão no mercado de embalagens.

O PET é produzido industrialmente por um processo que pode ser compreendido por duas ou três etapas, dependendo de sua aplicação, sendo elas: (I) pré-polimerização, (II) policondensação e (III) polimerização no estado sólido. Para alguns produtos como as fibras têxteis (PET grau têxtil), que não requerem elevados esforços mecânicos e propriedades reológicas intermediárias, apenas as duas primeiras etapas são suficientes, já para a síntese do PET grau garrafa é necessária também a realização da etapa de polimerização no estado sólido (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009).

Sendo assim, na etapa de pré-polimerização ocorre a formação do oligômero tereftalato de bis (2-hidroxietileno) (BHET), um polímero amorfo, que por sua vez, pode ser obtido por esterificação direta através da reação do ácido tereftálico purificado (TPA) com o etilenoglicol (EG), ou por transesterificação, processo pelo qual ocorre a substituição do TPA pelo éster tereftalato de dimetileno (DMT). Na etapa de policondensação, a resina PET amorfa recém

obtida é cristalizada e polimerizada de forma contínua para que o polímero obtenha massa molar em torno de 33.000 g/mol. Já na terceira e última etapa é realizada a polimerização a uma temperatura entre a de transição vítrea e a de fusão com o intuito de gerar aumento da massa molar e do grau de cristalinidade do material (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009). Os dois métodos descritos de síntese do PET, compreendidos até a etapa de policondensação, encontram-se apresentados na Figura 4.

Figura 4: Métodos de síntese do PET.



Fonte: Adaptado de ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI (2009)

A indústria de fabricação de garrafas geralmente usa três tipos de PET. O primeiro é o homopolímero PET que é polimerizado na proporção de 1:1 de ácido tereftálico (TPA) ou tereftalato de dimetila (DMT) e o etilenoglicol (EG). O segundo tipo utilizado é o conhecido como copolímero PET que caracteriza-se por ser polimerizado com excesso de TPA (não mais que 3% mol) ou 1,4-ciclo hexanodimetanol (até 5% mol) e apresenta-se como o material mais adequado para a moldagem por sopro em alta velocidade. Já o terceiro tipo é o tereftalato de polietileno glicol (PETG) que é um copoliéster obtido da polimerização do DMT com 15-34% mol de 1,4-ciclo hexanodimetanol (MANCINI; ZANIN, 1999).

O politereftalato de etileno é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo e alcançou no final da década de 90 uma produção mundial em torno de $2,4 \times 10^{10}$ kg, tendo suas

aplicações em fibras têxteis (67%), embalagens processadas por injeção-sopro (24%), filmes biorientados (5%) e polímeros de engenharia (4%) (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009).

Devido às suas propriedades mecânicas, térmicas e custo de produção, a utilização do PET veio se tornando cada vez maior. De acordo com Romão; Spinacé; de Paoli (2009), no Brasil a sua principal aplicação é na indústria de embalagem (71%), sendo que o segmento do mercado nacional da indústria alimentícia e de embalagens corresponde a 32% do mercado brasileiro de polímeros, envolvendo diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas.

2.4.1 Propriedades do PET

Dentre as principais propriedades do PET destacam-se: a baixa densidade, a transparência, o brilho, a boa performance em diferentes designs, a segurança e a facilidade de moldagem. Além disso, é um material que proporciona uma excelente barreira para gases e odores, e caracteriza-se por apresentar alta resistência mecânica, química e térmica (MANO; MENDES, 2004; SILVA, 2016).

Algumas propriedades do PET estão associadas à sua estrutura molecular. A presença de ligações de hidrogênio assegura ao polímero boa resistência mecânica e consequentemente elevado peso molecular, já a presença de anel aromático na cadeia determina a temperatura de fusão e transição vítrea deste material (MANO; MENDES, 2004). Os valores característicos de tais propriedades encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do PET.

Propriedades do Polímero	Valores
Peso Molecular	40.000 u
Densidade	1,33 – 1,45 g/cm ³
Temperatura de Fusão	250 – 270 °C
Temperatura de Transição Vítrea	70 – 74 °C

Fonte: Adaptado de MANO; MENDES (2004)

De acordo com Silva (2015) o elevado peso molecular do polímero é essencial, pois este confere ao material boas propriedades mecânicas, tais como: rigidez, dureza e resistência à fluência, além de proporcionar flexibilidade suficiente para resistir à ruptura sob pressão.

As propriedades mecânicas do PET destacam-se quando comparadas com as de outros polímeros comumente utilizados na engenharia, a exemplo do polipropileno (PP) e do

policloreto de vinila (PVC), conforme pode ser observado na Tabela 2. Além disso, esse polímero caracteriza-se por apresentar elevada resistência a determinados agentes ambientais que comprometem a durabilidade dos materiais. Dentre esses agentes, tem-se a resistência a sais, temperaturas superiores a 100 °C, microorganismos, entre outros. No entanto, existem agentes em que o PET apresenta baixa resistência, a exemplo dos ácidos e vapor (SHUKLA, 2017). Na Tabela 3 encontram-se listados os graus de resistência desse polímero a determinados agentes agressivos.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do PET em contraposição com as do PP e as do PVC.

Polímeros	Resistência à Tração a 20°C (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na Ruptura (%)
PET	800 - 1200	12 - 18	8 - 15
PP	400 - 600	1,3 – 1,8	10 – 40
PVC	20 - 50	2,7 – 3,0	50 - 150

Fonte: Adaptado de SHUKLA (2017)

Tabela 3: Resistência do PET a determinados agentes agressivos.

Fatores de Influência	Resistência do Polímero
Luz ultravioleta não estabilizada	Alta
Luz ultravioleta estabilizada	Alta
Ácidos	Baixa
Sais	Alta
Detergentes	Alta
Calor (clima seco e temperaturas maiores que 100°C)	Alta
Vapor (temperaturas maiores que 100°C)	Baixa
Hidrólise (reação com a água)	Alta
Microorganismos	Alta
Deformação	Alta

Fonte: Adaptado de SHUKLA (2017)

Portanto, as características físicas e mecânicas dos produtos PET dependem de uma combinação de variáveis que inclui as características do material, sua composição, cristalinidade, orientação molecular decorrente do processo e das tensões internas geradas durante a fabricação. Sendo assim, tratando-se de um polímero cristalizável, o PET apresenta

uma grande dependência de suas propriedades com as condições de processamento (SILVA, 2015).

2.4.2 PET e o Impacto Ambiental

Com o crescimento populacional, a demanda e o consumo por produtos industrializados vêm aumentando a cada ano, a exemplo da produção e consumo desenfreado de produtos dispostos em garrafas PET. Com isso, a geração de embalagens não degradáveis cresce a cada dia, sendo que quando estas não são adequadamente aproveitadas ou descartadas, podem ocasionar sérios danos à natureza, contribuindo negativamente para a sustentabilidade do meio ambiente. Tais danos são gerados simplesmente pelo fato de que a cada ano milhares de toneladas de garrafas PET são produzidas e descartadas, e além delas apresentarem um longo tempo de decomposição (no mínimo 100 anos), essas embalagens muitas vezes acabam não tendo um descarte final de maneira correta (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009).

Senez e Casagrande (2016) afirmam que mesmo com os diversos benefícios que as embalagens PET trouxeram tanto para o consumidor quanto para o produtor, o consumo exacerbado dessas embalagens trouxe junto, grandes problemas ambientais, e estes estão relacionados à inadequada disposição final dos resíduos de PET.

Ao contrário dos polímeros que são utilizados para fabricação de produtos com longa vida útil nas indústrias de bens de consumo e construção civil, a exemplo do polipropileno (PP) e do policloreto de vinila (PVC), o PET por ser utilizado como matéria prima de produtos com vida útil curta, como as embalagens, e por apresentar um tempo de degradação bastante longo, é considerado como um grande vilão ambiental.

Segundo Romão; Spinacé; de Paoli (2009), os principais polímeros produzidos no Brasil são: o polietileno de alta, baixa densidade e baixa densidade linear (PEAD, PEBD e PELBD, respectivamente); o polipropileno (PP); o policloreto de vinila (PVC); o poliestireno (PS) e o politereftalato de etileno (PET), e estes por sua vez, tem aumentado sua participação na composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), onde em 2005 a produção de PET correspondeu a 9% da produção total de polímeros no Brasil, contribuindo dessa forma com 20% na produção do RSU.

Di Souza; Torres; Ruvolo Filho (2008) afirmam que o processo de reciclagem, não só primária, que utilizam produtos fora da especificação na indústria, mas também a secundária, terciária ou quaternária, que tem como foco a reciclagem dos produtos descartados após o

consumo, ainda vem sendo uma alternativa para amenizar o impacto ambiental causado por esse polímero.

2.4.3 Reciclagem do PET

No Brasil, o PET pós consumo é considerado resíduo sólido, sendo sua disposição final e reciclagem regidas pela Lei nº 12305/2010 a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e define este tipo de resíduo como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

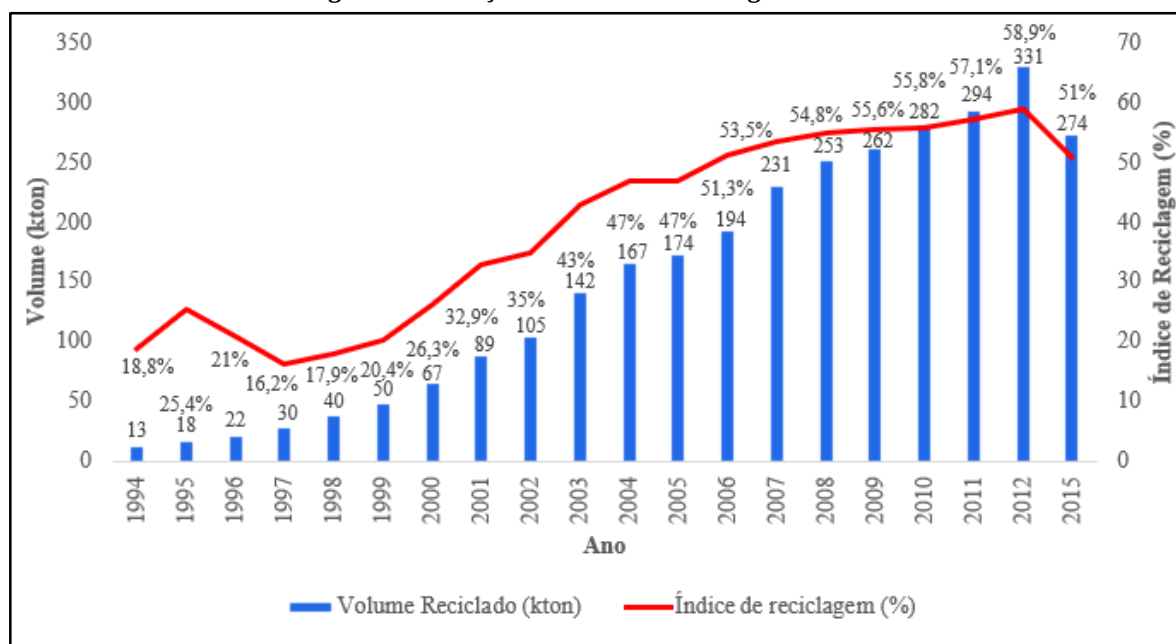
De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos de PET classificam-se como não perigosos e inertes, sendo definidos como:

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004).

No Brasil, dentre os tipos de reciclagem existente, a mecânica é a mais utilizada devido a vários fatores, tais como: custo de mão de obra, baixo investimento para instalação de uma planta de reciclagem e principalmente pelo fato do país apresentar grande volume de polímero pós consumo, ao contrário dos países da Europa e do Japão que utilizam as reciclagens química e energética, majoritariamente (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

O índice de reciclagem do PET no Brasil apresenta-se em evolução, conforme pode ser observado na Figura 5, porém ainda se caracteriza por ser um quantitativo que precisa ser melhorado. De acordo com o décimo censo da reciclagem do PET no Brasil, fornecido pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2016), o volume de PET consumido no ano de 2015 foi aproximadamente 537.000 toneladas, sendo que apenas 274.000 toneladas foram recicladas. No entanto, mesmo notando que 51% do PET consumido foi reciclado, é possível perceber que muito do consumo desse polímero ainda se encontra sem fins de reciclagem e acabam sendo descartados em aterros sanitários e até mesmo lixões.

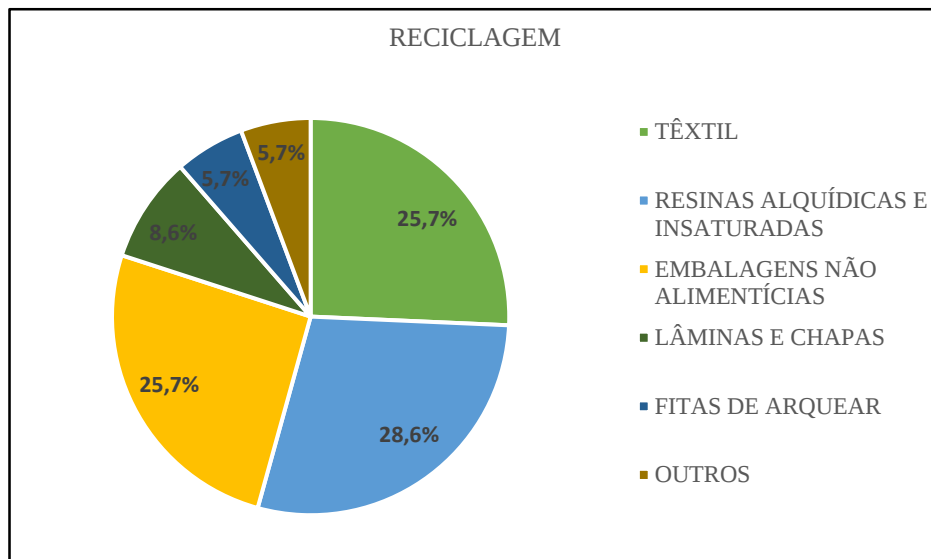
Figura 5: Evolução do índice de reciclagem do PET.



Fonte: Adaptado de ABIPET (2013; 2016)

A partir do processo de reciclagem, obtém-se o PET em diferentes formas, sendo as mais comuns: os flocos, os fardos e o granulado. Os flocos, são a forma mais produzida, e representam 65% do volume do PET reciclado, e isso se deve ao fato de que essa é a forma preferencial para quem vai utilizar o material reciclado na produção de um novo artigo. Em seguida, tem-se os fardos de garrafa, que representam 25% de todo material reciclado, os granulados, por sua vez, são produzidos em menor quantidade e chegam a 10% (ABIPET, 2016).

A reciclagem do PET contempla um amplo mercado consumidor, tendo 25,7% de sua aplicação na indústria têxtil, sendo usado na fabricação de fios de tecelagem, forrações, tapetes, carpetes, mantas de TNT, cordas, cerdas de vassouras e escovas (monofilamento). Um outro mercado é compreendido pela fabricação de resinas alquílicas, as quais utilizam 28,6% do PET reciclado para produção de tintas e também resinas insaturadas para produção de adesivos e resinas poliéster. Além disso, 25,7% é utilizado na fabricação de novas embalagens para produtos não alimentícios, 8,6% para produção de laminados, 5,7% é utilizado para produção de fitas de arquear, tubos, termoformados e 5,7% corresponde ao uso do material reciclado para outros fins, conforme pode ser observado na Figura 6. Portanto, mesmo com um mercado tão amplo de reciclagem, boa parte do PET consumido ainda não é reciclado (ABIPET, 2016; ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009).

Figura 6: Aplicação do PET reciclado.

Fonte: Adaptado de ABIPET (2016)

Entretanto, vale ressaltar que existe limitação para a utilização do PET reciclado para confecção de embalagens de alimentos, bebidas e fármacos, isso devido à possível contaminação dos produtos (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009).

Diante do cenário encontrado, é notório que o descarte final das garrafas PET ainda representam um problema, de certa forma, difícil de lidar, pois são produtos que necessitam de grandes espaços para serem armazenados e apresentam um longo tempo para se decompor. Com isso, percebe-se que é necessário a eliminação desses resíduos plásticos sem gerar impactos ao meio ambiente, ou seja, é preciso encontrar um uso alternativo para esse material.

Em contrapartida, nota-se que questões ambientais e econômicas têm motivado o interesse na busca por materiais alternativos que possam satisfazer as especificações de projetos geotécnicos, com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas dos solos. Com isso, o PET vem sendo utilizado como reforço de solo, atribuindo dessa forma mais um fim para a reciclagem desse material.

2.5 USO DE RESÍDUOS DE PET COMO REFORÇO DE SOLOS

A utilização de fibras e resíduos derivados da reciclagem do politereftalato de etileno tem sido uma boa alternativa como reforço de solos. Com isso, estudos vêm sendo realizados por diversos autores demonstrando a viabilidade do emprego do PET para aplicação como reforço em locais onde o solo não seja adequado para o fim ao qual se deseja, contribuindo dessa forma, para a tentativa de minimizar os problemas atuais de disposição desse tipo de

resíduo, além de ser uma técnica economicamente viável. Os resultados obtidos por alguns autores são descritos a seguir.

Sivakumar Babu e Chouksey (2011) avaliaram o efeito da adição de tiras de politereftalato de etileno nos parâmetros de resistência e compressibilidade de dois solos, um arenoso e outro argiloso. Para tal avaliação, foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada, ensaios de compressão triaxial do tipo adensado não drenado (CU) e ensaios de adensamento em corpos de prova contendo tiras de PET de 12 mm de comprimento e 4 mm de largura, conforme é apresentado na Figura 7, empregando percentuais de 0; 0,5; 0,75 e 1,0% em relação à massa de solo seco.

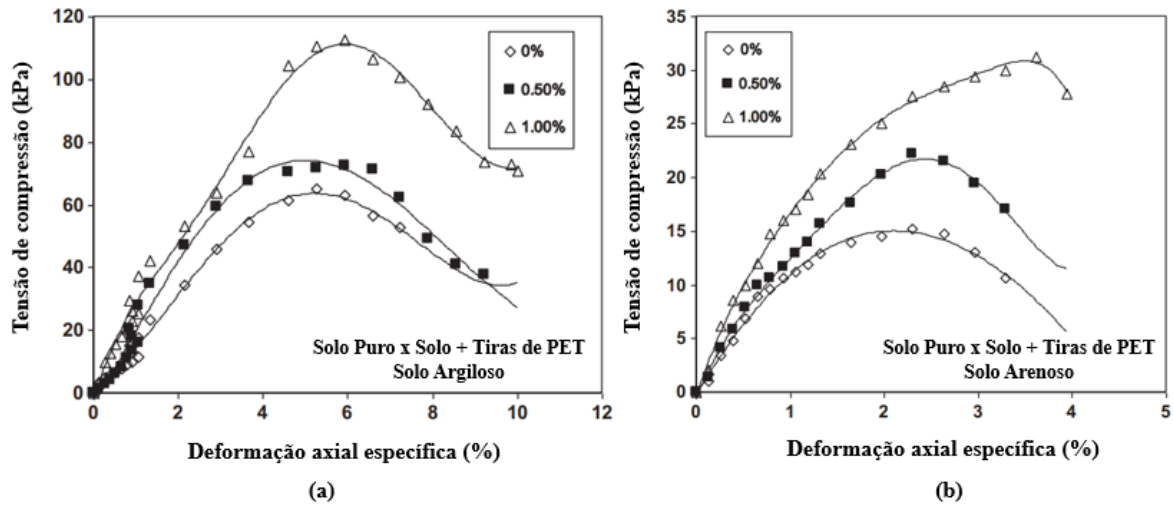
Figura 7: Tiras de PET utilizadas.



Fonte: SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY (2011)

Com base nos resultados obtidos com a realização dos ensaios de resistência à compressão não confinada, os autores mencionados anteriormente notaram que a adição de tiras de PET aumentou significativamente a resistência à compressão simples dos solos, e que quanto maior o teor de tiras na mistura, maior a resistência não confinada obtida. A tensão de ruptura do solo argiloso puro passou de 65 kPa para 113 kPa com a adição de 1% de resíduos plásticos ao solo, apresentando assim um aumento de 73,8%, conforme pode ser observado na Figura 8(a). A tensão de ruptura do solo arenoso puro passou de 16 kPa para 31 kPa, com adição do mesmo teor de PET, ocasionando um aumento de 93,7%, conforme pode ser observado na Figura 8(b) (SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY, 2011).

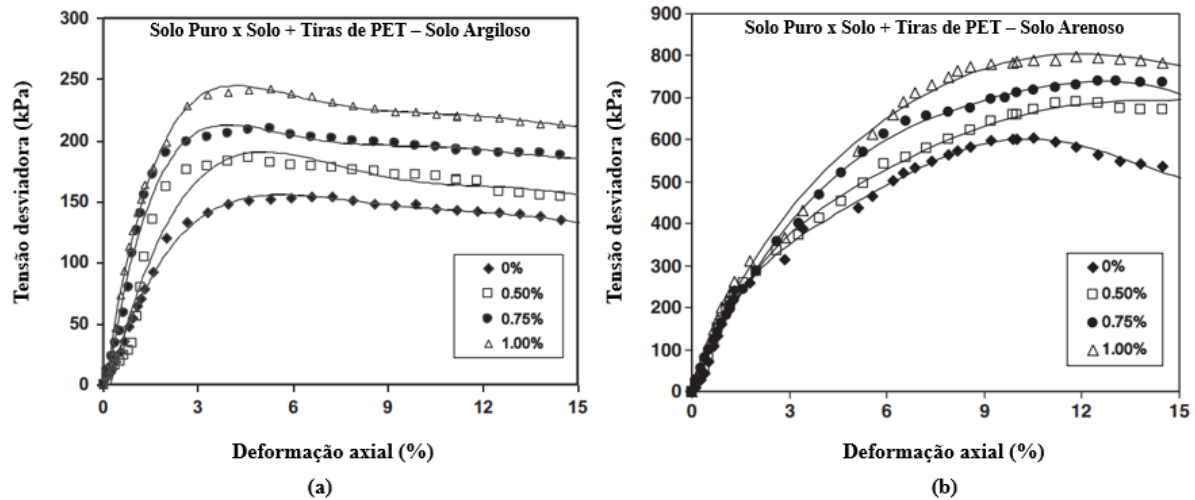
Figura 8: Resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada para diferentes teores de tiras de PET para (a) solo argiloso e (b) solo arenoso.



Fonte: Adaptado de SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY (2011)

Da realização dos ensaios de compressão triaxial do tipo adensado não drenado (CU) para as pressões de confinamento de 50, 100 e 150 kPa, os autores verificaram a partir dos comportamentos tensão-deformação obtidos, que a adição de tiras de PET aos solos gera aumento na resistência ao cisalhamento dos mesmos. Ou seja, ocasiona aumento nos valores do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo. Para a pressão de confinamento de 100 kPa, os referidos autores observaram que a tensão desviadora máxima aumenta à medida que é maior o teor de PET na mistura, sendo que para a adição de 1% de resíduos plásticos, a tensão desviadora máxima do solo argiloso puro aumenta de 155 kPa para 243 kPa, conforme pode ser observado na Figura 9(a). Enquanto que, para o mesmo teor, o solo arenoso puro aumenta de 572 kPa para 796 kPa, conforme pode ser observado na Figura 9(b). Além disso, os autores verificaram também o comportamento poropressão-deformação das misturas ensaiadas e notaram que quanto maior a adição de tiras de politereftalato de etileno aos solos, menor é a poropressão gerada durante o ensaio (SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY, 2011).

Figura 9: Resultados dos ensaios de compressão triaxial adensado não drenado (CU), para pressão de confinamento de 100 kPa, com diferentes teores de tiras de PET para (a) solo argiloso e (b) solo arenoso.



Fonte: Adaptado de SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY (2011)

Já a partir da realização dos ensaios de adensamento, os autores perceberam que a adição de tiras de PET confere aos solos uma redução significativa dos seus parâmetros de compressibilidade, visto que a adição de tiras de PET aos solos gera uma redução dos seus índices de vazios. Isto ocorre devido à densidade das tiras de politereftalato de etileno ser inferior à dos solos, sendo que quanto maior o teor de resíduos plásticos na mistura, menor a proporção de vazios existentes. Contudo, o índice de compressão da mistura de solo argiloso com 1,0% de tiras de PET foi reduzido em 37,2% em comparação com o solo puro, enquanto que o índice de compressão da mistura de solo arenoso com o mesmo teor de reforço foi reduzido em 26,6% quando comparado com o solo não reforçado (SIVAKUMAR BABU; CHOUKSEY, 2011).

Acharyya *et al.* (2013) realizaram ensaios de compactação, resistência à compressão não confinada e de compressão triaxial para avaliar os efeitos da adição de tiras de garrafas PET em três tipos de solo, um argiloso e dois corrigidos com 10 e 20% de areia, respectivamente. Foram testadas amostras de solo puro e reforçado com tiras distribuídas aleatoriamente nas concentrações de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0% em relação à massa de solo seco, sendo que estas apresentavam largura constante de 5 mm e comprimentos variados (5, 10 e 15 mm).

A partir dos resultados obtidos, os autores notaram que para os solos analisados, a adição de tiras de PET gera aumento do peso específico aparente seco máximo, do módulo de elasticidade, da coesão e do ângulo de atrito, ou seja, da resistência ao cisalhamento. Percebeu-se que os incrementos gerados aumentavam quanto maior era o conteúdo de reforço na mistura e esse comportamento persistia até a adição de 1,0%. Além disso, notou-se também que dos

comprimentos ensaiados, o de 10 mm caracteriza-se como o ideal para a melhoria das propriedades dos solos analisados (ACHARYYA *et al.*, 2013).

Botero *et al.* (2015) analisaram o comportamento mecânico de um solo siltoso reforçado com fibras de PET distribuídas aleatoriamente através da realização de ensaios de compressão triaxial do tipo não adensado não drenado (UU) sob diferentes pressões de confinamento. Para isso, foram utilizadas fibras de PET com 50 mm de comprimento e 15 mm de largura, nas concentrações de 0,0; 0,1; 0,3; 0,6 e 1,0% em relação à massa de solo seco. Com base nos resultados obtidos, os autores verificaram que a adição de fibras ao solo gera um incremento na resistência ao cisalhamento, e este é associado à concentração de fibras presentes nas misturas, de forma que os corpos de prova com teores de 0,6 e 1,0% foram os que apresentaram maiores resistências. Foi observado também que quanto maior o teor de fibras utilizado, maior é o intercepto coesivo obtido, além disso, notou-se que o uso de fibras proporcionou ao solo um comportamento dúctil, ou seja, possibilitou uma maior capacidade de deformação do solo sem propagação ou formação de fissuras.

Martínez *et al.* (2016) observaram o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com a adição de politereftalato de etileno triturado fino, proveniente do processo de micronização de garrafas PET. Para isso, foram realizados ensaios de compressão triaxial do tipo adensado drenado (CD) nas pressões de confinamento de 50, 150 e 300 kPa, com o intuito de avaliar os parâmetros de resistência tanto para as amostras de solo puro como para as misturas solo-PET. O solo argiloso foi misturado com concentrações de 10 e 20% de politereftalato de etileno triturado fino em relação à massa de solo seco.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, os autores identificaram que a adição de PET triturado fino influencia a resistência ao cisalhamento do solo, gerando assim, incrementos nos parâmetros de ângulo de atrito e coesão, sendo que os maiores incrementos são observados para o ângulo de atrito, pois segundo os autores, o PET funciona como um melhoramento do tamanho do grão. Além disso, foi notado que o aumento da resistência ao cisalhamento do solo é função da pressão de confinamento (baixas pressões de confinamento não conferem incrementos de resistência) e que existe uma concentração de PET ideal para a mistura, sendo que uma concentração acima do ideal acaba não gerando efeito de reforço ao solo, até porque altos teores de PET pode gerar muitos contatos dentro da mistura, mas estes apenas entre os grãos de PET, em vez de contatos entre o solo e o reforço. Contudo, os autores afirmam que a mistura contendo 10% de politereftalato de etileno triturado fino foi a que apresentou as maiores resistências ao cisalhamento (MARTÍNEZ *et al.*, 2016).

Senez e Casagrande (2016) realizaram ensaios de placa em modelo físico reduzido com a finalidade de analisar o comportamento carga-recalque de uma areia mal graduada reforçada com fibras poliméricas provenientes da indústria têxtil, confeccionadas com resíduos de politereftalato de etileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo. Foram utilizadas fibras PET com título de 1,4 dtex (correspondente ao diâmetro das fibras) e comprimento de 38 mm. Os ensaios foram realizados com amostras do solo puro e com misturas solo-fibras na concentração de 0,5% em relação à massa de solo seco. Através da análise dos resultados obtidos, os autores notaram que a adição de fibras PET à matriz arenosa colabora para um aumento na resistência do solo e ocasiona uma redução dos recalques em até 60% quando comparado com o solo puro. Durante esse estudo, os autores observaram que as fibras trabalham por tração, e por isso gera um efeito de intertravamento dos grãos impedindo a propagação de fissuras. Além disso, notaram também que as fibras de PET começam a agir, ou seja, começam a trabalhar como reforço no estado pós fissuração da matriz, isto é, quando a mesma não consegue mais resistir às cargas aplicadas.

Karmacharya e Acharya (2017) analisaram os efeitos da adição de tiras de PET adicionadas a três tipos de solos arenosos através da realização de ensaios de compressão triaxial. Para isso, foram ensaiadas amostras de solo puro e reforçado com tiras de dimensão (3 mm x 30 mm) distribuídas aleatoriamente nas concentrações de 0,5; 1,0 e 1,5% em relação à massa de solo seco.

Dos resultados obtidos, os autores constataram que a adição de PET gera um aumento significativo da resistência ao cisalhamento dos solos e, conseqüentemente na sua capacidade de suporte à medida que o teor de reforço aumenta na mistura. Este incremento, por sua vez, ocorre devido ao aumento do atrito entre as partículas e ao desenvolvimento de tensões de tração nas tiras. Dentre os teores utilizados, o de 1,5% foi o que conferiu maiores resistências, gerando aumentos de 66%, 74% e 129% em comparação com os solos sem reforço (KARMACHARYA; ACHARYA, 2017).

Zukri; Nazir; Mender (2017) investigaram os efeitos do uso de fibras de politereftalato de etileno, oriundas da reciclagem de garrafas PET, e fibras de polipropileno (PP), provenientes da reciclagem de produtos feitos com esse polímero, distribuídas aleatoriamente como reforço de um solo argiloso mole. Uma série de ensaios de resistência à compressão não confinada foram realizados com amostras de solo puro e com misturas solo-fibras nas concentrações de 5,0; 10,0 e 20,0% dos dois tipos de fibras em relação à massa de solo seco. Os resultados dos ensaios mostraram que as fibras utilizadas como reforço desempenham um papel importante na resistência ao cisalhamento não drenada do solo em questão, bem como na sua ductilidade.

Além disso, os autores observaram que o aumento na resistência obtido era diretamente proporcional ao percentual de fibras contido na mistura, e isso ocorria até que fosse atingido o teor ótimo de fibras para o solo em estudo. Portanto, percebeu-se ainda que, a utilização de politereftalato de etileno como reforço, mostrava-se mais eficaz, pois para atingir o valor máximo de resistência foi necessário apenas 10% de inclusão de fibras, enquanto que para o uso do polipropileno foi preciso 20%.

Peddaiah; Burman; Sreedeeep (2018) avaliaram o efeito da adição de tiras de PET na melhoria das propriedades de uma areia siltosa. Para isso, foram realizados ensaios de compactação, cisalhamento direto e Índice de Suporte Califórnia (ISC) em amostras de solo puro e reforçado com concentrações de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8% de tiras de PET em relação à massa de solo seco. O material utilizado como reforço apresentava largura constante de 15 mm e três comprimentos diferentes (15, 25 e 35 mm).

A partir dos resultados obtidos, os autores notaram que a adição de tiras de PET ao solo gera um incremento significativo no seu peso específico aparente seco máximo, nos seus parâmetros de resistência ao cisalhamento e no seu valor de ISC, sendo que a melhoria das propriedades dependia do teor de PET presente na mistura e do comprimento da tira utilizada. Sendo assim, os autores perceberam que as propriedades eram mais potencializadas com a adição de até 0,4% de tiras de PET, pois até essa concentração o material utilizado como reforço contribuía para um melhor intertravamento entre as partículas. Dentre os teores utilizados, o de 0,4% caracterizou-se por conferir os maiores incrementos ao solo, isto é, ocasionou um aumento de 10% no peso específico aparente seco máximo, 78,9% na coesão, 42% no ângulo de atrito interno e cerca de 400% no valor do ISC, conforme pode ser observado na Tabela 4. (PEDDAIAH; BURMAN; SREEDEEP, 2018).

Tabela 4: Resultados dos ensaios para o solo puro e reforçado com tiras de PET de (15 x 25 mm) em diferentes teores.

Teor de Tiras de PET (15 x 25 mm)	Parâmetros de Compactação		Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento		Índice de Suporte Califórnia
	Umidade Ótima (%)	Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m ³)	Coesão (kN/m ²)	Ângulo de Atrito (°)	ISC (%)
0%	16,8	16,75	19	23,1	3,3
0,2%	16,1	17,5	28	28,7	7,1
0,4%	14,2	18,4	34	32,8	16,5
0,6%	15,0	18,1	18	27,0	13,7
0,8%	16,4	17,3	13	25,0	12,5

Fonte: Adaptado de PEDDAIAH; BURMAN; SREEDEEP (2018)

Além disso, os autores mencionados anteriormente também observaram que quanto menor o comprimento das tiras, mais acentuadas eram as melhorias nas propriedades analisadas. Dentre os comprimentos testados, o de 15 mm, foi o que gerou os maiores incrementos ao solo, ocasionando um aumento de 12,8% no peso específico aparente seco máximo, 121,05% na coesão, 58,01% no ângulo de atrito interno e cerca de 524,2% no valor do ISC. Sendo assim, este comprimento foi considerado o ideal para o solo em estudo, conforme pode ser observado na Tabela 5 (PEDDAIAH; BURMAN; SREEDEEP, 2018).

Tabela 5: Resultados dos ensaios com solo puro e reforçado com 0,4% de tiras de PET com diferentes comprimentos (a largura da tira é constante 15 mm).

Comprimento das Tiras de PET para o Teor de 0,4%	Parâmetros de Compactação		Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento		Índice de Suporte Califórnia
	Teor de Umidade Ótimo (%)	Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m³)	Coesão (kN/m²)	Ângulo de Atrito (°)	ISC (%)
0%	16,8	16,75	19	23,1	3,3
15 mm	13,7	18,9	42	36,5	20,6
25 mm	14,2	18,4	34	32,8	16,5
35 mm	16,7	16,8	23	25,4	5,9

Fonte: Adaptado de PEDDAIAH; BURMAN; SREEDEEP (2018)

Louzada; Malko; Casagrande (2019) realizaram ensaios de compressão triaxial do tipo adensado drenado (CD) sob diferentes pressões de confinamento para avaliar o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com PET disposto no solo de duas formas: PET triturado fino e PET em flocos, oriundos da reciclagem de garrafas plásticas. Os ensaios foram realizados com amostras de solo puro e com misturas solo-PET nas concentrações de 10, 20 e 30% do PET triturado fino e com 3 e 5% do PET em flocos com diâmetro de 1 mm, ambos em relação à massa de solo seco.

Com isso, a partir dos resultados obtidos, os autores verificaram que a adição de PET ao solo contribui para aumentar sua resistência ao cisalhamento, pois este funciona como uma melhoria do tamanho do grão. Sendo que, esse aumento da resistência é associado à dois fatores, sendo eles: o teor de PET utilizado na mistura, ou seja, quanto maior o teor, maior a resistência obtida; e a pressão de confinamento, isto é, melhorias mais significativas são alcançadas para maiores pressões de confinamento, até porque quando a mistura solo-PET é submetida a uma

baixa pressão de confinamento, o reforço não gera uma melhoria significativa nos parâmetros de resistência e na capacidade de suporte do solo, isso porque em uma baixa pressão de confinamento os grãos não ficam totalmente em contato uns com os outros, deixando espaços entre as partículas. No entanto, para altas pressões de confinamento, o PET consegue preencher melhor os vazios do solo, conferindo a este uma maior resistência. Sendo assim, as misturas que apresentaram melhor comportamento mecânico quando comparadas com o solo puro foram as que utilizaram um teor de 30% de PET triturado fino e a mistura contendo 5% de PET em flocos (LOUZADA; MALKO; CASAGRANDE, 2019).

Salimi e Ghazavi (2019) analisaram os efeitos da adição de folhas de politereftalato de etileno, proveniente da reciclagem de garrafas PET, como reforço de um solo arenoso. Para isso, foram realizados ensaios de compressão triaxial para as pressões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa, com amostras de solo puro e com misturas solo-folhas PET. As folhas de PET utilizadas apresentavam 0,4 mm de espessura e diâmetro inferior à 5 cm e foram dispostas horizontalmente no solo em 1, 2 e 3 camadas.

A partir dos resultados obtidos, os autores notaram que a inclusão de folhas de PET ao solo aumenta significativamente a resistência ao cisalhamento do solo, ou seja, o seu ângulo de atrito e a sua coesão, isso porque as folhas de politereftalato de etileno aumentam o intertravamento entre os grãos e reduzem a deformação lateral. Sendo assim, quanto maior o número de camadas de folhas plásticas, maior a resistência de pico adquirida. Além disso, os autores perceberam que a inclusão de folhas plásticas confere ao solo uma maior deformação axial, ou seja, as folhas de PET geram ao solo um comportamento dúctil. Portanto, melhores resultados são obtidos quanto maior for o número de camadas de folhas inseridas e quanto menor for a pressão de confinamento em que a mistura esteja submetida.

Para melhor evidenciar as melhorias obtidas nas propriedades dos solos analisados pelos autores mencionados, ao utilizar o PET em diferentes formas como reforço de solos, na Tabela 6 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nas pesquisas mencionadas. Na referida tabela se pode observar a expressiva variedade de solos testados (argilosos, arenosos, siltosos e areno argiloso), bem como as mais variadas formas de reforço com PET, de tiras a flocos e fibras.

Tabela 6: Resumo dos resultados obtidos nas pesquisas mencionadas, nas quais vários autores utilizaram o PET como reforço de solo.

Autor	Tipo de solo	Forma do PET	Ensaio	Melhorias obtidas	Uso
Sivakumar Babu; Chouksey (2011)	Arenoso e argiloso	Tiras	RCS, compressão triaxial (CU), adensamento	Resistência ao cisalhamento e na redução dos parâmetros de compressibilidade	Fundações superficiais
Acharyya <i>et al.</i> (2013)	Argiloso e corrigido com 10 e 20% de areia	Tiras	RCS e compressão triaxial (UU)	Resistência ao cisalhamento e no módulo de elasticidade	-
Botero <i>et al.</i> (2015)	Siltoso	Fibras	Compressão triaxial (UU)	Resistência ao cisalhamento e na ductilidade	Aterros e barragens
Martínez <i>et al.</i> (2016)	Argiloso	Triturado fino	Compressão triaxial (CD)	Resistência ao cisalhamento	Pavimentação
Senez e Casagrande (2016)	Arenoso	Fibras	Ensaio de placa	Resistência e na redução dos recalques	Fundações superficiais, taludes e aterros sobre solos moles
Karmacharya e Acharya (2017)	Arenoso	Tiras	Compressão triaxial (UU)	Resistência ao cisalhamento	-
Zukri; Nazir; Mender (2017)	Argiloso	Fibras	RCS	Resistência e na ductilidade	-
Peddaiah; Burman; Sreedeeep (2018)	Arenoso	Tiras	Cisalhamento direto, ISC	Resistência ao cisalhamento e na capacidade de suporte	-
Louzada; Malko; Casagrande (2019)	Argiloso	Triturado fino e flocos	Compressão triaxial (CD)	Resistência ao cisalhamento	Aterros e estabilização de taludes
Salimi e Ghazavi (2019)	Arenoso	Folhas	Compressão triaxial	Resistência ao cisalhamento e na ductilidade	Estabilização de taludes

Fonte: AUTORA (2020)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa experimental realizado para avaliar a influência da inclusão de PET, em duas formas distintas, no comportamento mecânico de um solo de matriz argilosa. Inicialmente são descritos os materiais utilizados e, em seguida os métodos executados são detalhados.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado um solo com matriz predominantemente argilosa, conforme é apresentado na Figura 10. A coleta das amostras de solo foi realizada em um local de exploração de solos para obras locais, denominada Jazida Cajueiro, situada nas proximidades do KM 104 da Rodovia BR 101, Estrada do Cajueiro, S/N, São Cristóvão/SE, cuja posição geográfica da área é determinada pelas coordenadas 10°55'52.26"S e 37°10'14.02"O, (Figura 11). A coleta, por sua vez, seguiu as recomendações da NBR 9604 (ABNT, 2016). Vale ressaltar que optou-se por escolher um solo argiloso, pois pelo o que se verifica na literatura, ainda são poucas as publicações avaliando o comportamento mecânico deste tipo de solo quando reforçado com resíduos de PET.

