



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Doutorado

Engenharia Civil e Ambiental

MARIANA BASOLLI BORSATTO

**COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DE SOLOS LATERÍTICOS COM
INCLUSÃO DE TIRAS PLÁSTICAS**

Bauru
2025



MARIANA BASOLLI BORSATTO

**COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DE SOLOS LATERÍTICOS COM
INCLUSÃO DE TIRAS PLÁSTICAS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Lodi



B738c

Borsatto, Mariana Basolli

Comportamento da resistência de solos lateríticos com inclusão de
tiras plásticas / Mariana Basolli Borsatto. -- Bauru, 2025

161 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Paulo César Lodi

1. Reforço de solo. 2. Resíduos plásticos. 3. Mistura solo-tiras. 4.
Tiras de tereftalato de polietileno. 5. Tiras de polipropileno. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARIANA BASOLLI BORSATTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 11 dias do mês de abril do ano de 2025, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de MARIANA BASOLLI BORSATTO, intitulada **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO E RESISTÊNCIA DE SOLOS COM INCLUSÃO DE TIRAS PLÁSTICAS RECICLÁVEIS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO CESAR LODI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / UNESP - Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru, Prof. Dr. FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANÇA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFNR, Prof. Dr. GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO (Participação Virtual) do(a) Engenharia Civil e Ambiental / Universidade de Brasília, Prof. Dr. FERNANDO LUIZ LAVOIE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Geotecnia / Universidade de São Paulo - USP / Escola de Engenharia de São Carlos. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO CESAR LODI



Documento assinado digitalmente

PAULO CESAR LODI

Data: 16/04/2025 09:50:04-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA MARIANA BASOLLI BORSATTO DE: **"AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO E RESISTÊNCIA DE SOLOS COM INCLUSÃO DE TIRAS PLÁSTICAS RECICLÁVEIS "**

PARA:

"COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DE SOLOS LATERÍTICOS COM INCLUSÃO DE TIRAS PLÁSTICAS"

Bauru, 14 de abril de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **PAULO CESAR LODI**
Data: 16/04/2025 09:51:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. PAULO CÉSAR LODI
Orientador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Edinan e Márcia

À minha irmã, Juliana

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo César Lodi, pela orientação e amizade desde a graduação, quando proporcionou a oportunidade de me tornar bolsista de iniciação científica.

Aos técnicos Sergio, Gustavo, Israel e Tiago, do Laboratório de Mecânica dos Solos e Construção Civil da FEB, pela grande ajuda durante a realização dos ensaios.

Aos meus pais, Edinan e Márcia, e à minha irmã, Juliana, por todo incentivo, companheirismo e por proporcionar todo o apoio necessário para chegar até aqui.

Aos amigos que me apoiaram e ajudaram na coleta de materiais necessários para o desenvolvimento dessa pesquisa; e aos amigos que a pós-graduação me trouxe, os quais tornaram essa jornada mais fácil e divertida.

À Deus, por todas as oportunidades e bençãos proporcionadas.

“Tudo é possível àquele que crê.”

(Marcos 9:23)

RESUMO

BORSATTO, M. B. (2025) **Comportamento da resistência de solos lateríticos com inclusão de tiras plásticas**. Bauru, 161 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Esse trabalho avaliou os efeitos provocados na resistência de solo arenoso e argiloso pela inclusão de diferentes tamanhos e porcentagens de tiras de Polietileno Tereftalato (PET) e Polipropileno (PP), cortadas a partir de embalagens reutilizadas. As propriedades de resistência foram estudadas por meio de ensaios de resistência à compressão simples, a partir do qual foram obtidos os teores ótimos de porcentagem e tamanhos de tiras nas misturas para ambos os solos; cisalhamento direto, no qual foi possível observar as variações que ocorreram nos valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito; ensaio de determinação do índice de suporte Califórnia, no qual pôde-se analisar as variações na capacidade de expansão do solo e nos valores de CBR e ensaio de resistência à tração por compressão diametral, visto que os geossintéticos apresentam boa resistência e aplicação à esse tipo de solicitação. Os ensaios foram realizados conforme as normas vigentes e métodos utilizados pela literatura corrente. Os teores ótimos de mistura foram obtidos para o solo arenoso com adição de 1,5% de tiras PET de 20 mm de comprimento e 2,0% de tiras PP de 20 mm de comprimento, enquanto para o solo argiloso, tanto as tiras PET como PP tiveram seus valores ótimos de resistência na mistura com 30 mm e 2,0% de massa de solo seco. O CBR apresentou melhora no solo arenoso tanto para a adição de tiras PET quanto PP, aumentando em 28% e 26% respectivamente, sendo possível reduzir a espessura de camadas de pavimentos com a inclusão de tiras plásticas; entretanto o solo argiloso não apresentou melhora no CBR para nenhuma situação estudada, não se mostrando interessante a adição de tiras em aplicações práticas para esse tipo de solo. Os principais resultados mostram que em termos de intercepto coesivo e ângulo de atrito, ambos os tipos de solos estudados apresentaram melhora na resistência ao cisalhamento com a adição de tiras PET e PP, comparado ao solo puro. A resistência a tração da mistura solo-tiras foi menor quando comparada ao solo sem adição de tiras plásticas, entretanto estas atuaram de modo que o comportamento do solo à ruptura por tração foi alterado, tiras parecem segurar o maciço, aumentando o nível de deformação e impedindo que a massa de solo se desprenda. De maneira geral, o uso de tiras provenientes de recipientes reutilizados fabricados em Polietileno Tereftalato (PET) e Polipropileno (PP) mostrou-se uma alternativa viável para promover

melhoria na resistência do solo, além de permitir uma destinação ambientalmente correta para esses materiais.

Palavras-chave: reforço de solo, melhoria do solo, sustentabilidade ambiental, resíduos plásticos, tiras de tereftalato de polietileno, tiras de polipropileno, mistura solo-tiras.

ABSTRACT

BORSATTO, M. B. (2025) **Behavior of the resistance of lateritic soils with inclusion of plastic strips**. Bauru, 161 p. Doctoral thesis - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

This study evaluated the effects on the resistance of sandy and clayey soils by the inclusion of different sizes and percentages of polyethylene terephthalate (PET) and polypropylene (PP) strips cut from reused packaging. The resistance properties were studied by means of simple uniaxial compression resistance tests, from which the optimum percentage and strip sizes in the mixtures for both soils were obtained; direct shear, in which it was possible to observe the variations that occurred in the cohesion intercept and friction angle values; and California support index test, in which it was possible to analyze the variations in the soil expansion capacity and in the CBR values, according to the current standards and methods used in the current literature. The optimum mixture contents were obtained for the sandy soil with the addition of 1.5% of 20 mm long PET strips and 2.0% of 20 mm long PP strips, while for the clayey soil, both PET and PP strips had their optimum strength values in the mixture with 30 mm and 2.0% of dry soil mass. The CBR showed improvement in the sandy soil for both the addition of PET and PP strips, increasing by 28% and 26% respectively, making it possible to reduce the thickness of pavement layers with the inclusion of plastic strips; however, the clayey soil did not present an improvement in the CBR for any situation studied, not proving to be interesting the addition of strips in practical applications for this type of soil. The main results show that in terms of cohesive intercept and friction angle, both types of soils studied presented improvement in shear strength with the addition of PET and PP strips, compared to the pure soil. The tensile strength of the soil-strips mixture was lower when compared to the soil without the addition of plastic strips, however, these acted in such a way that the behavior of the soil to rupture by traction was altered, strips seem to hold the mass, increasing the level of deformation and preventing the soil mass from coming loose. In general, the use of strips from reused containers made of Polyethylene Terephthalate (PET) and Polypropylene (PP) has proven to be a viable alternative for improving soil resistance, in addition to allowing an environmentally correct disposal of these materials.

Keywords: soil reinforcement, soil improvement, environmental sustainability, plastic waste, polyethylene terephthalate strips, polypropylene strips, geotechnical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção de plástico no mundo.....	18
Figura 2. Quantidade de documentos divididos por agência financiadora para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>environmental Sustainability</i> ".	19
Figura 3. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>environmental Sustainability</i> ".	20
Figura 4. Quantidade de documentos por autor para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>environmental Sustainability</i> ".	20
Figura 5. Quantidade de documentos por país para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>environmental Sustainability</i> ".	21
Figura 6. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>plastic waste</i> ".	22
Figura 7. Quantidade de documentos por país para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>plastic waste</i> ".	22
Figura 8. Quantidade de documentos divididos por instituições de pesquisa para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>plastic waste</i> ".	23
Figura 9. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>polyethylene terephthalate</i> ".	24
Figura 10. Quantidade de documentos por área do conhecimento para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>polyethylene terephthalate</i> ".	24
Figura 11. Quantidade de documentos por autor para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>polyethylene terephthalate</i> ".	25
Figura 12. Quantidade de documentos por país para a combinação " <i>soil improvement</i> " AND " <i>polyethylene terephthalate</i> ".	25
Figura 13. Quantidade de documentos por área do conhecimento para a combinação " <i>geotechnical properties</i> " AND " <i>polyethylene terephthalate</i> " OR " <i>polypropylene</i> ".	26
Figura 14. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação " <i>geotechnical properties</i> " AND " <i>polyethylene terephthalate</i> " OR " <i>polypropylene</i> ".	27
Figura 15. Quantidade de documentos por país para a combinação " <i>geotechnical properties</i> " AND " <i>polyethylene terephthalate</i> " OR " <i>polypropylene</i> ".	27

Figura 16 - Configurações variadas de um compósito de solo reforçado com fibra. Adaptado de Dejaloud e Jafarian (2016).	35
Figura 17 - Resposta ao cisalhamento - deslocamento horizontal para areia não reforçada e areia reforçada: (a) teor de fibras de 0,10%; (b) teor de fibras de 0,25%; (c) teor de fibras de 0,50%; (d) teor de fibras de 1,0%. Adaptado de Yetimoglu e Salbas (2003).....	38
Figura 18 - Efeito do teor de fibras no solo tratado com fibra e cal em amostras após 28 dias de cura: (a) coesão; (b) ângulo de atrito. Adaptado de Caia et al. (2006).....	39
Figura 19 - Relação entre os parâmetros de resistência do solo e teor de fibra: (a) coesão e teor de fibras; (b) ângulo de atrito interno e teor de fibra. Adaptado de Tang et al. (2007)..	40
Figura 20 - Comportamento mecânico sob ensaio de compressão uniaxial. Adaptado de Plé e Lê (2012).	40
Figura 21 - (a) Variação do ângulo de atrito interno em função do teor de fibra: 1) fibras lisas (triaxiais); 2) fibras lisas (cisalhamento direto); 3) fibras em malha (triaxial); 4) fibras em malha (cisalhamento direto). (b) Influência do comprimento da fibra no ângulo de atrito interno.	42
Figura 22 - Efeito do teor de fibras no módulo de elasticidade de areia reforçada em dois níveis de deformação: marcadores vazios para $\varepsilon = 10^{-3}$ e marcadores cheios para $\varepsilon = 10^{-2}$. Adaptado de Claria e Vettorelo (2016).....	42
Figura 23 - Círculo de Mohr: (a) solo não reforçado; (b) solo reforçado com teor de 0,1%; (c) solo reforçado com teor de 0,3%; (d) solo reforçado com teor de 0,6%; (e) solo reforçado com teor de 1%. Adaptado de Botero et al. (2015).	44
Figura 24 - Círculo de Mohr de tensões efetivas: (a) solo não reforçado; (b) solo reforçado com 30% de fibras de nylon. Adaptado de Estabragh et al. (2011).....	47
Figura 25 - Resistência à compressão em função do teor de fibras de nylon para solo cimentado com 5%,8% e 10% de cimento e reforçado com diferentes conteúdos de fibra, em 28 dias de tempo de cura.	47
Figura 26 - Efeito da inclusão de fibras PVA: (a) aumento da força devido à inclusão de fibras; (b) Tensão axial de pico para diferentes teores de fibras. Adaptado de Park (2011). ...	49
Figura 27 – Envoltórias de resistência e residual em função do teor de fibras (FC). Adaptado de Choobbast et al. (2019).	50
Figura 28 - Relação entre o ângulo de atrito e a densidade relativa. Adaptado de Lovisa et al. (2010).....	51