Figura 10: Amostra do solo argiloso utilizado.



Fonte: AUTORA (2021)

Figura 11: Imagem de satélite do ponto de coleta das amostras de solo em São Cristóvão/SE.



Fonte: GOOGLE EARTH (2021)

3.1.2 Material Polimérico Reciclado Proveniente do PET

Para melhor avaliar a influência da inclusão de PET no comportamento mecânico do solo argiloso estudado foi utilizado um material polimérico reciclado em duas formas distintas, denominadas como: PET micronizado e PET filete.

3.1.2.1 PET micronizado

O PET micronizado utilizado como reforço do solo argiloso estudado encontra-se apresentado na Figura 12 e foi produzido em Porto Alegre/RS pela empresa Plastimix Industrial.

Esse material é resultante da moagem de garrafas PET e o processo de micronização, ou seja, processo pelo qual a garrafa PET é transformada em pó é constituído de basicamente quatro etapas: triagem; formação de *flakes* (flocos, pequenos pedaços); formação de pelotas; e, por último, a obtenção do pó. Na primeira etapa é feita uma triagem com a remoção do rótulo e do bico das garrafas, na segunda etapa, as garrafas passam pelo processo de moagem onde obtém-se os *flakes* de PET, estes por sua vez, passam por aglomeração para redução do volume e aumento da densidade. Na terceira etapa o material obtido na anterior passa por preparação e

transformação do termoplástico e, em seguida é submetido a uma nova moagem que transforma os *flakes* em pelotas. Na quarta e última etapa ocorre a micronização das pelotas reduzindo-as a um pó.

Figura 12: Aspectos visuais do PET micronizado.



Fonte: AUTORA (2021)

3.1.2.2 PET filete

O PET filete utilizado nesta pesquisa como reforço do solo argiloso estudado foi obtido através da reciclagem de garrafas PET e encontra-se apresentado na Figura 13.

Figura 13: Imagem do PET filete.



Fonte: AUTORA (2021)

Para obtenção dos filetes foram coletadas garrafas PET de refrigerante, de uma das marcas comercializadas no mercado, priorizando-se aquelas com capacidade de 2 litros. Após

a coleta, foi retirado o rótulo e as tampas das garrafas, em seguida estas foram higienizadas em água corrente e posteriormente secas. Por fim, foi retirado o fundo, conforme pode ser observado na Figura 14, sendo que o restante da garrafa, com exceção do bico, foi utilizado para confeccionar de forma artesanal os filetes de PET com largura constante de 1,3 mm e comprimentos variados (5, 10 e 15 mm). Optou-se por utilizar comprimentos variados, pois de acordo com o que se encontra na literatura, o comprimento influencia os efeitos do reforço na matriz do solo empregado.

Figura 14: Etapas de preparação das garrafas PET para confecção dos filetes.



Fonte: AUTORA (2021)

A produção dos filetes de PET se deu em duas etapas: i) a primeira consistiu na formação de fios de PET com 1,3 mm de largura com o auxílio de um filetador, conforme pode ser observado na Figura 15 (a); ii) a segunda e última etapa foi dedicada à obtenção dos filetes nos comprimentos desejados e, para isso, foi utilizada uma tesoura e uma régua, conforme é apresentado nas Figuras 15 (b) e (c).

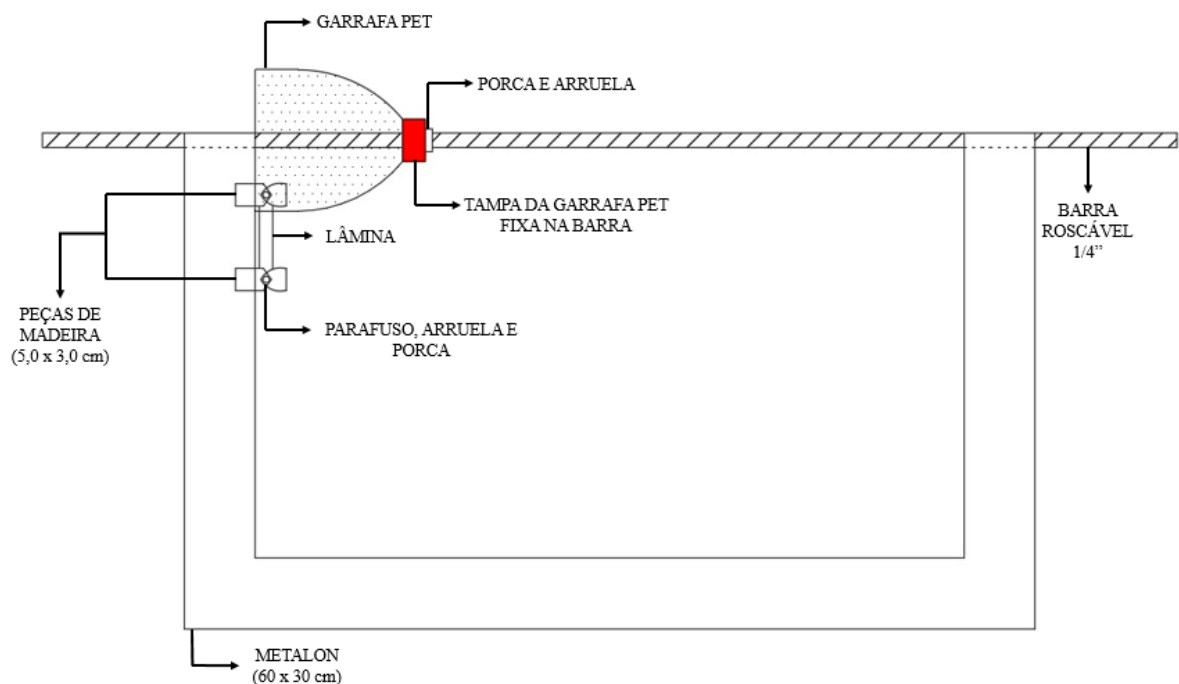
Figura 15: Etapas da preparação do PET filete: (a) formação dos fios de PET, (b) fios de PET obtidos e acessórios utilizados (tesoura e régua) para confecção dos filetes, (c) filetes.



Fonte: AUTORA (2021)

Para a realização da primeira etapa foi confeccionado um filetador. Este, por sua vez, é composto de uma peça de metalon de 60 cm de comprimento onde foram fixadas duas hastes, cada uma com 30 cm de altura. Na haste esquerda dois pares de peças de madeira (5,0 x 3,0 cm) com extremidade biselada foram fixadas com o auxílio de um parafuso, uma porca e uma arruela cada, sendo que estas peças servem para fixar uma lâmina no sentido vertical. Além disso, na extremidade superior das duas hastes (direita e esquerda) foi feito uma cavidade para apoiar uma barra roscada de 1/4", conforme pode ser observado no croqui apresentado na Figura 16. Sendo assim, o princípio de funcionamento do filetador deu-se da seguinte forma: a garrafa PET era introduzida na barra roscada e fixada em uma tampa de garrafa que se encontrava fixa na barra através de duas porcas e de duas arruelas, em seguida a barra era apoiada na cavidade existente nas extremidades do metalon e forçada num giro no sentido anti-horário. À medida que a barra girava a garrafa entrava em contato com a lâmina e o corte era iniciado, assim que a garrafa começava a ser cortada e formava o fio, o giro forçado na barra era cessado e dava-se continuidade ao corte da garrafa puxando-se apenas pelo fio até o corte ser cessado no bico da garrafa. Vale ressaltar que à medida que a barra vai sendo girada, a espessura da sua rosca determina a largura do fio formado (1,3 mm). É importante destacar também que embora de caráter artesanal, o filetador empregado se mostrou bastante funcional.

Figura 16: Croqui do filetador confeccionado.



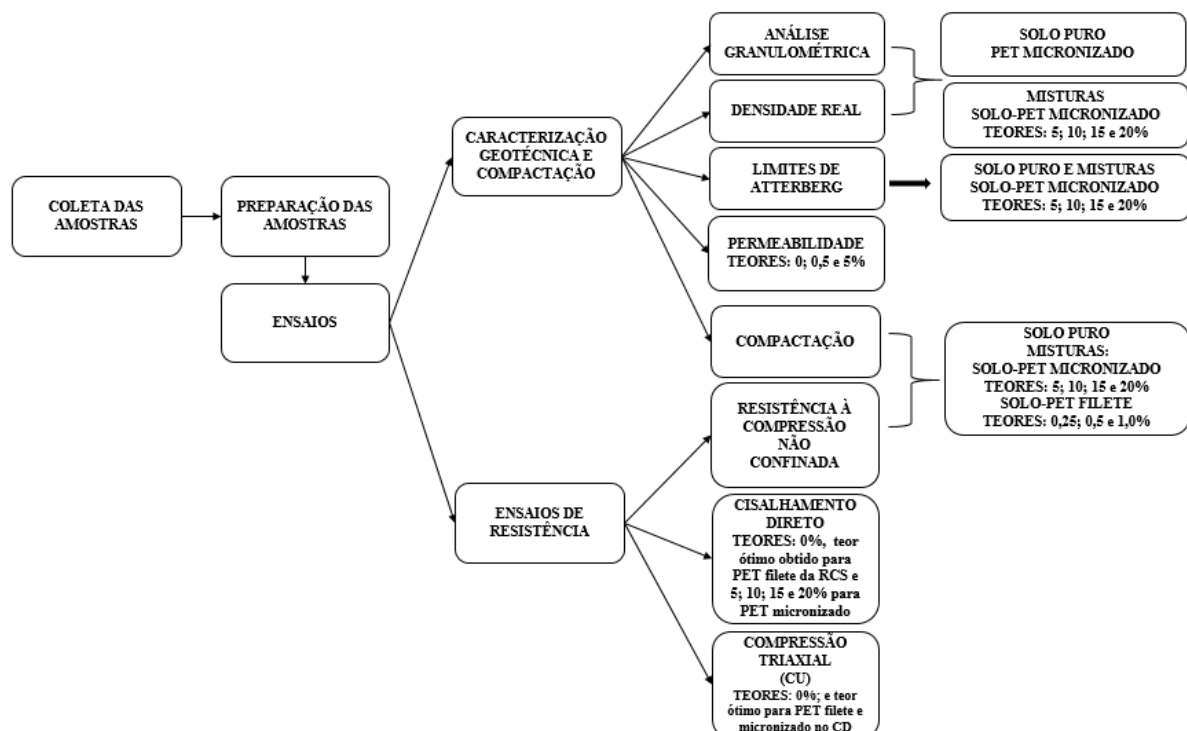
Fonte: AUTORA (2021)

3.2 MÉTODOS

Após a coleta das amostras de solo, estas foram encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GeoPav) da Universidade Federal de Sergipe - UFS, onde se deu continuidade a pesquisa com a preparação das amostras para a realização dos ensaios de laboratório que seguiram as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016).

Portanto, o programa experimental do presente trabalho consistiu em duas fases: uma foi destinada à realização de uma caracterização geotécnica, enquanto que a outra, foi dedicada à avaliação do comportamento mecânico dos materiais (solo e misturas). Deste modo, a primeira consistiu em caracterizar primeiramente o solo puro e o PET micronizado separadamente. Em seguida, procedeu-se com a caracterização das misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico distribuído aleatoriamente, em diferentes teores em relação à massa de solo seco. Além disso, a pesquisa também avaliou o efeito da inclusão de PET micronizado e PET filete na condutividade hidráulica das misturas em comparação com a matriz não reforçada. Já na segunda fase, buscou-se avaliar a influência da adição de PET (micronizado e filete) no comportamento mecânico das misturas em relação ao solo puro. Sendo assim, o desenvolvimento do programa experimental seguiu as etapas apresentadas no fluxograma mostrado na Figura 17, o qual será detalhado nos itens subsequentes.

Figura 17: Fluxograma das etapas do programa experimental.



Para melhor avaliar os efeitos da inclusão do PET micronizado e PET filete ao solo argiloso, foram ensaiadas misturas solo-PET com diferentes teores, além de comprimentos variados para o PET filete, conforme se encontra apresentado na Tabela 7. A escolha da variação dos teores utilizados, bem como dos comprimentos tomou como base o que se verifica na literatura disponível, visto que os fatores determinantes na melhoria das propriedades da matriz em que o PET é inserido são o teor e a dimensão do reforço adicionado ao solo.

Tabela 7: Dimensões e teores do material polimérico reciclado que foram utilizados nas misturas Solo-PET.

Reforço	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Teor utilizado nas misturas Solo-PET (%)
PET micronizado	-	-	5; 10; 15 e 20
PET filete	1,3	5, 10 e 15	0,25; 0,50; e 1,0

Fonte: AUTORA (2021)

Em virtude da quantidade de misturas solo-PET ensaiadas, para melhor identificar cada mistura, bem como o tipo de PET utilizado, foram adotadas as nomenclaturas apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Nomenclaturas adotadas para o solo puro e para cada mistura solo-PET ensaiada.

Material/Misturas	Solo (%)	PET (%)	Nomenclatura
Solo Puro	100	-	SP
Solo + 5% PET micronizado	95	5	S95P5
Solo + 10% PET micronizado	90	10	S90P10
Solo + 15% PET micronizado	85	15	S85P15
Solo + 20% PET micronizado	80	20	S80P20
Solo + 0,25% PET filete (5mm)	99,75	0,25	S+0,25%FIL.(5mm)
Solo + 0,5% PET filete (5mm)	99,5	0,5	S+0,5%FIL.(5mm)
Solo + 1,0% PET filete (5mm)	99,0	1,0	S+1,0%FIL.(5mm)
Solo + 0,25% PET filete (10mm)	99,75	0,25	S+0,25%FIL.(10mm)
Solo + 0,5% PET filete (10mm)	99,5	0,5	S+0,5%FIL.(10mm)
Solo + 1,0% PET filete (10mm)	99,0	1,0	S+1,0%FIL.(10mm)
Solo + 0,25% PET filete (15mm)	99,75	0,25	S+0,25%FIL.(15mm)
Solo + 0,5% PET filete (15mm)	99,5	0,5	S+0,5%FIL.(15mm)
Solo + 1,0% PET filete (15mm)	99,0	1,0	S+1,0%FIL.(15mm)

Fonte: AUTORA (2021)

3.2.1 Caracterização Geotécnica e Compactação

Para a caracterização geotécnica do solo puro, do PET micronizado e das misturas solo-PET foram realizados os ensaios descritos a seguir de acordo com as recomendações da normatização brasileira vigente. Da mesma forma, para os ensaios de compactação nos materiais (solo e misturas) seguiu-se os procedimentos da norma especificada.

- Análise Granulométrica: ABNT NBR 7181/2016 – Solo – análise granulométrica;
- Densidade Real dos Grãos: DNER-ME 093/1994 – Solos – determinação da densidade real;
- Limite de Liquidez: ABNT NBR 6459/2016 – Solo – determinação do limite de liquidez;
- Limite de Plasticidade: ABNT NBR 7180/2016 – Solo – determinação do limite de plasticidade;
- Permeabilidade – Solos Argilosos: ABNT NBR 14545/2021 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.
- Compactação: ABNT NBR 7182/2016 – Solo – ensaio de compactação;

3.2.1.1 Análise granulométrica

Os ensaios de análise granulométrica foram realizados apenas para o solo puro, para o PET micronizado e para as misturas solo-PET micronizado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, visto que o PET filete mostrava-se inviável para o processo de peneiramento e sedimentação, e além disso, conforme se verifica na literatura o PET filete não é capaz de alterar significativamente os índices físicos do solo, sendo assim dispensável a realização do ensaio para as misturas solo-PET filete. A classificação das granulometrias obtidas foi baseada nas recomendações da NBR 6502 (ABNT, 2022).

3.2.1.2 Densidade real dos grãos

Os ensaios para determinação da densidade real dos grãos foram realizados para o solo puro, para o PET micronizado e para as misturas solo-PET micronizado nos teores de 5, 10, 15

e 20% em relação à massa de solo seco. Vale ressaltar que devido ter encontrado dificuldade na execução, este ensaio acabou não sendo realizado para o PET filete e para as misturas solo-PET filete.

3.2.1.3 Limites de *Atterberg*

Os ensaios de limite de liquidez e de plasticidade foram realizados para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, visto que apenas o PET micronizado consegue interferir na interação do solo com a água.

De posse dos dados obtidos com a realização dos ensaios até então listados, o solo puro e as misturas foram classificados pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e pelo *Transportation Research Board* (TRB).

Vale destacar que como o ensaio de permeabilidade foi executado apenas após a obtenção e análise dos dados dos ensaios de cisalhamento direto, para melhor compreensão, esse ensaio será detalhado após a seção referente aos “Ensaio de Resistência”.

3.2.1.4 Ensaio de Compactação

Com o intuito de avaliar a influência da adição de PET nos parâmetros de compactação do solo argiloso estudado foram realizados ensaios de compactação na energia Proctor Normal, com o cilindro pequeno e com reuso do material, para o solo puro e para as misturas solo-PET (micronizado e filete) nos teores e comprimentos já especificados na Tabela 7. O material polimérico foi distribuído aleatoriamente e os teores foram adicionados em relação à massa de solo seco.

De posse dos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação para o solo puro e para as misturas solo-PET foram preparadas as misturas e moldados os corpos de prova necessários para a realização dos ensaios de resistência à compressão não confinada, cisalhamento direto e compressão triaxial.

3.2.2 Ensaios de Resistência

Para avaliar o comportamento mecânico do solo puro e das misturas solo-PET foram realizados os ensaios descritos a seguir, seguindo-se as recomendações das respectivas normas listadas.

- Ensaio de Resistência à Compressão não Confinada: ABNT NBR 12770/2022 – Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo;
- Ensaio de Cisalhamento Direto: ASTM D3080-11 – Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions;
- Ensaio de Compressão Triaxial Adensado não Drenado (CU): ASTM D4767-20 – Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils;

3.2.2.1 Ensaio de resistência à compressão não confinada

A realização dos ensaios de resistência à compressão não confinada seguiram as recomendações da normatização já mencionada e consistiu em três etapas básicas: a preparação da amostra de solo puro e das misturas solo-PET; a moldagem dos corpos de prova e a execução do ensaio, estas por sua vez, serão descritas a seguir.

Preparação da amostra de solo puro e das misturas solo-PET

A primeira etapa para realização dos ensaios de resistência à compressão não confinada foi a preparação da amostra de solo puro e das misturas solo-PET a serem ensaiadas. Sendo assim, de posse dos parâmetros ótimos obtidos nos ensaios de compactação para o solo argiloso e para cada mistura solo-PET ensaiada, a amostra de solo puro e as misturas solo-PET foram preparadas para cada teor de umidade ótimo correspondente.

O preparo da amostra de solo puro se deu da seguinte forma: em uma bandeja metálica foi adicionado a massa de solo suficiente para a moldagem de três corpos de prova na massa específica aparente seca máxima e para a determinação da umidade da amostra preparada e da moldagem dos corpos de prova, e em seguida foi adicionado de forma gradativa a água necessária para atingir a umidade ótima, misturando-se a amostra até obter aspecto homogêneo. Enquanto que para as misturas solo-PET o procedimento foi o mesmo, porém antes de adicionar a água adicionou-se o material polimérico reciclado (PET micronizado ou filete) e tomou-se o cuidado para homogeneizar inicialmente os componentes secos da mistura com o auxílio de

uma espátula de aço triangular, para assim garantir a homogeneização da mistura final e certificar que não houvesse aglomeração dos filetes, conforme pode ser observado na Figura 18. Vale ressaltar que o solo utilizado foi previamente passado na peneira #10, abertura 2mm, embora o material retido não tenha sido descartado. Além disso, vale destacar que a adição de PET não dificultou a trabalhabilidade das misturas.

Figura 18: Procedimento para preparação da mistura solo-PET filete.



Fonte: AUTORA (2021)

A quantidade de PET micronizado e PET filete adicionado ao solo para confecção das misturas foi determinada em relação à massa de solo seco, a massa de água utilizada foi calculada em relação a massa total dos constituintes (solo + PET micronizado) com o intuito de verificar se este tipo de PET iria absorver água, enquanto que para as misturas solo-PET filete, a água foi relacionada apenas a massa de solo, visto que segundo a literatura é comprovado que o PET em forma de filete não absorve água. Portanto, à medida que as misturas foram preparadas, foi constatado que o PET micronizado também não absorve água.

Após o preparo da amostra de solo puro e das misturas solo-PET, estas foram colocadas em sacos plásticos, fechadas com barbante, etiquetadas para facilitar a identificação, conforme pode ser observado na Figura 19, e conduzidas para uma câmara úmida onde permaneceram lá

por um período de 26h, após esse período, de posse da umidade já determinada, realizava-se a correção da umidade quando necessário e dava-se início aos procedimentos para moldagem dos corpos de prova.

Figura 19: Misturas ensacadas e etiquetadas.



Fonte: AUTORA (2021)

Moldagem dos corpos de prova

Após finalizado o processo de preparo da amostra de solo puro e das misturas solo-PET com a conferência da umidade que se desejava alcançar e com os ajustes de umidade feitos quando necessário, deu-se início a moldagem dos corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados por compactação dinâmica em molde cilíndrico metálico, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para os parâmetros ótimos obtidos dos ensaios de compactação para o solo puro e para cada mistura solo-PET ensaiada.

Para a moldagem dos corpos de prova por compactação dinâmica foi utilizada a aparelhagem da metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical) sob energia normal. Dessa forma, tomou-se a quantidade da amostra de solo puro e das misturas solo-PET necessária para alcançar a massa específica aparente seca máxima correspondente em cada caso e dividiu-a para serem compactadas em três camadas no interior do molde cilíndrico metálico. Em seguida, passou-se vaselina no interior do molde e colocou-se um plástico no fundo, para então ser adicionada a primeira camada de solo puro ou mistura solo-PET previamente calculada. Logo após, o molde foi posto sobre o cilindro central do suporte para compactação no sistema MCT, no qual sobre cada camada foram aplicados 5 golpes do soquete, e finalmente,

o topo da camada foi escarificado visando-se uma maior adesão com a base da camada sobrejacente.

Este processo foi repetido para as outras camadas, sendo que na última utilizou-se um colarinho (disco de polietileno) sobre o topo do molde para evitar perda de solo à medida que a camada era golpeada. Além disso, para a terceira camada inicialmente era dado apenas 4 golpes, retirava-se o colarinho, efetuava o nivelamento da superfície com uma régua metálica e só então o último golpe era lançado. Finalizado este processo, o corpo de prova era retirado do molde com o auxílio de um extrator. O procedimento para moldagem dos corpos de prova é apresentado na Figura 20.

Figura 20: Procedimento para moldagem dos corpos de prova por compactação dinâmica.



Fonte: AUTORA (2021)

Vale ressaltar que o controle da massa específica aparente seca máxima foi feito monitorando-se a altura de cada camada, já o do teor de umidade ótimo foi realizado através do método da estufa, ou seja, através da determinação da umidade de moldagem.

Após finalizado o processo de moldagem dos corpos de prova, estes foram colocados em sacos plásticos, fechados com barbante, etiquetados para facilitar identificação e levados para um dessecador, para assim garantir que não houvesse perda de umidade, conforme pode ser observado na Figura 21, sendo que cada corpo de prova permanecia neste local apenas até finalizar o rompimento do que o antecedia.

Figura 21: Corpos de prova moldados para o ensaio de resistência à compressão não confinada no dessecador antes do rompimento.



Fonte: AUTORA (2021)

Execução do ensaio

Os ensaios de resistência à compressão não confinada foram realizados controlando-se a velocidade de deformação do corpo de prova e medindo-se a deformação correspondente (deformação controlada). A velocidade adotada foi de 1,0 mm/min, seguindo-se as recomendações da NBR 12770 (ABNT, 2022).

Foram ensaiados corpos de prova moldados com solo puro e com as misturas solo-PET (micronizado e filete) contendo o material polimérico reciclado nos teores e comprimentos, para o caso do PET filete, apresentados na Tabela 9. Sendo assim, foram testados três corpos de prova para cada teor de PET micronizado e para cada combinação comprimento-teor de PET filete, bem como para o solo puro, perfazendo um total de 42 corpos de prova. Na Figura 22 é mostrada a prensa utilizada para a execução do ensaio, fabricada pela Solotest.

Tabela 9: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão não confinada.

Material	Teor de material polimérico reciclado (%)	Comprimento do material polimérico reciclado (mm)	Combinações	Nº de corpos de prova testados	Total
Solo Puro	-	-	-	3	42
Solo + PET micronizado	5; 10; 15 e 20	-	-	12	
Solo + PET filete	0,25; 0,5; 1,0	5; 10 e 15	9	27	

Fonte: AUTORA (2021)

Figura 22: Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão não confinada.



Fonte: AUTORA (2021)

Com base nos resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão não confinada foi feita uma análise para identificar o teor de PET filete que adicionado ao solo argiloso gerou as maiores tensões de ruptura e, consequentemente os maiores valores de coesão. Ou seja, identificou-se o teor mais adequado para o solo em questão. A partir deste, decidiu-se que o ensaio seguinte, o de cisalhamento direto, seria realizado apenas com misturas solo-PET filete contendo o teor encontrado. Porém, optou-se por permanecer variando-se os comprimentos, para assim intensificar a análise quanto ao efeito deste parâmetro.

3.2.2.2 Ensaio de cisalhamento direto

A realização dos ensaios de cisalhamento direto seguiram as recomendações da normatização já mencionada, e consistiu em três etapas: a preparação da amostra de solo puro e das misturas solo-PET; a moldagem dos corpos de prova e a execução do ensaio. A preparação da amostra de solo puro e das misturas solo-PET seguiram os mesmos procedimentos já descritos para o ensaio de resistência à compressão não confinada, enquanto que a moldagem dos corpos de prova e a execução do ensaio serão descritas a seguir.

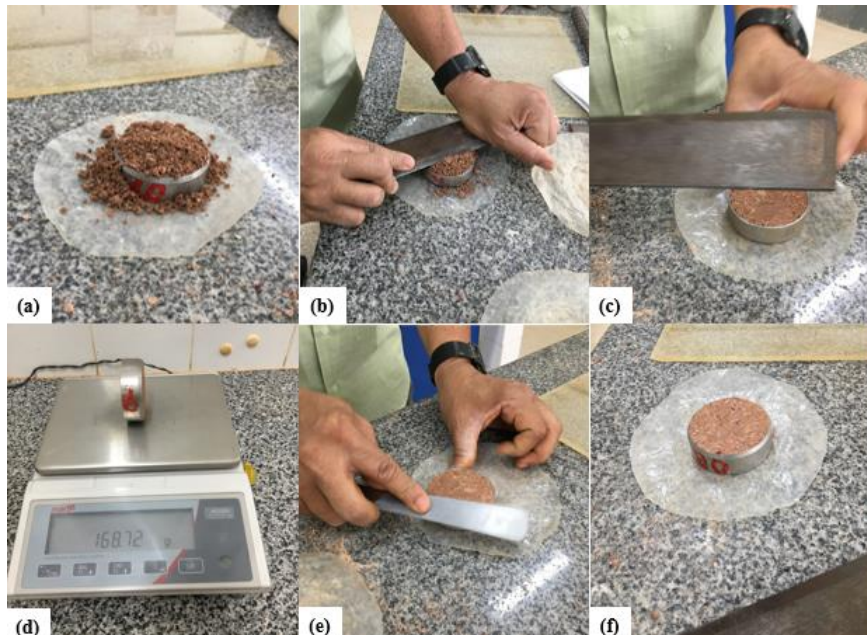
Moldagem dos corpos de prova

Após finalizado o processo de preparo da amostra de solo puro e das misturas solo-PET foram moldados corpos de prova por compactação estática em anéis metálicos de 6,0 cm de

diâmetro com alturas variando de 2,02 a 2,08 cm, para os parâmetros ótimos obtidos dos ensaios de compactação para o solo puro e para cada mistura solo-PET ensaiada.

Para a moldagem dos corpos de prova por compactação estática, tomou-se inicialmente a quantidade da amostra de solo puro e das misturas solo-PET necessária para alcançar a massa específica aparente seca máxima correspondente em cada caso, levando em consideração o volume de cada anel utilizado. Em seguida foi passado vaselina no interior do anel, este foi colocado sobre um plástico e a massa de solo ou mistura previamente calculada foi inserida, Figura 23 (a), daí então foi aplicada uma pressão em toda área superior do anel com o auxílio de uma régua metálica, Figura 23 (b), tomou-se o cuidado para que essa pressão fosse aplicada de forma uniforme de maneira a compactar a massa de solo ou mistura por igual, sendo que a pressão era aplicada até a massa ser totalmente compactada, Figura 23 (c), após esse procedimento, o anel metálico era pesado para conferir se a massa específica aparente seca máxima almejada havia sido alcançada, Figura 23 (d), para os casos que não era alcançada, era adicionado mais uma quantidade de solo e repetia o processo já descrito, por fim, realizava-se o acabamento da superfície com uma espátula, conforme pode ser observado na Figura 23 (e) e (f).

Figura 23: Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. (a) massa de solo inserida no anel; (b) pressão aplicada com o auxílio de régua metálica; (c) pressão aplicada para compactar a massa por igual; (d) conferência da massa específica aparente seca máxima almejada; (e) acabamento da superfície e (f) corpo de prova compactado.

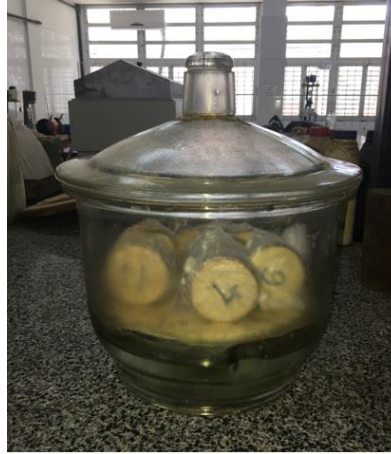


Fonte: AUTORA (2021)

Após os corpos de prova serem moldados, estes eram colocados em dois sacos plásticos, fechados com nó, etiquetados com o número correspondente de cada anel para facilitar a

identificação e armazenados em um dessecador para assim garantir que não houvesse perda de umidade até que fossem ensaiados, conforme pode ser observado na Figura 24.

Figura 24: Corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto armazenados no dessecador.



Fonte: AUTORA (2021)

Antes dos corpos de prova serem colocados na célula do cisalhamento direto para dar início ao ensaio, estes eram extraídos do anel. Para isso, o anel era posto sobre a célula já montada, sobre ele era colocado o cabeçote e o conjunto era levado para uma prensa de CBR onde com o auxílio de um êmbolo metálico o corpo de prova era desprendido do anel, conforme pode ser observado na Figura 25.

Figura 25: Extração dos corpos de prova de cisalhamento direto.



Fonte: AUTORA (2021)

Foram moldados seis corpos de prova para cada amostra de solo puro e misturas solo-PET que foram ensaiadas, sendo que quatro desses correspondia a cada tensão normal escolhida e os outros eram destinados a realização de repetições quando necessário.

Execução do ensaio

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para o solo puro e para as misturas solo-PET nas condições de umidade natural e inundado previamente para as tensões normais de 50, 100, 200 e 400 kPa. A execução dos ensaios deu-se em duas fases, primeiramente o corpo de prova foi submetido a fase de adensamento e em seguida a fase de cisalhamento.

Na fase de adensamento, para os ensaios realizados nas condições de umidade natural a amostra de solo puro estabilizou em um período de 120 min, já as misturas solo-PET micronizado o adensamento ocorreu entre 120 e 195 min, enquanto que para as misturas solo-PET filete a estabilização ocorreu entre 150 e 210 min.

Para os ensaios realizados com inundação prévia os corpos de prova eram inundados em 0,5 min após a tensão normal começar a atuar na fase de adensamento. Os corpos de prova inundados previamente apresentaram tempo de adensamento inferior aos ensaios em condição de umidade natural, sendo que o solo puro estabilizava entre 60 e 90 min, as misturas solo-PET micronizado entre 60 e 105 min, enquanto que as misturas solo-PET filete o adensamento era caracterizado entre 60 e 120 min.

Finalizada a fase de adensamento os corpos de prova foram submetidos à fase de cisalhamento, empregando-se a velocidade de 0,5 mm/min e uma deformação máxima de 20%. Cada ensaio foi finalizado quando a ruptura do corpo de prova era comprovada ou até se atingir 12 mm de deslocamento.

Portanto, foram ensaiados corpos de prova de solo puro, misturas solo-PET micronizado nos teores de 5; 10; 15 e 20% e misturas solo-PET filete, contendo o teor mais adequado para o solo em questão identificado no ensaio de resistência à compressão não confinada e os comprimentos já definidos. Os corpos de prova foram submetidos à quatro tensões normais (50, 100, 200 e 400 kPa) para definição da respectiva envoltória de resistência. Sendo assim, foram realizados 32 ensaios para cada condição ensaiada (umidade natural e previamente inundada), totalizando 64 ensaios, conforme síntese apresentada na Tabela 10.

Tabela 10: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de cisalhamento direto.

Material	Teor do material polimérico reciclado (%)	Comprimento do material polimérico reciclado (mm)	Combinações (envoltórias)	Nº de corpos de prova testados	Total
Solo Puro	-	-	2	8	64
Solo + PET micronizado	5; 10; 15 e 20	-	8	32	
Solo + PET filete	0,5	5; 10 e 15	6	24	

Fonte: AUTORA (2021)

O equipamento utilizado no ensaio é de fabricação alemã, da marca Wille Geotechnik e se encontra apresentado na Figura 26.

Figura 26: Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto.

Fonte: AUTORA (2021)

Após a realização dos ensaios, de posse dos resultados obtidos foi feita uma análise para identificar qual o teor de PET micronizado e qual comprimento de PET filete gerou ao solo argiloso as maiores tensões de cisalhamento, ou seja, maior resistência ao cisalhamento quando comparados com o solo puro, onde percebeu-se que os resultados coincidiam com os já obtidos nos ensaios de resistência à compressão não confinada. Para complementar a etapa de ensaios

de cisalhamento, seguindo-se a programação estabelecida, foram realizados ensaios de compressão triaxial com misturas solo-PET contendo o melhor teor de PET micronizado e o comprimento ideal do PET filete identificados. Tal análise também serviu para determinar quais misturas seriam testadas no ensaio de permeabilidade.

3.2.2.3 Ensaio de compressão triaxial adensado não drenado (CU)

Os ensaios de compressão triaxial do tipo adensado não drenado (CU), com medida de poropressão, seguiram as recomendações da normatização já mencionada e consistiu em três etapas: a preparação da amostra de solo puro e das misturas solo-PET; a moldagem dos corpos de prova e a execução do ensaio. A preparação da amostra de solo puro e das misturas solo-PET, bem como a moldagem dos corpos de prova seguiram os mesmos procedimentos já descritos para o ensaio de resistência à compressão não confinada, utilizando-se o mesmo molde cilíndrico metálico de 5,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Execução do ensaio

Os ensaios de compressão triaxial (CU) foram realizados para o solo puro e para as misturas solo-PET para as tensões de confinamento de 100, 200, 400 e 600 kPa. A execução do ensaio se deu em três fases, ou seja, saturação, adensamento e cisalhamento.

Após a moldagem dos corpos de prova e montagem destes na câmara triaxial deu-se início a fase de saturação. A saturação dos corpos de prova foi realizada inicialmente através da aplicação de contrapressão. Para isso, aumentou-se simultaneamente a pressão confinante e a contrapressão de forma gradativa, tomando-se o cuidado para que os incrementos de pressão realizados fossem de tal forma que a diferença entre a pressão confinante e a contrapressão não excedesse 35 kPa, uma vez que esta é a recomendação dos procedimentos normativos. Sendo assim, buscou-se trabalhar com contrapressão de até 10 kPa inferior à pressão confinante aplicada, para valores de contrapressão aplicada até 690 kPa, visando a saturação do corpo de prova.

Além da aplicação de contrapressão, em alguns casos foi necessário realizar também a saturação pelo mecanismo de circulação de água com drenagem, para assim conseguir retirar mais rapidamente todo ar ainda presente no corpo de prova. Para isso, com as válvulas de drenagem abertas, a pressão confinante e a contrapressão eram aumentadas simultaneamente deixando-se uma diferença máxima de 10 kPa para que dessa forma a água desaerada da bureta pudesse fluir sobre todo corpo de prova, expulsando todo ar ainda presente nos poros.

Após esses procedimentos, para checar que o corpo de prova encontrava-se saturado era determinado o parâmetro de poropressão B de Skempton que consiste na relação entre a variação de poropressão (Δu) e a variação de pressão confinante ($\Delta \sigma_3$) e determina que para a condição de solo saturado ($B = 1$). Para a determinação deste parâmetro a pressão confinante e a contrapressão era reduzida a zero de forma gradativa e, em seguida apenas a pressão confinante era aumentada em incrementos de 50 kPa até alcançar a pressão confinante daquele ensaio. Para cada incremento de pressão confinante era checado o valor da poropressão medida, e consequentemente o parâmetro B . Foi considerada saturação satisfatória quando B era igual ou maior que 0,98 (saturação igual a 98%). O tempo médio gasto para se alcançar a saturação dos corpos de prova foi 48h.

Obtida a saturação deu-se início à fase de adensamento. Nessa fase, apenas a pressão confinante atuava no sistema, sendo assim, cada corpo de prova era adensado para diferentes pressões confinantes (100, 200, 400 e 600 kPa). Em seguida, a válvula de drenagem era aberta para que o excesso de poropressão da água decorrente da pressão confinante sobre o corpo de prova pudesse ser dissipado na forma de variação de volume, registrado em uma das buretas disponíveis no sistema.

Durante o adensamento foram coletadas as variações de volume do corpo de prova em tempos predeterminados. A fase de adensamento foi considerada concluída quando não houve mais variação de volume de água na bureta, sendo isto constatado em 24h. Entretanto, de posse dos dados coletados, foi plotado o gráfico variação volumétrica (ΔV) versus ($\log t$) e foi estimado o valor de (t_{50}), tempo necessário para ocorrer 50% do adensamento primário, a partir deste valor foi calculado a taxa de deformação adequada para a ruptura do corpo de prova.

Determinada a taxa de deformação adequada, deu-se início a fase de cisalhamento. Esta fase foi realizada sob deformação controlada, onde foi adotada a velocidade de cisalhamento de 0,3 mm/min, até se alcançar um nível de deformação axial máxima de aproximadamente 18% (60 minutos de ensaio para cada corpo de prova).

De forma análoga à metodologia empregada nos demais ensaios de resistência, foram ensaiados corpos de prova moldados com solo puro e com as misturas solo-PET micronizado e filete contendo os teores de 5 e 0,5% com comprimento de 15 mm, respectivamente, em relação à massa de solo seco. Estes percentuais foram os que conferiram os melhores valores de resistência registrados para cada tipo de PET e comprimento ideal para o PET filete obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto. Foram ensaiados quatro corpos de prova para cada mistura solo-PET, bem como para a matriz sem reforço. Dessa forma, 12 corpos de prova foram testados, conforme síntese apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de compressão triaxial (CU).

Material	Teor de material polimérico reciclado (%)	Comprimento do material polimérico reciclado (mm)	Combinações (envoltória de resistência)	Nº de corpos de prova testados (círculos de Mohr)	Total
Solo Puro	-	-	1	4	12
Solo + PET micronizado	5	-	1	4	
Solo + PET filete	0,5	15	1	4	

Fonte: AUTORA (2021)

Vale destacar que encontrou-se dificuldade para ensaiar os corpos de prova das misturas solo-PET filete, pois os filetes acabavam perfurando a membrana e permitindo que houvesse entrada do fluido da câmara para o corpo de prova, comprometendo assim o ensaio. Para contornar esta dificuldade, a montagem dos corpos de prova em questão na câmara triaxial foi diferente, isto é, antes deles serem envolvidos com a membrana, tiras de papel eram aderidas à sua superfície, o que fazia com que as pontas dos filetes fossem protegidas, impedindo assim a perfuração da membrana, conforme pode ser observado na Figura 27. O equipamento triaxial utilizado no ensaio é de fabricação alemã, da marca Wille Geotechnik e se encontra apresentado na Figura 28.

Figura 27: Corpo de prova das misturas solo-PET filete revestido com tiras de papel antes de ser envolvido com a membrana.

Fonte: AUTORA (2021)

Figura 28: Equipamento triaxial utilizado nesta pesquisa.



Fonte: AUTORA (2021)

3.2.3 Ensaio de Permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade foram executados após análise dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto e seguiram as recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2021). Os ensaios foram realizados de acordo com o método B sugerido pela norma mencionada e compreendeu quatro etapas: i) preparo da amostra de solo puro e das misturas solo-PET; ii) moldagem do corpo de prova; iii) saturação do corpo de prova; e iv) execução do ensaio.

O preparo da amostra de solo puro e das misturas solo-PET seguiram os mesmos procedimentos já descritos no item relacionado ao ensaio de resistência à compressão não confinada levando-se em consideração o teor de umidade ótimo e a quantidade necessária de solo/mistura para atingir a massa específica aparente seca máxima no permeâmetro para cada caso.

Os corpos de prova foram compactados sob energia do Proctor normal, usando-se um cilindro metálico de 15 cm de diâmetro e 8 cm de altura livre, com quatro camadas de solo, cada uma submetida a 11 golpes. A saturação dos corpos de prova foi feita por percolação no sentido ascendente, sendo que estes obtiveram saturação satisfatória após um período de 24h.

Foram testados dois corpos de prova para cada mistura solo-PET micronizado e filete, bem como para a matriz sem reforço, totalizando 6 corpos de prova, conforme pode ser observado na síntese apresentada na Tabela 12. Na Figura 29 é apresentado as etapas realizadas no ensaio, desde a compactação do corpo de prova até a sua extração.

Tabela 12: Quantidade de corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de permeabilidade.

Material	Teor de material polimérico reciclado (%)	Comprimento do material polimérico reciclado (mm)	Nº de corpos de prova testados	Total
Solo Puro	-	-	2	6
Solo + PET micronizado	5	-	2	
Solo + PET filete	0,5	1,5	2	

Fonte: AUTORA (2021)

Figura 29: Etapas realizadas no ensaio de permeabilidade, (a) compactação do corpo de prova, (b) corpo de prova compactado, (c) preparação da base do permeâmetro, (d) aplicação do papel filtro sobre a camada de areia, (e) corpo de prova posicionado sobre a base e sobreposto por papel filtro e uma camada de areia grossa, (f) cilindro preenchido com água, (g) inserção da tampa superior, (h) processo de saturação, (i) execução do ensaio, (j) extração do corpo de prova.



Fonte: AUTORA (2021)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o programa experimental desenvolvido para avaliar a influência da inclusão de PET, em duas formas distintas, no comportamento mecânico de um solo de matriz argilosa. Primeiramente são expostos os resultados obtidos para a fase de caracterização geotécnica e, em seguida são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas.

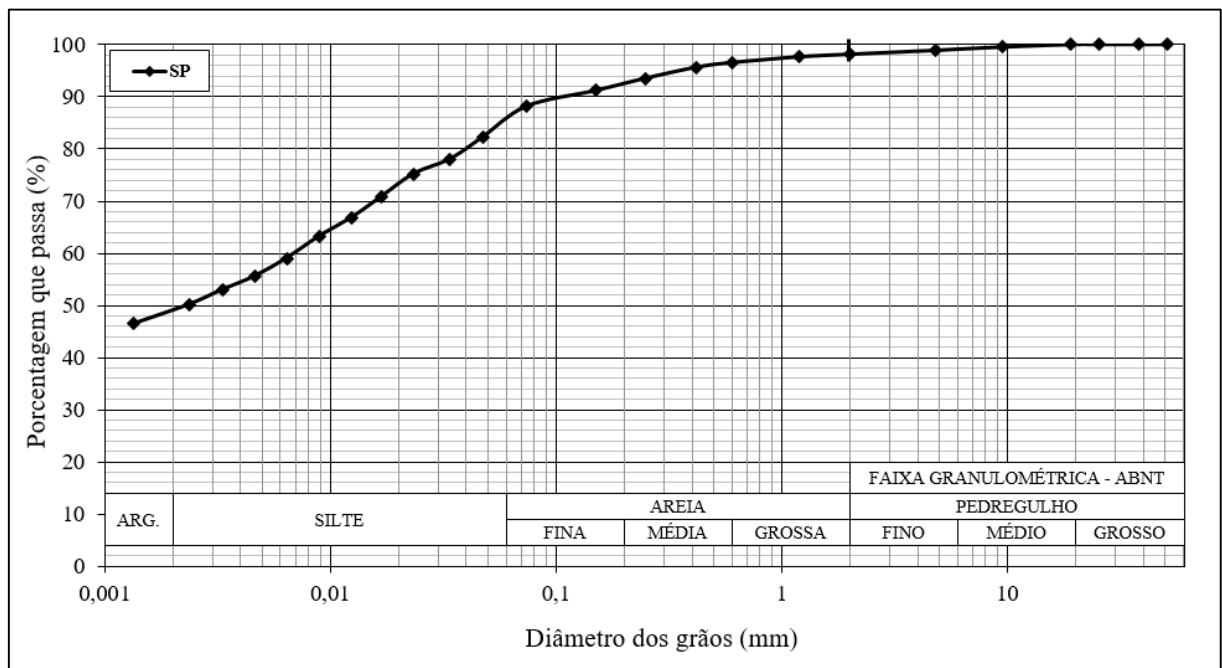
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos na fase de caracterização geotécnica, que envolve os ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e limites de *Atterberg*, além dos ensaios de compactação.

4.1.1 Análise Granulométrica

A curva granulométrica obtida para o solo puro a partir do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação é apresentada na Figura 30.

Figura 30: Curva granulométrica do solo puro.

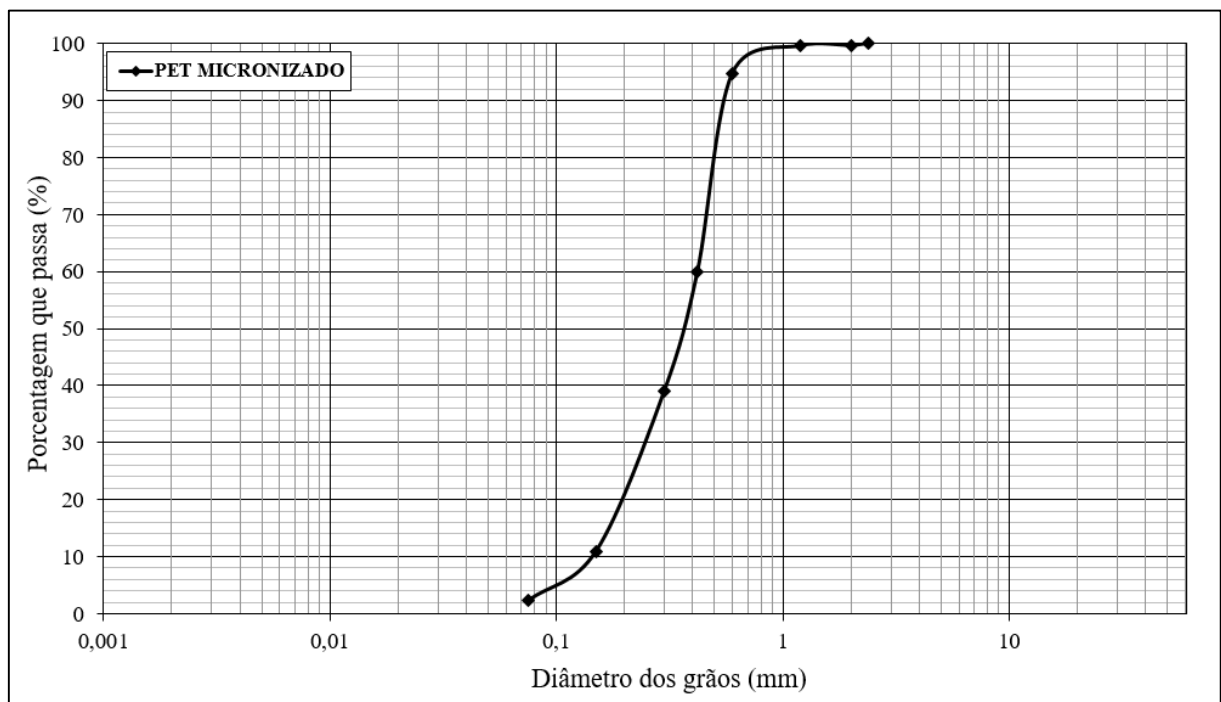


Fonte: AUTORA (2022)

Observando-se a curva granulométrica apresentada na Figura 30 constata-se que o solo empregado nesta pesquisa é constituído de matriz predominantemente fina, contendo as seguintes frações: 49,08% de argila, 36,92% de silte, 12,13% de areia e 1,87% de pedregulho. Conforme já mencionado, trata-se de um solo fino, com mais de 88% passando na peneira nº 200, sendo classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como CH, isto é, uma argila de alta plasticidade. Com base na classificação *Transportation Research Board* (TRB), pode-se afirmar que o solo em estudo pertence ao Grupo A-7-6, apresentando índice de grupo (IG) igual a 20, cujo comportamento que se prevê está entre sofrível a mau para utilização como subleito.

O ensaio de granulometria realizado por peneiramento com o PET micronizado forneceu a curva granulométrica apresentada na Figura 31. Da curva obtida observa-se que o PET micronizado utilizado nesta pesquisa é composto por partículas com dimensões variando entre 0,075 e 2,2 mm. Além disso, nota-se do gráfico que se trata de um material de granulometria uniforme.

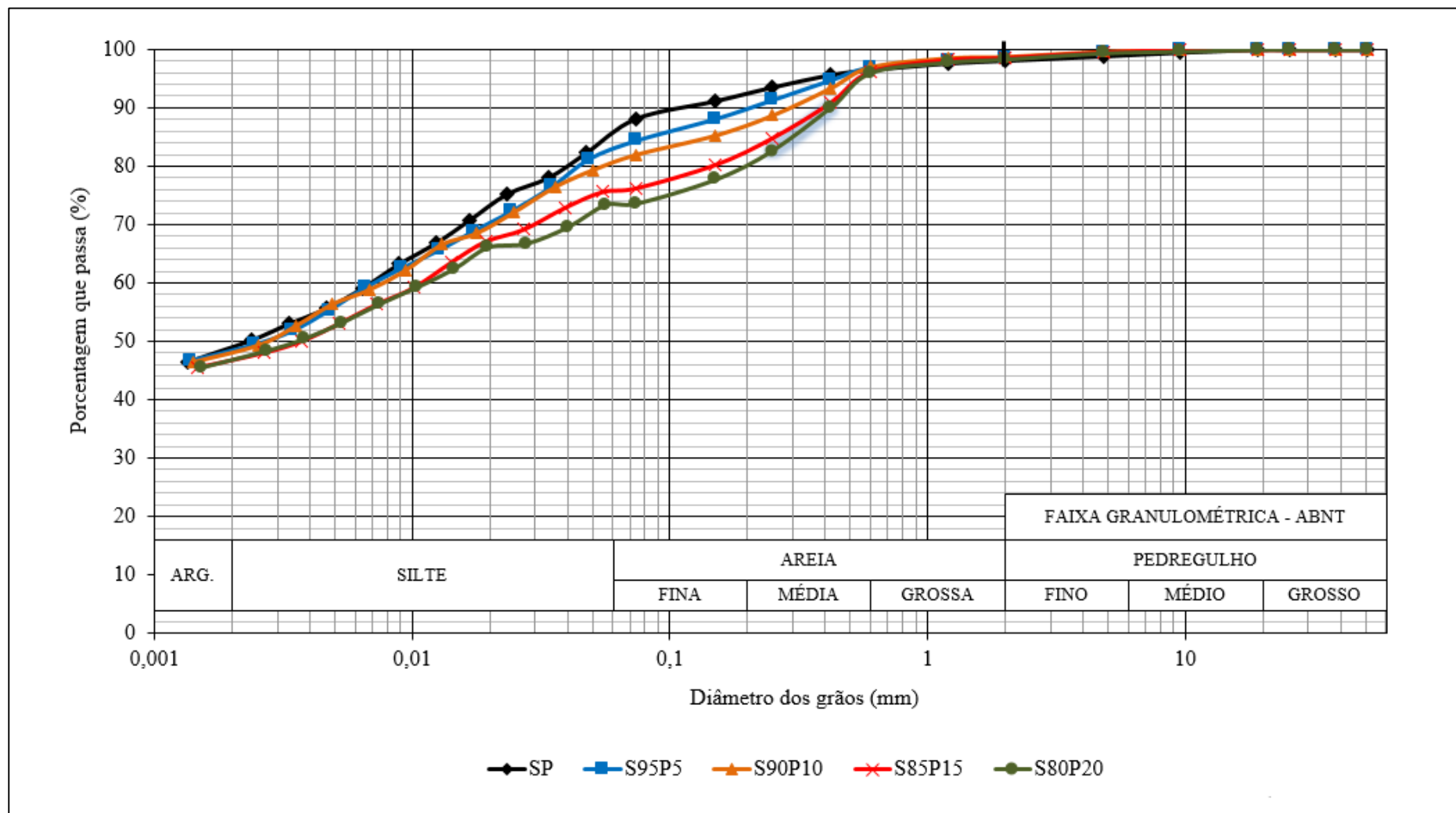
Figura 31: Curva granulométrica do PET micronizado.



Fonte: AUTORA (2022)

As curvas granulométricas obtidas para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, bem como a do solo puro para efeito de comparação são apresentadas na Figura 32.

Figura 32: Curvas granulométricas do solo puro e das misturas solo-PET micronizado contendo os teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco.



Fonte: AUTORA (2022)

A curva granulométrica (S95P5) obtida para a mistura solo-PET micronizado, contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco, mostra que essa mistura é constituída das seguintes frações, conforme NBR 6502 (ABNT, 2022): 48,47% argila, 35,03% de silte, 14,98% de areia e 1,52% de pedregulho. De acordo com a SUCS esta mistura não sofre alteração em relação ao solo puro, continuando a ser classificada como CH, e, analogamente, Grupo A-7-6 com IG igual a 20 de acordo com o TRB.

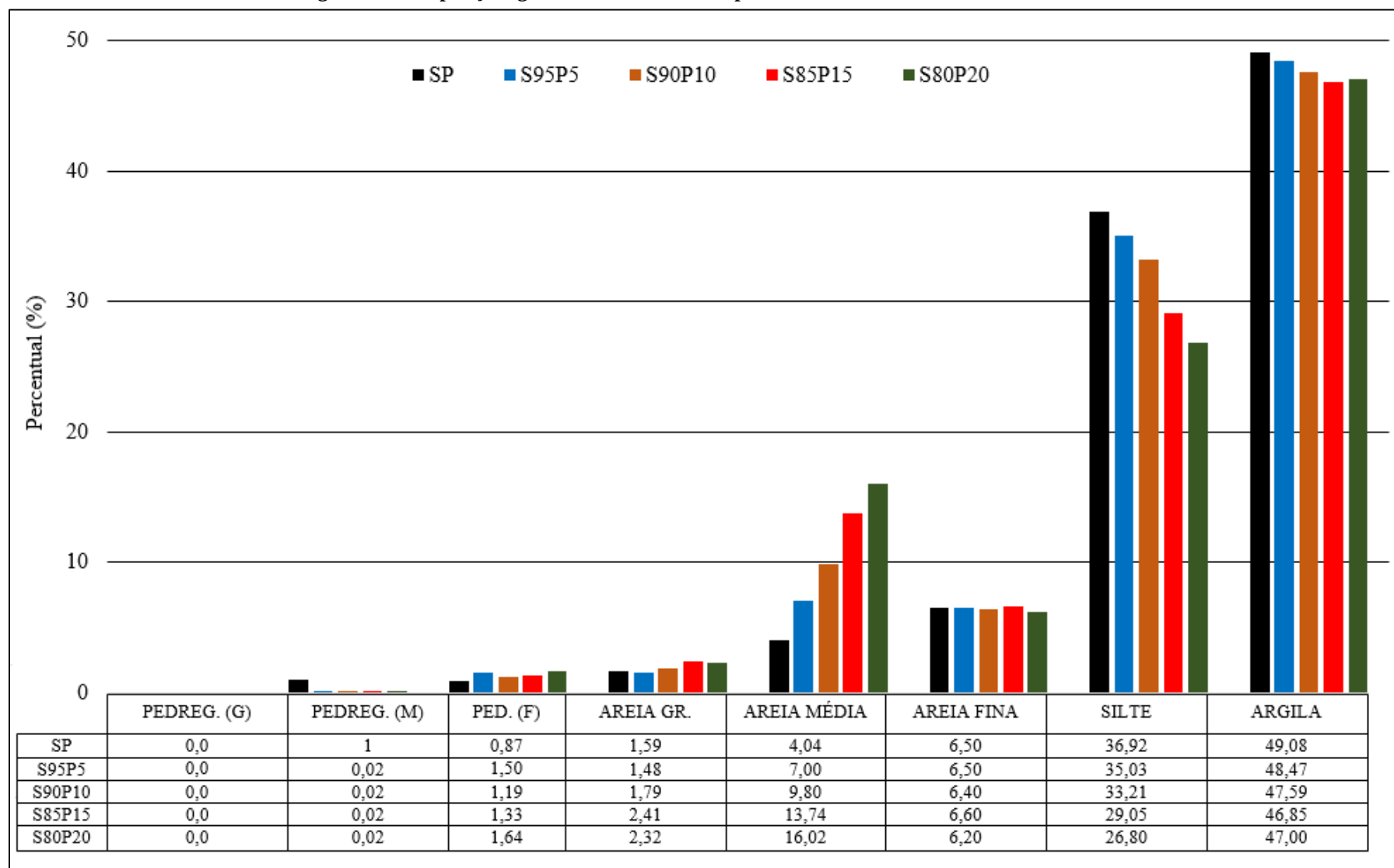
Da mesma forma, conforme se pode ver nas curvas da Figura 32, todas as demais misturas solo-PET micronizado, contendo 10%, 15% e 20% do reforço em relação à massa de solo seco também não diferiram, em termos de classificação geotécnica, do solo puro. Ocorre apenas uma pequena variação nos percentuais de argila, silte e demais constituintes, mas permanecendo como solo CH e A-7-6, para os sistemas SUCS e TRB, respectivamente.

No geral, as misturas ficaram com percentuais de argila entre 46,9 e 48,5%, contra 49,1% do solo puro, enquanto que a fração silte das misturas situaram-se entre 26,8% e 35%, contra aproximadamente 37%, para o solo puro.

Portanto, após análise das curvas obtidas para as misturas solo-PET e comparação com a do solo puro, nota-se que a adição de PET micronizado ao solo argiloso não gera mudança na composição granulométrica da amostra que resulte em alteração considerável na classificação do solo. Cabendo destacar que só a partir da adição de 10% de PET, o reforço adicionado altera discretamente a subclassificação do solo de argila de alta plasticidade para argila de alta plasticidade com areia.

Pode-se destacar ainda, conforme mostrado na Figura 33, que à medida que é aumentado o teor de PET micronizado na mistura as frações de argila são levemente diminuídas, ao passo que a fração silte decresce mais acentuadamente. Quanto à fração areia, a parte de areia fina quase não sofre alteração, a de areia média cresce de forma significativa, e a areia grossa é pouco alterada. Finalmente as frações de pedregulho são pouco alteradas, como era de se esperar, visto que as dimensões do reforço adicionado variam entre 0,075 e 2,2 mm.

Figura 33: Composições granulométricas do solo puro e das misturas solo-PET micronizado.

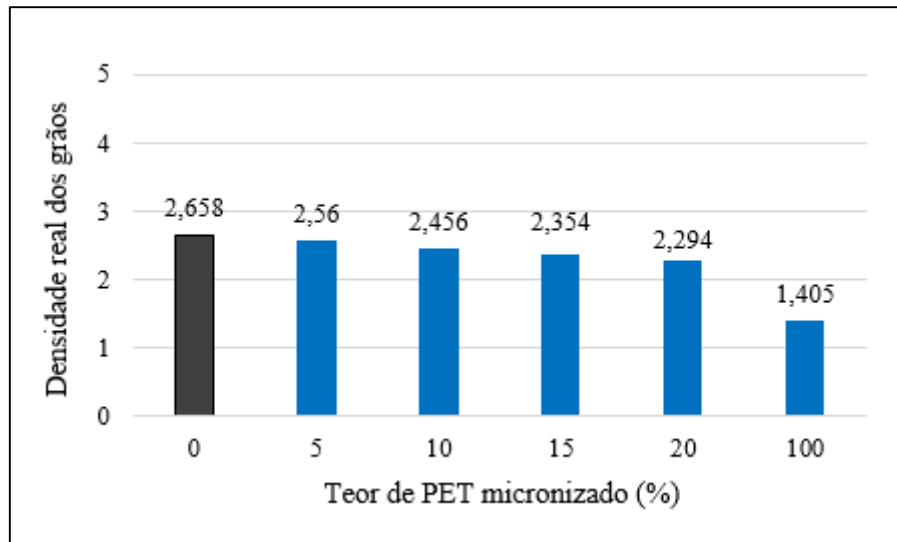


Fonte: AUTORA (2022)

4.1.2 Densidade Real dos Grãos

Os valores de densidade real dos grãos obtidos para o solo puro, para o PET micronizado e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores definidos no programa experimental desta pesquisa são apresentados na Figura 34.

Figura 34: Valores de densidade real dos grãos do solo puro, do PET micronizado e das misturas solo-PET micronizado.



Fonte: AUTORA (2022)

Da Figura 34, nota-se que o PET micronizado possui densidade real dos grãos inferior à do solo puro, ou seja, trata-se de um material mais leve. Como consequência, constata-se também que todas as misturas solo-PET apresentaram densidades menores do que a do solo puro, ao mesmo tempo em que quanto maior o teor de PET micronizado na mistura, menor foi o valor da densidade obtida, o que demonstra a coerência dos dados obtidos, uma vez que ao substituir uma massa de solo por um material mais leve, a mistura terá a sua densidade real reduzida. Estes resultados corroboram o que foi verificado por De Carvalho (2019) e Martínez *et al.* (2016).

4.1.3 Limites de Atterberg

Os valores de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) obtidos dos ensaios com o solo puro e com as misturas solo-PET micronizado, contendo o material polimérico

reciclado nos teores estabelecidos nesta pesquisa, bem como os respectivos índices de plasticidade (IP) estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Valores dos limites de Atterberg obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado.

Material	LL	LP	IP
SP	62	27	35
S95P5	56	26	30
S90P10	53	24	29
S85P15	53	25	28
S80P20	50	24	26

Fonte: AUTORA (2022)

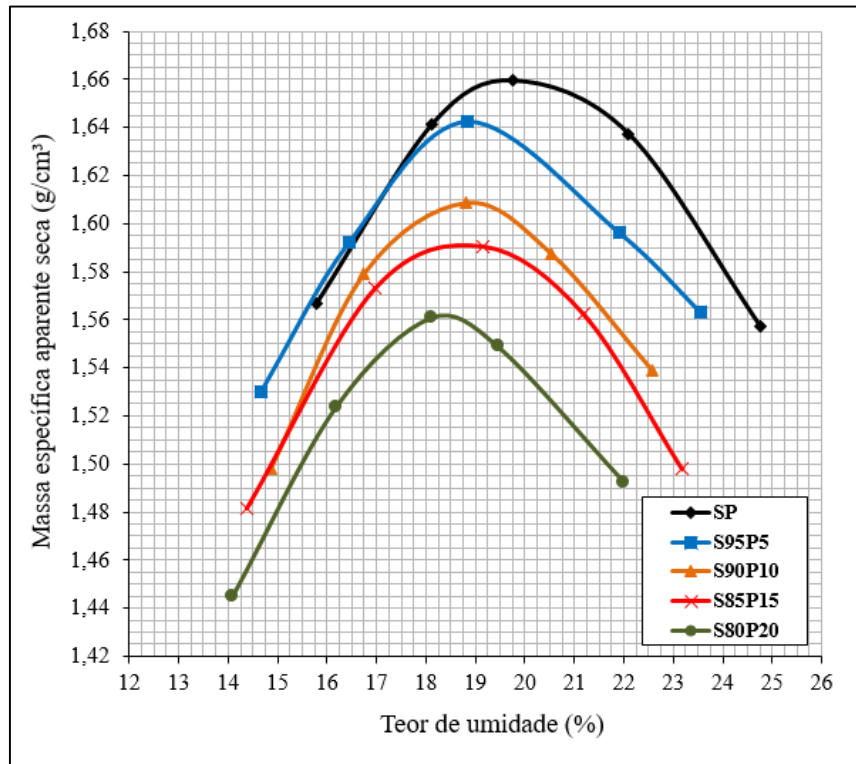
De acordo com os valores dos índices de plasticidade mostrados na Tabela 13, observa-se que o solo puro possui elevada plasticidade, mas à medida que o PET micronizado foi adicionado ao solo os valores de limite de liquidez e plasticidade sofrem redução, fazendo com que os valores do IP das misturas sejam inferiores ao do solo puro. Conforme já observado, este fato está associado ao comportamento granular do PET micronizado. Porém, para os teores de PET utilizados nesta pesquisa, as misturas ainda continuaram apresentando alta plasticidade. O fato desta forma de PET promover redução no IP da matriz em que ele é adicionado também foi observado por De Carvalho (2019).

4.1.4 Ensaios de Compactação

4.1.4.1 Misturas solo-PET micronizado x solo puro

As curvas de compactação obtidas para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores pré-estabelecidos para esta pesquisa, bem como a do solo puro, para efeito de comparação, estão apresentadas na Figura 35. Os valores dos parâmetros ótimos obtidos, ou seja, massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo são mostrados na Tabela 14.

Figura 35: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET micronizado.



Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 14: Parâmetros ótimos de compactação obtidos para o solo puro e para cada mistura solo-PET micronizado.

Material	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	Teor de umidade ótimo (%)
SP	1,660	19,6
S95P5	1,644	18,8
S90P10	1,609	18,8
S85P15	1,592	18,6
S80P20	1,563	18,4

Fonte: AUTORA (2022)

Da Figura 35 e Tabela 14 verifica-se que a adição de PET micronizado à matriz argilosa gerou uma leve redução no valor da massa específica aparente seca máxima, de maneira que quanto maior o teor de PET inserido, menores são os valores encontrados para este parâmetro. Isto pode ser justificado pelo fato já comentado de que a massa específica do PET é inferior à do solo e, conseqüentemente pela maior quantidade de material com baixa densidade inserido na mistura. Vale ressaltar que a massa específica aparente seca máxima é influenciada tanto pela densidade quanto pela quantidade de componentes presentes no compósito, conforme revelado por Lucarelli (2018).

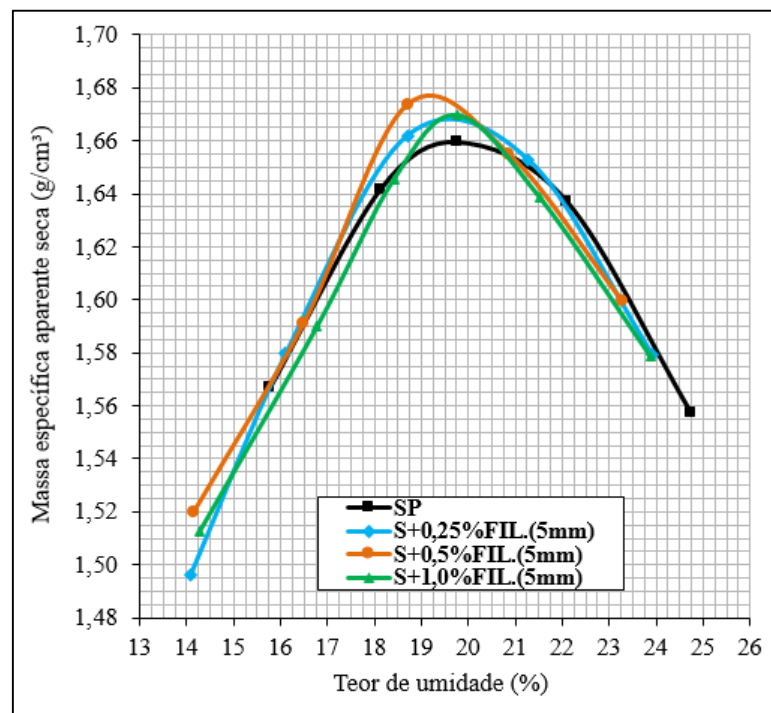
Observa-se também que ocorre uma discreta redução do teor de umidade ótimo à medida que o PET micronizado é adicionado ao solo, o que pode estar associado à substituição de uma massa de solo por um material que não absorve água (o material plástico). A maior redução verificada foi para a mistura S80P20, em que a massa específica aparente seca máxima reduziu em 5,8%, ao passo que a umidade ótima diminuiu em 6,1% em relação ao solo puro.

De modo geral, o comportamento observado para os parâmetros de compactação estão de acordo com os resultados obtidos por De Carvalho (2019), Louzada; Malko; Casagrande (2019) e Martínez *et al.* (2016).

4.1.4.2 Misturas solo-PET filete x solo puro

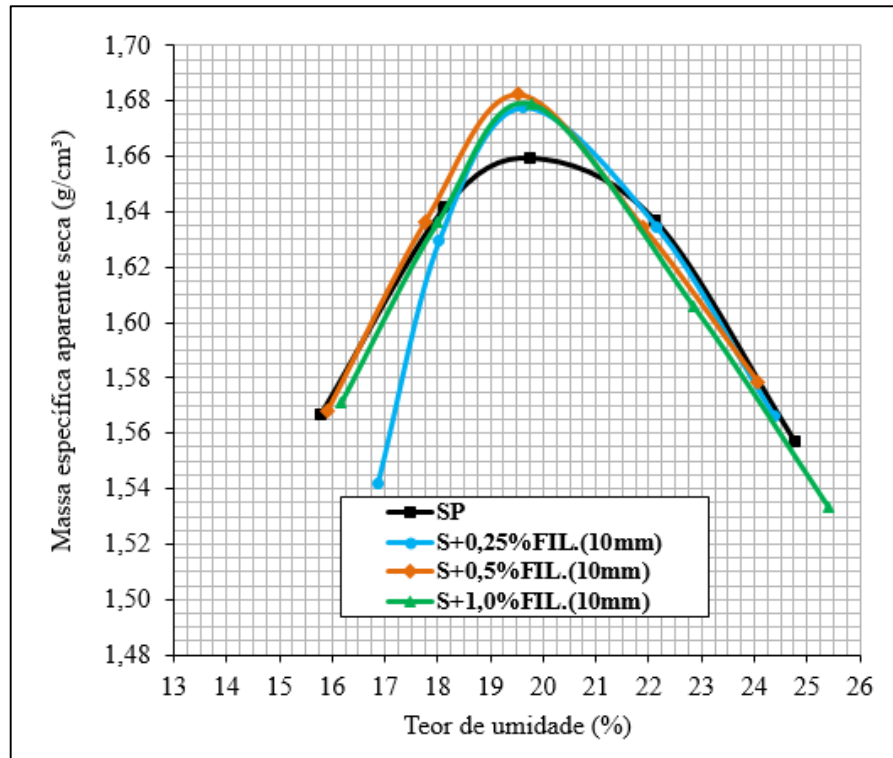
As curvas de compactação obtidas para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado em diferentes comprimentos e nos teores de 0,25, 0,5 e 1,0% em relação à massa de solo seco, bem como a do solo puro para efeito de comparação, são apresentadas nas Figuras 36 a 38 para os comprimentos de 5, 10 e 15 mm, respectivamente. Os valores dos parâmetros ótimos obtidos, ou seja, massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo para cada mistura e para o solo puro são mostrados na Tabela 15.

Figura 36: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET filete contendo o material polimérico nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e comprimento de 5mm.



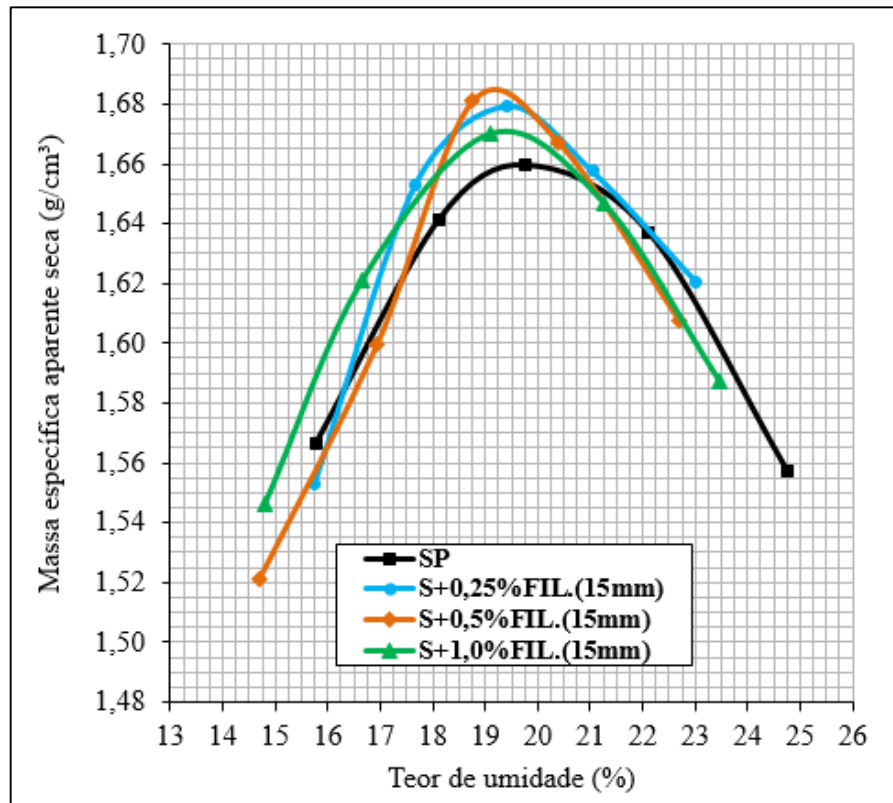
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 37: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET filete contendo o material polimérico nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e comprimento de 10mm.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 38: Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo-PET filete contendo o material polimérico nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e comprimento de 15mm.



Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 15: Parâmetros ótimos de compactação obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo os teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com 5, 10 e 15 mm de comprimento.

Material	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	Teor de umidade ótimo (%)
SP	1,660	19,6
S+0,25%FIL.(5mm)	1,668	19,6
S+0,5%FIL.(5mm)	1,678	19,2
S+1,0%FIL.(5mm)	1,670	19,6
S+0,25%FIL.(10mm)	1,678	19,6
S+0,5%FIL.(10mm)	1,682	19,5
S+1,0%FIL.(10mm)	1,679	19,6
S+0,25%FIL.(15mm)	1,679	19,4
S+0,5%FIL.(15mm)	1,686	19,2
S+1,0%FIL.(15mm)	1,671	19,4

Fonte: AUTORA (2022)

De acordo com os dados mostrados na Tabela 15, bem como das curvas obtidas, (Figuras 36, 37 e 38), observa-se que a adição de PET filete ao solo argiloso gera discretos aumentos na massa específica aparente seca máxima. Presume-se que tais aumentos estejam associados ao fato dos filetes ocasionarem um melhor rearranjo dos grãos do solo sob o processo de compactação, contribuindo dessa forma, para que ocorra incrementos de massa de grãos sólidos por volume unitário da mistura.

Nota-se também que quanto maior o teor de PET filete inserido na matriz, maior é o discreto incremento observado na massa específica aparente seca máxima obtida. Porém, verifica-se que isso só ocorre até o percentual de 0,5%, de forma que para percentuais acima deste o parâmetro em questão decresce, embora continue maior que o do solo puro. Esta redução pode ser justificada pelo fato de um teor maior, (no caso, 1,0%) não mais contribuir tão efetivamente para um melhor rearranjo dos grãos. Ou seja, para o percentual em questão, acredita-se que os filetes ao se apoiarem nos grãos do solo gerem vazios e comecem a restringir o acréscimo de massa de grãos sólidos no volume do compósito. Comportamento semelhante também foi observado por Lucarelli (2018).

Esta hipótese também está em concordância com os resultados obtidos por Acharyya *et al.* (2013), cujos autores afirmam que para um solo argiloso, tiras de PET contribuem para gerar incrementos na massa específica aparente seca máxima da matriz até um teor específico, sendo que após este, o reforço começa a gerar vazios na mistura devido à separação dos grãos do solo causada pelas tiras.

Além do efeito já mencionado relacionado ao percentual de filete, percebe-se que o comprimento destes também interfere na massa específica aparente seca da mistura. Contudo, verifica-se que para um mesmo percentual desse tipo de PET na mistura, quanto maior o comprimento, maior a massa específica aparente seca máxima obtida, exceto para o teor de 1,0% com comprimento de 15 mm. Desta forma, presume-se que estes aumentos estão associados ao aspecto de que um maior tamanho dos filetes podem resultar no melhor intertravamento e rearranjo das partículas para o solo em questão. Esta hipótese está em concordância com os resultados obtidos por Tang. *et al.* (2007), para os quais os reforços fibrosos funcionam como uma estrutura tridimensional, promovendo intertravamento das partículas do solo, sendo que essa interação física partículas-reforço é incrementada quanto maior for o comprimento da fibra.

Porém, vale destacar que para um determinado percentual de filete na mistura, o comprimento acaba reduzindo sua capacidade em gerar incrementos na massa específica, caso constatado para a mistura S+1,0%FIL.(15mm). Este comportamento também foi observado por Acharyya *et al.* (2013) e Peddaiah; Burman; Sreedeeep (2018) tanto para solo argiloso como para uma matriz arenosa.

Ainda é possível observar que a adição de PET filete ao solo argiloso provoca pouca ou nenhuma alteração nos valores do teor de umidade ótimo em comparação ao solo puro. Isto se deve, provavelmente, ao fato da massa dos filetes inserida na mistura ser muito baixa, que embora este material não absorva água, sua concentração é tão pequena que não consegue gerar alterações na umidade. Portanto, deve-se ressaltar que as misturas que apresentaram uma leve variação, estas se deram para um determinado teor de filete (0,5%), sendo elas: S+0,5%FIL.(5mm), S+0,5%FIL.(10mm) e S+0,5%FIL.(15mm).

O maior incremento na massa específica aparente seca máxima foi obtido para a mistura S+0,5%FIL.(15mm), que resultou em aumento deste parâmetro em 1,6% quando comparado ao solo puro.