Figura 29 - Mecanismos de ruptura potencial de um talude com solo reforçado e os respectivos ensaios laboratoriais mais adequados para caracterização do reforço do solo. Adaptado de Nakamura et al. (1999).....	54
Figura 30 - Esquema do comportamento mecânico na interface entre o elemento de fibra e a matriz do solo. Adaptado de Tang et al. (2007).....	55
Figura 31 - Esboço da condição de contato entre partículas rijas de solo e superfície da fibra sob pressão. Adaptado de Tang et al. (2010).	55
Figura 32 - Foto microscópica de fendas formadas na superfície da fibra após compactação. Adaptado de Tang et al. (2010).	56
Figura 33 - Interação solo-fibra: (a) esquema do mecanismo de tração da fibra no solo; (b) fase elástica pura inicial; (c) fase de amolecimento elástico; (d) fase pura de amolecimento; (e) fase residual de amolecimento; (f) fase residual pura final. Adaptado de Zhu et al. (2014).	57
Figura 34 - Imagens microscópicas de: (a) solo; (b) solo e 10% de cimento; (c) solo e 0,25% de fibras; (d) solo, 10% de cimento e 0,25% de fibras. Cristelo et al. (2015).	58
Figura 35 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de solo não cimentado reforçado com fibra: (a) solo não cimentado reforçado com fibra com uma ampliação de 1500 vezes; (b) solo não cimentado com uma ampliação de 1500 vezes; (c) superfície da fibra em solo não cimentado reforçado com fibra, com uma ampliação de 2000 vezes; d) fibra distribuição na matriz do solo; (e) cavidades e sulcos formados na superfície da fibra. Tang et al., (2007).....	59
Figura 36 - Elemento de solo com e sem reforço. Adaptado de Wheeler (1996).....	60
Figura 37 - Resultados de ensaios de compactação para solo argiloso com e sem reforço de tiras PP. Adaptado de Nataraj e McManis (1997).	64
Figura 38 - Parâmetros de resistência: (a) solo arenoso; (b) solo argiloso. Adaptado de Nataraj e McManis (1997).....	65
Figura 39 - Resistência a compressão não confinada em função do teor de tiras/fibras para diferentes comprimentos. Adaptado de Akbulut et al. (2007).....	66
Figura 40 - Variação da coesão e do ângulo de atrito interno para diferentes tipos de tiras e comprimentos. Adaptado de Akbulut et al. (2007).....	67
Figura 41 - Variação do índice suporte Califórnia em função do comprimento e teor de tiras. Adaptado de Choudhary et al. (2010).....	67

Figura 42 - (a) Tiras de plástico recicladas; (b) Mistura solo/tiras. Babu e Chouksey (2011).	67
Figura 43 - Tiras de resíduos de PET e mistura solo-tiras. Fathi et al. (2019).	68
Figura 44 - Curva de distribuição granulométrica dos solos.	71
Figura 45 - Curva de compactação.	71
Figura 46 - Tiras de PET (a) e PP (b) cortadas e prontas para a mistura com solo.	73
Figura 47 - Mistura solo-tira após homogeneização para areia/argila com tiras PET e PP.	74
Figura 48 - Fluxogramas dos ensaios: (a) solo arenoso e tiras PP; (b) solo arenoso e tiras PET; (c) solo argiloso e tiras PP; (d) solo argiloso e tiras PET.	75
Figura 49 - Preparação e montagem do corpo de prova para ensaio de cisalhamento direto.	78
Figura 50 - Mistura seca (a) e mistura úmida (b) de solo, cimento e tiras plásticas.	80
Figura 51 - Corpos de prova em câmara úmida para cura.	80
Figura 52 - Equipamento e montagem para ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	81
Figura 53 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PET em solo arenoso.	83
Figura 54 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PP em solo arenoso.	83
Figura 55 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural para tiras de 10 mm de comprimento.	87
Figura 56 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural tiras de 15 mm de comprimento.	87
Figura 57 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural para tiras de 20 mm de comprimento.	88
Figura 58 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural para tiras de 30 mm de comprimento.	88
Figura 59 – Resistência à compressão simples: (a) Solo SC natural; (b) solo SC e tiras PET 1,5% e 30mm de comprimento; (c) solo SC e tiras PP 1,5% e 30mm de comprimento. .	89
Figura 60 – Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PP de 30 mm e diferentes teores.	90

Figura 61 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 2,0% PP e diferentes comprimentos de tiras.	91
Figura 62 – Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PET de 20 mm e diferentes teores.	92
Figura 63 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 1,50% PET e diferentes comprimentos de tiras.	93
Figura 64 - Influência do teor de umidade nos resultados de RCS para solo arenoso combinado com teor ótimo de tiras PET e PP.	93
Figura 65 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PET em solo argiloso.	94
Figura 66 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PP em solo argiloso.	95
Figura 67 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 10 mm de comprimento.	98
Figura 68 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 15 mm de comprimento.	98
Figura 69 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 20 mm de comprimento.	99
Figura 70 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 30 mm de comprimento.	99
Figura 71 – Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PP de 30 mm e diferentes teores.	100
Figura 72 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 1,5% PP e diferentes comprimentos de tiras.	101
Figura 73 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PET de 30 mm e diferentes teores.	101
Figura 74 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 1,50% PET e diferentes comprimentos de tiras.	102
Figura 75 - Influência do teor de umidade nos resultados de RCS para solo argiloso combinado com teor ótimo de tiras.	103
Figura 76 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo SC e tiras PP.	104

Figura 77 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo SC e tiras PET.	105
Figura 78 – Variação do CBR do solo SC em função da inclusão de tiras PP e PET.	105
Figura 79 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo argiloso natural e com tiras PP.	106
Figura 80 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo argiloso sem e com tiras de PET.	107
Figura 81 - Variação do CBR do solo CL em função da inclusão de tiras PP e PET.	107
Figura 82 - Curvas de CBR(%) versus espessura do pavimento para diferentes condições de tráfego. (HANSEN 1959, Apud PEDDAIAH et al., 2018)	109
Figura 83 – Síntese dos resultados do ensaio de Capacidade de Suporte Califórnia (CBR).	110
Figura 84 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PP.....	111
Figura 85 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PP.....	112
Figura 86 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso com adição de tiras PP.	112
Figura 87 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PET.	113
Figura 88 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PET.	114
Figura 89 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso com adição de tiras PET....	114
Figura 90 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PP.....	116
Figura 91 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PP.....	116
Figura 92 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso com adição de tiras PP.	117
Figura 93 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PET.	118
Figura 94 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PET.	118
Figura 95 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso com adição de tiras PET. ..	119
Figura 96 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso.	120

Figura 97 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso.	121
Figura 98 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso sem e com adições de tiras plásticas.	122
Figura 99 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso sem e com adições de tiras plásticas.	122
Figura 100 - Corpo de prova de solo arenoso com adição de tiras plásticas pós ensaio de cisalhamento direto. (a) CP fora do molde; (b) corpo de prova aberto com tiras distribuídas de forma aleatória; (c) CP com tiras desmanchado.	125
Figura 101 - Corpo de prova de solo argiloso com adição de tiras plásticas pós ensaio de cisalhamento direto. (a) fibras impedindo a tendencia ao cisalhamento do CP; (b) corpo de prova fora do molde com tiras distribuídas de forma aleatória; (c) CP com tiras desmanchado.	126
Figura 102 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.	127
Figura 103 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.	128
Figura 104 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.	128
Figura 105 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.	129
Figura 106 - Corpos de prova com solo argiloso após a finalização dos ensaios (a) sem tiras; (b) tiras PP; (c) tiras PET.	130
Figura 107 - Pontos considerados para cálculo da resistência à tração por compressão diametral.	131
Figura 108 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo argiloso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.	132
Figura 109 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo argiloso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.	132
Figura 110 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo argiloso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.	133
Figura 111 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo argiloso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.	134

Figura 112 - Corpo de prova com tiras plásticas após moldagem. (a) solo argiloso; (b) solo arenoso.	135
Figura 113 - Resumo dos valores de ruptura para diferentes porcentagens de cimento e misturas.....	135
Figura 114 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.....	136
Figura 115 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.....	136
Figura 116 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.....	137
Figura 117 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.....	137
Figura 118 - Corpos de prova com solo arenoso após a finalização dos ensaios (a) sem tiras; (b) tiras PP; (c) tiras PET.....	138
Figura 119 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.	139
Figura 120 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.	139
Figura 121 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.	140
Figura 122 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.	141
Figura 123 - Resumo dos valores de ruptura para diferentes porcentagens de cimento e misturas.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo dos artigos encontrados em literatura com utilização de PET e PP para reforço de solos.....	29
Tabela 2 - Resumo das principais fibras sintéticas.	53
Tabela 3 - Parâmetros de resistência do solo reforçado com tiras plásticas recicladas. Adaptado de Babu e Chouksey (2011).	66
Tabela 4 - Caracterização das amostras de solo estudadas.	72
Tabela 5 - Propriedades típicas do PET e do PP. Adaptado de Shukla (2017).	73
Tabela 6 - Resistência do PET e do PP a determinados agentes agressivos. Adaptado de Shukla (2017)	73
Tabela 7 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 10 mm de comprimento.	84
Tabela 8 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 15 mm de comprimento.	84
Tabela 9 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 20 mm de comprimento.	84
Tabela 10 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 30 mm de comprimento	84
Tabela 11 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 10 mm de comprimento.	85
Tabela 12 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 15 mm de comprimento.	85
Tabela 13 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 20 mm de comprimento.	85
Tabela 14 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 30 mm de comprimento.	85
Tabela 15 - Resistências comparativas, sem e com tiras, em diferentes umidades.	93
Tabela 16 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 10 mm de comprimento.	95
Tabela 17 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 15 mm de comprimento.	95
Tabela 18 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 20 mm de comprimento.	96
Tabela 19 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 30 mm de comprimento.	96
Tabela 20 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 10 mm de comprimento.	96
Tabela 21 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 15 mm de comprimento.	96
Tabela 22 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 20 mm de comprimento.	97
Tabela 23 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 30 mm de comprimento.	97
Tabela 24 - Resistências comparativas, sem e com tiras, em diferentes umidades. ...	103
Tabela 25 - Síntese dos resultados de CBR.	108
Tabela 26 - Resumo dos valores de coesão e ângulo de atrito obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.	121

Tabela 27 - Variação percentual entre valores de coesão e ângulo de atrito obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, comparado com o solo sem adição de tiras (referência).....	123
Tabela 28 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.....	131
Tabela 29- Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.....	132
Tabela 30 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.....	133
Tabela 31 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.....	133
Tabela 32 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.	138
Tabela 33 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.	139
Tabela 34 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.	140
Tabela 35 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.	140