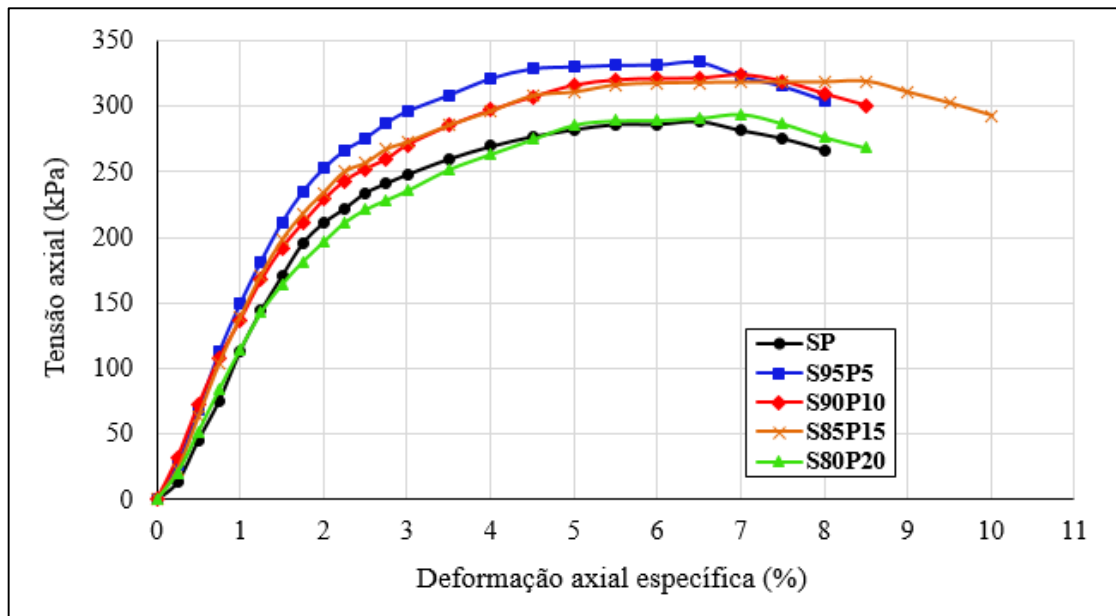
4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

4.2.1 Resistência à Compressão não Confinada

4.2.1.1 Ensaios realizados com o solo puro e com as misturas solo-PET micronizado

Na Figura 39 são apresentadas as curvas tensão-deformação obtidas para os valores médios dos três corpos de prova ensaiados para cada mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, bem como para o solo puro para efeito de comparação.

Figura 39: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado.



Fonte: AUTORA (2022)

Das curvas tensão-deformação obtidas, nota-se que a adição de PET micronizado ao solo argiloso resultou em aumento na tensão de pico das misturas em comparação à matriz não reforçada para todos os teores testados, exceto para a mistura com 20% do micronizado, para a qual a tensão de ruptura é levemente superior a do solo puro. Porém, analisando-se apenas as misturas, percebe-se que quanto maior o teor de PET na matriz, menor é a tensão de ruptura atingida. Do exposto, constata-se que embora este reforço contribua para gerar incrementos de resistência à compressão não confinada ao compósito, o fato da tensão axial máxima reduzir com o aumento do teor possivelmente está associado à quantidade do reforço inserido estar

acima da necessária para ocasionar um melhor desempenho mecânico ao material, o que faz com que o efeito do PET micronizado como reforço não seja potencializado.

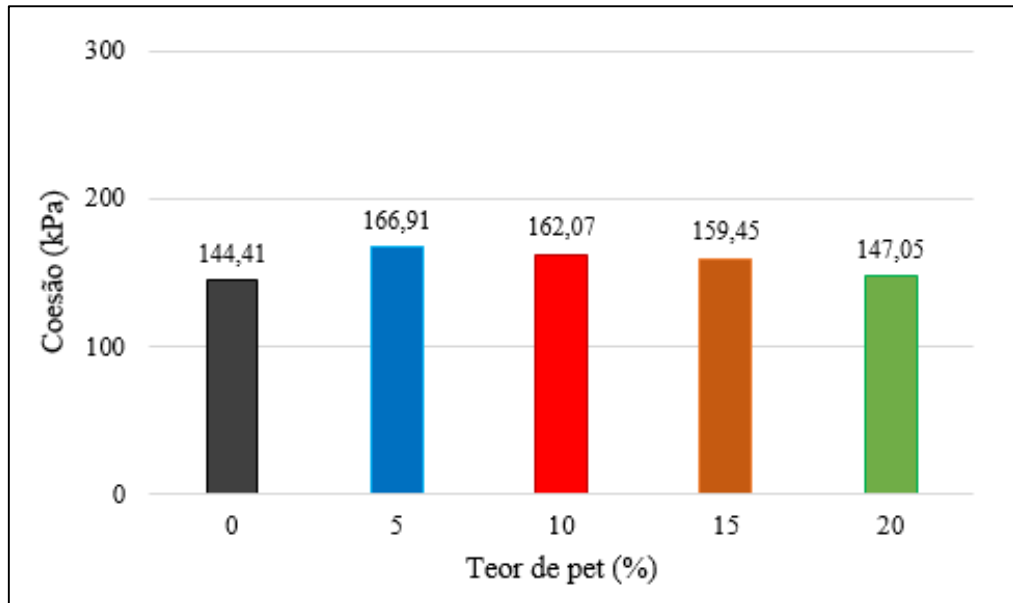
Comportamento semelhante foi observado por De Carvalho (2019) e Martínez *et. al* (2016) na realização de outros ensaios de resistência ao adicionar este tipo de PET como reforço de solos argilosos. Os autores mencionados afirmam que existe um teor ideal de reforço que confere um melhor comportamento mecânico ao material, mas que a partir deste, começa a ocorrer muitos contatos entre os grãos de PET e não entre a matriz e o reforço, o que faz reduzir a resistência da mistura.

É importante destacar também que o PET micronizado gera melhoria na ductilidade do solo, sendo que esse efeito é identificado a partir da adição de 10%, (mistura S90P10), e intensificado no teor de 15%, apesar de ocorrer redução para o percentual de 20%, (mistura S80P20). Dessa forma, verifica-se que o PET aumenta a capacidade do compósito de absorver energia. Porém, este efeito torna-se considerável para um teor específico. Assim como para o solo puro, a mistura S95P5 atingiu sua tensão de ruptura para 6,5% de deformação. Mas as misturas com maiores teores de PET se deformaram mais até à ruptura, como foi o caso das misturas S90P10 e S80P20, que sofreram deformações de ruptura igual a 7,0%, enquanto que a mistura S85P15 rompeu com 8,5% de deformação.

De modo geral, nota-se que dos teores testados existe um que melhor confere incrementos de resistência à compressão não confinada ao compósito e outro que embora não gere o maior ganho de resistência, contribui de forma mais efetiva na melhoria da ductilidade quando comparados ao solo puro. Estes teores correspondem às misturas S95P5 e S85P15, respectivamente.

Na Figura 40 são apresentados os valores de coesão obtidos para cada mistura solo-PET micronizado ensaiada, bem como o do solo para efeito de comparação.

Figura 40: Coesão obtida para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco.



Fonte: AUTORA (2022)

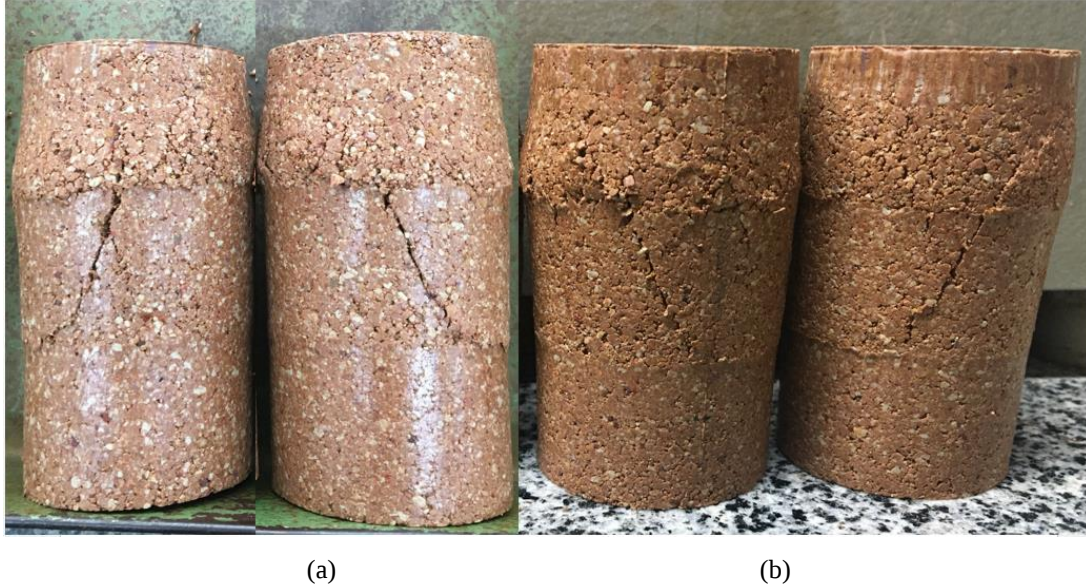
Da Figura 40, nota-se que a coesão do solo é alterada com a adição do teor de PET micronizado, ou seja, os valores obtidos para as misturas superam o do solo puro. A Figura 40 revela que, conforme já identificado nas curvas tensão-deformação, 5% de PET é o teor que confere maior incremento de coesão ao compósito, gerando um aumento de 15,6% em relação ao solo puro. Logo, para o solo em questão, este é o teor mais adequado para promover um melhor comportamento mecânico ao material.

O resultado obtido está de acordo com o comportamento observado por De Carvalho (2019), cujo autor comprova que os incrementos na coesão para este tipo de PET são decorrentes da formação de grumos compostos por partículas de solo aderidas às partículas maiores e menores do PET, o que faz com que ocorra uma maior interligação dos grãos e, consequentemente uma maior resistência coesiva seja obtida. Além disso, o autor afirma que a partir de um determinado teor, considerado como ideal, começa a ocorrer mais contatos entre os grãos de PET, minimizando a formação e resistência dos grumos, o que resulta em menores valores de coesão.

Para ilustrar, na Figura 41 são mostrados corpos de prova testados com o solo puro, Figura 41 (a), e com a mistura solo-PET micronizado, contendo o material polimérico reciclado no teor de 5%, Figura 41 (b), após o rompimento. Observa-se que a adição deste tipo de PET na matriz argilosa não interfere na superfície de ruptura, mas ocasiona uma discreta redução na

profundidade da fissura formada. Infere-se que esta redução ocorre devido ao fato dos grãos de PET gerar um melhor rearranjo das partículas do solo.

Figura 41: Corpos de prova após rompimento; (a) solo puro; (b) solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5%.

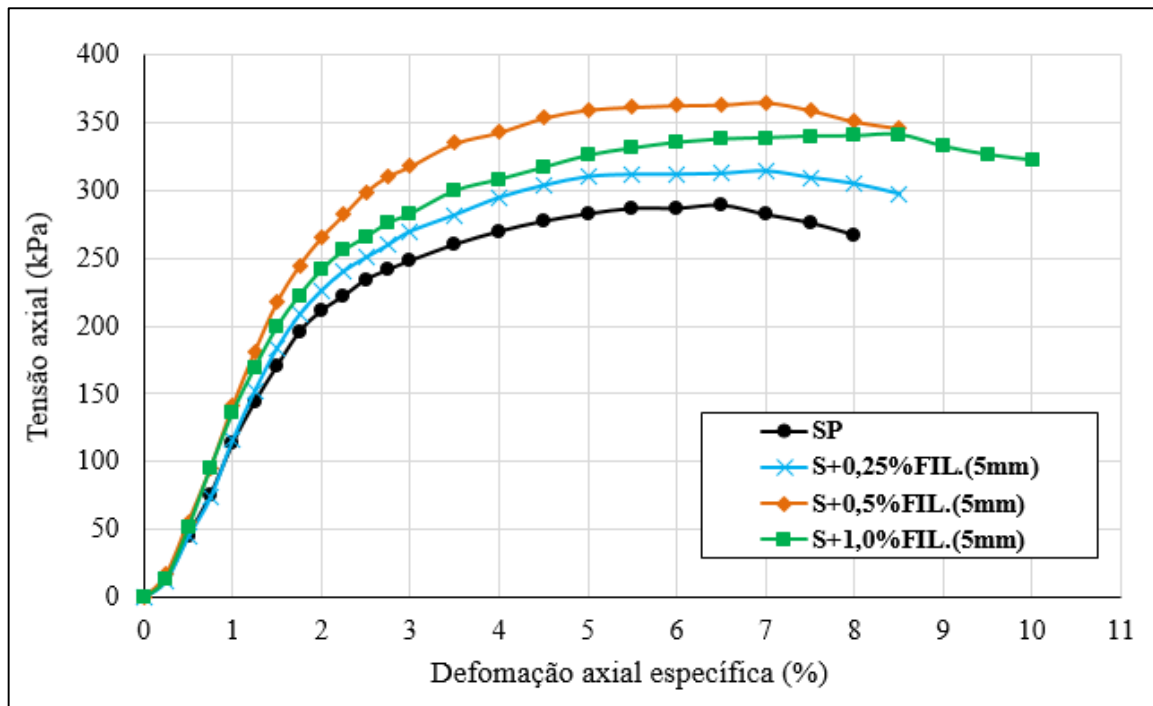


Fonte: AUTORA (2022)

4.2.1.2 Ensaios realizados com o solo puro e com as misturas solo-PET filete

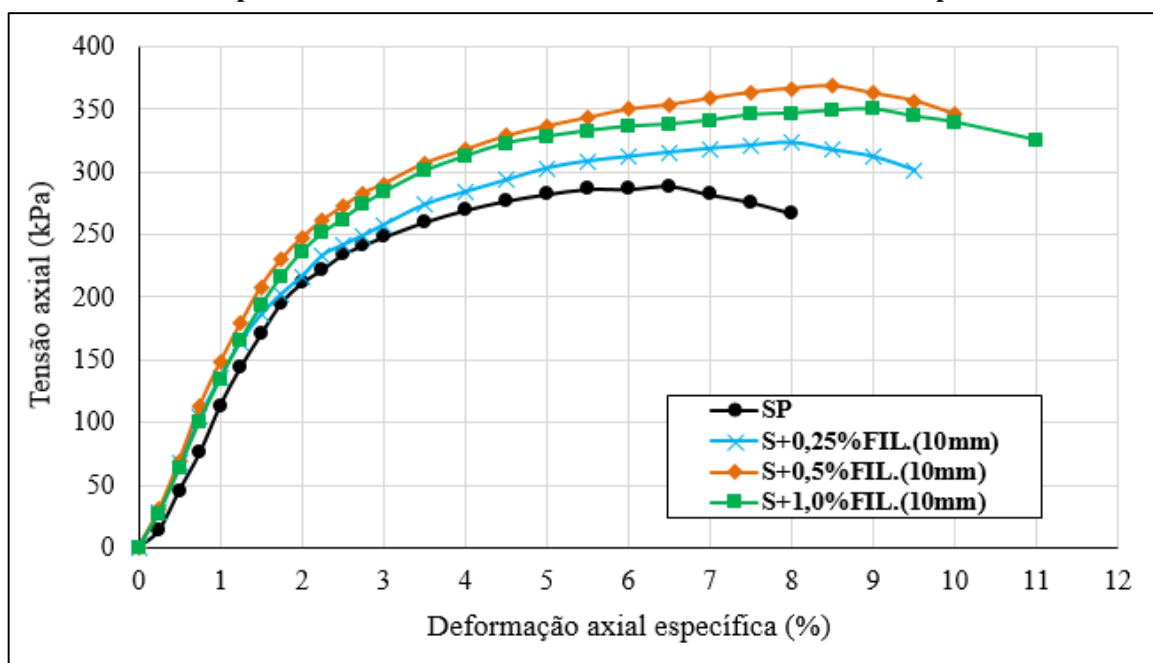
As curvas tensão-deformação obtidas para os valores médios dos três corpos de prova ensaiados para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado em diferentes comprimentos e nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% em relação à massa de solo seco, bem como para o solo puro para efeitos comparativos são apresentadas nas Figuras 42 a 44 para os comprimentos de 5, 10 e 15 mm, respectivamente.

Figura 42: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com comprimento de 5mm.



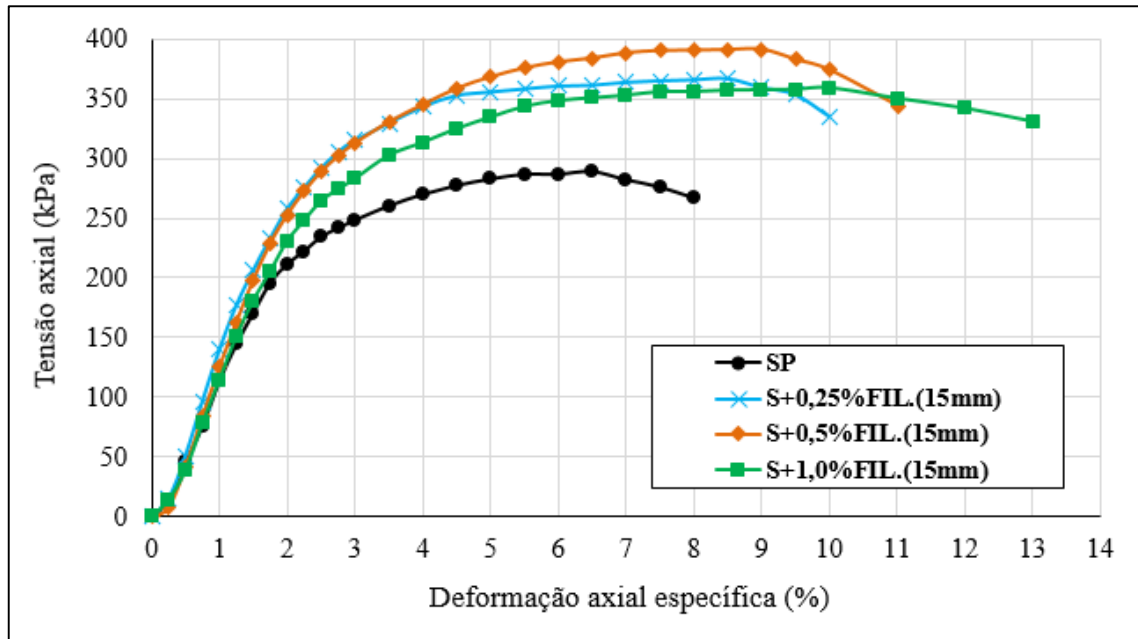
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 43: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com comprimento de 10mm.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 44: Curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% e com comprimento de 15mm.



Fonte: AUTORA (2022)

Conforme se pode observar nas Figuras 42 a 44, as curvas tensão-deformação obtidas indicam claramente que a adição de PET filete ao solo argiloso promoveu aumento na tensão de pico das misturas. Porém, observa-se que ocorre pouca variação na rigidez inicial das misturas em comparação ao solo puro. Embora nota-se o contrário para maiores deformações. Isto revela que a contribuição dos filetes é baixa para pequenas deformações e indica que à medida que as deformações plásticas começam a predominar no compósito, este tipo de reforço é mobilizado e contribui para o aumento da rigidez.

Este fato também foi observado por Li e Zornberg (2013) e está em concordância com a hipótese de McGown *et al.* (1978), em que os autores constataram que reforços fibrosos são mobilizados e agregam maior resistência ao solo quanto maior for a deformação imposta ao compósito. Esta constatação é corroborada ainda por Senéz e Casagrande (2016), cujos autores afirmam que as fibras começam a trabalhar como reforço no estado pós fissuração da matriz. Mas, além disso, Tran; Satomi; Takahashi (2018) afirmam que este fato é decorrente do aparecimento de forças de embricamento, ou seja, está associado à formação de uma rede de fibras/filetes na matriz que ocasiona um melhor comportamento mecânico do compósito.

Para os teores e comprimentos testados nesta pesquisa, a tensão de ruptura das misturas foi sempre superior à do solo puro. Atribui-se isto à hipótese de que tal aumento da resistência à compressão não confinada possivelmente esteja associado ao fato dos filetes gerarem intertravamento dos grãos através dos contatos das partículas de solo com os filetes. Pesquisas

realizadas por Senez e Casagrande (2016) e Peddaiah; Burman; Sreedeeep (2018) comprovam a capacidade de fibras e tiras de PET gerarem intertravamento dos grãos do solo.

Ainda em relação às Figuras 42 a 44, destaca-se que o aumento na tensão de ruptura das misturas se dá de forma crescente em relação ao solo puro, mas, para o percentual de 1,0%, ocorreu uma situação inversa em comparação à mistura com 0,5% de filete. Presume-se que isso ocorre devido ao fato deste teor (1,0%) se encontrar acima do ideal para o solo em questão. Ou seja, que esta concentração comece a gerar muitos contatos entre os filetes dentro da mistura e não entre a matriz e o reforço, gerando assim vazios e reduzindo os incrementos de resistência obtidos. Vale frisar que resultados análogos também foram observados e justificados desta forma por Acharyya *et al.* (2013) e Zukri; Nazir; Mender (2017).

Nota-se que para todos os teores e comprimentos testados a resistência à compressão não confinada é obtida para maiores deformações quando comparadas ao solo puro. Infere-se que esta melhoria na resistência também esteja associada a melhor configuração dos grãos e intertravamento causado pelos filetes.

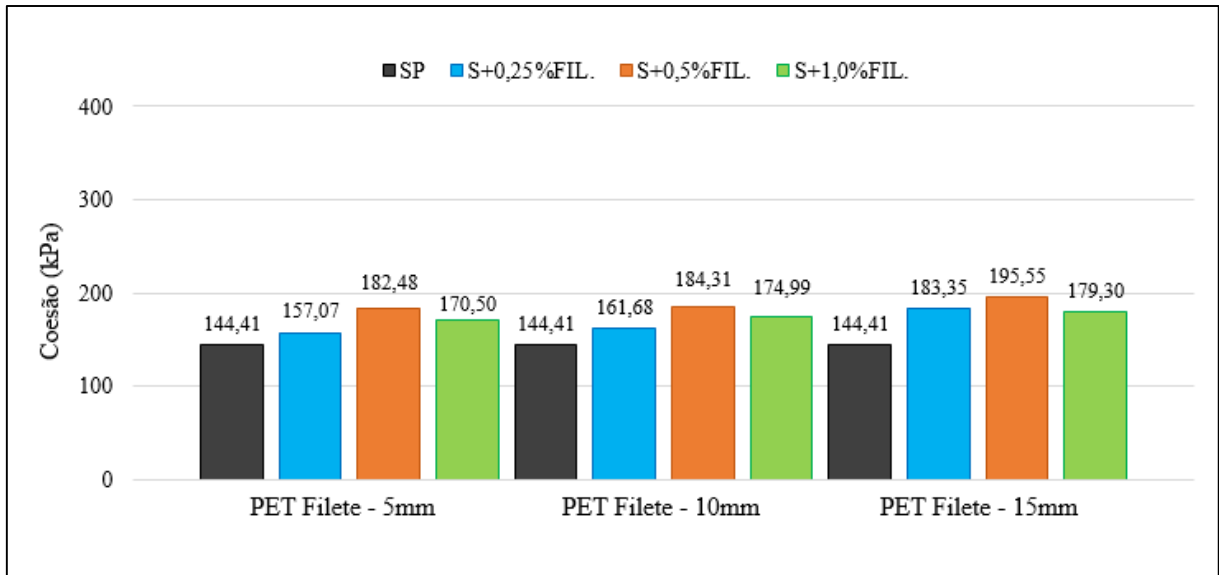
Os dados analisados indicam que o PET filete aumenta a capacidade do compósito em absorver energia e, conseqüentemente gera melhoria na ductilidade do solo argiloso. No entanto, observou-se que quanto maior o teor do reforço inserido na matriz, maior foi a ductilidade obtida, exceto para a mistura S+0,5%FIL.(5mm) que coincidiu com a S+0,25%FIL.(5mm). Além disso, percebe-se também que este efeito é potencializado quanto maior o comprimento do filete utilizado. O efeito observado do reforço está em concordância com os resultados obtidos por Tran; Satomi; Takahashi (2018) e comprova a hipótese de Consoli *et al.* (2002).

Outro ponto analisado é o fato de que para um mesmo teor, quanto maior o comprimento do filete inserido na matriz, maior a resistência à compressão não confinada obtida. Portanto, ainda para um mesmo teor, a ductilidade é melhorada quanto maior o comprimento do filete.

Assim como observado para as misturas solo-PET micronizado, nota-se que dos teores e comprimentos testados existe uma combinação teor-comprimento de PET filete que melhor confere incrementos de resistência à compressão não confinada ao compósito e outra que embora não gere o maior ganho de resistência, contribui de forma mais efetiva na melhoria da ductilidade. Essas combinações correspondem às misturas S+0,5%FIL.(15mm) e S+1,0%FIL.(15mm).

Na Figura 45 são apresentados os valores de coesão obtidos para as misturas solo-PET filete ensaiadas, bem como o do solo puro para efeito de comparação.

Figura 45: Valores de coesão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 0,25; 0,5 e 1,0% em relação à massa de solo seco e com os comprimentos de 5, 10 e 15mm.



Fonte: AUTORA (2022)

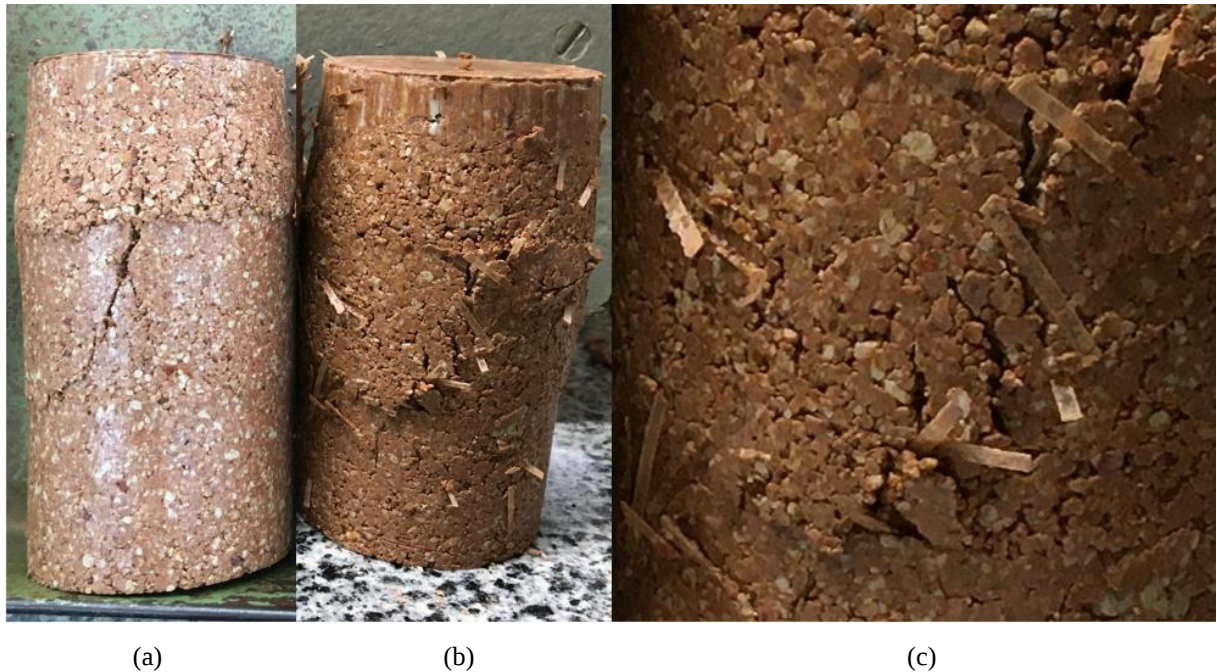
Da Figura 45 nota-se que a coesão da mistura é influenciada pelo teor e pelo comprimento do filete, o que também foi constatado por Acharyya *et al.* (2013) e Zukri; Nazir; Mender (2017). Conforme pode ser observado na Figura 45 e já identificado nas curvas tensão-deformação, a combinação teor de 0,5% e comprimento de 15 mm, mistura S+0,5%FIL.(15mm), foi a que conferiu o maior incremento na resistência coesiva da mistura, ocasionando um aumento de 35,4% na coesão em relação ao solo puro. Logo, para o solo em questão, este é o teor e o comprimento mais adequado para proporcionar um melhor desempenho mecânico ao material. De qualquer forma, os gráficos mostram que para qualquer dos comprimentos de filete testados, o percentual de 0,5% sempre resulta no maior valor de coesão.

Na Figura 46 são mostrados corpos de prova testados com o solo puro, Figura 46 (a), e com a mistura solo-PET filete, contendo o material polimérico reciclado no teor de 1,0% e comprimento de 15 mm, Figura 46 (b), após o rompimento. Observa-se que a adição deste tipo de PET na matriz não impede a formação de fissuras, mas à medida que confere ganho de resistência coesiva, a propagação da fissura é levemente reduzida.

Inferese que este fato esteja associado aos filetes funcionarem como uma barreira à superfície das fissuras, Figura 46 (c). Ou seja, acredita-se que os filetes ocasionam uma espécie de ancoragem na superfície das fissuras impedindo sua abertura e proporcionando uma melhor distribuição das solicitações, gerando assim, melhoria nas propriedades mecânicas do

compósito no estado pós-fissuração. Esta hipótese está em concordância com os resultados obtidos por Lucarelli (2018) e foi comprovada por Tang *et al* (2007) ao verificar que fibras ao serem utilizadas como reforço de um solo argiloso geram pontes de transferência e absorvem parte das solicitações, minimizando assim a superfície da fissura formada.

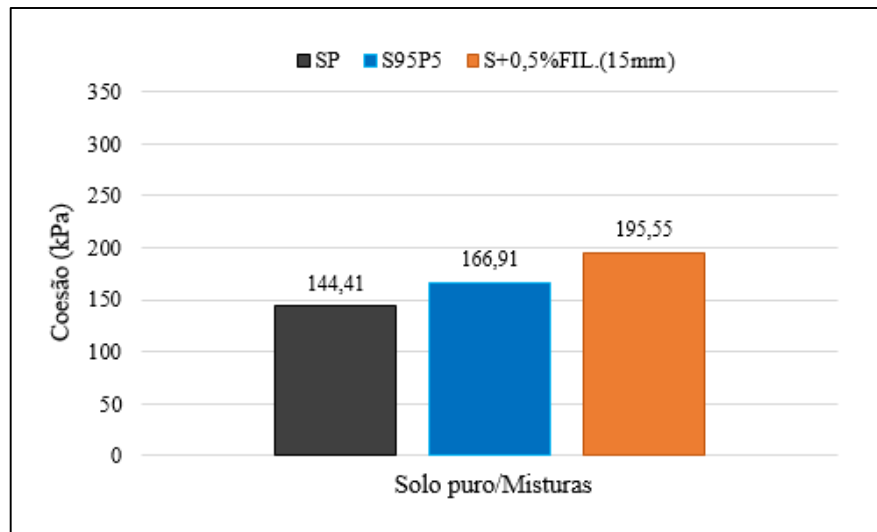
Figura 46: Corpos de prova após rompimento: (a) solo puro; (b) solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 1,0% e comprimento de 15mm; (c) superfície da fissura do corpo de prova solo-PET levemente reduzida.



Fonte: AUTORA (2022)

Na Figura 47 são comparados os valores de coesão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o teor e a combinação teor-comprimento identificados como os mais adequados para o solo analisado.

Figura 47: Comparação dos valores de coesão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5%, respectivamente, em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm.



Fonte: AUTORA (2022)

De acordo com os valores de coesão apresentados na Figura 47, comparando-se os incrementos de resistência coesiva ocasionados por cada tipo de PET ao ser adicionado à matriz argilosa, verifica-se que para o solo em questão o PET filete foi capaz de promover maior aumento no valor da coesão da mistura em relação ao solo puro quando comparado ao PET micronizado. Dos dados, conclui-se que a coesão obtida da mistura com PET filete supera em 17,2% a coesão da melhor mistura solo-PET micronizado.

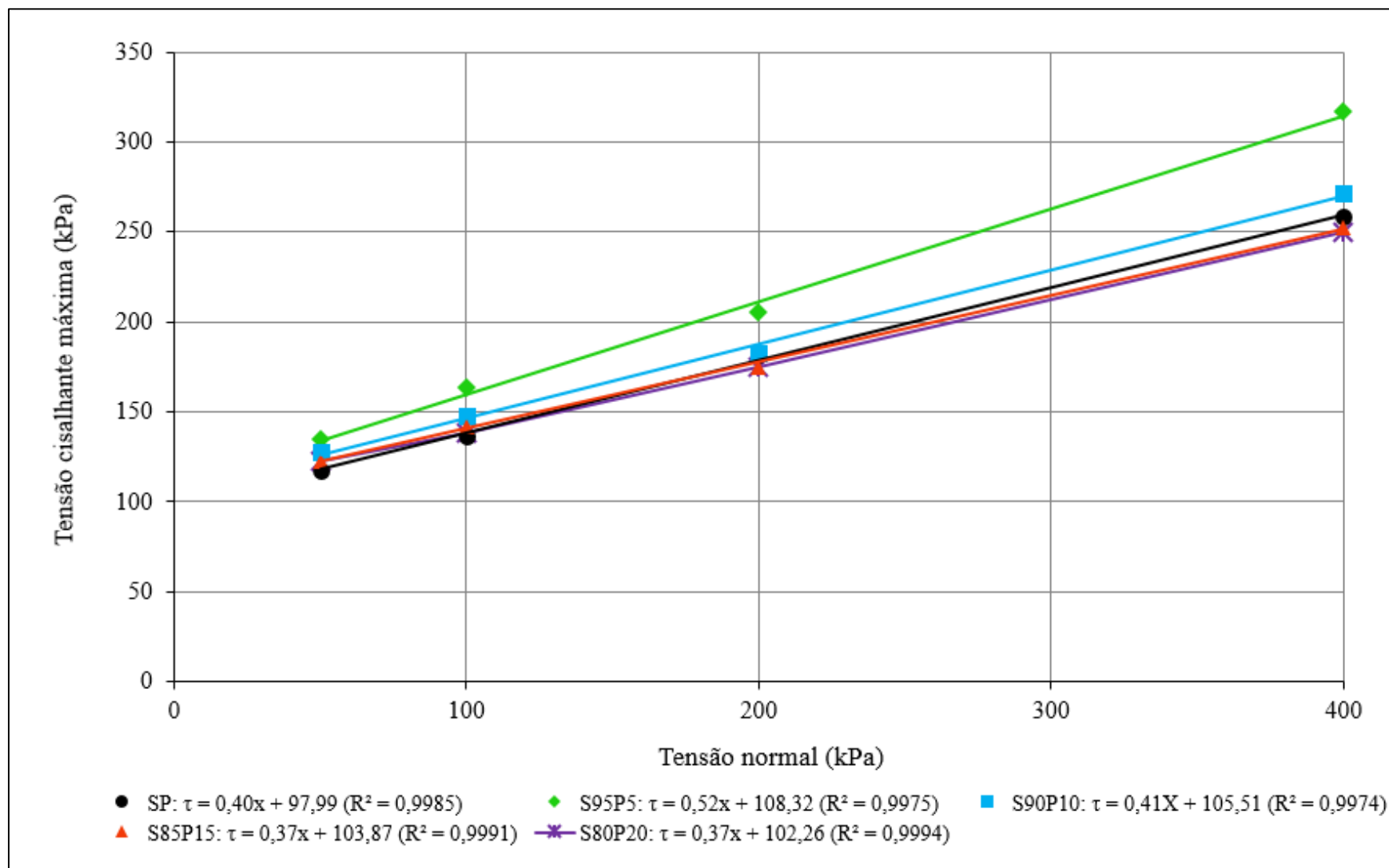
4.2.2 Cisalhamento Direto

4.2.2.1 Ensaios realizados em condição de umidade natural

4.2.2.1.1 Amostras do solo puro e solo-PET micronizado

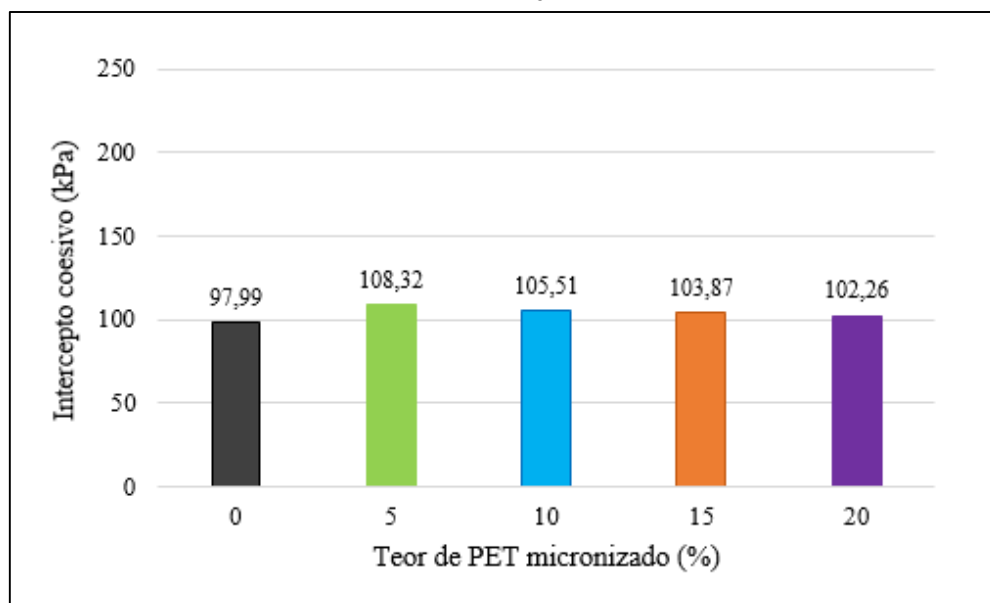
As envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb obtidas para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, para as tensões normais de 50, 100, 200 e 400 kPa, bem como a do solo puro para efeito de comparação são mostradas na Figura 48. Nas Figuras 49 e 50 são apresentados os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, respectivamente, obtidos para o solo puro e para as misturas já mencionadas.

Figura 48: Envoltórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



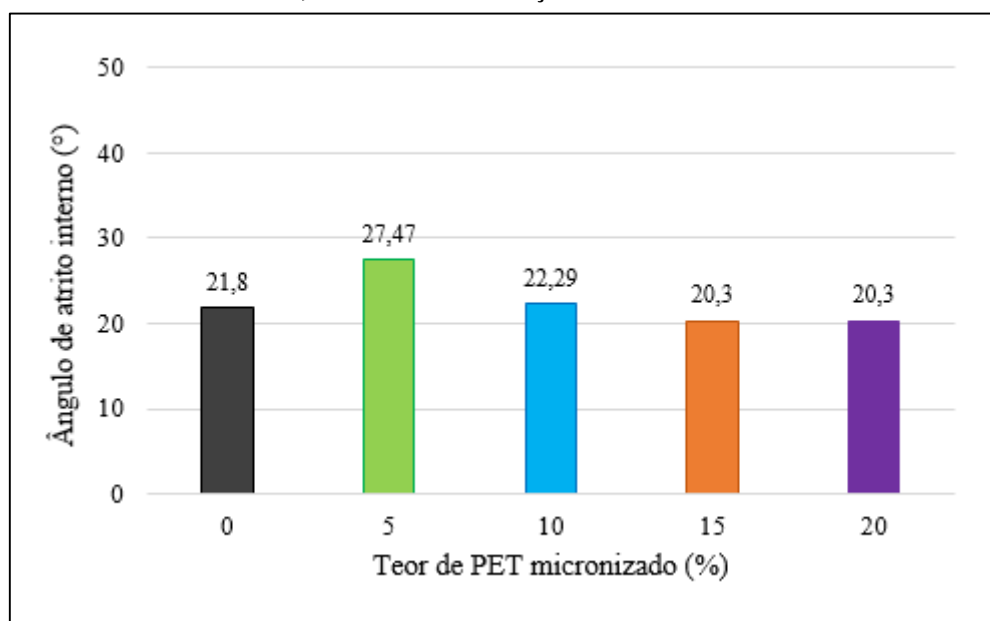
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 49: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 50: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

A partir da análise das envoltórias obtidas, assim como, dos dados apresentados na Figura 49, nota-se que o PET micronizado adicionado ao solo promoveu aumento no intercepto coesivo das misturas em relação à matriz não reforçada. Além disso, verifica-se que este

parâmetro reduz-se com o aumento do teor de PET, sendo que o maior incremento de resistência coesiva foi obtido para o teor de 5% (mistura S95P5).

O comportamento observado para este parâmetro está de acordo com os resultados obtidos por De Carvalho (2019), cuja justificativa quanto aos incrementos ocorridos com o intercepto coesivo já foi apresentada por ocasião das discussões referentes aos resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada.

Em relação aos gráficos mostrados na Figura 50, percebe-se que a adição de PET micronizado ao solo argiloso promove aumento nos valores de ângulo de atrito interno de algumas misturas em relação à matriz não reforçada. Neste caso, nota-se que os incrementos na parcela de atrito ocorrem apenas para os teores de 5 e 10%. Acima desses teores, os valores de ângulo de atrito interno sofrem uma leve redução, para cujas misturas os valores de ϕ ($20,3^\circ$) ficam inferiores ao valor obtido para o solo puro, aproximadamente 22° .

O efeito ocasionado por este tipo de PET no ângulo de atrito do solo analisado está em concordância com os resultados da literatura, a exemplo de Louzada; Malko; Casagrande (2019) e Martínez *et al.* (2016). Os autores mencionados afirmam que os incrementos neste parâmetro até um determinado teor, são decorrentes de uma melhoria no tamanho do grão gerada pelo reforço.

De modo geral, o teor de 5% (mistura S95P5), foi o que conferiu ao solo puro um melhor comportamento mecânico e, conseqüentemente maiores incrementos nos seus parâmetros de resistência ao cisalhamento. Neste caso, houve um aumento de 10,5% no intercepto coesivo e 26% no ângulo de atrito interno em relação à matriz não reforçada, revelando-se como sendo o teor mais adequado para o solo em questão.

4.2.2.1.2 Amostras do solo puro e solo-PET filete

As envoltórias de resistência de Mohr Coulomb obtidas para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e em comprimentos diferentes (5, 10 e 15 mm), para as mesmas tensões normais adotadas para o solo-PET micronizado estão mostradas na Figura 51. Para efeitos comparativos também são novamente apresentados os dados do solo puro. Na Figuras 52 e 53 são apresentados os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, respectivamente.

Figura 51: Envolvórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com os comprimentos de 5, 10 e 15mm, ensaiados em condição de umidade natural.

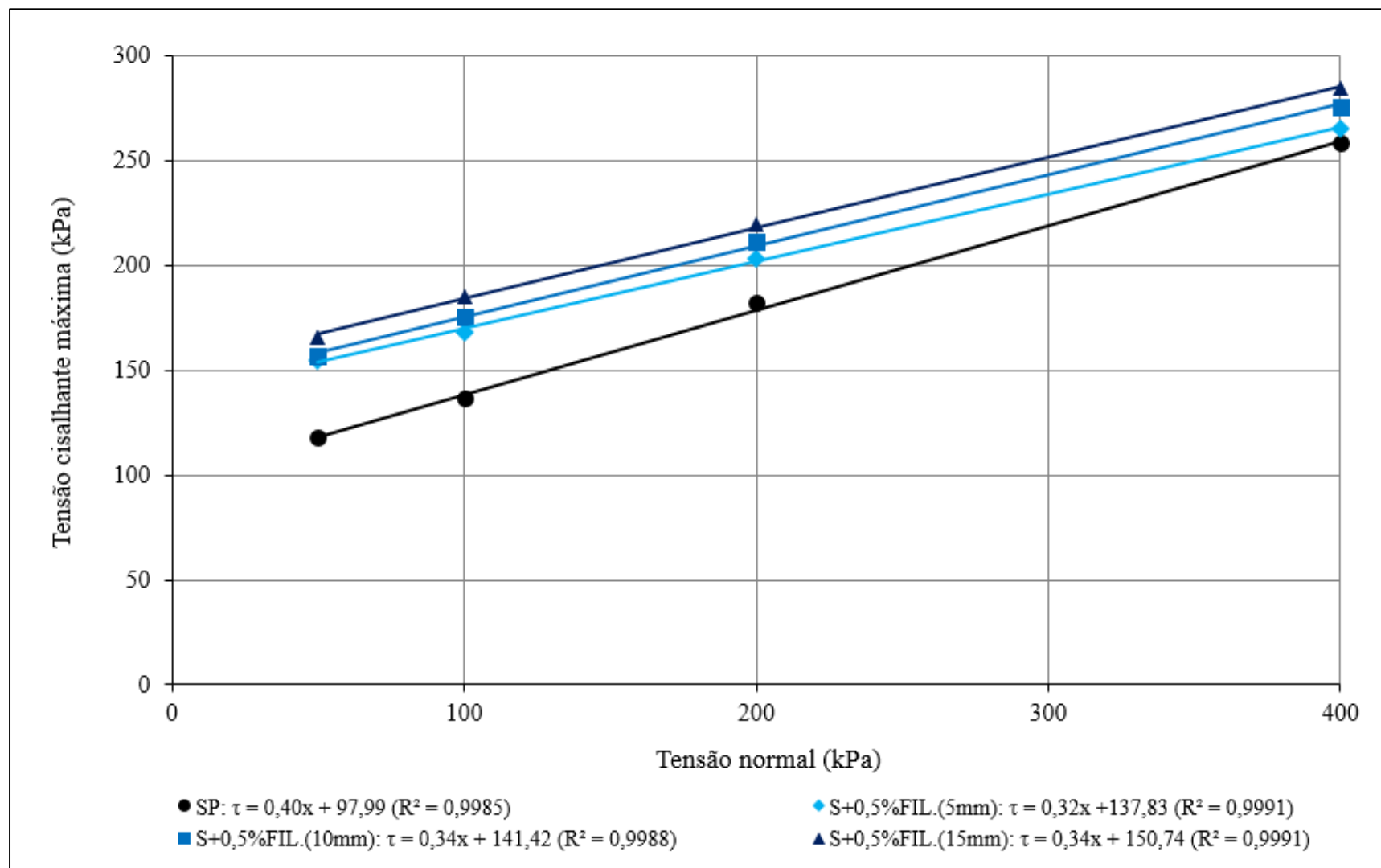
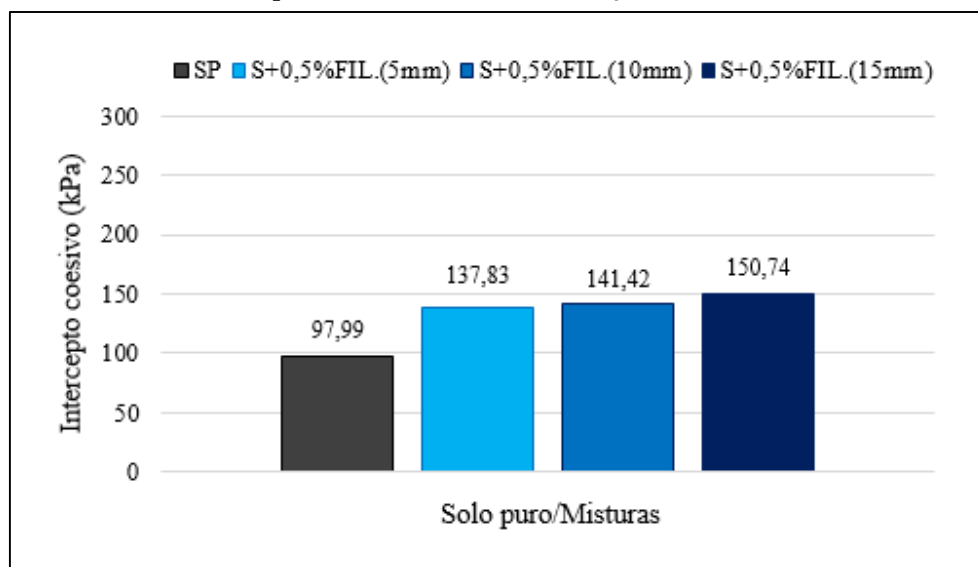
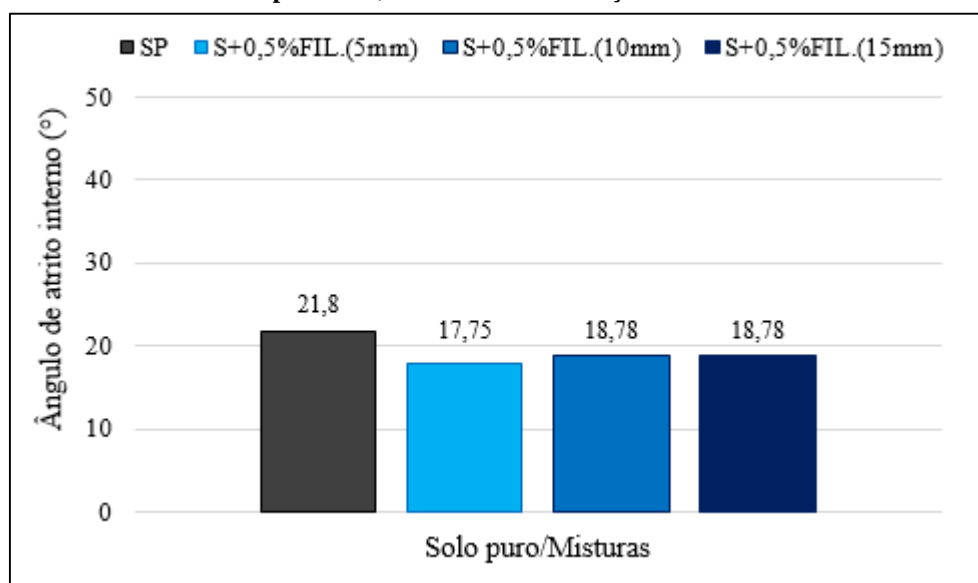


Figura 52: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 53: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

A análise das envoltórias, bem como os valores apresentados na Figura 52 revelam que a adição de PET filete ao solo, analogamente ao solo-PET micronizado, também promoveu aumento nos valores do intercepto coesivo das misturas em relação à matriz não reforçada. Observou-se que quanto maior o comprimento do filete na mistura, maior foi a resistência coesiva obtida.

Destaca-se que o PET filete com comprimento de 15 mm (mistura S+0,5%FIL.15mm), produziu o maior incremento no valor do intercepto coesivo em comparação ao solo puro. Pesquisas realizadas por Sivakumar Babu e Chouksey (2011); Acharyya *et al.* (2013) e Lucarelli (2018) também constataram que a inclusão de tiras de PET em matriz argilosa resulta em aumento do intercepto coesivo. Além disso, Lucarelli (2018) comprova que os incrementos na parcela coesiva decorre da ancoragem gerada pelas tiras de PET às partículas de solo, sendo que esta ancoragem é ocasionada pelo fato das partículas mais duras do solo desgastarem a superfície das tiras, formando assim sulcos que constituem uma espécie de intertravamento e, por consequência ocorre uma melhor interação solo-reforço, o que faz aumentar a resistência coesiva das misturas.

Com base nos dados apresentados na Figura 53, verifica-se que a adição de PET filete ao solo argiloso resulta em uma leve redução do ângulo de atrito interno das misturas em relação ao solo puro. Percebe-se que a maior redução na parcela de atrito ocorre para o menor comprimento do filete utilizado, todavia, observa-se que ao se aumentar o comprimento do filete, os valores do ângulo de atrito interno das misturas permanecem praticamente inalterados.

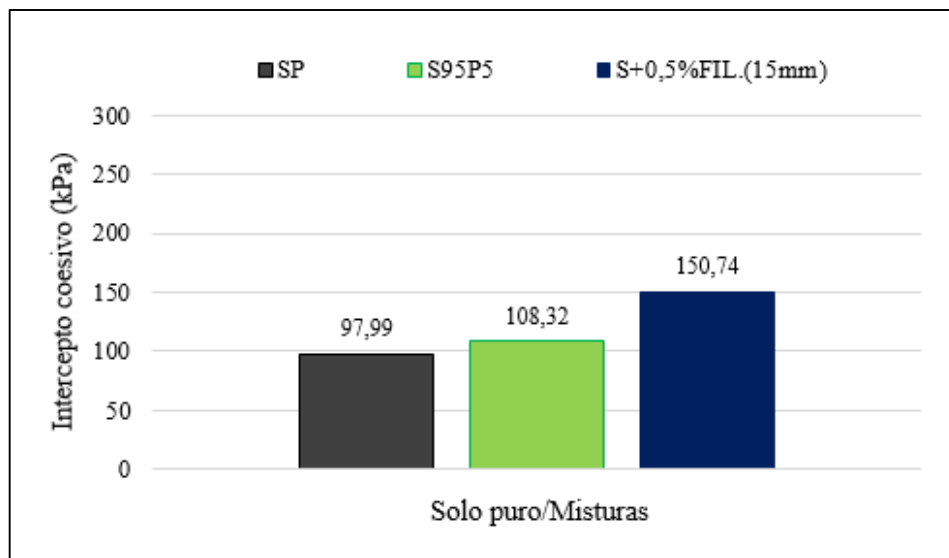
Um fato importante a ser destacado é que até o maior valor de tensão testado (400 kPa), as envoltórias de resistência das misturas são praticamente paralelas à da matriz não reforçada, isto é, não apresentam a bilinearidade descrita por Maher e Gray (1990). Isto indica que possivelmente as tensões normais às quais o solo puro e as misturas solo-PET filete estiveram submetidos são inferiores à crítica, e alguns filetes tenham deslizado durante o deslocamento.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, nota-se que o comprimento de 15 mm, mistura S+0,5%FIL.(15mm), é a que confere ao solo puro um melhor comportamento mecânico. Verifica-se que a melhoria neste comportamento está associada aos incrementos gerados na resistência coesiva. Uma vez que, esta mistura resultou em um aumento de 53,8% no intercepto coesivo e uma redução do ângulo de atrito de 13,9% em relação à matriz não reforçada, mostrando-se como o comprimento mais adequado para o solo em questão.

4.2.2.1.3 *Comparação dos parâmetros de resistência obtidos para o solo puro e para as amostras solo-PET micronizado e filete em condição de umidade natural*

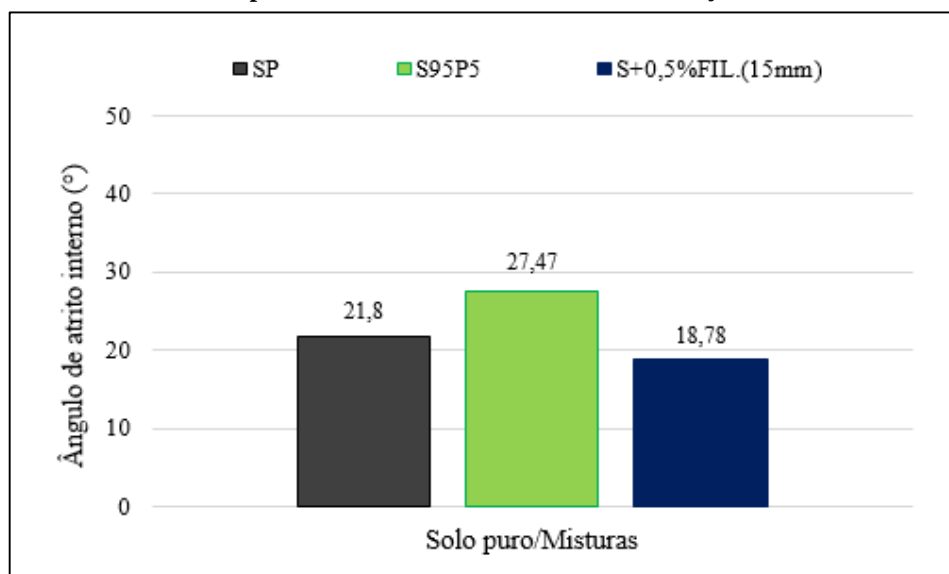
Nas Figuras 54 e 55 são comparados os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, respectivamente, obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o teor e a combinação teor-comprimento identificados como os mais adequados para o solo analisado.

Figura 54: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 55: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

De acordo com os valores de intercepto coesivo apresentados na Figura 54, comparando-se os incrementos de resistência coesiva ocasionados por cada tipo de PET ao ser adicionado à matriz argilosa, verifica-se que para o solo em questão o PET filete foi capaz de ocasionar maior incremento no intercepto coesivo da mistura em relação ao solo puro quando comparado ao PET micronizado, superando a coesão deste em 39,2%. Por sua vez, quanto aos valores de ângulo de atrito interno apresentados na Figura 55, comparando-se o tipo de PET

utilizado, verifica-se que o PET micronizado ao ser inserido ao solo contribuiu com incrementos na resistência por atrito da matriz, enquanto que o PET filete reduz levemente este parâmetro.

4.2.2.2 Ensaios realizados em condição previamente inundada

4.2.2.2.1 Amostras do solo puro e solo-PET micronizado

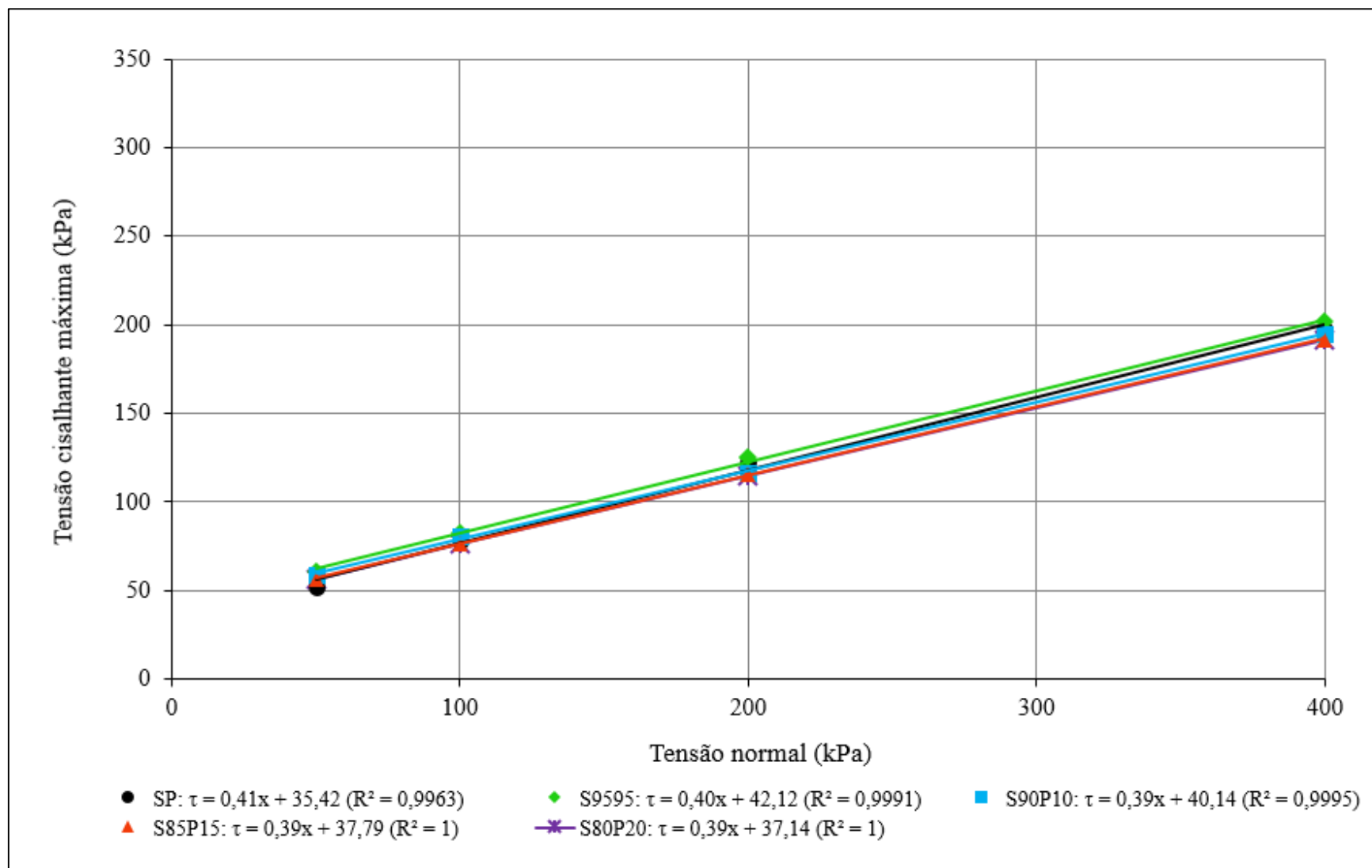
As envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb obtidas para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores já descritos para a condição natural e as mesmas tensões normais são mostradas na Figura 56. Para efeitos comparativos também são novamente apresentados os dados do solo puro. Nas Figuras 57 e 58 são apresentados os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, respectivamente, obtidos para o solo puro e para as misturas já mencionadas.

A partir da análise da Figura 56, nota-se que para a condição previamente inundada as envoltórias do solo puro e das misturas solo-PET micronizado praticamente coincidem, mostrando que para esta condição, a adição deste tipo de reforço à matriz argilosa não resulta em grandes variações nos parâmetros de resistência das misturas em relação ao solo puro.

Isto é identificado nos valores de intercepto coesivo apresentados na Figura 57, onde verifica-se que a adição de PET micronizado ao solo resulta em discretos incrementos na resistência coesiva das misturas em relação à matriz não reforçada. Percebe-se que quanto maior o teor de PET na mistura, menor são os incrementos obtidos para este parâmetro. Sendo assim, o teor de 5% foi o que conferiu à mistura S95P5 o maior intercepto coesivo quando comparado ao solo puro.

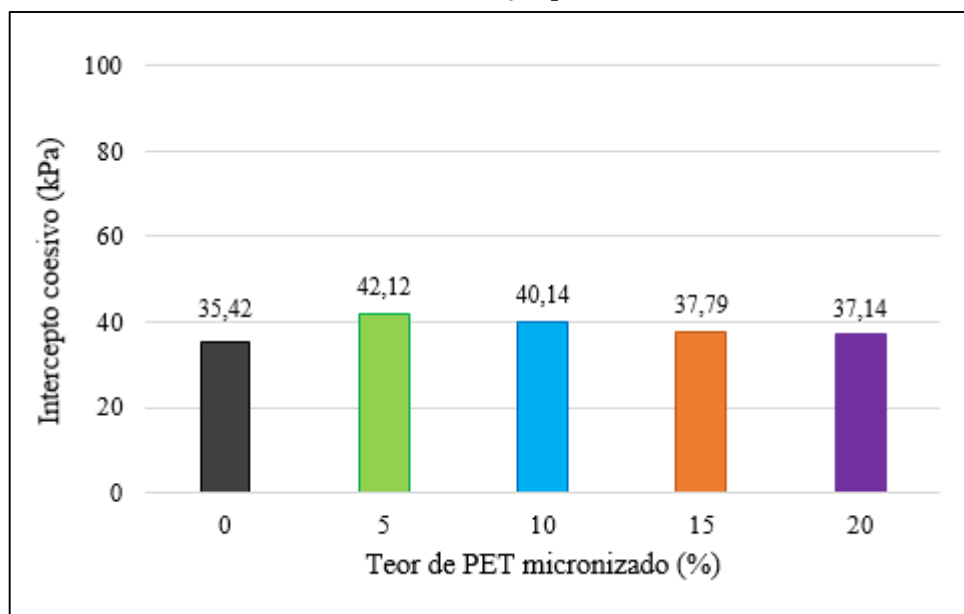
Pequenas variações também são identificadas nos dados apresentados na Figura 58, onde observa-se que o PET micronizado ao ser adicionado ao solo ocasiona uma leve redução nos valores do ângulo de atrito interno das misturas em relação ao solo puro. Além disso, nota-se que a partir do teor de 5%, ao aumentar o percentual de reforço na mistura a redução deste parâmetro não mais se altera. Dessa forma, presume-se que teores inferiores aos utilizados nesta pesquisa, promovam incrementos nos valores de ângulo de atrito interno.

Figura 56: Envolvórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.



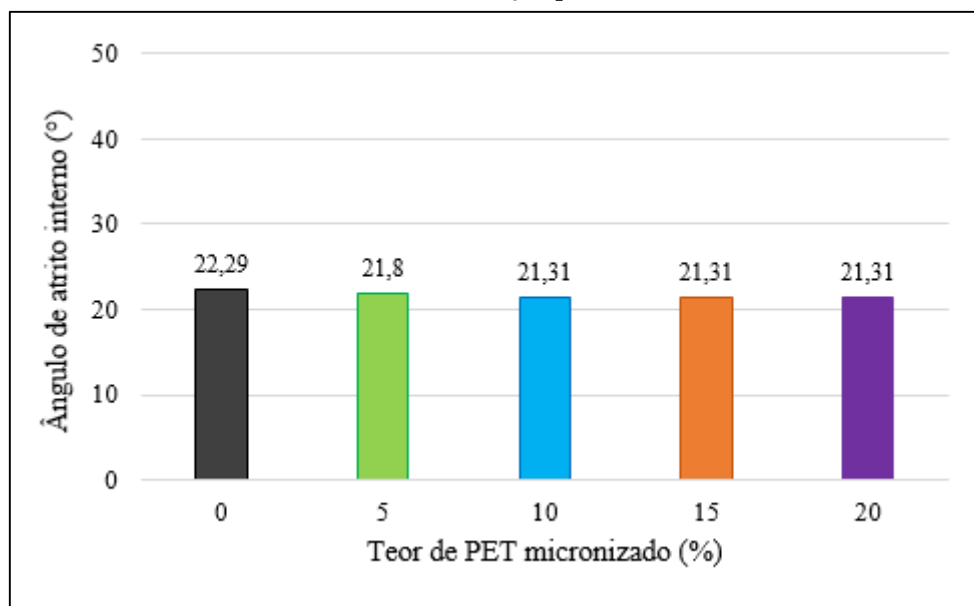
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 57: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 58: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de solo seco, ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

O comportamento observado nesta pesquisa em relação ao intercepto coesivo e ao ângulo de atrito interno pode estar relacionado com a hipótese de Anagnostopoulos; Tzetzis; Berketis (2013). Ou seja, estes autores afirmam que a percentagem de fibras desempenham um papel importante no desenvolvimento da resistência ao cisalhamento da matriz terrosa em que

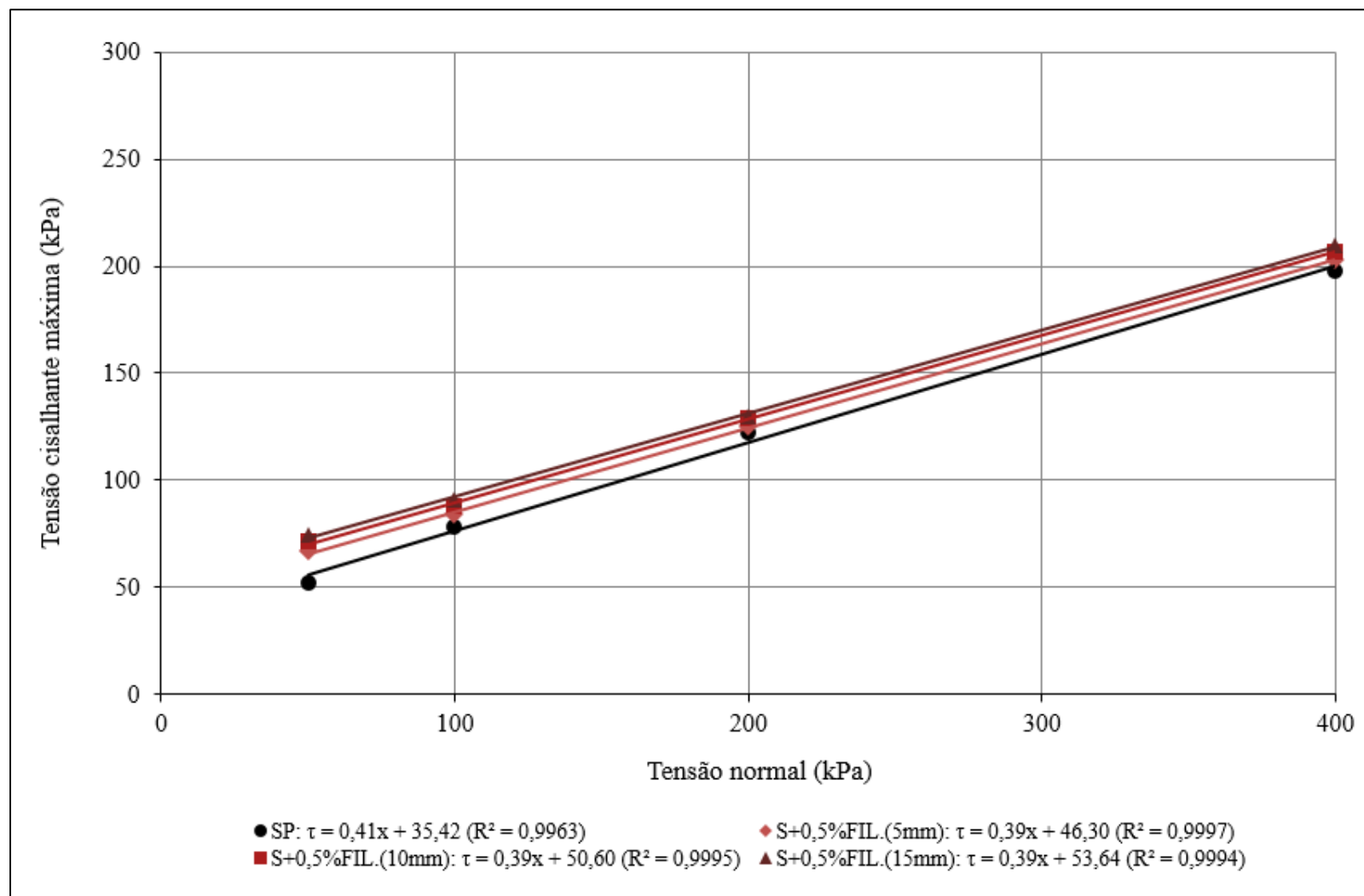
são inseridas, fazendo com que a resistência seja função do teor de fibras inseridas na mistura até uma percentagem ideal, a partir da qual os parâmetros de resistência tendem a diminuir ou se manterem inalterados. Segundo os autores, isso ocorre devido ao alto teor do reforço resultar em misturas com menor contato solo-fibras, comprometendo o desenvolvimento de uma ligação satisfatória entre a matriz e o reforço.

Do exposto, ou seja, a partir da hipótese mencionada e dos resultados obtidos, verifica-se que dos percentuais utilizados nesta pesquisa, 5% indica ser o que confere ao solo um melhor comportamento mecânico quando comparado ao solo puro, quando o solo é saturado. Nota-se que a melhoria no comportamento está associada ao incremento gerado na parcela de resistência coesiva. Visto que, esta mistura resultou em um aumento de 18,9% no intercepto coesivo e uma redução de 2,2% no ângulo de atrito interno, em relação à matriz não reforçada, mostrando-se como o teor mais adequado para o solo em questão.

4.2.2.2.2 Amostras do solo puro e solo-PET filete

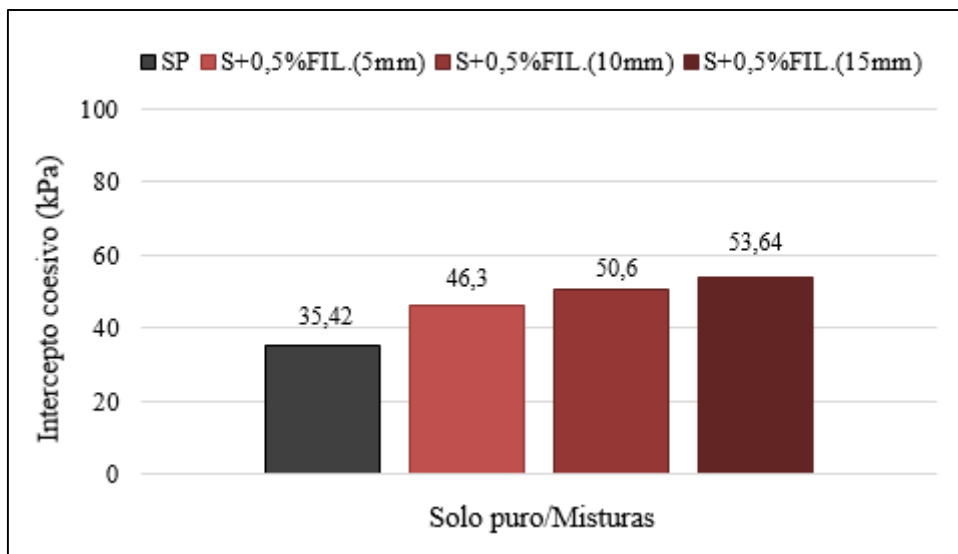
As envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb obtidas para as misturas solo-PET filete, contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e nos comprimentos predeterminados (5, 10 e 15 mm), para as mesmas tensões normais empregadas na condição natural são mostradas na Figura 59, enquanto que nas Figuras 60 e 61 são apresentados os valores dos respectivos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Figura 59: Envolvórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com os comprimentos de 5, 10 e 15mm, ensaiados em condição previamente inundada.



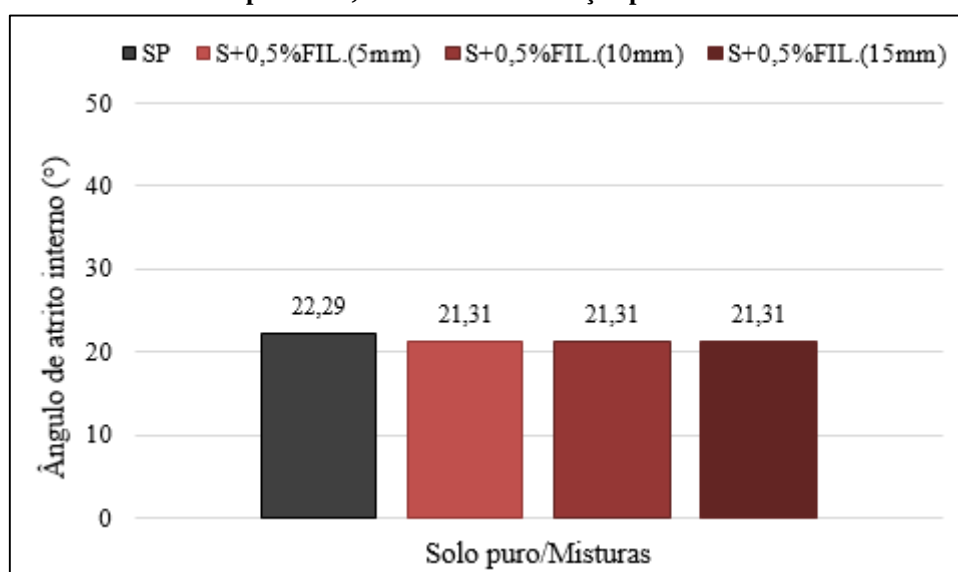
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 60: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 61: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com 5, 10 e 15mm de comprimento, ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

As envoltórias de resistência, bem como os dados apresentados na Figura 60 revelam que para a condição previamente inundada a adição de PET filete à matriz argilosa promoveu, a exemplo da condição natural, aumento no intercepto coesivo das misturas em relação ao solo puro. Nota-se que quanto maior o comprimento do filete inserido na mistura, maior foi o incremento obtido para este parâmetro. O PET filete com comprimento de 15 mm conferiu à

mistura S+05%FIL.(15mm) o maior aumento no valor do intercepto coesivo na condição inundada quando comparado à matriz não reforçada.

Com base nos dados apresentados na Figura 61, constata-se que a adição de PET filete ao solo argiloso resulta em uma leve redução nos valores do ângulo de atrito interno das misturas em relação ao solo puro. Porém, percebe-se que essa redução não é intensificada com o comprimento do filete.

Vale destacar que de acordo com De Freitas *et al.* (2021), ao variar o tamanho de fibras inseridas ao solo para uma condição previamente inundada, as fibras geram redução tanto do intercepto coesivo quanto do ângulo de atrito interno. Dessa forma, nota-se que o comportamento observado pelos autores contradiz com os resultados obtidos nesta pesquisa. Por outro lado, vale destacar que a pesquisa conduzida pelos mencionados autores foi desenvolvida com amostras de solo arenoso, cujo comportamento espera-se que seja diferente do que foi verificado nesta pesquisa.

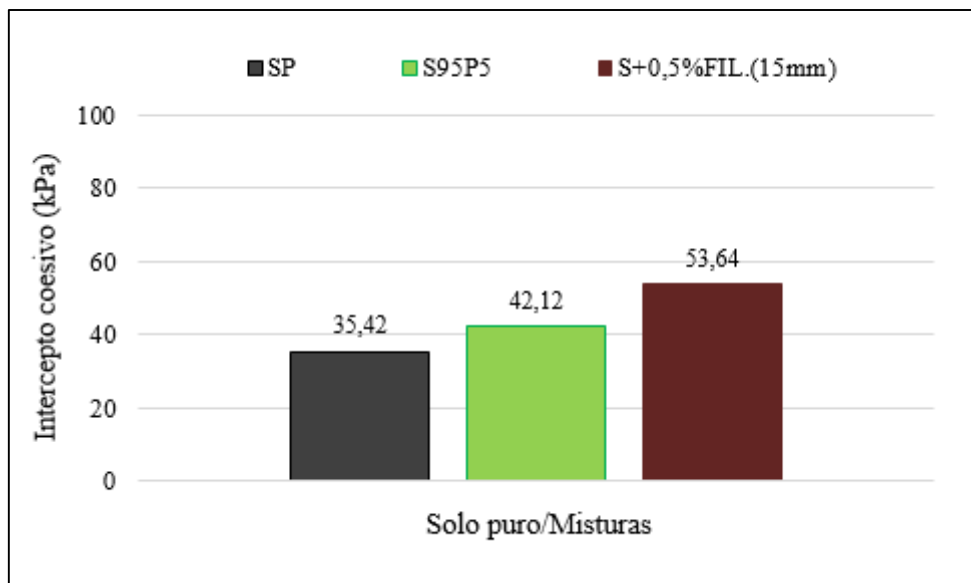
Analogamente ao que foi verificado com os resultados dos ensaios em condição de umidade natural, até à tensão normal máxima, igual a 400 kPa, as envoltórias de resistência das misturas também são praticamente paralelas à da matriz não reforçada, ou seja, não apresentam a bilinearidade descrita por Maher e Gray (1990).

Contudo, percebe-se que as misturas ensaiadas para a condição previamente inundada apresentam o mesmo comportamento já observado para a condição de umidade natural, ou seja, o efeito do PET filete independe da condição ensaiada. Além disso, verifica-se que dos comprimentos testados, o filete com 15 mm foi o que conferiu à mistura S+0,5%FIL.(15mm) um melhor desempenho mecânico em relação ao solo puro. Nota-se que a melhoria neste comportamento está associada ao incremento gerado na parcela coesiva. Uma vez que, esta mistura resultou em um aumento de 51,4% no intercepto coesivo e uma redução de 4,4% no ângulo de atrito interno quando comparado com a matriz não reforçada, mostrando-se como o comprimento mais adequado para o solo analisado.