LISTA DE ABREVIATURAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CPBR	<i>Council for PET Bottle Recycling</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
NAPCOR	<i>Nacional Association for PET Container Resources</i>
NBR	Norma Brasileira
ONG	Organização Não Governamental
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PVA	Poliacetato de Vinila
RCS	Resistência à Compressão Simples
UNESP	Universidade Estadual Paulista
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos do Alfabeto Latino

<i>C.V.</i>	Coeficiente de Variação
<i>e</i>	Índice de vazios
<i>Sr</i>	Grau de saturação do solo
<i>GC</i>	Grau de compactação do solo
<i>LL</i>	Limite de liquidez
<i>LP</i>	Limite de plasticidade
<i>IP</i>	Índice de plasticidade
<i>TOT</i>	Teor e tamanho de tiras
<i>CL</i>	Solo argiloso
<i>SC</i>	Solo arenoso

Símbolos do Alfabeto Grego

σ	Tensão normal
ε	Deformação axial
ρ	Massa específica
$\rho_d \text{ máx}$	Massa específica seca máxima
ρ_s	Massa específica dos sólidos
$\emptyset$	Ângulo de atrito
τ	Tensão de cisalhamento
δ_h	Deslocamento horizontal
α	Ângulo de dilatância

SUMÁRIO

1. LEVANTAMENTO BIBLIOMÉTRICO	18
2. OBJETIVO	30
3. REVISÃO DA LITERATURA	31
3.1 Incorporação de materiais plásticos na engenharia geotécnica	31
3.2 Materiais Compósitos e Compósitos Fibrosos	34
3.3 Tipos de Fibras utilizadas em compósitos fibrosos	36
3.3.1 Fibras Naturais	36
3.3.2 Fibras Sintéticas	37
3.4 Mecanismos de Interação Solo-Fibra	54
3.5 Aplicações das fibras na engenharia.....	60
3.5.1 Camadas de pavimentos.....	60
3.5.2 Muros de contenção e proteção de taludes	62
3.5.3 Utilização de tiras como reforço	63
4. MATERIAIS E MÉTODOS	69
4.1 Coleta e caracterização das amostras.....	69
4.2 Preparação das tiras plásticas	72
4.3 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)	74
4.4 Ensaio de capacidade de suporte Califórnia	77
4.5 Ensaio de cisalhamento direto.....	78
4.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	79
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	82
5.1.1 Análise do solo arenoso	82
5.1.2 Análise do solo argiloso	94
5.2 Ensaio Índice de Suporte Califórnia (CBR)	104
5.2.1 Resultados para o solo arenoso	104
5.2.2 Resultados para o solo argiloso.....	106
5.3 Ensaio de cisalhamento direto	111
5.3.1 Solo arenoso e tiras PP	111
5.3.2 Solo arenoso e tiras PET	113
5.3.3 Solo argiloso e tiras PP	115

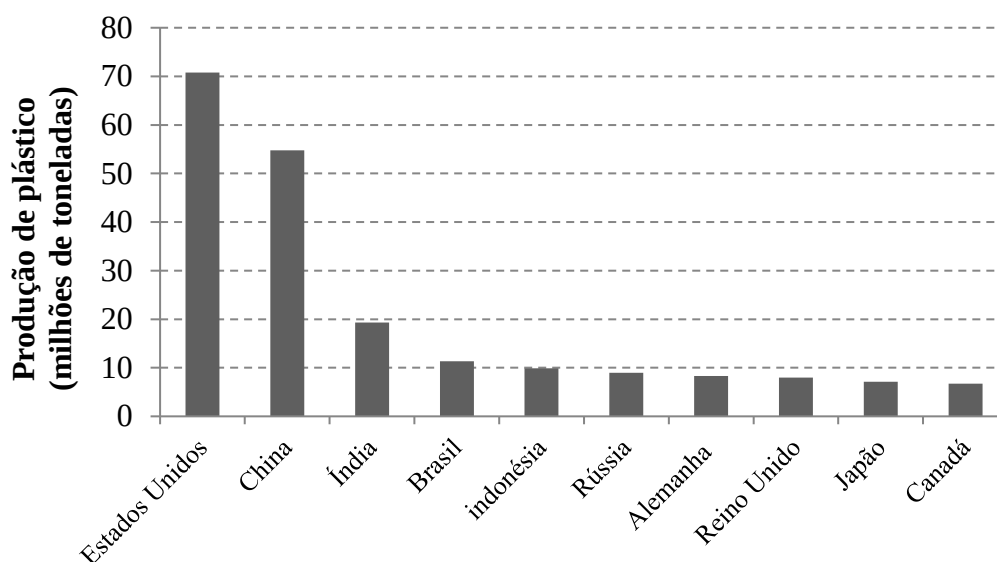
5.3.4 Solo argiloso e tiras PET.....	117
5.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	127
5.4.1 Solo argiloso	127
5.4.2 Solo arenoso.....	136
5.5 Considerações finais.....	144
6. CONCLUSÕES.....	147
7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	148
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS E CONSULTADAS	149

1. LEVANTAMENTO BIBLIOMÉTRICO

O crescimento da população mundial, as alterações nos hábitos culturais e padrões de consumo, juntamente com a procura cada vez maior por produtos industrializados, produzidos ou embalados com compostos plásticos, tem gerado um aumento significativo na produção de materiais não-degradáveis e de resíduos na mesma proporção.

O Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico do mundo, atrás apenas de Estados Unidos, China e Índia, além de ser dos países que menos recicla este tipo de lixo: apenas 1,2% são reciclados, ou seja, 145.043 toneladas (WWF, 2019). A Figura 1 representa a produção de plástico no mundo.

Figura 1. Produção de plástico no mundo.



Fonte: *World Wide Fund for Nature International* (2019).

Visando a possibilidade da reutilização e reciclagem em grandes proporções de resíduos descartados em amplas quantidades, a compreensão e aplicação de novas técnicas são indispensáveis (BOTERO et al., 2015).

A implementação de tecnologias para desenvolver novos processos a fim de promover uma destinação correta a estes resíduos torna-se necessária, sendo importante buscar novos usos para estes materiais, reduzindo impactos ambientais das obras de engenharia. Dessa forma, uma grande parte dos resíduos que são coletados e enviados aos aterros sanitários ou em vazadouros a céu aberto tem potencial para serem reutilizados.

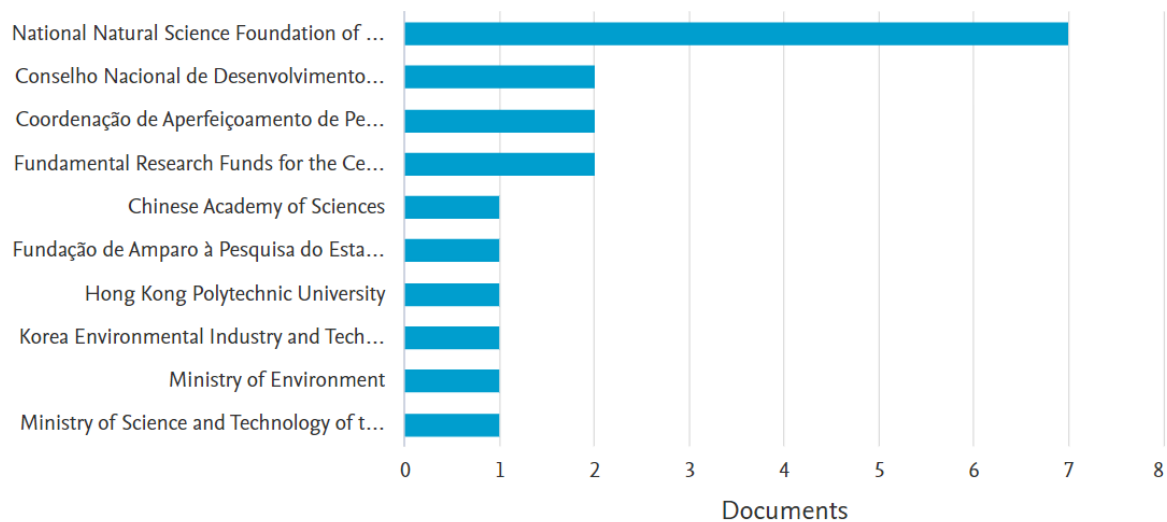
Dentro da engenharia civil, o uso de materiais recicláveis e reutilizáveis tem se mostrado uma alternativa interessante, uma vez que além de promover uma destinação ambientalmente correta, também pode trazer novas tecnologias.

No contexto de reuso de materiais reutilizáveis e recicláveis na engenharia geotécnica, o comportamento de solos reforçados com fibras de politereftalato de etileno (PET) e de polipropileno (PP) tem sido estudado visando entender a influência da sua inclusão nas propriedades mecânicas e de resistência dos solos.

Para entender melhor o que já foi publicado sobre o tema, foi realizada uma pesquisa na base de dados SCOPUS a fim de encontrar artigos publicados em revistas e congressos com diferentes combinações de palavras-chave.

A primeira combinação utilizada foi *"soil improvement" AND "environmental sustainability"*. Essa pesquisa resultou em 11 documentos, dos quais 9 são artigos publicados em diversas revistas da área. O destaque na quantidade de publicações é a *Nacional Natural Science Foundation of China*; Capes e Fapesp também aparecem na lista. A Figura 2 mostra as principais instituições responsáveis pelas publicações.

Figura 2. Quantidade de documentos divididos por agência financiadora para a combinação *"soil improvement" AND "environmental Sustainability"*.



Também foi observado a data dessas publicações, as quais tiveram início em 2017 (Figura 3). Isso mostra que a busca de soluções ambientalmente adequadas para o melhoramento de solos é um tema relativamente recente que tem aparecido há menos de 10

anos, por isso, ainda não há autores que se destacaram, visto que possuem o mesmo número de publicações, como mostra a Figura 4.

Figura 3. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação *"soil improvement" AND "environmental Sustainability"*.