4.2.2.2.3 *Comparação dos parâmetros de resistência obtidos para o solo puro e para as amostras solo-PET micronizado e filete*

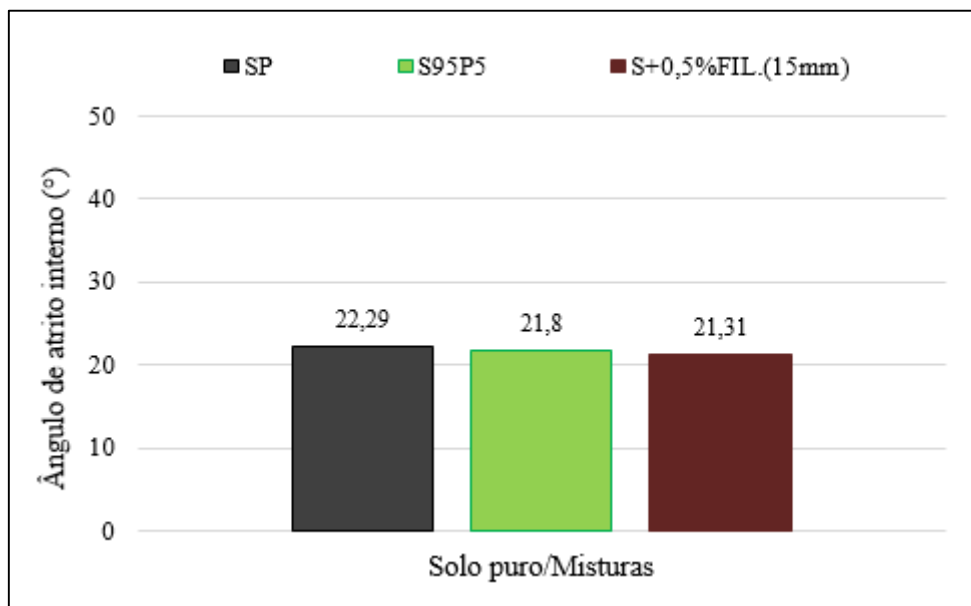
Nas Figuras 62 e 63 são comparados os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, respectivamente, obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o teor e a combinação teor-comprimento identificados como os mais adequados para o solo analisado.

Figura 62: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 63: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

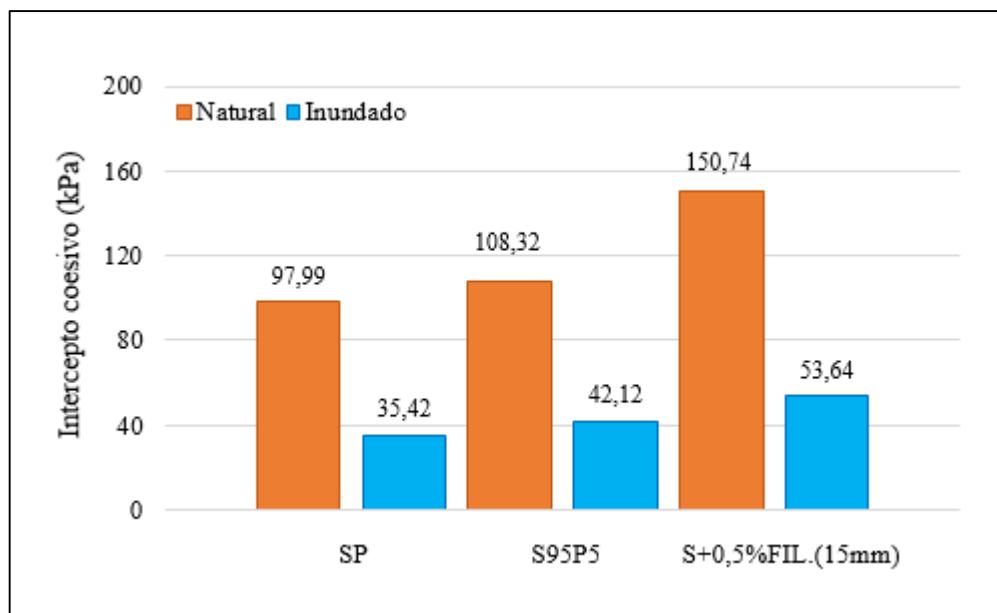
De acordo com os valores de intercepto coesivo apresentados na Figura 62, comparando-se os incrementos de resistência coesiva ocasionados por cada tipo de PET ao ser adicionado à matriz argilosa, verifica-se que para o solo em questão o PET filete foi capaz de ocasionar maior incremento no intercepto coesivo da mistura em relação ao solo puro quando

comparado ao PET micronizado. Superando a resistência coesiva gerada por este em 27,4%. Já quanto aos valores de ângulo de atrito interno apresentados na Figura 63, comparando-se o tipo de PET utilizado, verifica-se que tanto o PET micronizado quanto o PET filete ao ser inserido no solo ocasionam uma discreta redução deste parâmetro.

4.2.2.3 Comparação entre os ensaios realizados para a condição de umidade natural e previamente inundada

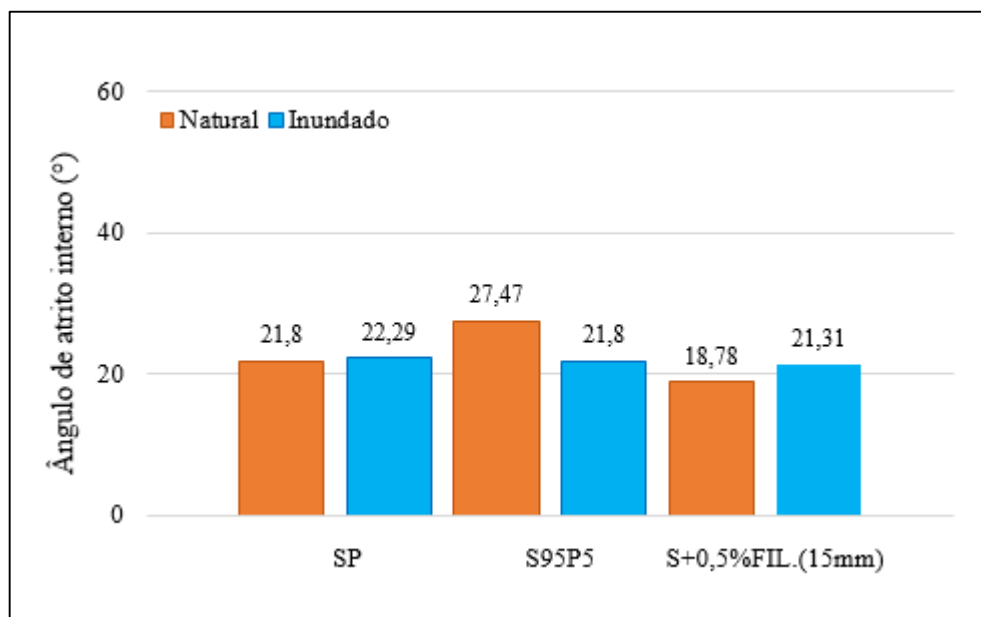
Com o objetivo de analisar a mudança que ocorre nos parâmetros de resistência ao cisalhamento entre a condição de umidade natural e previamente inundada para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete que foram identificadas como as mais adequadas para ocasionar um melhor comportamento mecânico à matriz, nas Figuras 64 e 65 são apresentados os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, respectivamente, obtidos para cada condição.

Figura 64: Valores de intercepto coesivo obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados para as condições de umidade natural e previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 65: Valores de ângulo de atrito interno obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material o polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm, ensaiados para as condições de umidade natural e previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

A partir da análise dos valores obtidos para os parâmetros de resistência ao cisalhamento em cada condição de ensaio, nota-se que na presença de água o solo puro tem seu intercepto coesivo reduzido em 63,9%, enquanto que o valor do seu ângulo de atrito interno sofre um discreto aumento de 2,2%. A mistura S95P5 tem tanto sua resistência coesiva quanto sua resistência por atrito reduzidas em 61,1% e 20,6%, respectivamente. Já a mistura S+0,5%FIL.(15mm) tem seu intercepto coesivo reduzido em 64,4%, ao passo que o ângulo de atrito sofre um aumento de 13,5%.

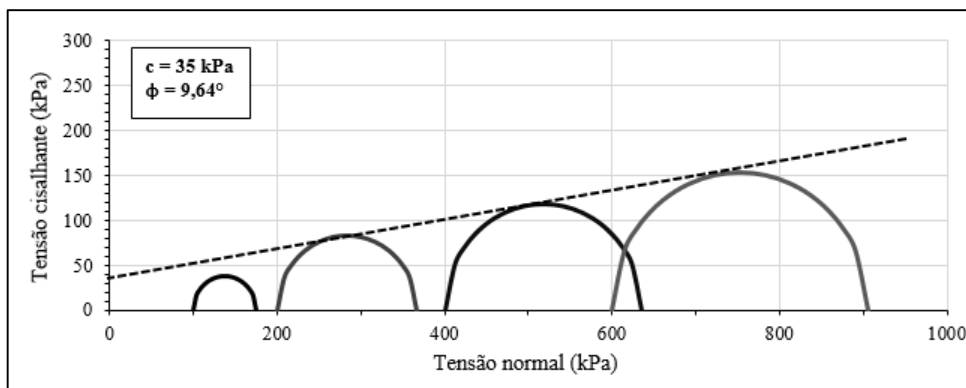
Portanto, conforme esperado, conclui-se que para a condição previamente inundada tanto o solo puro quanto as misturas solo-PET micronizado e filete perdem resistência, justamente por se tratar de um material coesivo. Na presença de água os reforços utilizados reduzem seu efeito em conferir ganhos de resistência ao cisalhamento à matriz argilosa. Mas, em contrapartida, verifica-se que eles continuam proporcionando às misturas um melhor desempenho mecânico em relação ao solo puro através de incrementos no seu intercepto coesivo.

4.2.3 Ensaio de Compressão Triaxial Adensado não Drenado (CU)

4.2.3.1 Envoltórias de resistência do solo puro e das misturas solo-PET micronizado e filete em termos de tensões totais

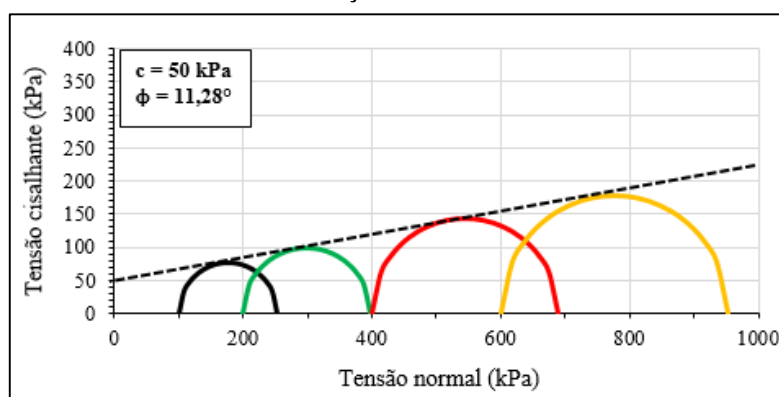
As envoltórias de resistência de Mohr Coulomb em termos de tensões totais, obtidas a partir dos ensaios realizados sob pressões confinantes de 100, 200, 400 e 600 kPa são mostradas nas Figuras 66, 67 e 68, para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete, respectivamente. As misturas empregadas foram: solo com 5% de PET micronizado e solo com 0,5% de PET filete, com comprimento 15 mm, em relação à massa de solo seco. Como as curvas tensão desviadora versus deformação axial não exibiram picos de ruptura, para todos os ensaios foi adotada a deformação axial de 5% como a ruptura convencional. Na Tabela 16 são apresentados os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos das envoltórias mostradas nas Figuras 66 a 68.

Figura 66: Envoltória de resistência obtida para o solo puro em termos de tensões totais.



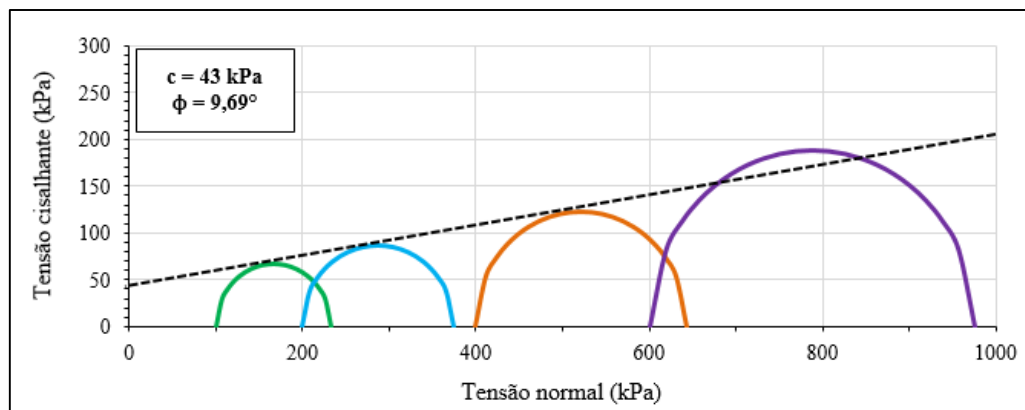
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 67: Envoltória de resistência obtida para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco em termos de tensões totais.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 68: Envolvória de resistência obtida para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm em termos de tensões totais.



Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 16: Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), em relação à massa de solo seco, em termos de tensões totais.

Material	Tensões totais			
	Intercepto coesivo (kPa)	Variação (%)	Ângulo de atrito interno (°)	Variação (%)
SP	35	-	9,64	-
S95P5	50	42,9	11,28	17,0
S+0,5%FIL.(15mm)	43	22,9	9,69	0,5

Fonte: AUTORA (2022)

A análise das envoltórias obtidas, bem como os valores apresentados na Tabela 16 revelam que tanto a adição de PET micronizado quanto a de PET filete à matriz argilosa resultou em aumento nos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas em relação ao solo puro. Dos valores mostrados na Tabela 16, observa-se que o PET micronizado proporciona um melhor desempenho mecânico, em termos de resistência total à matriz do solo, quando comparado ao PET filete, visto que o PET na forma micronizado promoveu aumento de 42,9% no intercepto coesivo e 17% no ângulo de atrito interno da mistura, em comparação ao solo puro.

O comportamento observado para o PET filete está em concordância com os resultados alcançados por Sivakumar Babu e Chouksey (2011) ao utilizar tiras de PET como reforço de um solo argiloso.

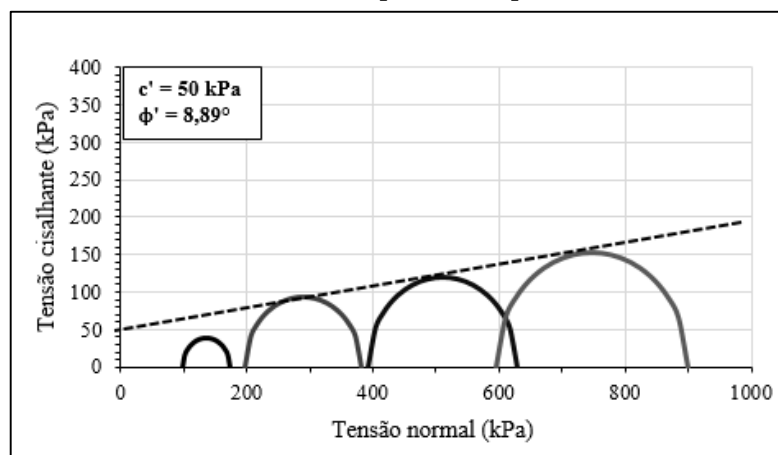
Portanto, até o nível máximo de pressão confinante empregado nesta pesquisa (600 kPa), verifica-se que as envoltórias do solo puro e das misturas solo-PET não apresentam o comportamento bilinear descrito pelos autores Maher e Gray (1990), Teodoro e Bueno (1998)

e Zornberg (2002), conforme já comentado por ocasião das análises sobre os ensaios de cisalhamento direto.

4.2.3.2 Envolvórias de resistência do solo puro e das misturas solo-PET micronizado e filete em termos de tensões efetivas

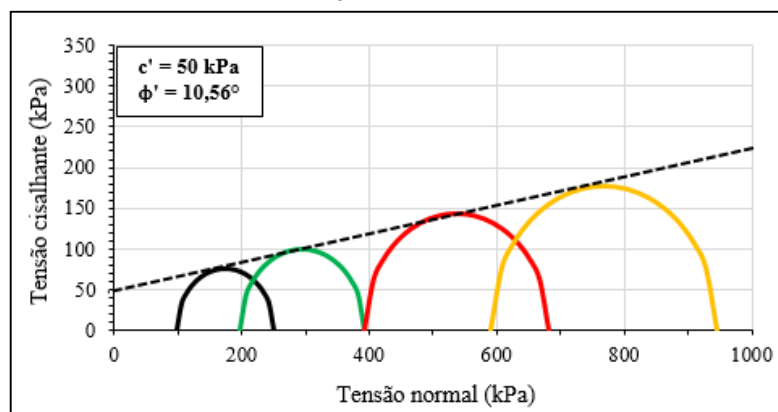
As envoltórias de resistência de Mohr Coulomb obtidas em termos de tensões efetivas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos mesmos teores e pressões confinantes empregadas nos ensaios em termos de tensões totais, são mostradas nas Figuras 69, 70 e 71, adotando-se a deformação axial de 5% como a ruptura convencional. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivos obtidos das respectivas envoltórias estão mostrados na Tabela 17.

Figura 69: Envolvória de resistência obtida para o solo puro em termos de tensões efetivas.



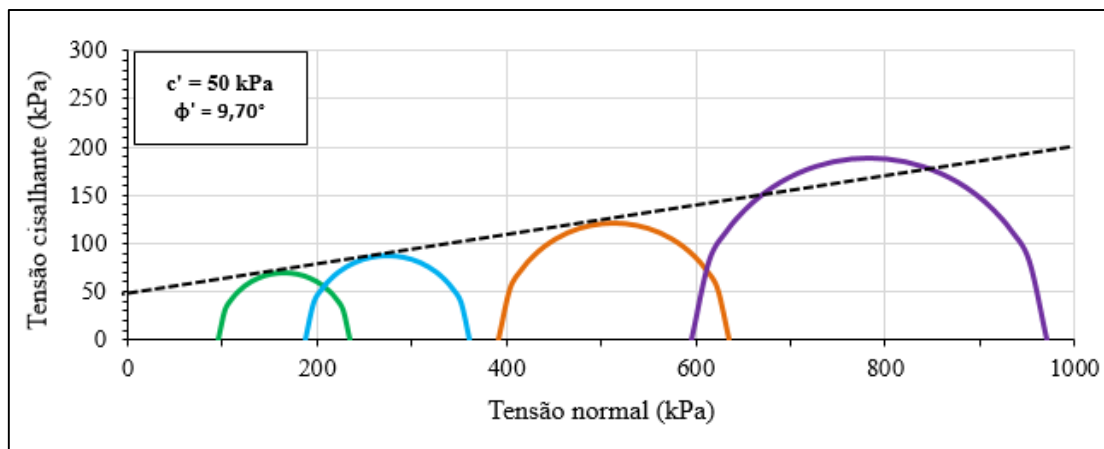
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 70: Envolvória de resistência obtida para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco em termos de tensões efetivas.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 71: Envoltória de resistência obtida para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15 mm em termos de tensões efetivas.



Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 17: Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), em relação à massa de solo seco, em termos de tensões efetivas.

Material	Tensões efetivas			
	Intercepto coesivo efetivo (kPa)	Variação (%)	Ângulo de atrito interno efetivo (°)	Variação (%)
SP	50	-	8,89	-
S95P5	50	-	10,56	18,8
S+0,5%FIL.(15mm)	50	-	9,70	9,1

Fonte: AUTORA (2022)

Observando-se as envoltórias de resistência efetiva mostradas nas Figuras 69 a 71, bem como os respectivos valores dos parâmetros de resistência apresentados na Tabela 17 tem-se a constatação de que a adição de PET à matriz argilosa empregada nesta pesquisa não altera os valores do intercepto coesivo efetivo das misturas em relação ao solo puro. Mas, em contrapartida, o PET, nas formas utilizadas promoveu um discreto aumento no ângulo de atrito interno efetivo das misturas. Observa-se que, o PET micronizado ocasionou um melhor comportamento mecânico à matriz quando comparado ao PET filete, visto que, o PET na forma micronizado ao ser adicionado ao solo resultou num aumento de 18,8% no valor do ângulo de atrito interno efetivo da mistura, mais do que o dobro do ganho de resistência promovido pelo PET filete, quando comparado ao ângulo de atrito interno do solo puro.

O comportamento observado nesta pesquisa em relação ao intercepto coesivo efetivo da mistura solo-PET se manter inalterado em relação ao solo puro com a adição de PET filete está

em concordância com a pesquisa realizada por Rocha (2019), uma vez que esse autor também constatou que em termos de tensões efetivas, à inclusão de fibras poliméricas a um solo argiloso não altera este parâmetro.

O ganho de resistência friccional observado nos valores do ângulo de atrito interno efetivo promovido pela adição do PET micronizado empregado nesta pesquisa está de acordo com os resultados presentes na literatura de autoria de Martínez *et al.* (2016); Louzada e Casagrande (2016) e Louzada; Malko; Casagrande (2019).

Da mesma forma, o discreto aumento observado para este parâmetro com à inclusão de PET filete está em concordância com pesquisas realizadas em solo argiloso por Teodoro (1999), Feuerharmel (2000), Sivakumar Babu e Chouksey (2011) e Rocha (2019), os quais utilizaram tiras de PET e fibras poliméricas como reforço. Vale destacar que pesquisas realizadas com solo arenoso por Casagrande (2005), Festugato (2008) e Li e Zornberg (2013) também constataram esse comportamento para o ângulo de atrito interno efetivo do solo utilizado.

Assim como já observado para as envoltórias dos ensaios triaxiais realizados em termos de tensões totais, em termos de tensões efetivas o solo puro e as misturas solo-PET também não apresentam envoltórias bilineares, a despeito do que foi descrito pelos autores já mencionados.

4.2.4 Análise Conjunta da Resistência ao Cisalhamento do Solo e das Misturas

Visando avaliar de maneira conjunta os efeitos da adição de PET micronizado e PET filete na resistência ao cisalhamento do solo argiloso empregado nesta pesquisa, apresenta-se na Tabela 18 um resumo dos parâmetros de resistência obtidos para todos os ensaios realizados.

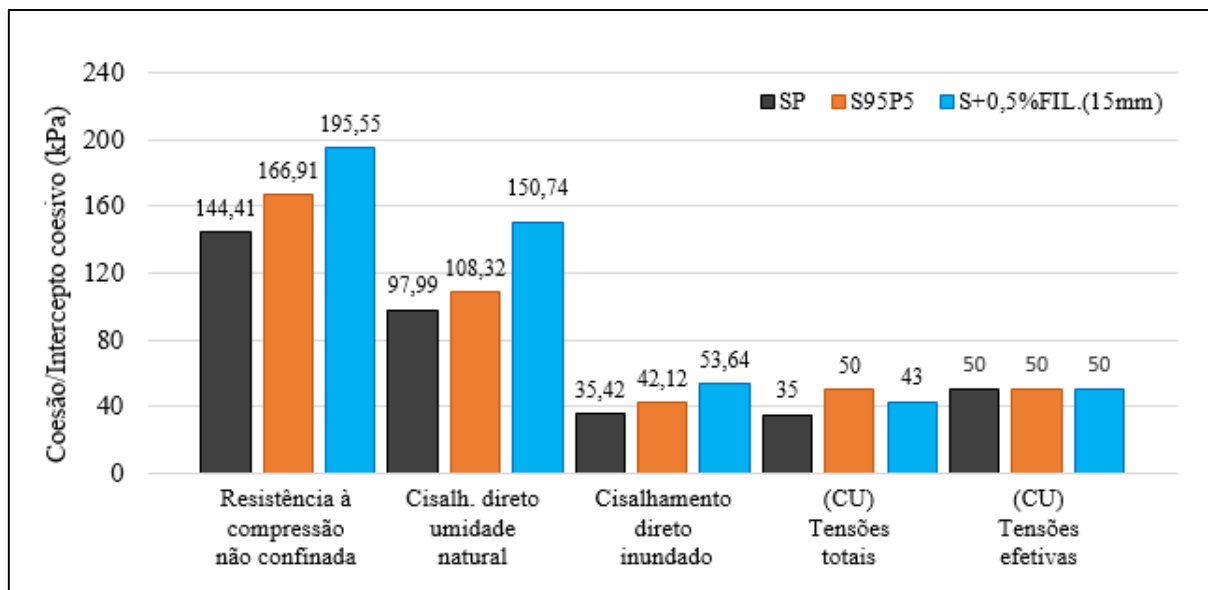
Tabela 18: Resumos dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), respectivamente, ambos em relação à massa de solo seco, para todos os ensaios realizados.

Parâmetros de resistência	Intercepto coesivo (kPa)			Ângulo de atrito interno (°)		
	SP	S95P5	S+0,5%FIL. (15mm)	SP	S95P5	S+0,5%FIL. (15mm)
Resistência à compressão não confinada	144,41	166,91	195,55	-	-	-
Cisalhamento direto (umidade natural)	97,99	108,32	150,74	21,97	27,47	18,78
Cisalhamento direto (previamente inundado)	35,42	42,12	53,64	22,29	21,80	21,31
Compressão triaxial (CU) parâmetros totais	35	50	43	9,64	11,28	9,69
Compressão triaxial (CU) parâmetros efetivos	50	50	50	8,89	10,56	9,70

Fonte: AUTORA (2022)

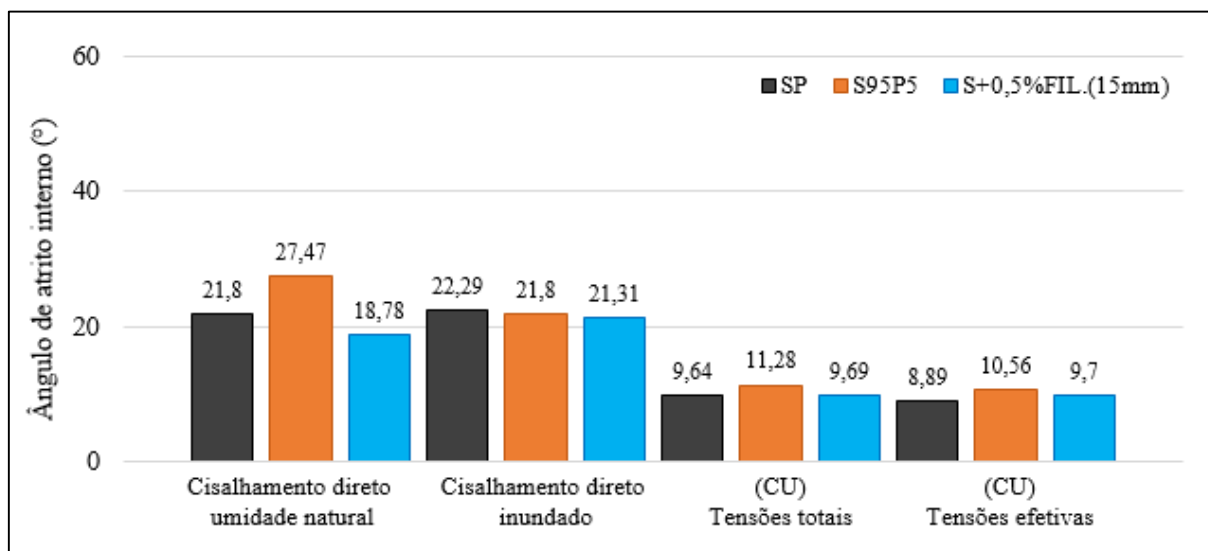
Com a intenção de melhor evidenciar os efeitos promovidos por cada tipo de PET na resistência ao cisalhamento da matriz, e notar a influência das particularidades de cada ensaio quanto aos resultados obtidos, nas Figuras 72 e 73 são apresentadas graficamente comparações entre os valores de coesão/intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, respectivamente, para o solo puro e para as misturas solo-PET.

Figura 72: Valores de coesão e intercepto coesivo obtidos nos ensaios de resistência para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm) em relação à massa de solo seco.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 73: Valores de ângulo de atrito interno obtidos nos ensaios de resistência para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm) em relação à massa de solo seco.



Fonte: AUTORA (2022)

De modo geral, a partir da análise dos parâmetros de resistência apresentados nas Figuras 72 e 73, verifica-se para todos ensaios realizados que independente da condição de ensaio (sem confinamento, confinado, umidade natural, com inundação) tanto o PET micronizado quanto o PET filete contribuem com incrementos no intercepto coesivo da matriz argilosa. Além disso, observa-se que os dois tipos de PET não agregam contribuição

considerável ao ângulo de atrito interno quando a mistura é ensaiada para uma condição previamente inundada.

Analisando-se os parâmetros isoladamente, nota-se que os valores de intercepto coesivo obtidos nos ensaios de resistência à compressão não confinada são próximos dos alcançados no cisalhamento direto para a condição de umidade natural. Da mesma forma, os valores obtidos para a condição previamente inundada no cisalhamento direto estão coerentes com os obtidos nos ensaios de compressão triaxial, em termos de tensões totais.

Quanto ao ângulo de atrito interno, os valores obtidos nos ensaios de cisalhamento direto praticamente não variam para as duas condições ensaiadas, o que também é observado nos alcançados nos ensaios de compressão triaxial em termos de tensões totais e efetivas.

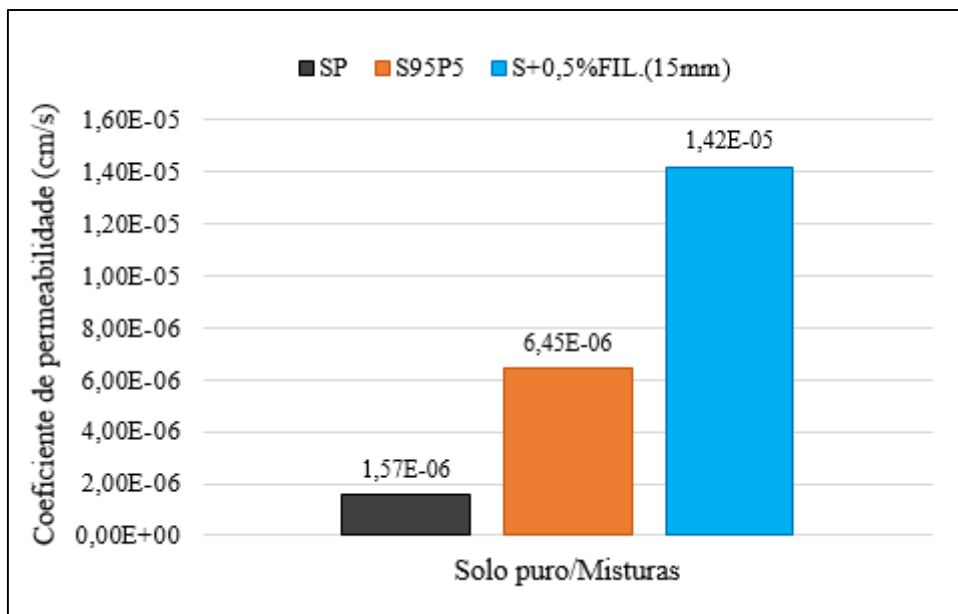
Portanto, é possível depreender que o PET micronizado assim como o PET filete ao ser inserido no solo argiloso influencia de forma mais considerável o intercepto coesivo do que o ângulo de atrito interno da matriz. Sendo assim, nota-se que a principal contribuição dos reforços está associada à agregação da resistência coesiva do solo puro, fazendo com que as misturas apresentem desempenho mecânico superior em relação à matriz não reforçada. Pesquisas realizadas por Lucarelli (2018) e Rocha (2019) também constataram que fibras e tiras de PET ao serem inseridas em uma matriz argilosa contribuem de forma mais efetiva em ocasionar incrementos no intercepto coesivo, o que corrobora os resultados desta pesquisa.

4.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

4.3.1 Amostras de Solo Puro e Misturas Solo-PET Micronizado e Filete

Embora não seja o objetivo principal desta pesquisa, mas sabendo que a permeabilidade de qualquer solo interfere em seu desempenho enquanto material de construção, nesta pesquisa também foram obtidos os coeficientes de permeabilidade do solo puro e das misturas solo com 5% de PET micronizado e solo com 0,5% de PET filete com comprimento de 15 mm, conforme apresentados na Figura 74.

Figura 74: Coeficientes de permeabilidade obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado e filete, contendo o material polimérico reciclado nos teores de 5 e 0,5% (com comprimento de 15 mm), respectivamente, ambos em relação à massa de solo seco.



Fonte: AUTORA (2022)

Observando-se os gráficos da Figura 74, constata-se que a adição do PET micronizado ou PET filete ao solo argiloso promove aumento no valor do coeficiente de permeabilidade das misturas em relação ao solo puro. Por sua vez, os dados revelam que o PET filete torna o solo mais permeável quando comparado ao PET micronizado. O comportamento observado para o PET filete está em concordância com a hipótese e com os resultados obtidos por Feuerharmel (2000), cujo autor comparou a condutividade hidráulica de um solo argiloso com o mesmo solo reforçado com fibras e afirmou que a adição de fibras propicia uma maior interconexão entre os poros do solo, tornando-o mais permeável, sendo que quanto maior o comprimento da fibra, mais potencializada é a interconexão gerada.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 CONCLUSÕES

A presente pesquisa avaliou a influência da inclusão de PET, em duas formas distintas, no comportamento mecânico de um solo de matriz argilosa a partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão não confinada, cisalhamento direto e compressão triaxial, além disso, analisou o efeito da adição de PET na condutividade hidráulica da matriz. Com base na análise dos resultados alcançados verificou-se que:

A adição tanto de PET micronizado quanto de PET filete à matriz argilosa agregou melhoria na resistência ao cisalhamento e na ductilidade das misturas em relação ao solo puro. Concluiu-se que para todos os ensaios realizados, a adição do PET contribuiu com incrementos nos valores do intercepto coesivo da matriz argilosa. Além disso, constatou-se que ambos os reforços (PET micronizado e filete) não promovem aumentos consideráveis no ângulo de atrito interno da mistura, especialmente quando esta é ensaiada para uma condição previamente inundada. Todavia, também não há perda de resistência.

Ainda em relação aos parâmetros de resistência, para o solo argiloso empregado nesta pesquisa, percebeu-se que tanto o PET micronizado quanto o PET filete ao ser inserido no solo influenciam de forma mais considerável o intercepto coesivo do que o ângulo de atrito interno da matriz. Ou seja, a parcela coesiva responde, neste caso, pelo melhor comportamento mecânico das misturas em relação ao solo puro.

Verificou-se também que existe um teor e uma combinação teor-comprimento mais adequado, a partir dos quais o PET adicionado ao solo confere uma melhoria mais considerável na resistência das misturas em relação à matriz do solo puro. Ou seja, para o solo analisado nesta pesquisa, o teor de 5% para o PET micronizado e a combinação teor de 0,5% e comprimento de 15 mm para o PET filete produziram os melhores ganhos de resistência ao solo.

Para o solo analisado, o PET filete foi capaz de promover predominantemente maior aumento no valor da coesão/intercepto coesivo da mistura em relação ao solo puro quando comparado ao PET micronizado. Dos dados, conclui-se que para o maior incremento observado, o intercepto coesivo obtido da mistura mais adequada com PET filete superou em aproximadamente 39% o da melhor mistura solo-PET micronizado.

Quanto à condutividade hidráulica, constatou-se que a adição de PET (micronizado e filete) promove aumento no valor do coeficiente de permeabilidade das misturas em relação ao

solo puro. Sendo o PET filete responsável por tornar o solo mais permeável quando comparado ao PET micronizado.

Portanto, dos resultados obtidos, conclui-se que o PET na forma micronizado e na forma filete mostraram-se viáveis tecnicamente, em escala de laboratório, para serem utilizados como reforço de um solo argiloso. Adicionalmente, cabe mencionar que a viabilidade técnica também resulta num benefício ambiental, com a possibilidade de redução dos impactos à natureza decorrentes da disposição inadequada deste tipo de resíduo.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para o avanço do conhecimento e das pesquisas envolvendo a temática abordada nesta dissertação, sugere-se:

- Analisar o efeito da adição de PET micronizado no comportamento mecânico de um solo argiloso para teores inferiores aos testados na presente pesquisa;
- Verificar a influência de PET filete na resistência de um solo argiloso com comprimentos maiores do que os utilizados nesta dissertação;
- Analisar por meio de ensaios mineralógicos os mecanismos de interação solo-reforço, bem como, as possíveis mudanças na microestrutura do solo ao ser adicionado o PET em duas formas distintas (micronizado e filete);
- Expandir o estudo da adição de PET micronizado e PET filete para outros tipos de solos, especialmente os arenosos;
- Avaliar as questões técnicas e de desempenho envolvendo a aplicação em campo das misturas desenvolvidas nesta pesquisa, dando-se prioridade à execução de trechos experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M. *et al.* **Reforço do terreno.** In: HACHICH, W; *et al.* Fundações: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 641-690.
- ACHARYYA, R.; *et al.* **Improvement of undrained shear strength of clayey soil with PET bottle strips.** In: Proceedings of Indian Geotechnical Conference, 2013, Roorkee. 8p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D3080:** Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken. 2011. 9p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4767:** Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. West Conshohocken. 2020. 14p.
- ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; TZETZIS, D.; BERKETIS, K. Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils. **Geomechanics and Geoengineering.** v. 9, n. 3, p. 241-251, jun. 2013. DOI: doi.org/10.1080/17486025.2013.804213
- ANDERSLAND, O. B.; KHATTAK, A. S. **Shear strength of kaolinite/fiber soil mixtures.** In: Proceedings, International Conference on Soil Reinforcement, v. 1, 1979, Paris, France, p. 11-16.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Resina PET – história.** 2012. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=46>>. Acesso em: 17 de setembro de 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Nono censo da reciclagem do PET no Brasil.** São Paulo, 2013. 26p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Décimo censo da reciclagem do PET no Brasil.** São Paulo, 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro. 2004. 71p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457:** Amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 2016. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459:** Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 2016. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180:** Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181:** Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2016. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182:** Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2016. 9p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14545:** Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro. 2021. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro. 2022. 40p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12770.** Solo – determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro. 2022. 6p.

BOTERO, E.; *et al.* Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). **Geotextiles and Geomembranes**. v. 43, n. 4, p. 363-369, aug. 2015. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.04.003

BRASIL. Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, 2010.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CONSOLI, N. C.; *et al.* Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 128, p. 462-472, jun. 2002. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462)

DE CARVALHO, B. V. **Avaliação do comportamento resiliente de solo argiloso com inserção de politereftalato de etileno (PET) para aplicação em base de pavimentos**. 2019. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 093:** Solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro. 1994. 4p.

DI SOUZA, L.; TORRES, M. C. M.; RUVOLO FILHO, A. C. Despolimerização do poli(tereftalato de etileno) – PET: efeitos de tensoativos e excesso de solução alcalina. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 18, n. 4, p. 334-341, 2008. DOI: 10.1590/S0104-14282008000400013

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)

– Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

DE FREITAS, J. H.; *et al.* Evaluation of behavior in soil field reinforced with PET fibers for mat foundations. **Paranoá**. v. 29, n. 3, p. 1-19, jun. 2021. DOI: doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n29.2021.03

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journ of Geotechnical Engineering**. v. 109, n. 3, p.335-353, mar. 1983. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335)

HANNANT, D. J. Fiber-reinforced cements and concrete. In: ILLSTON, J. M.; DOMONE, P. L. J. **Construction materials: their nature and behaviour**. 3. ed. London: Spon Press, 2001, p. 385-422.

HOLLAWAY, L. Fibre composites: polymer composites. In: ILLSTON, J. M.; DOMONE, P. L. J. **Construction materials: their nature and behaviour**. 3. ed. London: Spon Press, 2001, p. 349-384.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. The principles of soil stabilization. In: INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. 1. Ed. Sydney: Butterworths, 1972. P. 1-20.

KARMACHARYA, R.; ACHARYA, I. P. **Reinforcement of soil using recycled polyethylene terephthalate (PET) bottle strips**. In: Proceedings of IOE Graduate Conference, 5, 2017, p. 153-156.

LI, C.; ZORNBERG, J. G. Mobilization of reinforcement forces in fiber-reinforced soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 139, p. 107-115, jan. 2013.

LOUZADA, N. S. L.; CASAGRANDE, M. D. T. Study of the mechanical behavior of a clayey soil with the insertion of polyethylene terephthalate flakes. **Geo-Chicago**. v. 271, p. 885-892, 2016.

LOUZADA, N. dos S. L.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T. Behavior of clayey soil reinforced with polyethylene terephthalate. **Journ of Materials in Civil Engineering**. v. 31, n. 10, p. 1-11, oct. 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002863

LUCARELLI, D. C. **Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de polietileno tereftalato (PET) de distribuição aleatória**. 2018. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas gerais, 2018.

MAHER, M.; GRAY, D. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**. v. 116, n. 11, p. 1661-1667, nov. 1990. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:11(1661)

MANCINI, S. D.; ZANIN, M. Recyclability of pet from virgin resin. **Materials Research**. v. 2, n. 1, p. 33-38, jan. 1999.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 191p.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2011. 333p.

MARTÍNEZ, I. M. R.; *et al.* Mechanical behavior of reinforced clayey soil with fine crushed polyethylene terephthalate. **Key Engineering Materials**. v. 668, p. 404-410, oct. 2016. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.668.404

MCGOWN, A; *et al.* Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. **Géotechnique**. v. 28, n. 3, p. 327-346, sept. 1978. DOI.org/10.1680/geot.1978.28.3.327

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos**. In: SEMINÁRIO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA. Geossintéticos 92, Brasília, 1992, p. 1-20.

PALMEIRA, E. M. **Evolução dos geossintéticos no Brasil**. In: 2º SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS. Geossintéticos 95. São Paulo, 1995, p. 5-15.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 368p.

PEDDAIAH, S.; BURMAN, A.; SREEDEEP, S. Experimental study on effect of waste plastic bottle strips in soil improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**. v. 36, p. 2907-2920, marc. 2018. DOI: 10.1007/s10706-018-0512-0

ROCHA, S. A. **Avaliação da influência de fibras de polipropileno na resistência efetiva de um solo argiloso**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 19, n. 2, p. 121-132, abr./jun. 2009. DOI: 10.1590/S0104-14282009000200009

SALIMI, K.; GHAZAVI, M. Soil reinforcement and slope stabilisation using recycled waste plastic sheets. **Geomechanics and Geoengineering**. p. 1-12, oct. 2019. ISSN 1748-6025. DOI: 10.1080/17486025.2019.1683620

SENEZ, P. C.; CASAGRANDE, M. D. T. **Análise do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de politereftalato de etileno (PET) submetidas a ensaios de placa em modelo físico reduzido**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18, 2016, Minas Gerais. 6p.

SHUKLA, S. K. **Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering**. 1. ed. Townsville: Springer, 2017. 181p.

SILVA, J. de A. A. **Utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas**. 2015. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SILVA, J. B. **Avaliação do desempenho de blocos de concreto estrutural dosados com politereftalato de etileno (PET) micronizado**. 2016. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SIVAKUMAR BABU, G. L.; CHOUKSEY, S. K. Stress-strain response of plastic waste mixed soil. **Waste Management**. v. 31, n. 3, p. 481-488, 2011. DOI:10.1016/j.wasman.2010.09.018

SPINACÉ, M. A. da S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Revista Química. Nova**. v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

TANG, C.; *et al.* Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 25, n. 3, p. 194-202, june. 2007. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2006.11.002

TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. 2. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994. 284p.

TEODORO, J. M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TEODORO, J. M.; BUENO, B. S. **Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11, 1998, Brasília, 8p.

TRAN, K. Q.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. **Transportation Geotechnics**. v. 16, p. 76-84, sep. 2018. DOI: 10.1016/j.trgeo.2018.07.003

WOODHOUSE, W. W.; HANES, R. E. Dune stabilization with vegetation on the outer banks of north Carolina. **Cerc Technical Memo**. n. 22, Coastal Engineering Research Center, Washington, D.C, 1967.

ZUKRI, A.; NAZIR, R.; MENDER, F. N. An experimental study on stabilization of Pekan clay using polyethylene and polypropylene. **Ail Conference Proceedings**. v. 1892, n. 1, p. 1-6, oct. 2017. DOI: 10.1063/1.5005668

ZORNBERG, J. G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. **Géotechnique**. v. 52, n. 8, p. 593-604. 2002.

APÊNDICE A

Quadro 1: Resumo da caracterização geotécnica do solo puro e das misturas solo-PET micronizado.

ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO PURO E DAS MISTURAS SOLO-PET MICRONIZADO								
ENSAIO		PENEIRAS		SP	S95P5	S90P10	S85P15	S80P20
GRANULOMETRIA – NBR 7181/2016	PENEIRAMENTO (% PASSANDO)	2”	50,8	100	100	100	100	100
		1 ½”	38,1	100	100	100	100	100
		1”	25,4	100	100	100	100	100
		3/4"	19,1	100	100	100	100	100
		3/8”	9,5	99,52	100	100	100	99,66
		Nº 4	4,8	98,89	99,58	99,66	99,57	99,38
		Nº 10	2,0	98,13	98,48	98,79	98,65	98,34
		Nº 16	1,2	97,65	98,17	98,54	98,28	97,80
		Nº 30	0,6	96,54	96,99	97,00	96,24	96,02
		Nº 40	0,42	95,67	94,77	93,39	90,90	90,00
		Nº 60	0,25	93,56	91,38	88,73	84,86	82,69
		Nº 100	0,15	91,20	88,15	85,29	80,28	77,73
		Nº 200	0,074	88,18	84,43	82,00	76,28	73,60
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	PEDREG. GROSSO (20 – 60 mm)			0	0	0	0	0
	PEDREG. MÉDIO (6,0 – 20 mm)			1,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	PEDREG. FINO (2,0 – 6,0 mm)			0,87	1,50	1,19	1,33	1,64
	AREIA GROSSA (0,60 – 2,0 mm)			1,59	1,48	1,79	2,41	2,32
	AREIA MÉDIA (0,20 – 0,60 mm)			4,04	7,00	9,80	13,74	16,02
	AREIA FINA (0,06 – 0,2 mm)			6,50	6,50	6,40	6,60	6,20
	SILTE (0,002 – 0,06 mm)			36,92	35,03	33,21	29,05	26,80
	ARGILA (< 0,002mm)			49,08	48,47	47,59	46,85	47,00
UMIDADE HIGROSCÓPICA (%)				4,89	4,57	4,44	4,22	4,16
DENSIDADE REAL (DNER-ME 093/1994)				2,658	2,560	2,456	2,354	2,294
LIMITE DE LIQUIDEZ (NBR 6459/2016)				62	56	53	53	50
LIMITE DE PLASTICIDADE (NBR 7180/2016)				27	26	24	25	24
ÍNDICE DE PLASTICIDADE (NBR 7180/2016)				35	30	29	28	26
CLASSIFICAÇÃO SUCS				CH	CH	CH	CH	CH
CLASSIFICAÇÃO TRB				A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6

Fonte: AUTORA (2022)

APÊNDICE B

Tabela 19: Valores médios de tensão de ruptura e coeficientes de variação obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado.

Material	Corpos de prova	Grau de compactação (%)	Tensão de ruptura (kPa)	Tensão de ruptura média (kPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
SP	CP01	100	280,30	288,81	6,01	2,08
	CP02	100	292,99			
	CP03	100	293,13			
S95P5	CP01	100	337,10	333,82	3,04	0,91
	CP02	100	334,58			
	CP03	100	329,77			
S90P10	CP01	100	331,65	324,13	9,22	2,84
	CP02	100	329,61			
	CP03	99,8	311,15			
S85P15	CP01	100	329,43	318,90	12,30	3,86
	CP02	100	325,63			
	CP03	100	301,64			
S80P20	CP01	99,8	300,67	294,09	6,04	2,05
	CP02	99,8	295,51			
	CP03	99,8	286,09			

Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 20: Valores médios de tensão de ruptura e coeficientes de variação obtidos para o solo puro e para as misturas solo-PET filete.

Material	Corpos de prova	Grau de compactação (%)	Tensão de ruptura (kPa)	Tensão de ruptura média (kPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
SP	CP01	100	280,30	288,81	6,01	2,08
	CP02	100	292,99			
	CP03	100	293,13			
PET FILETE – 5mm						
S+0,25%FIL.(5mm)	CP01	99,8	308,87	314,13	8,55	2,72
	CP02	99,8	307,33			
	CP03	99,8	326,18			
S+0,5%FIL.(5mm)	CP01	99,7	351,69	364,95	9,48	2,60
	CP02	100	373,25			
	CP03	99,8	369,91			
S+1,0%FIL.(5mm)	CP01	100	349,60	341,00	8,25	2,42
	CP02	100	343,52			
	CP03	100	329,88			
PET FILETE – 10mm						
S+0,25%FIL.(10mm)	CP01	100	329,43	323,35	6,37	1,97
	CP02	99,8	326,06			
	CP03	99,7	314,56			
S+0,5%FIL.(10mm)	CP01	100	369,32	368,62	4,29	1,16
	CP02	100	373,49			
	CP03	100	363,05			
S+1,0%FIL.(10mm)	CP01	100	349,92	349,98	0,44	0,13
	CP02	100	350,54			
	CP03	100	349,47			
PET FILETE – 15mm						
S+0,25%FIL.(15mm)	CP01	100	367,53	366,69	7,64	2,08
	CP02	100	356,94			
	CP03	100	375,60			
S+0,5%FIL.(15mm)	CP01	100	398,95	391,10	9,33	2,38
	CP02	100	396,36			
	CP03	100	378,00			
S+1,0%FIL.(15mm)	CP01	100	354,89	358,60	7,21	2,01
	CP02	100	368,69			
	CP03	100	352,24			

Fonte: AUTORA (2022)

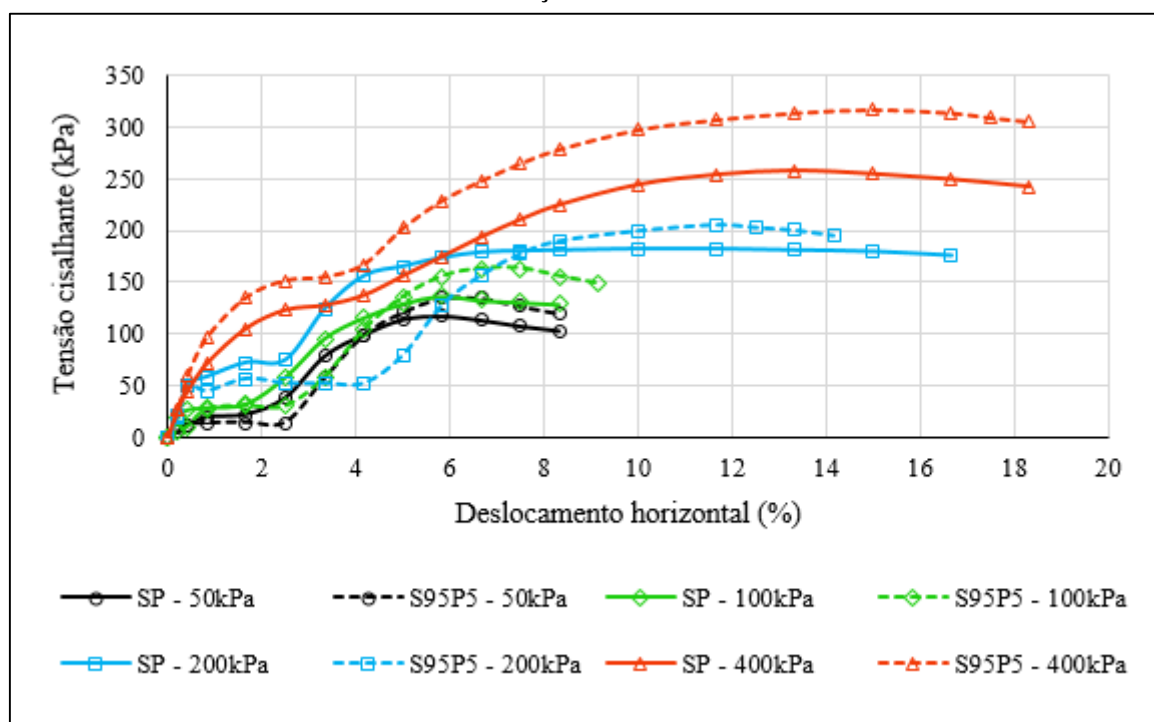
APÊNDICE C

Tabela 21: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado em condição de umidade natural.

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)				
	SP	S95P5	S90P10	S85P15	S80P20
50	117,68	134,59	127,43	122,88	122,23
100	136,54	163,19	148,24	141,74	137,84
200	182,24	205,67	182,89	175,08	174,43
400	258,12	316,64	271,77	252,27	249,67

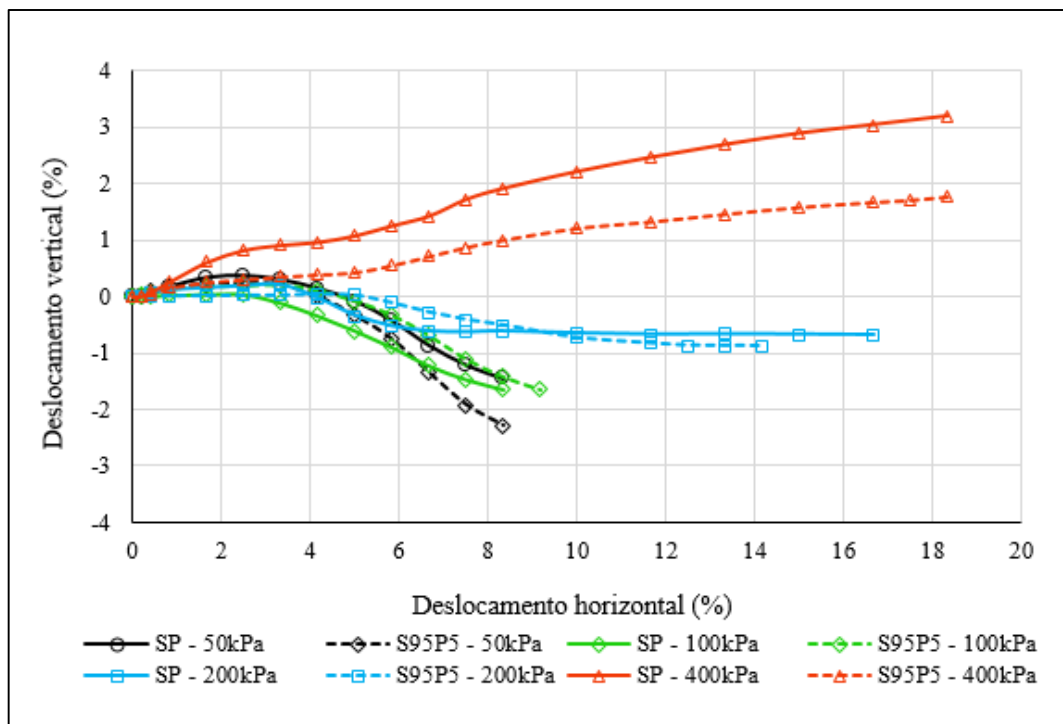
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 75: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico no teor de 5% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



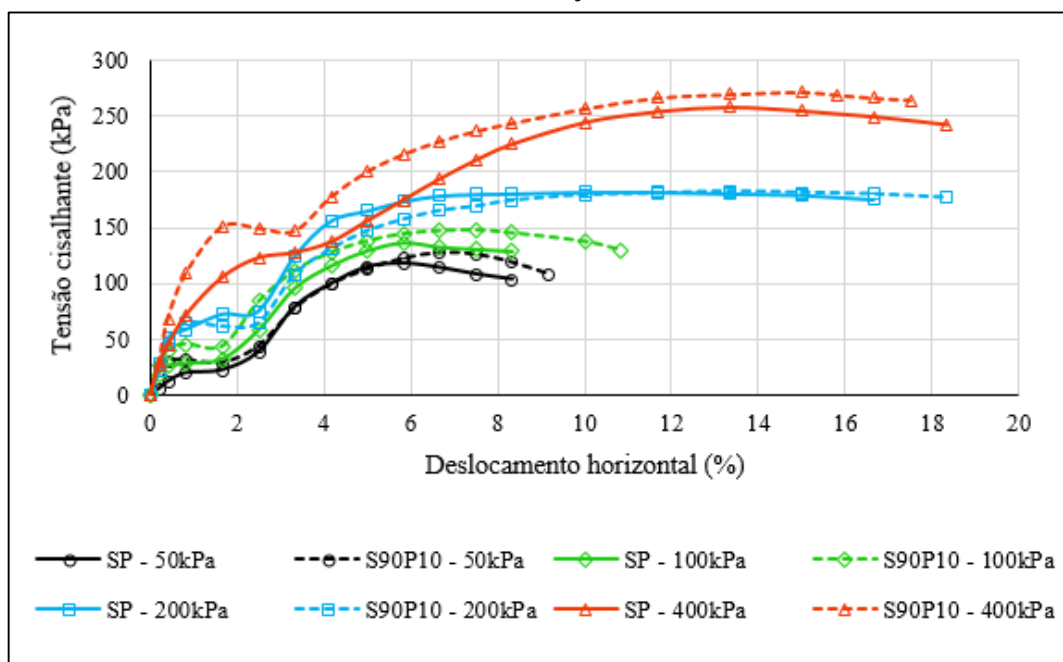
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 76: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



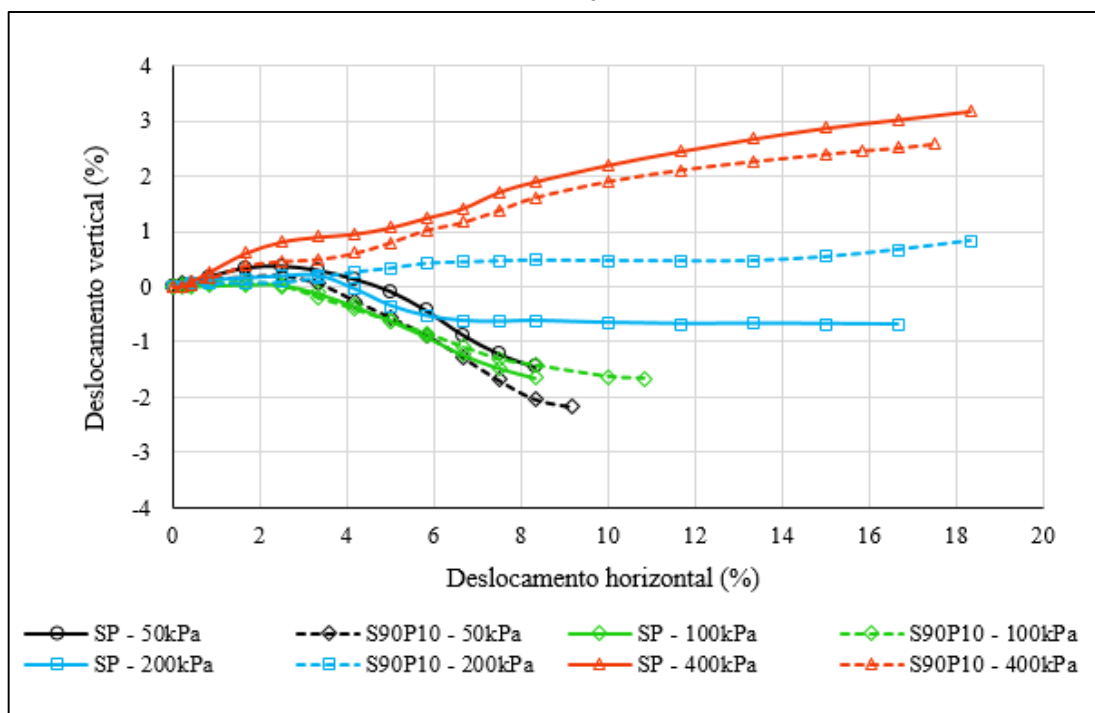
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 77: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



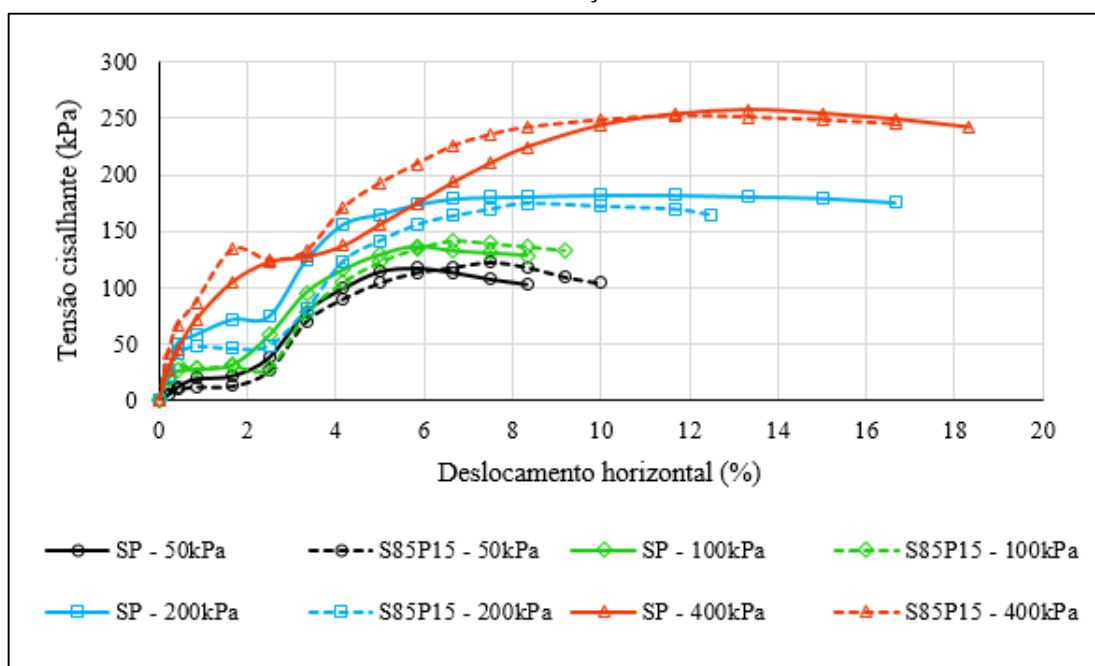
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 78: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



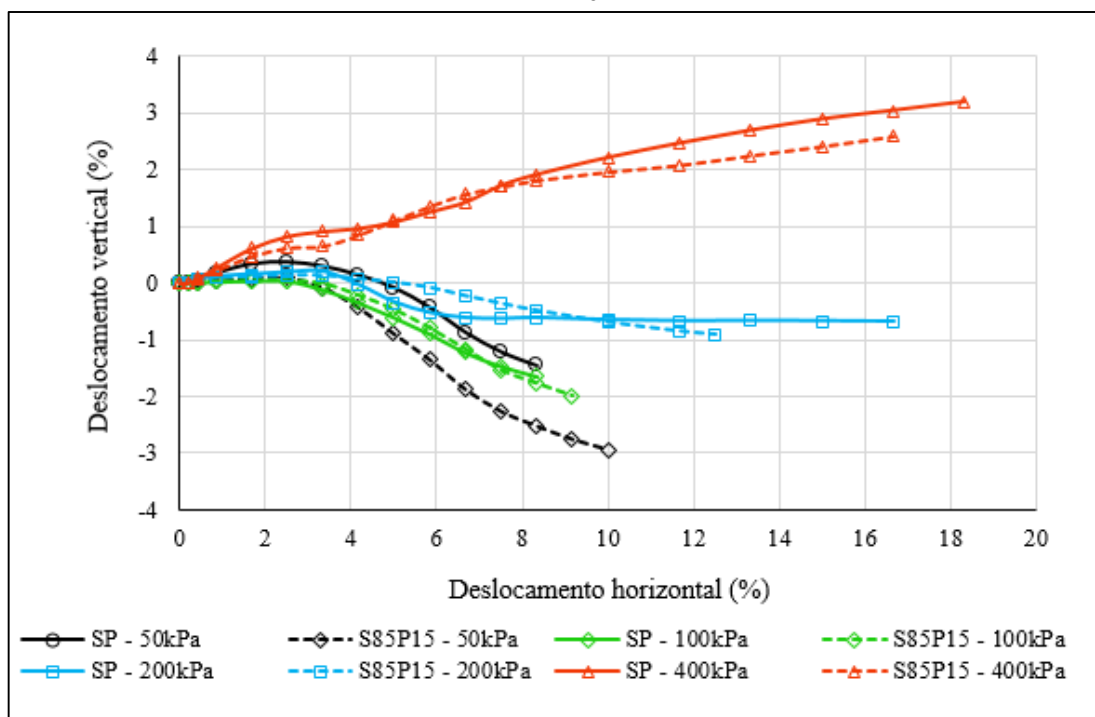
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 79: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



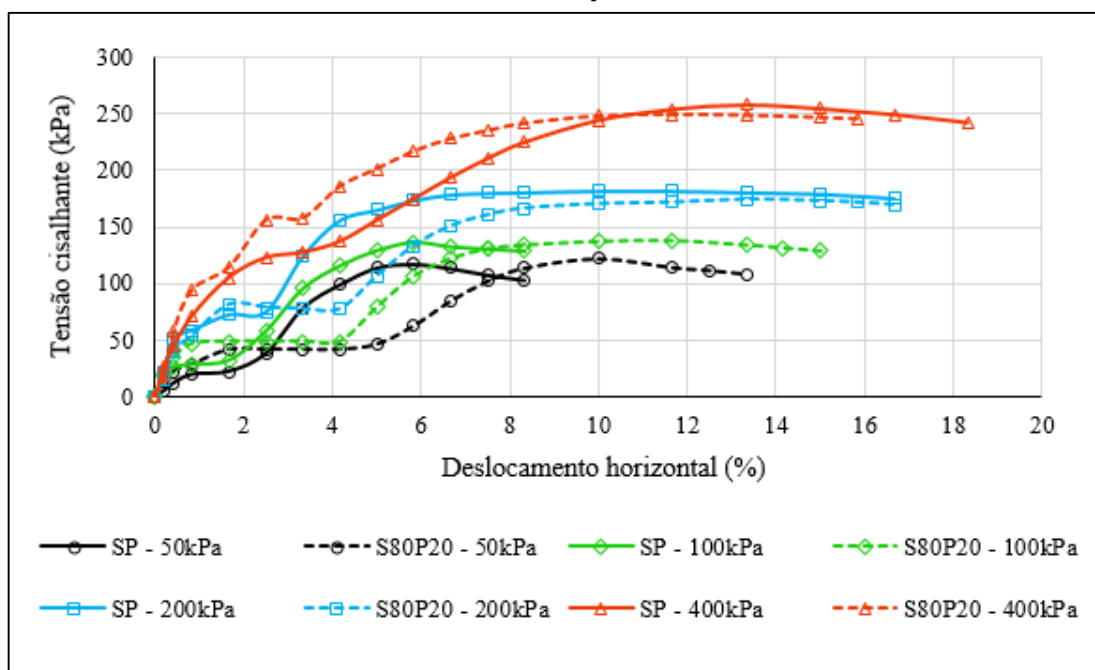
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 80: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



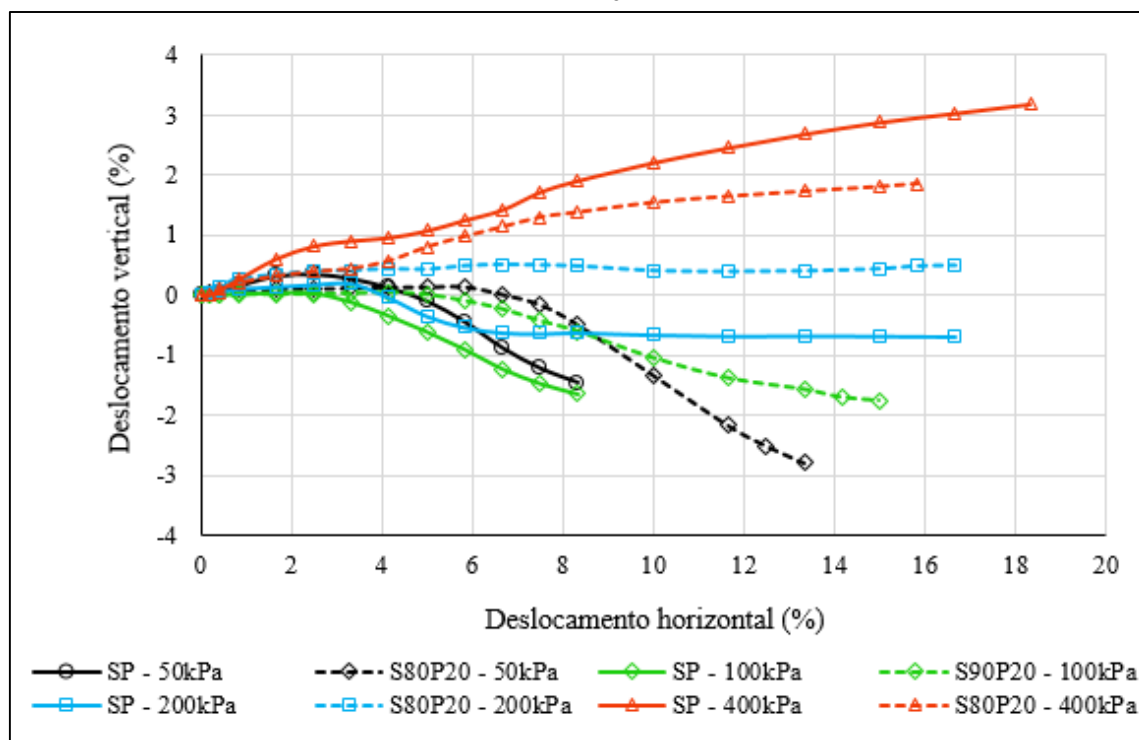
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 81: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 82: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco e em condição de umidade natural.



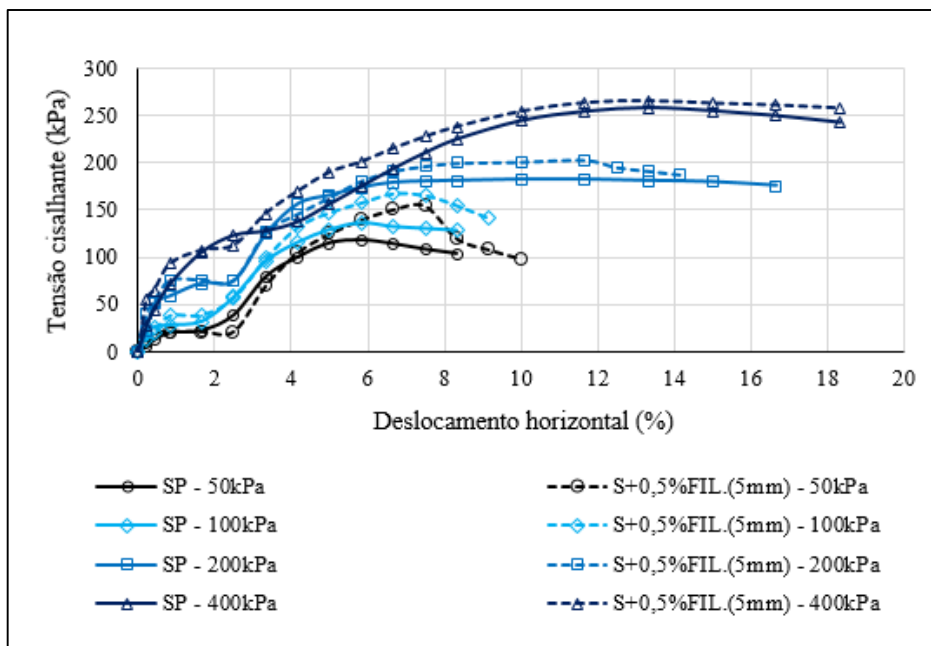
Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 22: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete em condição de umidade natural.

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)			
	SP	S+0,5%FIL.(5mm)	S+0,5%FIL.(10mm)	S+0,5%FIL.(15mm)
50	117,68	154,74	156,69	165,80
100	136,54	167,75	175,55	185,50
200	182,24	203,07	211,53	219,76
400	258,12	265,27	275,67	284,78

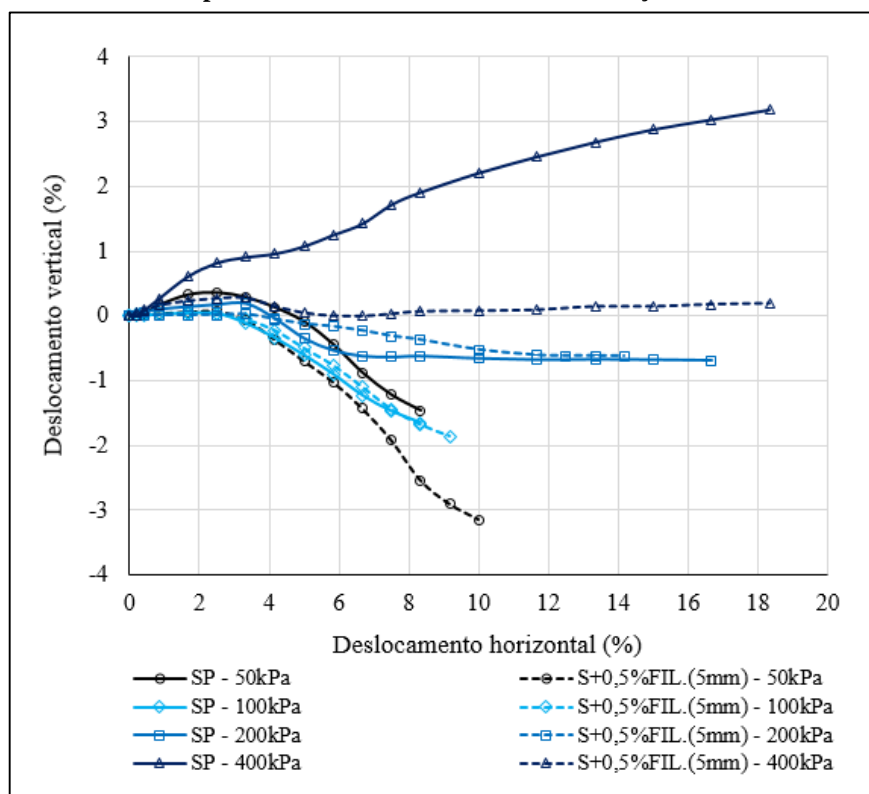
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 83: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm ensaiados em condição de umidade natural.



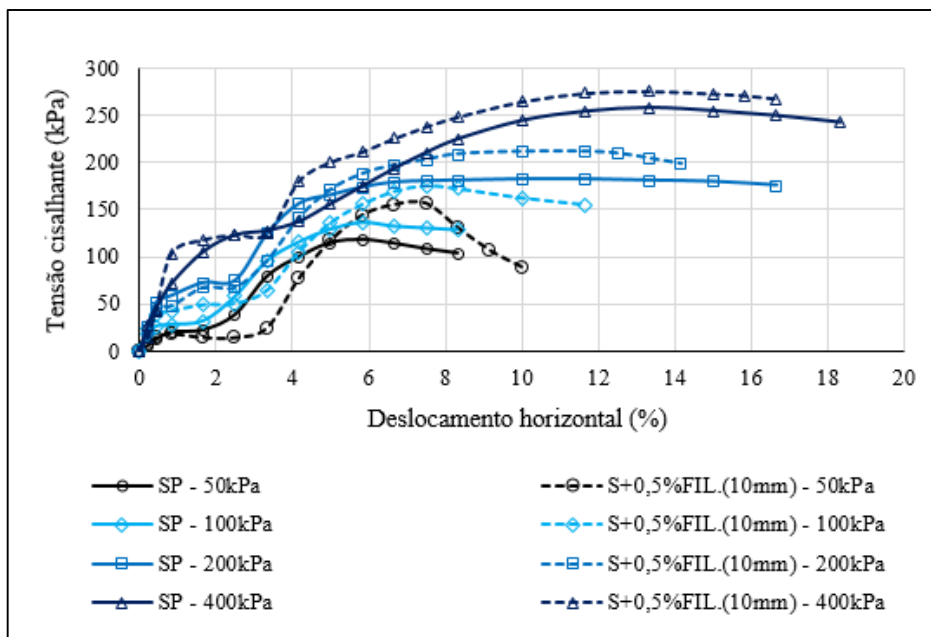
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 84: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm, ensaiados em condição de umidade natural.



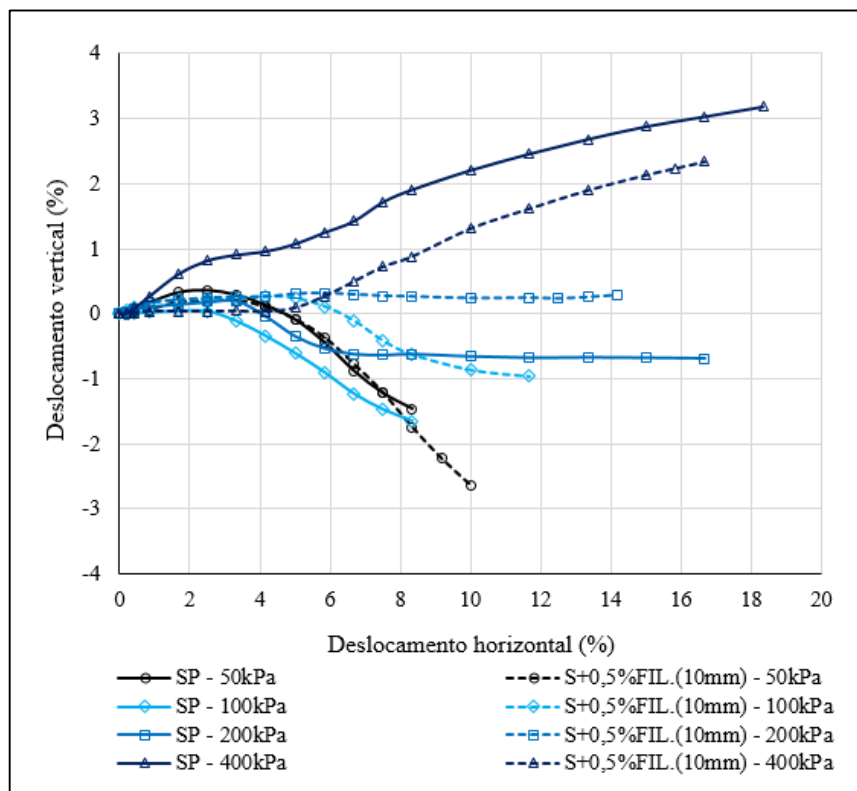
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 85: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm ensaiados em condição de umidade natural.



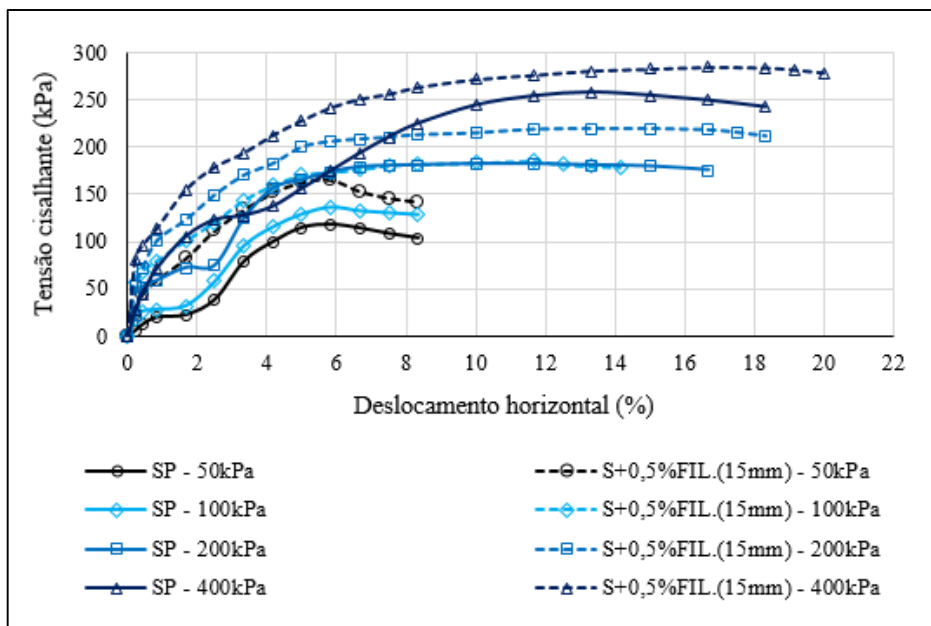
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 86: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm, ensaiados em condição de umidade natural.