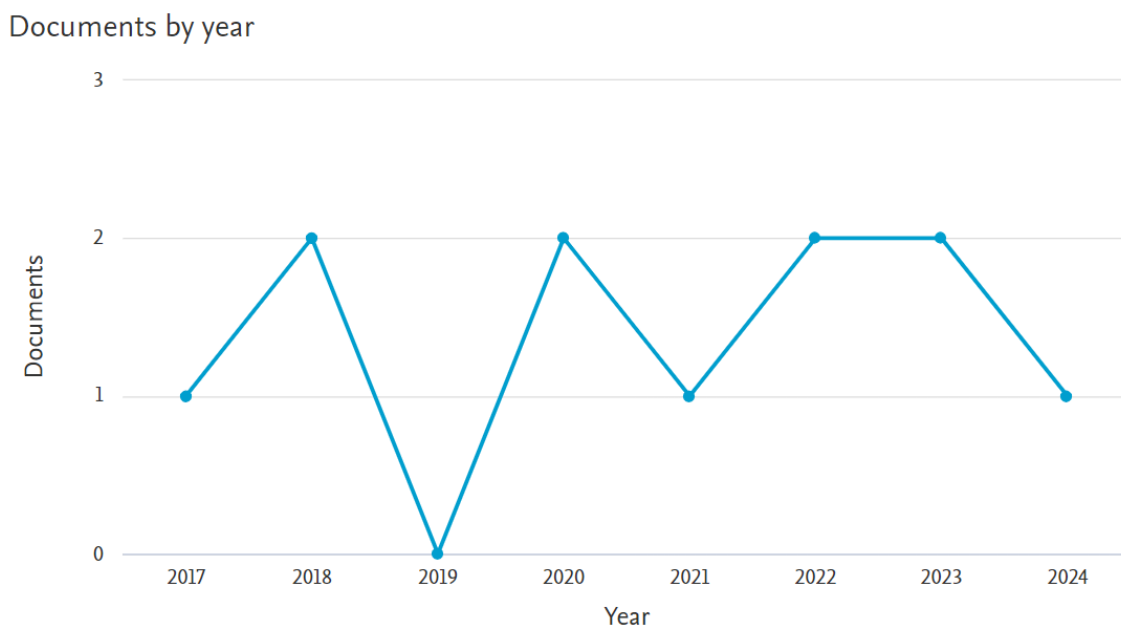
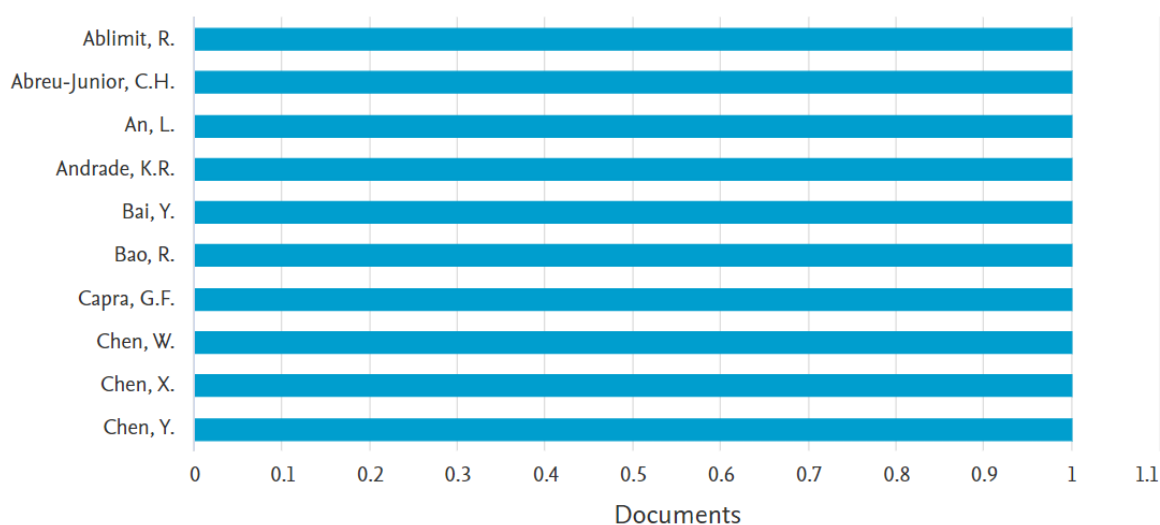
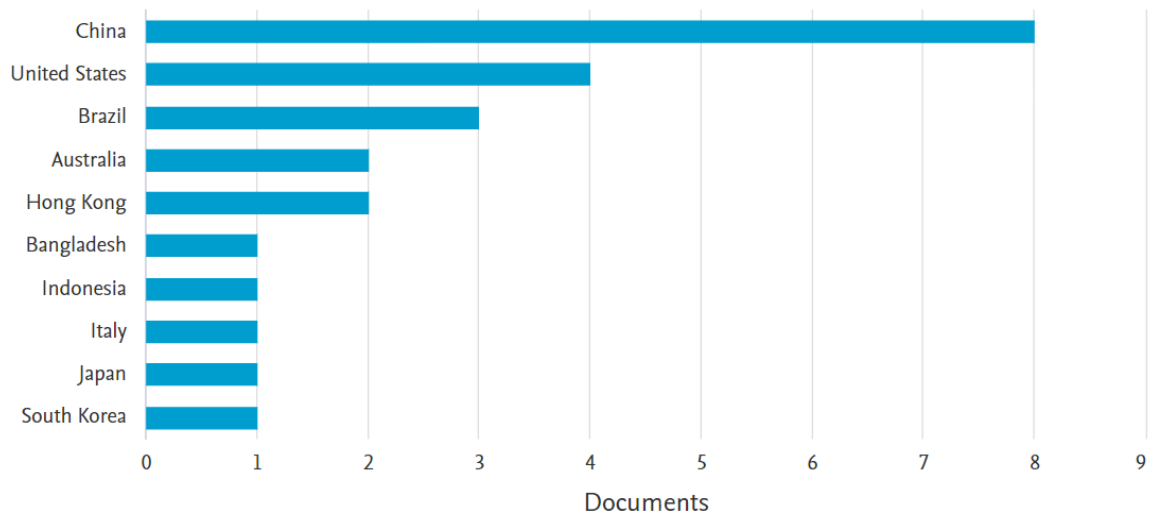


Figura 4. Quantidade de documentos por autor para a combinação *"soil improvement" AND "environmental Sustainability"*.



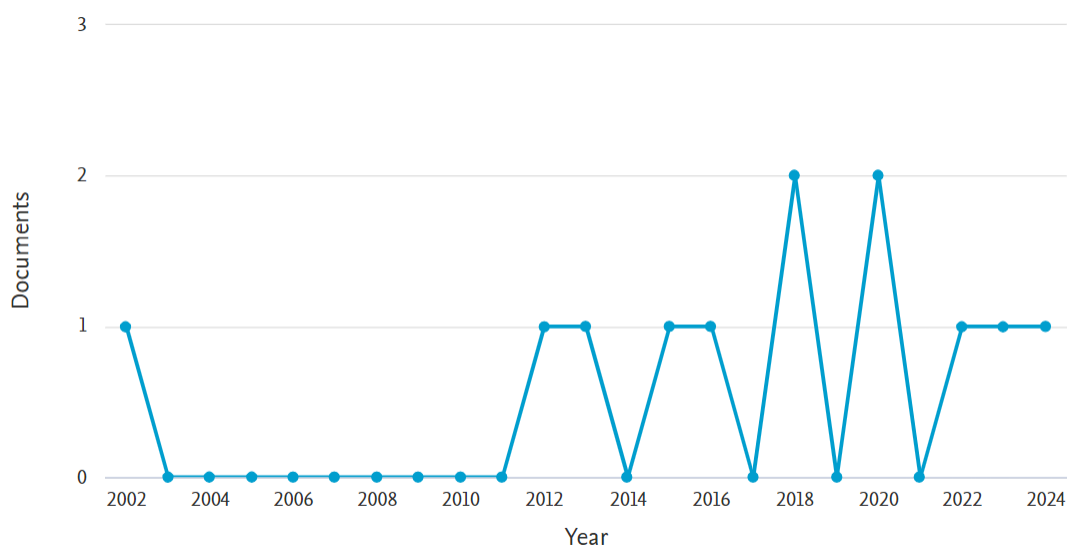
Com relação ao país de origem dessas pesquisas, a China se destaca com a maioria das publicações. Brasil aparece em terceiro, após China e Estados Unidos, com apenas três documentos (Figura 5).

Figura 5. Quantidade de documentos por país para a combinação *"soil improvement" AND "environmental Sustainability"*.



A segunda combinação de palavras-chave utilizada foi *"soil improvement" AND "plastic waste"*. Essas palavras chaves resultaram em 12 documentos, dos quais 10 são artigos de revistas e dois são artigos de congressos. As publicações tiveram início em 2002 mas tornaram-se mais constantes a partir de 2012, mostrando que pesquisas envolvendo o uso de materiais plásticos que seriam descartados no melhoramento de solo também é um tema recente.

Figura 6. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação "soil improvement" AND "plastic waste".



Nessa pesquisa o Brasil também se destaca, juntamente com Índia e Malásia, totalizando duas publicações cada (Figura 7). Além disso, das 10 principais instituições que publicam sobre o tema, três são brasileiras (Figura 8)

Figura 7. Quantidade de documentos por país para a combinação "soil improvement" AND "plastic waste".

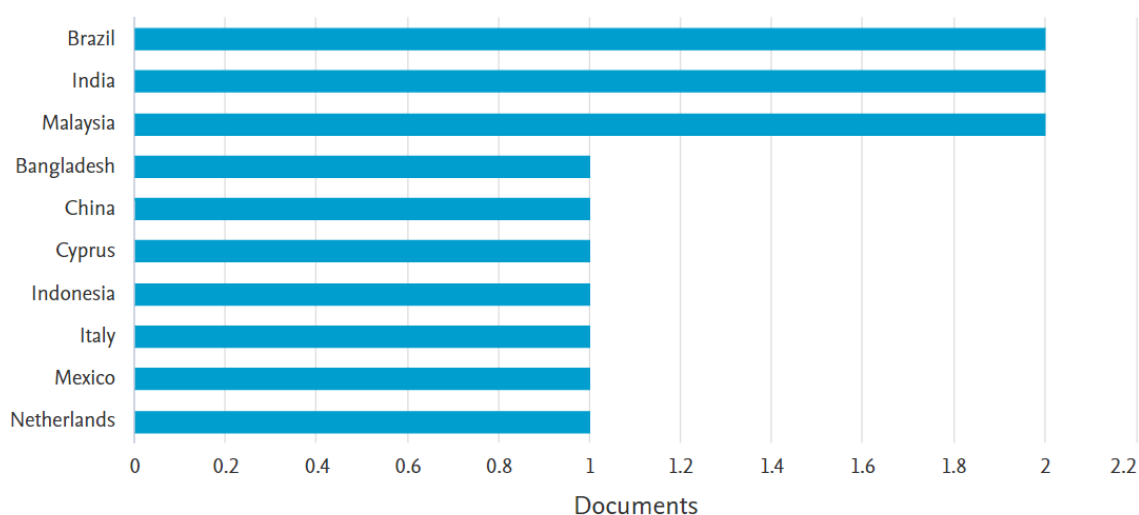
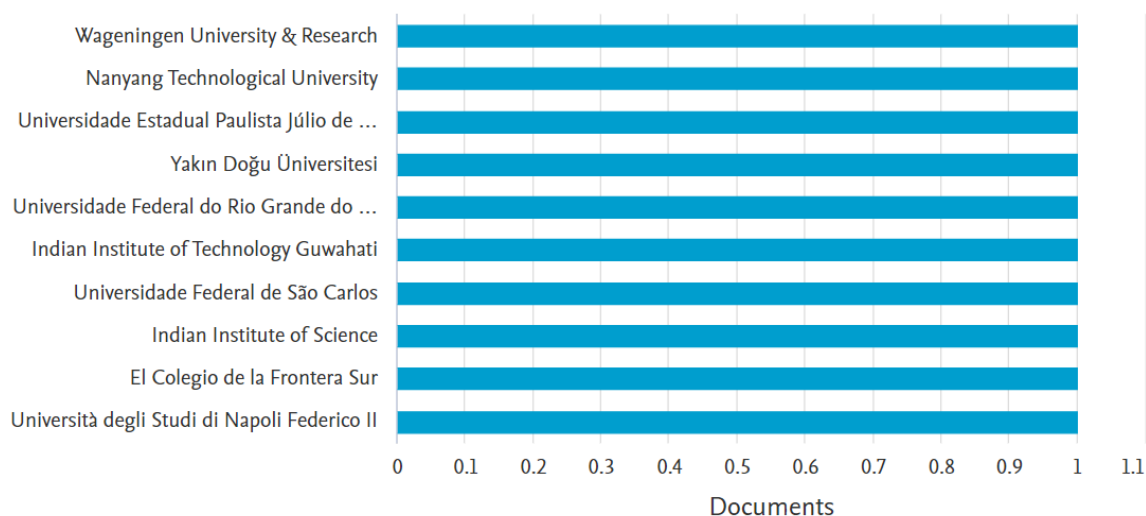


Figura 8. Quantidade de documentos divididos por instituições de pesquisa para a combinação "*soil improvement*" AND "*plastic waste*".



Entendido o que existe publicado relacionando o melhoramento de solos, meio ambiente e reaproveitamento de materiais plásticos, a pesquisa foi direcionada para entender o que já foi feito utilizando tiras plásticas para o melhoramento de solos. Assim, a próxima combinação de palavras-chave utilizada foi "*soil improvement*" AND "*polyethylene terephthalate*". Essa pesquisa mostrou que há apenas 8 documentos publicados que tratam do uso de tiras de material PET no melhoramento de solo, dos quais 7 são artigos de revistas e 1 artigo de congresso. Nota-se também que as publicações de artigos sobre uso de PET para melhoramento de solo tiveram início em 2002, tornando-se mais constante a partir de 2019 (Figura 9). Mais de 70% das publicações envolvem as áreas do conhecimento de meio ambiente, planeta Terra e engenharia (Figura 10).

Figura 9. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação "soil improvement" AND "polyethylene terephthalate".

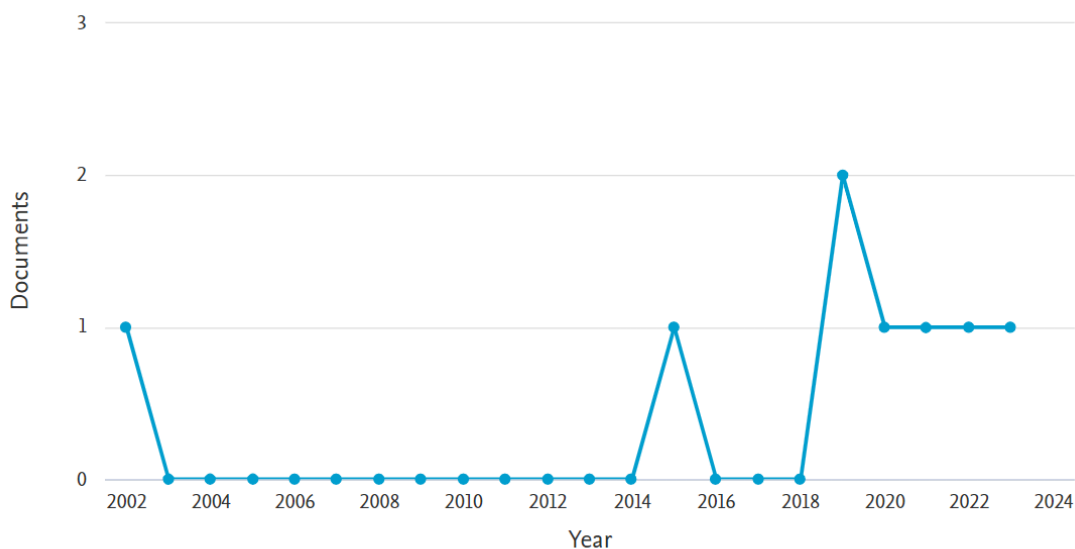
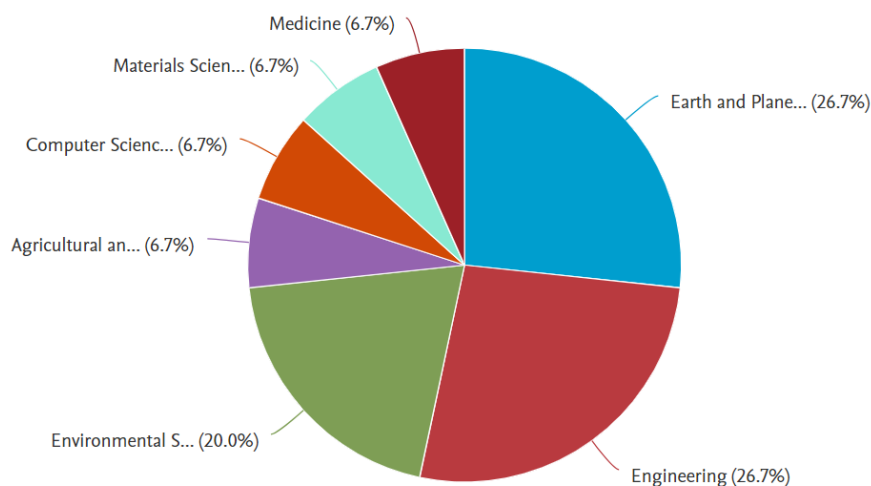


Figura 10. Quantidade de documentos por área do conhecimento para a combinação "soil improvement" AND "polyethylene terephthalate".



Ainda não há grandes nomes que se destacam no assunto, sendo Shooshpasha, I. o autor com maior quantidade de publicações nesse tema. O Brasil se destaca no uso de PET para melhoria das propriedades do solo, sendo um dos países com maior número de publicações atualmente. Mesmo assim, há apenas dois artigos de autores brasileiros que tratam do uso de tiras de garrafas PET misturadas ao solo (Figuras 11 e 12).

Figura 11. Quantidade de documentos por autor para a combinação "*soil improvement*" AND "*polyethylene terephthalate*".

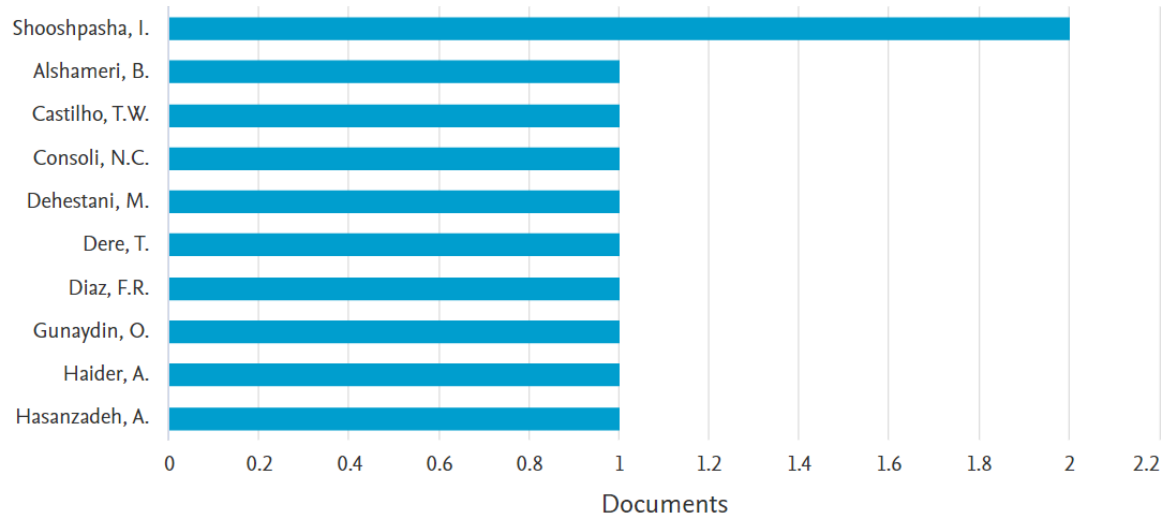
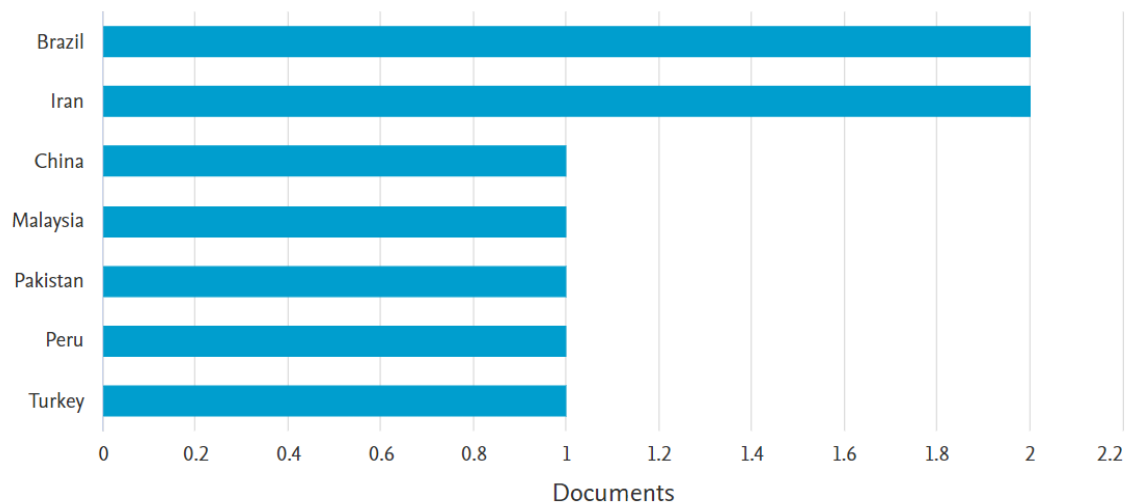


Figura 12. Quantidade de documentos por país para a combinação "*soil improvement*" AND "*polyethylene terephthalate*".



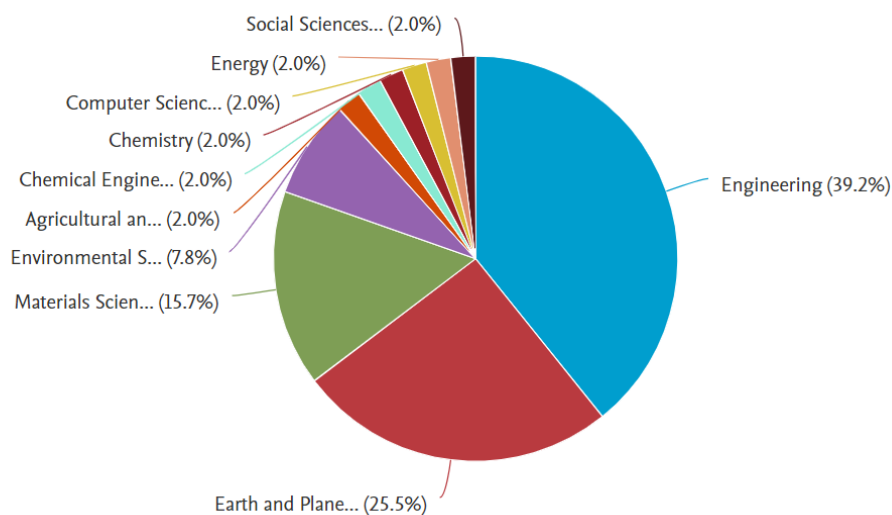
Com o objetivo de também entender o que tem sido feito com outros materiais além do PET, buscou-se a combinação de palavras-chave "*soil improvement*" AND "*polypropylene strips*". Sendo o polipropileno (PP) um plástico bastante comum, assim como o PET, muito utilizado em embalagens de alimentos.

A pesquisa encontrou apenas 1 documento, sendo um artigo publicado na revista Sustainability (Switzerland), em 2020, de autoria de Marçal, Régis; Lodi, Paulo César; Correia,

Natália de Souza; Giacheti, Heraldo Luiz; Rodrigues, Roger Augusto e McCartney, John S. em sua maioria autores brasileiros. A pesquisa trata do uso de tiras de polipropileno (PP) para reforço de solo.