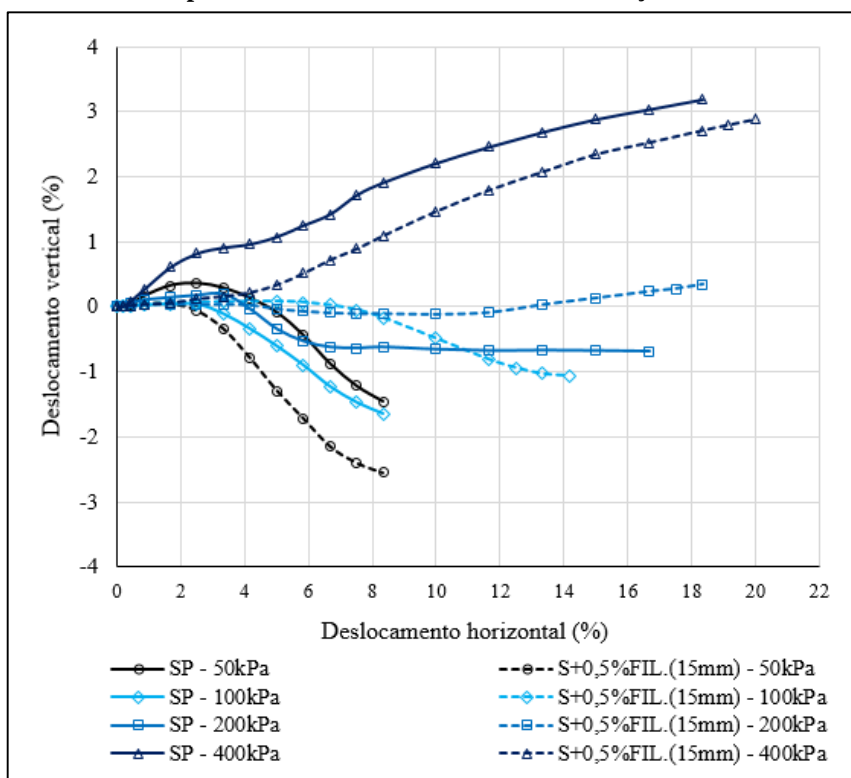
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 87: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm ensaiados em condição de umidade natural.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 88: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm, ensaiados em condição de umidade natural.



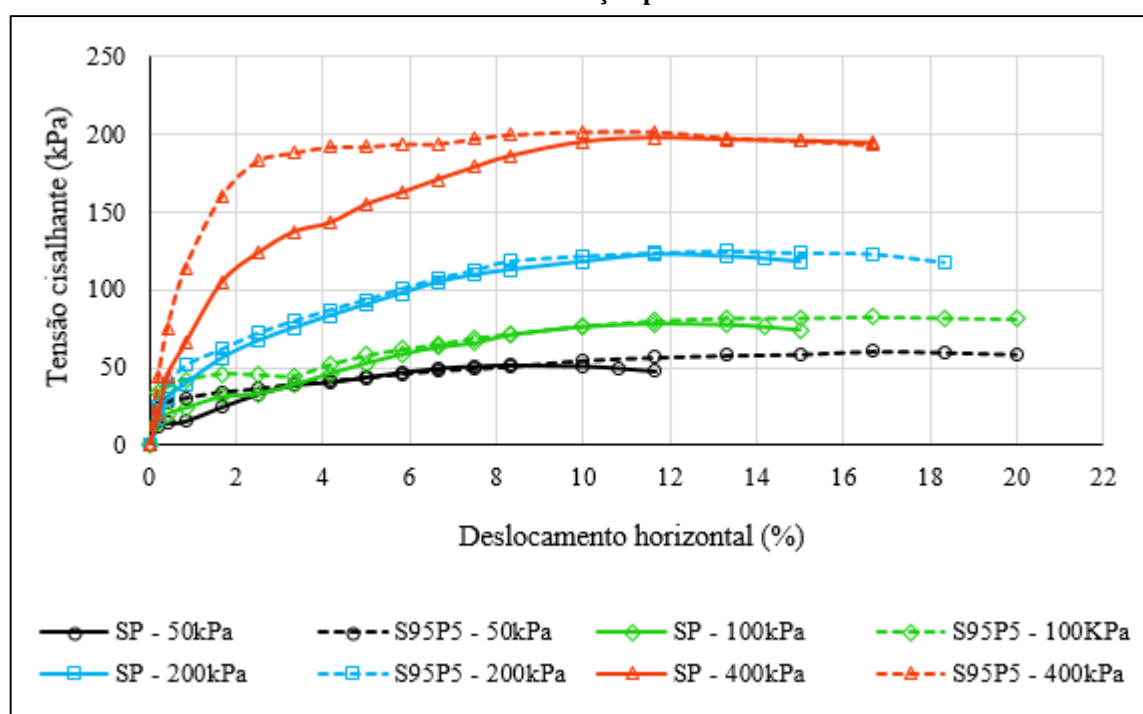
Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 23: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET micronizado em condição previamente inundada.

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)				
	SP	S95P5	S90P10	S85P15	S80P20
50	52,01	60,47	58,52	56,57	55,92
100	78,02	82,57	80,62	76,72	76,07
200	122,36	124,97	116,51	115,20	114,55
400	197,65	201,55	195,05	191,80	191,15

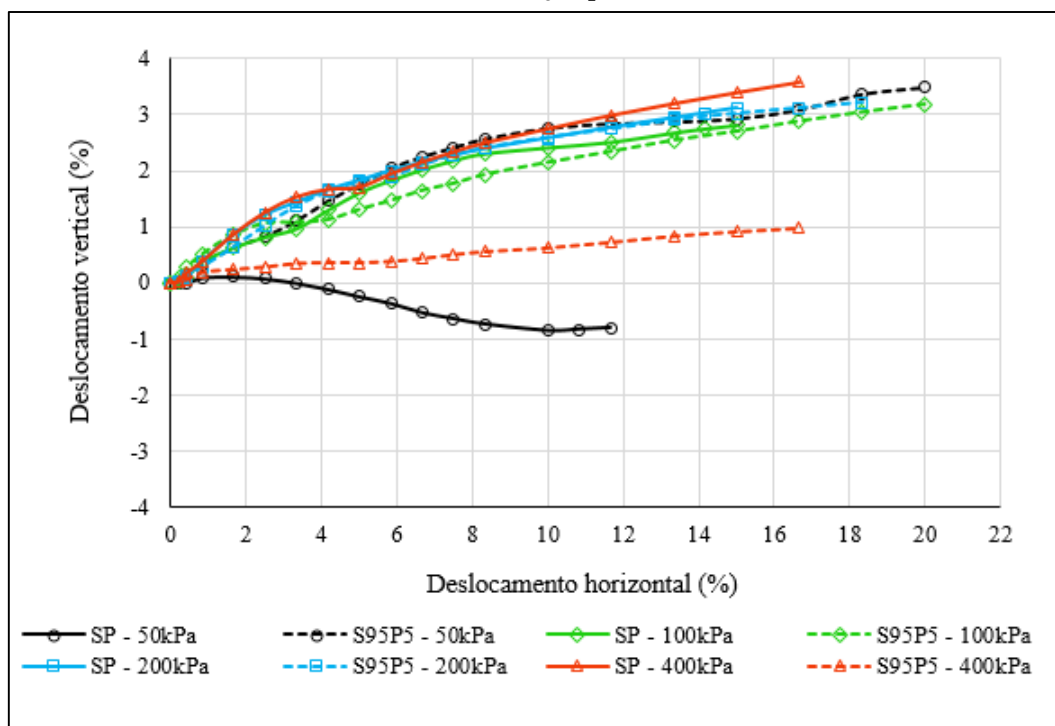
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 89: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.



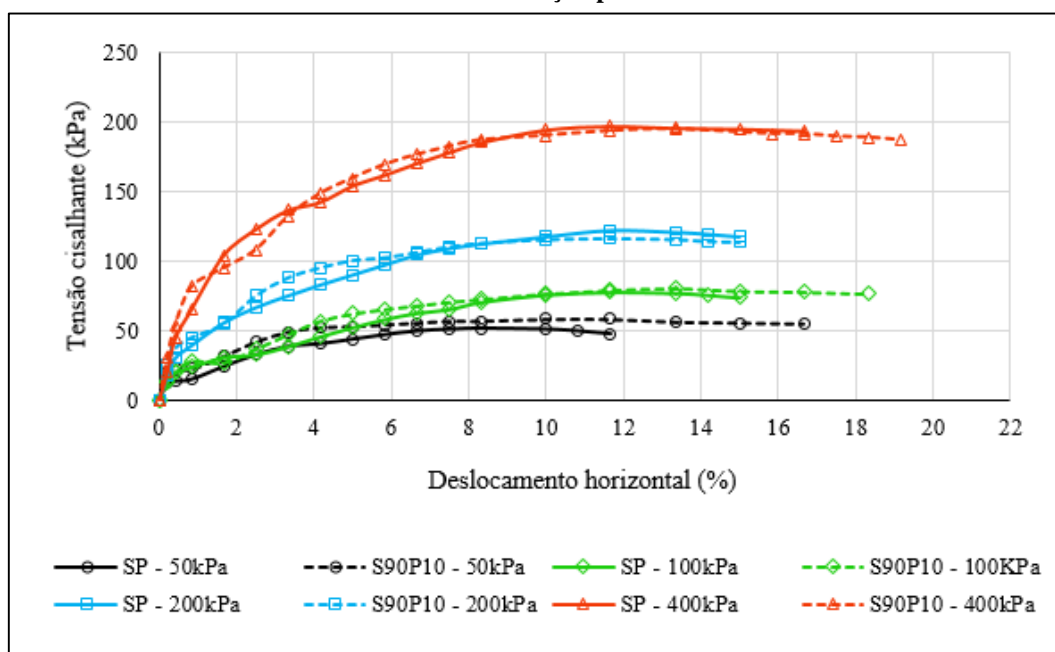
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 90: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.



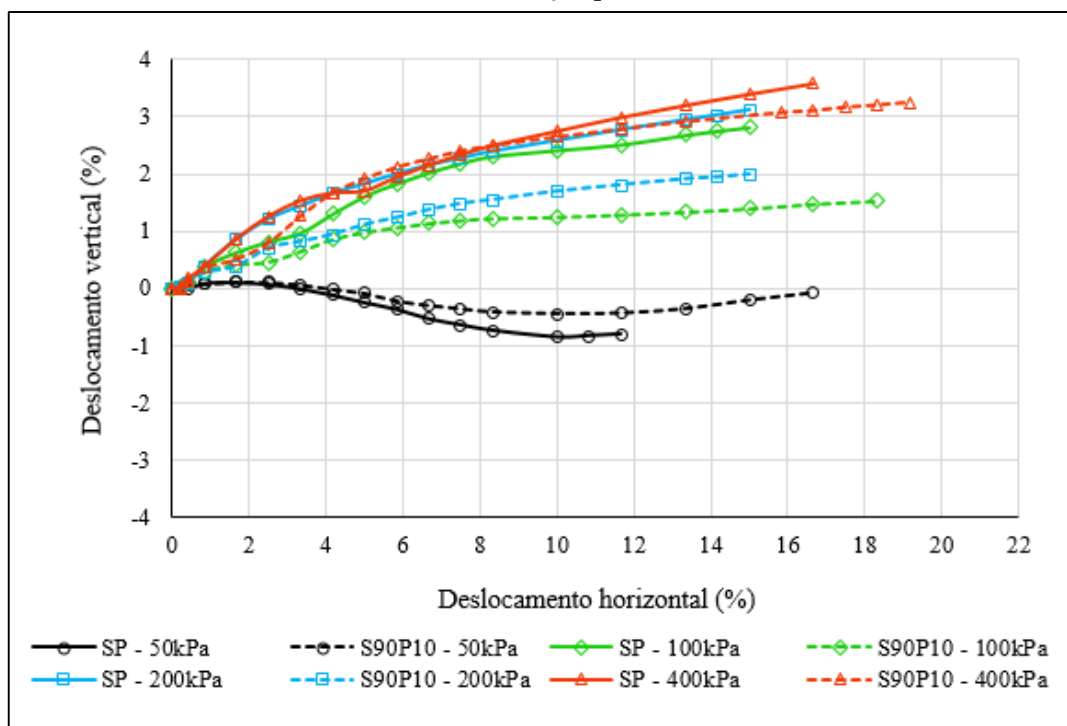
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 91: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.



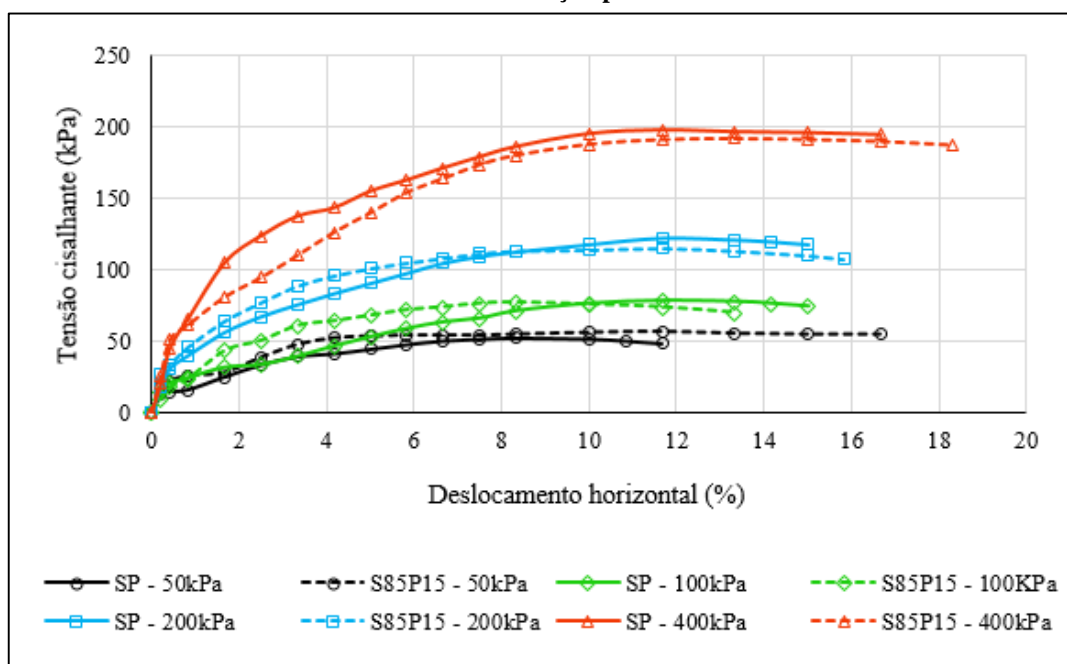
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 92: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 10% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.



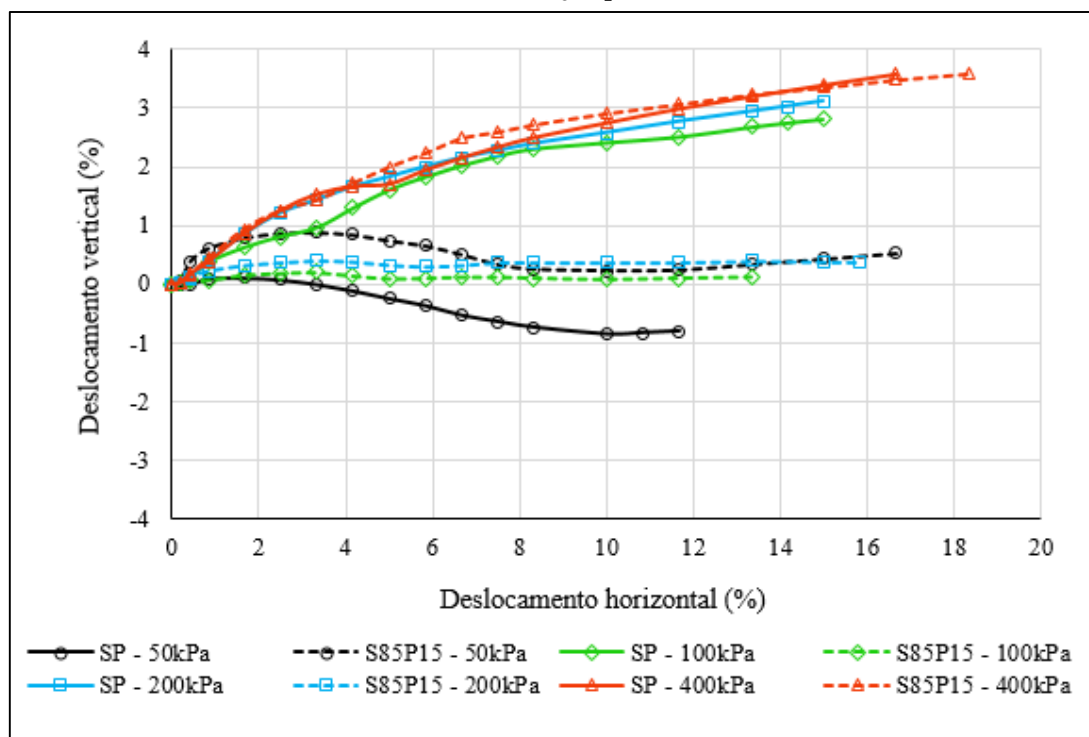
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 93: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.



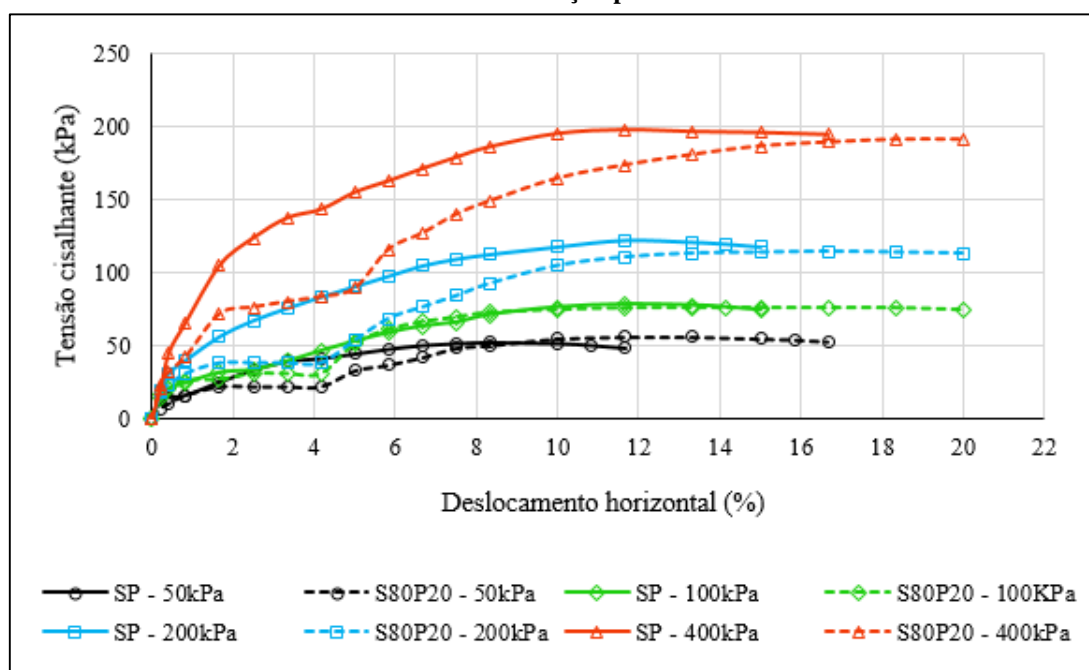
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 94: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 15% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.



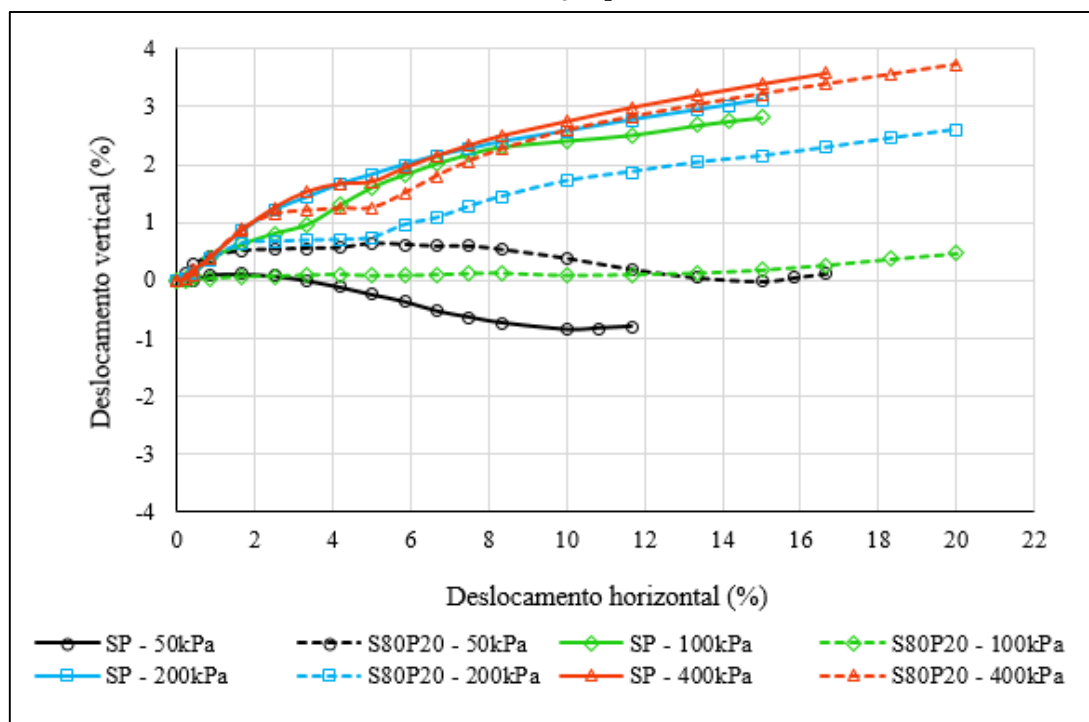
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 95: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco e em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 96: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 20% em relação à massa de solo seco em condição previamente inundada.



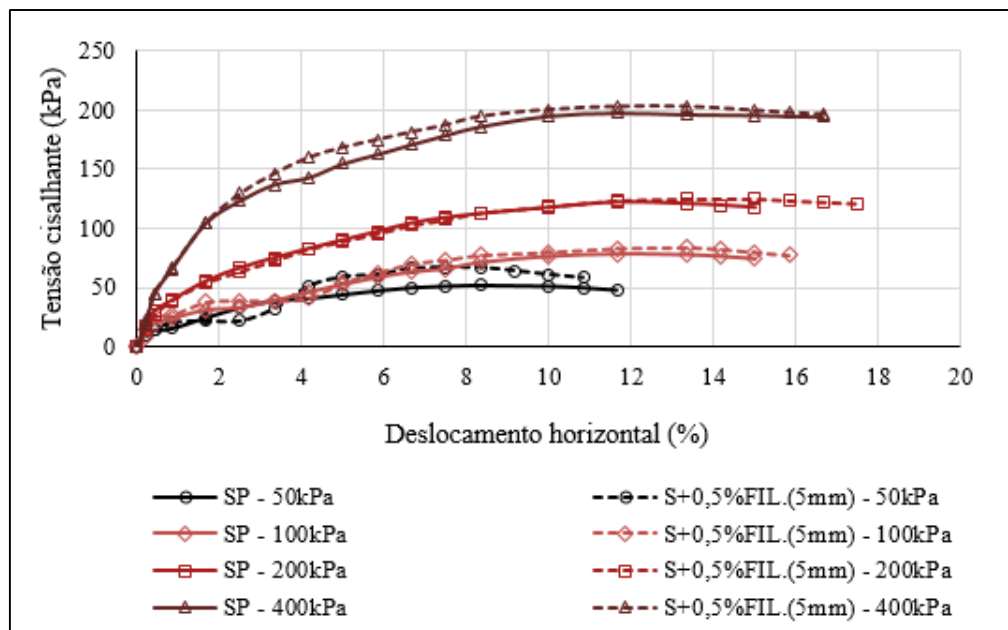
Fonte: AUTORA (2022)

Tabela 24: Tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo puro e para as misturas solo-PET filete em condição previamente inundada.

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)			
	SP	S+0,5%FIL.(5mm)	S+0,5%FIL.(10mm)	S+0,5%FIL.(15mm)
50	52,01	66,97	71,52	74,77
100	78,02	83,87	87,77	91,12
200	122,36	124,97	128,87	130,04
400	197,65	202,86	206,76	209,36

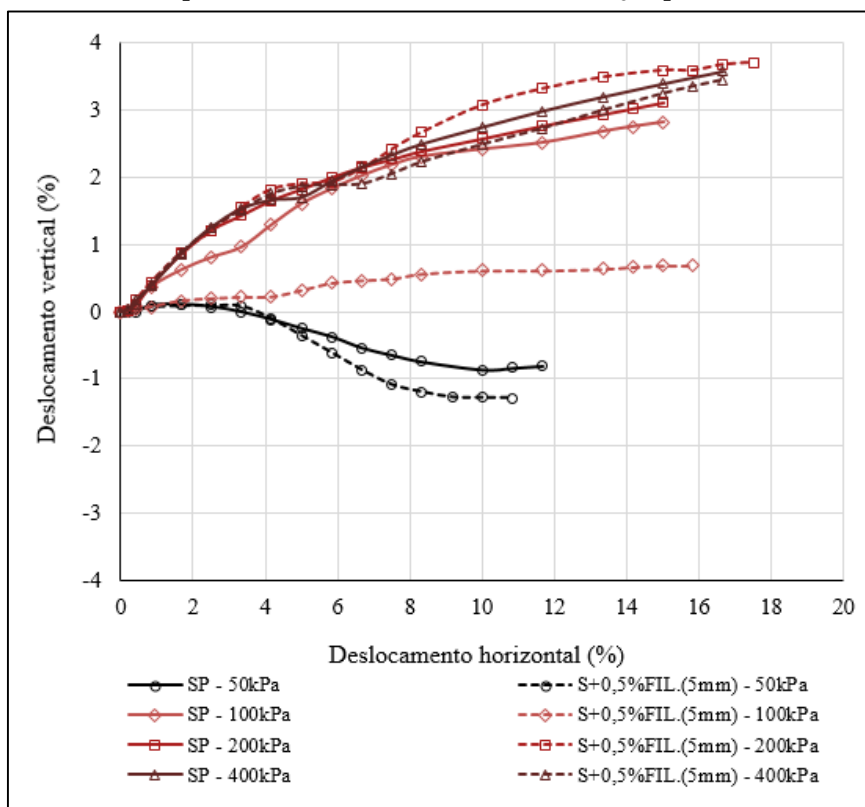
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 97: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm ensaiados em condição previamente inundada.



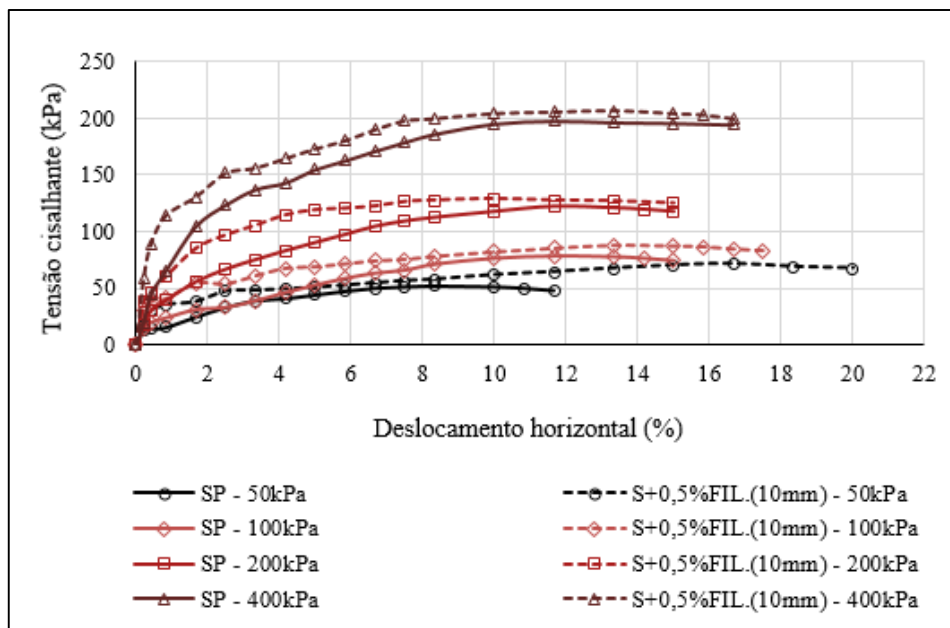
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 98: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 5mm, ensaiados em condição previamente inundada.



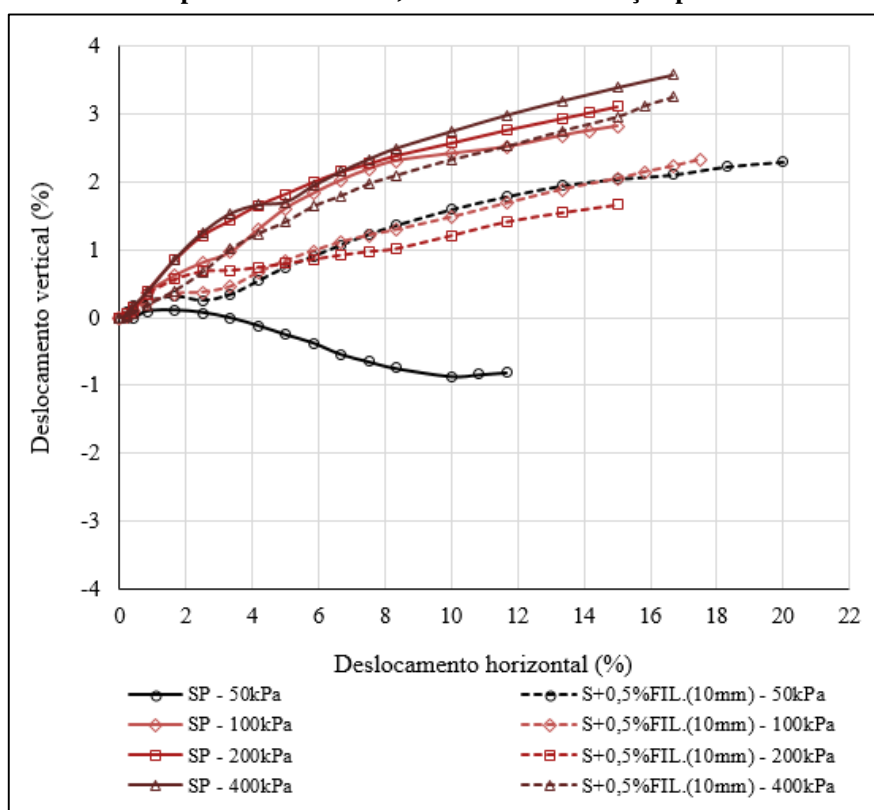
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 99: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm ensaiados em condição previamente inundada.



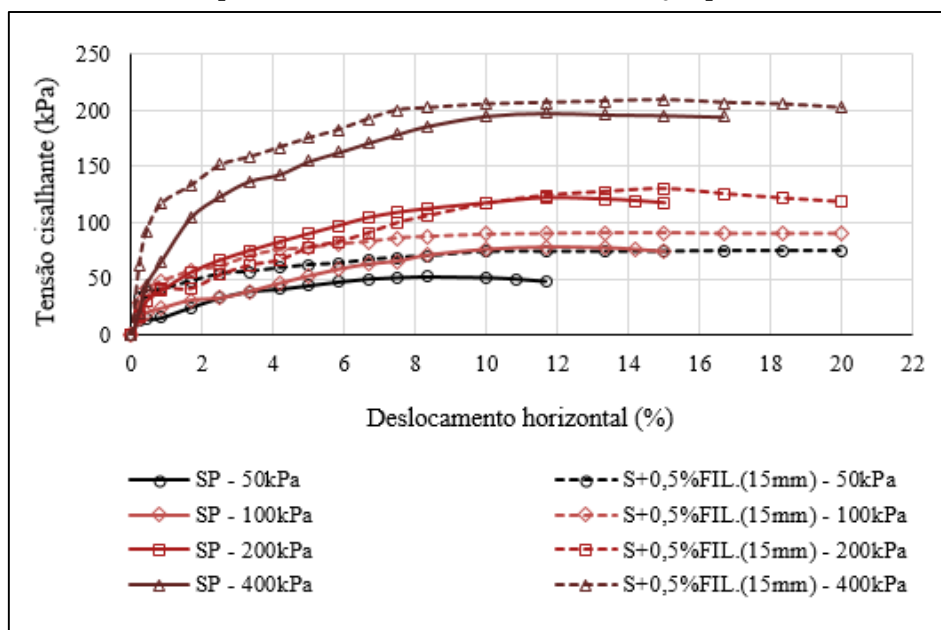
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 100: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 10mm, ensaiados em condição previamente inundada.



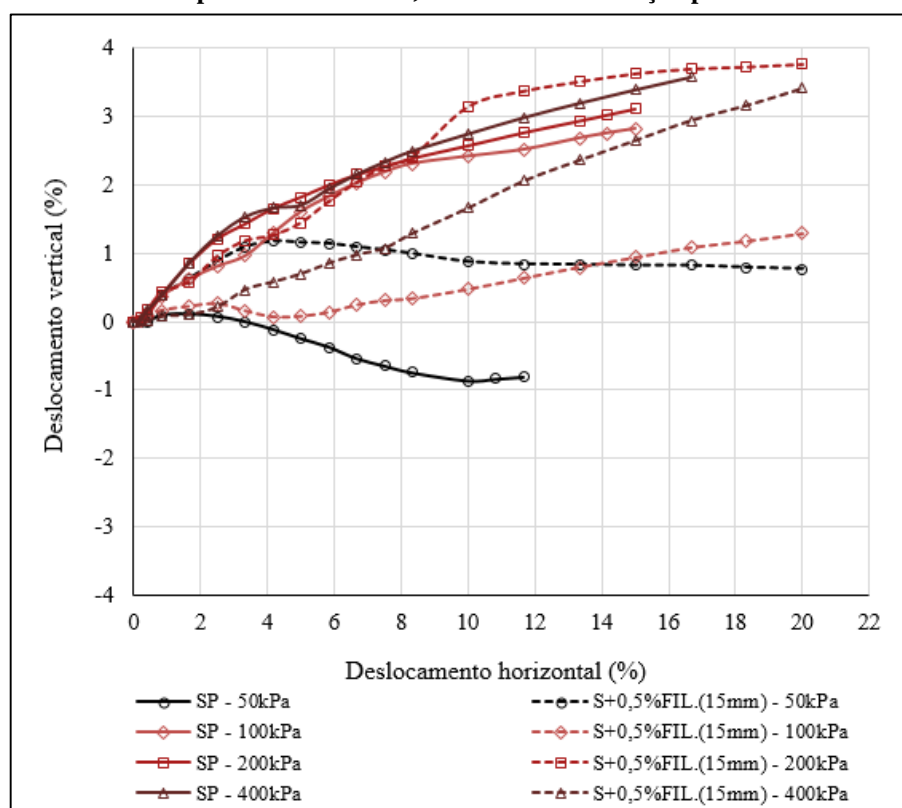
Fonte: AUTORA (2022)

Figura 101: Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

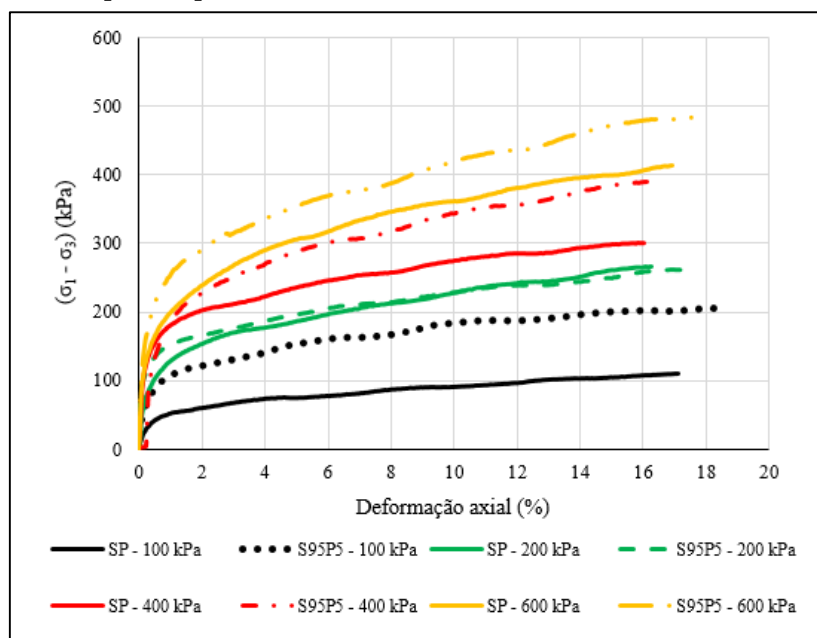
Figura 102: Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5% em relação à massa de solo seco e com comprimento de 15mm, ensaiados em condição previamente inundada.



Fonte: AUTORA (2022)

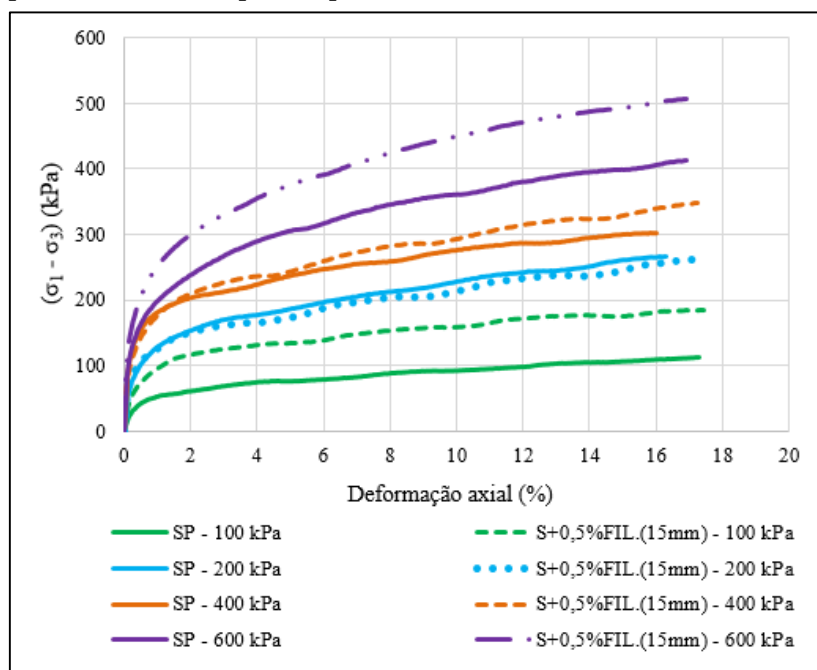
APÊNDICE D

Figura 103: Curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET micronizado contendo o material polimérico reciclado no teor de 5%, em relação à massa de solo seco, para as pressões de confinamento de 100, 200, 400 e 600 kPa.



Fonte: AUTORA (2022)

Figura 104: Curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial obtidas para o solo puro e para a mistura solo-PET filete contendo o material polimérico reciclado no teor de 0,5%, em relação à massa de solo seco, e com comprimento de 15 mm para as pressões de confinamento de 100, 200, 400 e 600 kPa.



Fonte: AUTORA (2022)