Finalizando com a última combinação de palavras-chave sendo composta por três combinações: *"geotechnical properties"* AND *"polyethylene terephthalate"* OR *"polypropylene"*, buscou-se entender o que já foi publicado no estudo do uso de PET e PP envolvendo suas propriedades geotécnicas, não necessariamente sendo a adição de tiras no solo. Essa foi a combinação de palavras-chave que mais gerou resultados, num total de 30 documentos, dos quais 18 são artigos de revistas, 11 artigos de congresso e 1 capítulo de livro. Sendo divididos em diferentes áreas do conhecimento, com destaque para Engenharia, seguido por ciências da terra e planeta e ciência dos materiais. Desses artigos, cerca de 30% tratam do uso de PET ou PP adicionado ao solo e utilizado para melhoria das propriedades mecânicas, incluindo estudos com adição de outros materiais em conjunto, como cimento e cal.

Figura 13. Quantidade de documentos por área do conhecimento para a combinação *"geotechnical properties"* AND *"polyethylene terephthalate"* OR *"polypropylene"*.



As publicações envolvendo o estudo de PET e PP tiveram início em 2002, tendo apresentado maior relevância nos últimos 10 anos (Figura 14). A Índia se destaca com a maior quantidade de publicações e o Brasil encontra-se em segundo lugar, juntamente com China e Estados Unidos com um total de 4 publicações cada (Figura 15).

Apesar de nas pesquisas combinadas isoladas nenhuma revista ter apresentado grande destaque, sempre tendo quantidades iguais de publicações, ao juntar as pesquisas notamos que as revistas *Geotechnical Special Publication* e *Journal Of Materials In Civil Engineering* possuem maior quantidade de publicações considerando os temas apresentados.

Figura 14. Quantidade de documentos por ano de publicação para a combinação "geotechnical properties" AND "polyethylene terephthalate" OR "polypropylene".

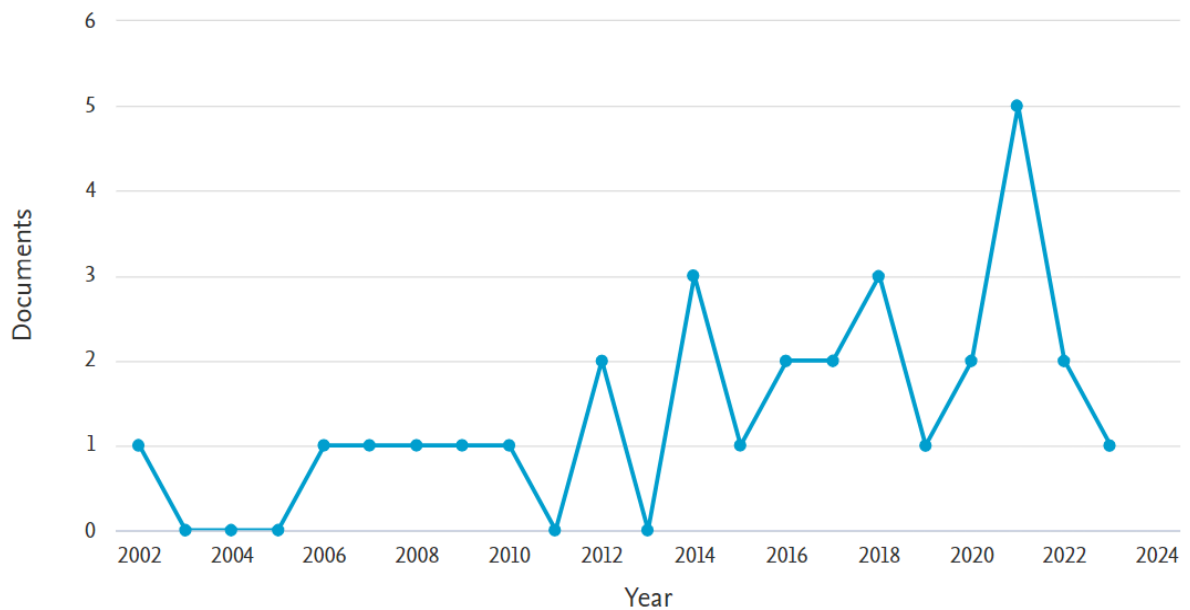
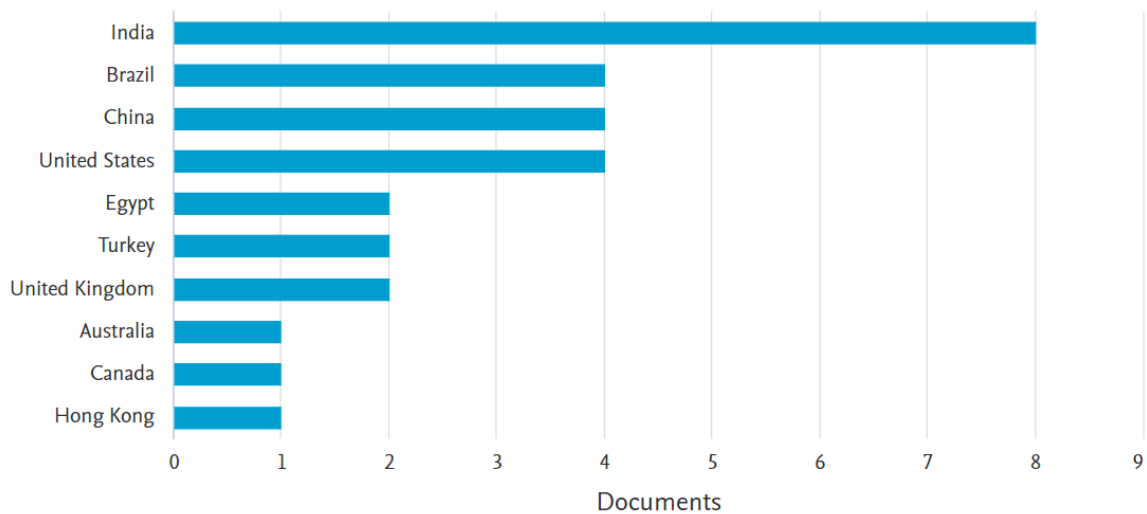


Figura 15. Quantidade de documentos por país para a combinação "geotechnical properties" AND "polyethylene terephthalate" OR "polypropylene".



Além disso, nota-se que praticamente inexistem pesquisas que tratam do uso de PET e PP para reforço de solos, tanto arenosos quanto argilosos, com a adição de tiras plásticas, sendo observado apenas uma publicação utilizando polipropileno (PP) e menos de oito publicações envolvendo o uso de tiras PET para o reforço de solos argilosos e arenosos, já que dentro dos oito resultados encontrados, alguns tratam da utilização de PET e PP como material de enchimento.

Isso mostra a grande necessidade de serem desenvolvidos mais estudos que complementem e tragam resultados para que essa prática seja amplamente difundida, visto que há potencial para aplicação em maior escala.

Essa prática pode reduzir o desperdício e reaproveitar material plástico, de forma que seja dada uma destinação ambientalmente adequada, evitando o descarte incorreto de materiais que são considerados fontes poluidoras, visto que sua vida útil passa de 400 anos. Nota-se, dessa forma, que sua utilização em obras de engenharia não afetaria a vida útil das obras, pois estende-se por um período muito superior.

Assim, o uso de tiras de material plástico para a melhoria de solos, apesar de ainda precisar ser mais estudada, apresenta grande potencial como uma alternativa ambientalmente correta, barata e de fácil acesso para a população. Os níveis de melhoramento dos solos com a utilização de tiras PET e PP serão detalhados ao longo dessa tese.

A Tabela 1 resume as principais informações apresentadas em cada artigo dentro da busca utilizando as palavras-chave *"soil improvement" AND "polypropylene strips"* e *"soil improvement" AND "polyethylene terephthalate"*.

Tabela 1. Resumo dos artigos encontrados em literatura com utilização de PET e PP para reforço de solos.

Palavra - chave	Autor da pesquisa	Ano da publicação	Material estudado	Tipo de solo*
"soil improvement" AND "polypropylene strips"	Marçal, R., Lodi, P.C., Correia, N.S., ...Rodrigues, R.A., McCartney, J.S.	2020	PP	SC, CL
	Sheikh, F., Alshameri, B., Maqsood, Z., Haider, A., Hassan, J.	2023	PET	CL
"soil improvement" AND "polyethylene terephthalate"	Hasanzadeh, A., Shooshpasha, I.	2022	PET, Cimento e Silica	SC
	Castilho, T.W., Rodrigues, R.A., Lodi, P.C.	2021	PET	SC, CL
	Malidarreh, N.R., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S.M., Dehestani, M.	2020	PET, Cimento	SC
	Salazar, L.A., Diaz, F.R., Ramirez, G.D.	2019	PET Triturado	CL
	Gunaydin, O., Dere, T., Soylemez, M., Yaman, Z.D.	2019	PET Triturado	CL
	Zhao, J.-J., Lee, M.-L., Lim, S.-K., Tanaka, Y.	2015	PET	SC, CL
	Consoli, N.C., Montardo, J.P., Marques Prietto, P.D., Pasa, G.S.	2002	PET, Cimento	SC

*SC = solo arenoso e CL = solo argiloso

2. OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa é avaliar os efeitos provocados na resistência de solo arenoso e argiloso pela inclusão de diferentes tamanhos e porcentagens, em peso, de tiras de material PET e PP, cortadas a partir de embalagens reutilizadas, avaliando-se os principais tipos de solicitação aos quais pode ser submetido, a saber: resistência à compressão, resistência ao cisalhamento e resistência à tração. Especificamente, pretende-se avaliar:

- O teor ótimo de comprimento e percentual de mistura das tiras plásticas recortadas com solo arenoso e argiloso, a partir do ensaio de resistência à compressão simples;
- O comportamento da expansão e índice de suporte Califórnia por meio do Ensaio de Capacidade de Suporte Califórnia (CBR), para o teor ótimo obtido no ensaio de resistência à compressão simples;
- A partir do teor ótimo de tiras na mistura, o comportamento dos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno) e deformabilidade, por meio de ensaios de cisalhamento direto;
- O comportamento da mistura solo-tiras quando submetida à esforços de tração, por meio de ensaios de tração por compressão diametral, para o teor ótimo de tiras;
- A partir dos resultados dos ensaios, como a inclusão de tiras plásticas de Polietileno Tereftalato (PET) e Polipropileno (PP) interferem no comportamento dos solos estudados e em quais situações essa adição é recomendada para a melhoria das características do solo, assim como as combinações indicadas para cada caso.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Incorporação de materiais plásticos na engenharia geotécnica

As crises ambientais, cada vez mais evidentes, tem incentivado pesquisadores a buscar técnicas alternativas para melhorar as características de resistência do solo, bem como desenvolver diferentes estudos na área geotécnica, buscando ampliar o uso de soluções ambientalmente corretas. Nesse sentido, o uso de resíduos reutilizáveis ou recicláveis na melhoria dos solos tem se tornado necessário, fazendo com que essas alternativas sustentáveis sejam cada vez mais estudadas (Babu & Chouksey, 2012; Castilho et al., 2021; Chu, 2016; Consoli et al., 2002a; Hoque et al., 2024; Iravanian & Ali, 2020; Marçal et al., 2020; Masud et al., 2023; Muntohar et al., 2013; Peddaiah et al., 2018a; Russo et al., 2022; Salazar et al., 2019; Sheikh et al., 2023; X. Wang et al., 2018; Y. Wang et al., 2024; Zhao et al., 2015).

Marçal et al. (2020) afirmam que o uso de tiras plásticas como reforço de solo promove a sustentabilidade por meio da utilização de materiais locais em obras de engenharia e do reaproveitamento de resíduos como reforços de baixo custo. Segundo Zhao et al. (2015), os resíduos plásticos, particularmente o tereftalato de polietileno (PET), gerados a partir de garrafas de água usadas, constituem um problema ambiental mundial, sendo que a reutilização dos resíduos de PET para aplicações geotécnicas não só reduz os encargos ambientais do manuseamento dos resíduos, mas também melhora as propriedades de engenharia inerentes ao solo.

Russo et al. (2022) estudaram os potenciais benefícios ambientais e mecânicos do reaproveitamento de dois resíduos diferentes: os resíduos de jet grouting (JGW) e os resíduos plásticos (PW) para a produção de mastigues asfálticos a quente compostos de betume e filler; sendo que o JGW vem de atividades de consolidação do solo durante a construção do pavimento, enquanto o PW, uma mistura de polietileno de alta densidade, polietileno de baixa densidade, polipropileno e tereftalato de polietileno, deriva de uma planta de reciclagem de plástico. Os resultados mostraram que a utilização de resíduos plásticos teve o melhor desempenho ambiental, expressando os menores danos à saúde humana e aos ecossistemas.

Segundo Russo et al. (2022), a economia circular pretende mudar o paradigma em relação à economia linear, limitando o impacto ambiental e o desperdício de recursos, bem como aumentando a eficiência em todas as fases da economia do produto. Os recentes alertas sobre a poluição por resíduos e a limitação dos recursos naturais estão encorajando o desenvolvimento de alternativas para a destinação de resíduos.

A única forma de salvaguardar o ambiente e os recursos naturais é tomar medidas sustentáveis. A fórmula pegar-fazer-descartar já não é sustentável e os efeitos das práticas industriais estão afetando gravemente a saúde humana e o ecossistema. Dessa forma, é necessária uma mudança baseada na circularidade dos fluxos de materiais, a fim de evitar o abastecimento intensivo e a produção de resíduos (RUSSO; ORETO; VEROPALUMBO, 2022).

Dentre os produtos de forte degradação, as garrafas de tereftalato de polietileno (PET) têm sido grande preocupação dos ambientalistas, com projeções indicando crescimento do consumo. A capacidade de produção anual de tereftalato de polietileno (PET) em todo o mundo situou-se em cerca de 30,5 milhões de toneladas em 2019 e até 2030 deverá atingir 35,70 milhões de toneladas, segundo o Portal Statista (2024). Isso indica o crescente consumo desses materiais, principalmente na produção de garrafas plásticas para bebidas, superando a capacidade atual de reciclagem e colocando em risco diversos ecossistemas.

De acordo com informações disponíveis pela ONG WWF, o Brasil é o quarto maior produtor de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia, em 2019. Desse total, mais de 10,3 milhões de toneladas foram coletadas (91%), mas apenas 145 mil toneladas (1,28%) são efetivamente recicladas, ou seja, reprocessadas na cadeia de produção como produto secundário. Esse é um dos menores índices da pesquisa e bem abaixo da média global de reciclagem plástica, que é de 9%.

O levantamento realizado pela WWF com base nos dados do Banco do Mundial analisou a relação com o plástico em mais de 200 países, e apontou que o Brasil produz, em média, aproximadamente 1 quilo de lixo plástico por habitante a cada semana.

Os últimos dados fornecidos pela National Association for PET Container Resources (NAPCOR, 2024) nos Estados Unidos, pelo Council for PET Bottle Recycling (CPBR, 2024) no Japão e pela Associação Brasileira da Indústria PET (ABIPET, 2024) mostram que a taxa de reciclagem de PET nos Estados Unidos foi de 29% em 2021, e a taxa norte-americana (EUA, Canadá e México) foi de 37,8%. Em 2006, a taxa nos Estados Unidos era de 23,5%, o que mostra que a quantidade de garrafas recicladas aumentou, ficando em torno de 20% maior em 15 anos.

A taxa de reciclagem de garrafas PET divulgada no Japão, dada pela reciclagem doméstica mais a reciclagem externa dividida pelo total de garrafas vendidas, cresceu de 75,1% em 2006 para 86,0% em 2021. No Brasil, 51% das embalagens PET eram destinadas à

reciclagem em 2013; em 2024 esse número aumentou em 8%, passando para 55% de embalagens PET destinadas à reciclagem.

De acordo com Castilho et al. (2021), aproximadamente 33% do faturamento da indústria brasileira de PET vem da reciclagem, gerando impostos, empregos, renda e todos os outros benefícios de uma indústria de base sólida, mostrando potencial de criação de novas utilizações para o PET reciclado. Os autores também afirmam que, no contexto geotécnico e ambiental, materiais recicláveis como PET, tiras metálicas e geossintéticos têm sido utilizados para a melhoria das propriedades do solo. Provavelmente, isso se deve ao avanço das indústrias químicas, à ampla adoção de materiais poliméricos em obras de reforço e as diversas vantagens, como economia, segurança, praticidade e menores volumes de solo.

Neste contexto, o reforço do solo com fibras poliméricas discretas ainda é uma técnica relativamente nova em projetos de engenharia com métodos que empregam dosagens baixas, ainda mais para aqueles provenientes de resíduos sólidos urbanos, e não existem padrões científicos ou técnicas especializadas para projetos reais de campo (CASTILHO; RODRIGUES; LODI, 2021).

Segundo Peddaiah et al. (2018), a causa das inundações na cidade de Mumbai em 2005 se deveu ao entupimento dos esgotos por resíduos plásticos descartados. Este é um excelente exemplo de como os resíduos plásticos não biodegradáveis podem gerar inúmeros problemas; portanto, é necessário descartar adequadamente esses resíduos. Os autores afirmam que a investigação experimental que realizaram sobre os resultados de solos reforçados com plásticos mostrou que este material pode ser usado como um estabilizador eficaz para enfrentar problemas de eliminação de resíduos, bem como uma solução econômica para estabilizar solos fracos.

Com os avanços da tecnologia de forma cada vez mais rápida em todo o mundo, o uso de plásticos, como sacos de polietileno e garrafas também está aumentando. A eliminação de resíduos descartados representa um sério desafio, uma vez que a maioria dos resíduos plásticos não são biodegradáveis e impróprios para incineração, pois emitem gases nocivos. Aliado a isso, a estabilização do solo melhora as propriedades de engenharia de solos fracos através da compactação controlada ou da adição de estabilizadores como cimento, cal, entre outros, mas estes aditivos também se tornaram caros nos últimos anos. Por isso, a utilização de resíduos plásticos na melhoria do solo tornou-se uma alternativa a ser considerada (Peddaiah et al., 2018).

3.2 Materiais Compósitos e Compósitos Fibrosos

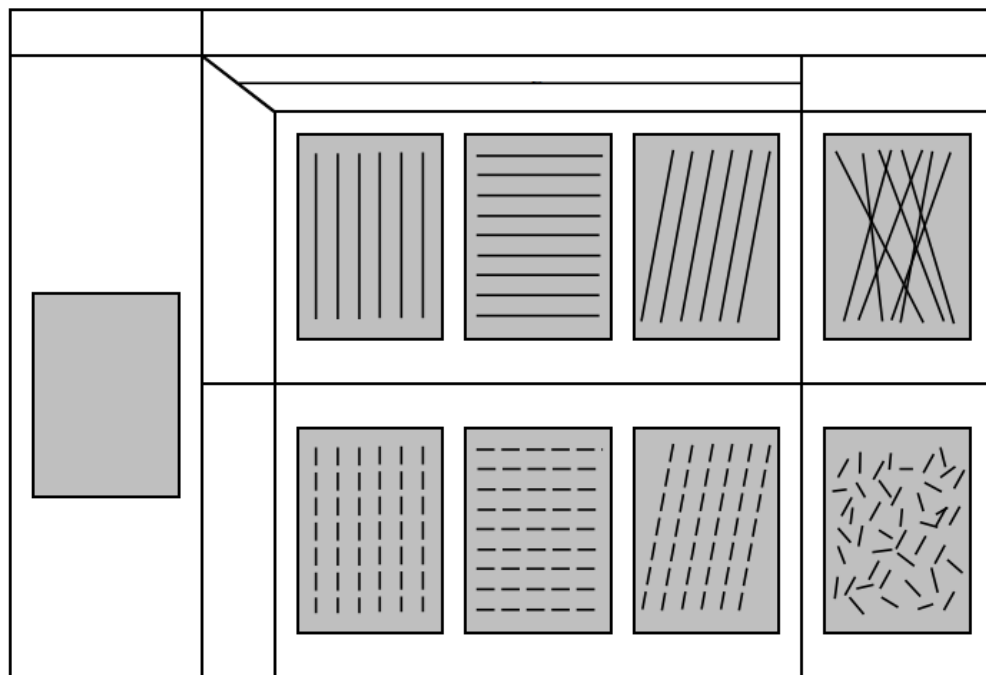
Os compósitos podem ser definidos como um conjunto de materiais que resultem em uma combinação de propriedades que isoladamente seus constituintes não seriam capazes de proporcionar.

Os materiais compósitos, de acordo com Higgins (1994), são classificados em dois grandes grupos: os materiais compósitos particulados, em que é acrescentado à matriz algum material em forma de partícula; e os compósitos fibrosos, em que é adicionado à matriz do solo elementos em forma de fibras. Dessa forma, os materiais compósitos são constituídos por duas fases: a matriz e o elemento de reforço e são desenvolvidos para otimizar seus pontos fortes. Para Neto e Pardini (2016), a principal função dos compósitos é combinar, pelo menos, duas fases denominadas de matriz e reforço. A matriz atua no sentido de distribuir a carga pelo compósito, ao passo que o reforço é responsável por restringir os esforços solicitantes (BENINI, 2011). O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (HANNANT, 1994). A seleção de materiais para a formação do compósito pode resultar na melhoria das propriedades mecânicas da mistura solo-fibra (DANSO et al., 2017).

Segundo Dejaloud e Jafarian (2016), os compósitos envolvem uma ampla gama de materiais, destacando-se os solos reforçados com fibras. Diversos trabalhos abordam materiais compósitos variando as inclusões de diferentes frações de volume, forma e especificações das fibras (CONSOLI et al., 2005; ÖZKUL & BAYKAL, 2007; TANG et al., 2007; JIANG et al., 2010; ESTABRAGH et al., 2011; ESTABRAGH et al., 2013; BOTERO et al., 2015; YILMAZ, 2015). A Figura 16 mostra diferentes padrões possíveis de orientação das fibras. Cada um desses padrões de orientação afeta a resposta mecânica global do compósito devido ao mecanismo de tensão/deformação.

Segundo Finkler (2005), no caso dos compósitos com fibras contínuas, as tensões atuantes são transferidas às fibras que, por sua vez, suportam o esforço solicitante, ao passo que a matriz atua mantendo as fibras unidas proporcionando a transferência de tensões. Para o autor, os compósitos com fibras descontínuas são formados por fibras cortadas, dispostas aleatoriamente ou de maneira orientada e contribuem com resistência mecânica (componente estrutural), sendo a matriz o “meio” de transferência do esforço mecânico sofrido (componente matricial). Esta última será o tipo de configuração utilizada nessa pesquisa.

Figura 16 - Configurações variadas de um compósito de solo reforçado com fibra. Adaptado de Dejaloud e Jafarian (2016).



Segundo Castilho et al. (2021) a principal diferença entre inclusões de fibras e tiras está no formato dos materiais. As fibras poliméricas são materiais muito finos e alongados, como os filamentos; enquanto as tiras são materiais com maior largura e espessura, geralmente cortados de estruturas plásticas existentes. Assim, a utilização de tiras apresenta diversas vantagens, como a possibilidade de reaproveitar resíduos plásticos para aumentar a resistência do solo sem a necessidade de aplicação de processo de reciclagem, como é o caso das fibras.

A resposta do compósito às solicitações atuantes vai depender dos elementos constituintes de sua matriz e do tipo de reforço empregado. Assim, os processos de intemperismo físico e químico sofridos pelo solo durante sua origem e formação vão influenciar na forma como a matriz vai responder aos esforços solicitantes. É fundamental avaliar diferentes tipos de solo (arenoso, siltoso e argiloso) no estudo da avaliação da resistência mecânica da mistura solo-fibra para o correto entendimento da contribuição do tipo de solo e do reforço neste processo.

Peddaiah et al. (2018) observou que os valores máximos de CBR ocorrem em 0,4% do conteúdo de plástico do solo natural em massa e há uma diminuição nos valores de CBR com 0,6% do conteúdo de plástico. Os autores também observaram que com 0,4% de conteúdo plástico em massa de solo é alcançada a melhoria máxima nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, sendo este considerado o teor ótimo nessa pesquisa. Assim, conclui-se que o

excesso de reforço do solo com material plástico pode levar à segregação da matriz solo-plástica durante a compactação, diminuindo a eficácia da mistura; por isso observa-se a necessidade de encontrar um teor de mistura ideal para cada tipo de solo.

3.3 Tipos de Fibras utilizadas em compósitos fibrosos

3.3.1 Fibras Naturais

De acordo com Faruk et al. (2012) existem seis tipos básicos de fibras naturais, as quais são classificadas da seguinte forma: fibras líberas (juta, linho, cânhamo, rami e kenaf), fibras de folhas (abacate, sisal e abacaxi), fibras de sementes (coco, algodão e kapok), fibras de núcleo (kenaf, cânhamo e juta), fibras de capim e de junco (trigo, milho e arroz) e todos outros demais tipos (madeira e raízes). Para Fidelis et al. (2013), as fibras naturais apresentam várias vantagens em comparação com fibras sintéticas: são biodegradáveis, leves, renováveis, têm boas propriedades mecânicas e são abundantes; além disso, não são abrasivas para o processamento em equipamentos e têm emissão neutra de CO₂. Existem algumas desvantagens no uso de fibras naturais como reforço em materiais compósitos, tais como: qualidade e eficiência de produção, que dependem de condições naturais; heterogeneidade de suas propriedades que podem ser associadas à produção, extração e condições de processamento das fibras; e o comportamento hidrofílico que leva à absorção de água nos sistemas compostos (FIDELIS et al., 2013).

Para Rowell (2008), o desempenho dos compósitos reforçados com fibras naturais depende de vários fatores, incluindo composição química das fibras, dimensões celulares, ângulo microfibrilar, defeitos, estrutura, propriedades físicas, e propriedades mecânicas. A fim de expandir o uso de fibras naturais para compósitos e melhorar seu desempenho, é essencial conhecer suas características.

As propriedades físicas de cada tipo de fibras naturais são críticas, e incluem as dimensões das fibras, defeitos, tração e estrutura interna. Dessa forma, existem diversas propriedades físicas para cada tipo de fibra natural e que são importantes de serem conhecidas a fim de que possam ser utilizadas aproveitando seu elevado potencial. O conhecimento sobre o comprimento e a largura da fibra é relevante para comparar diferentes tipos de fibras naturais. A relação (comprimento/largura) é muito importante em compósitos de fibras naturais, pois dão

uma indicação das propriedades de resistência mecânica, que pode ser um fator importante na seleção de uma fibra natural específica para uma aplicação específica (GASSAN et al., 2001).

Mudanças nas propriedades físicas podem ser devidas a diferenças na morfologia das fibras. Principais diferenças de estrutura, como densidade, espessura da parede celular, comprimento e diâmetro resultam em diferenças nas propriedades físicas. Dessa forma existem vários desafios apresentados pelas fibras naturais, como a grande variabilidade das propriedades mecânicas (SYDENSTRICKER et al., 2003; EICHHORN et al., 2001).

A compreensão dos componentes químicos e propriedades físicas relacionadas aos tipos de fibras naturais não é bem compreendida. São poucos os pesquisadores abordaram essas características e investigaram a relação entre fatores químicos e físicos e o comportamento mecânico do solo reforçado (ZHAO et al., 2019). Bordoloi et al. (2018) concluíram que amostras de solo reforçadas com diferentes tipos de fibras naturais exibiam diferentes comportamentos a ensaios de resistência à compressão não confinada. A razão por trás desse fenômeno pode estar relacionada às propriedades químicas e físicas distintas dessas fibras. Os quatro componentes químicos principais em uma fibra natural são a celulose, hemicelulose, lignina e cinzas. Diferentes proporções destes componentes químicos resultam em diversas propriedades físicas, como a massa específica, o teor de umidade natural, a resistência à tração e tensão de ruptura (ZHAO et al., 2019). Esses oito parâmetros (quatro componentes químicos mais quatro propriedades físicas) podem afetar o comportamento mecânico do solo reforçado com fibra.

3.3.2 Fibras Sintéticas

Fibras de Polipropileno

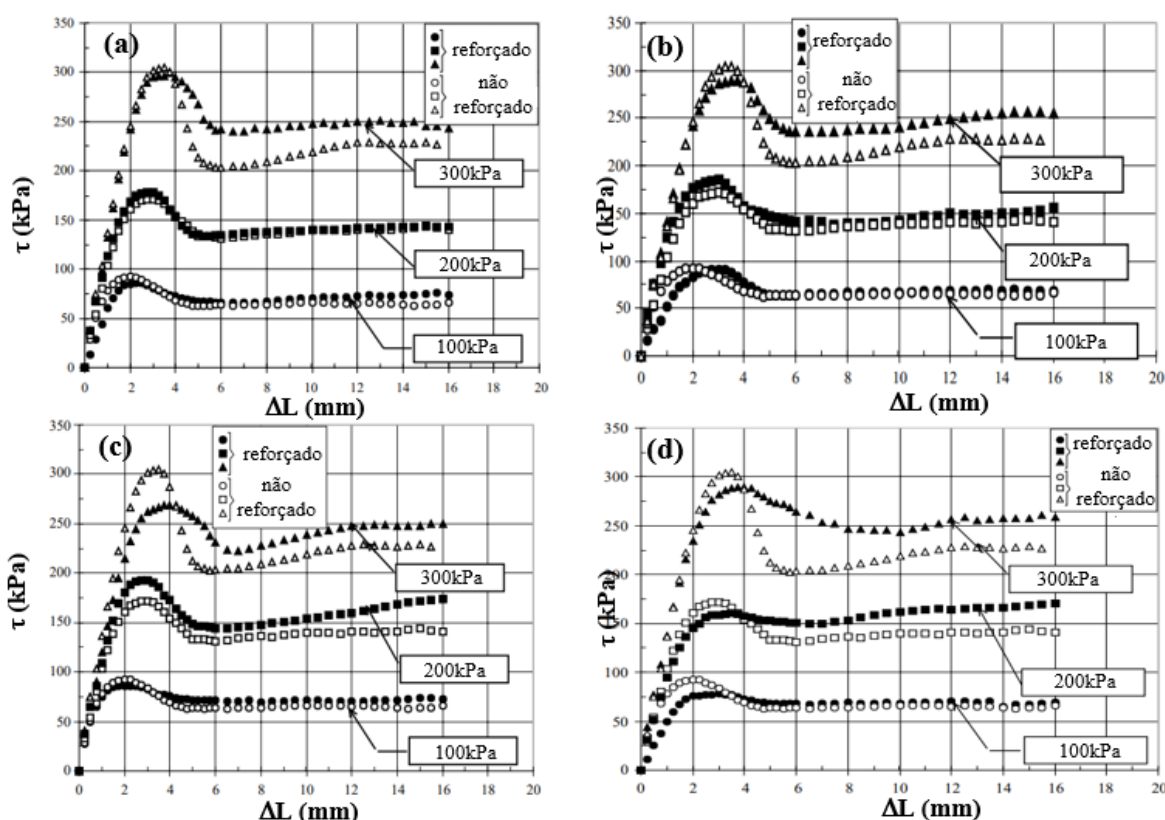
Existem três principais tipos de fibras sintéticas: fibras poliméricas; fibras de vidro; e fibras de aço.

As fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com aumento da temperatura, denominado termoplásticos. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma a que possam deslizar umas sobre as outras (HOLLAWAY, 1994). A seguir são apresentados estudos abordam a utilização de fibras de PP para reforço de solo.

Yetimoglu e Salbas (2003) investigaram a resistência ao cisalhamento de areias reforçadas com fibras aleatoriamente distribuídas, realizando ensaios de cisalhamento direto. Os resultados indicaram que o pico de resistência ao cisalhamento e a rigidez inicial da areia

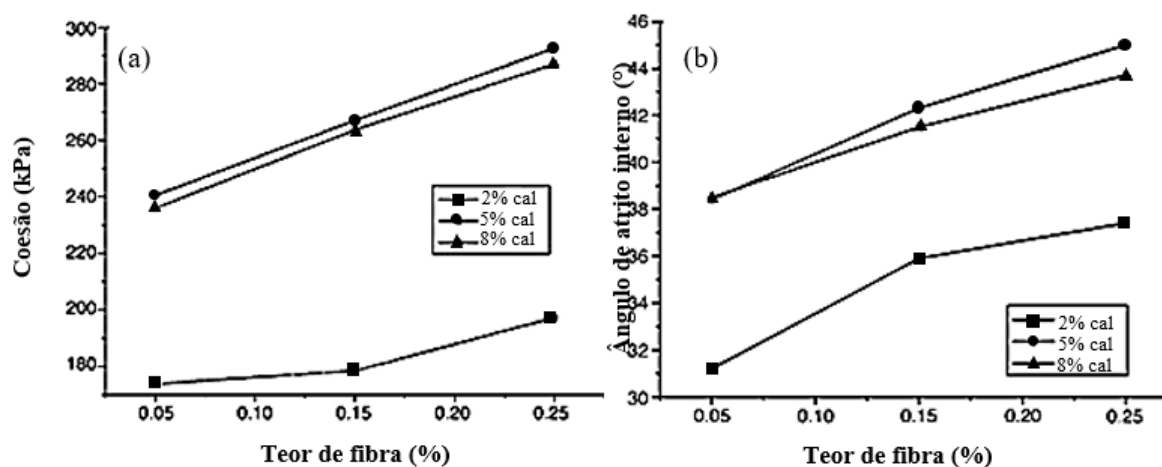
não foram afetados significativamente pelo reforço de fibra. Os deslocamentos horizontais na falha também foram similares para areias reforçadas e não reforçadas sob a mesma tensão normal. Reforços de fibra, no entanto, poderiam reduzir a fragilidade do solo, proporcionando menor perda de força pós-pico, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 17 - Resposta ao cisalhamento - deslocamento horizontal para areia não reforçada e areia reforçada: (a) teor de fibras de 0,10%; (b) teor de fibras de 0,25%; (c) teor de fibras de 0,50%; (d) teor de fibras de 1,0%. Adaptado de Yetimoglu e Salbas (2003).



Caia et al. (2006) investigaram a influência da mistura de fibra de PP e de cal sobre as propriedades de engenharia de um solo argiloso, por meio de três porcentagens diferentes de teores de fibra de 12 mm de comprimento médio e 0,034 mm de diâmetro médio (0,05%, 0,15%, 0,25% em massa de solo) e três diferentes porcentagens de cal (2,0%, 5,0%, 8,0% em massa do solo) que formaram nove grupos de ensaio, ou seja para cada porcentagem de fibra variou-se os teores de cal. Conclui-se que com a combinação de técnicas de estabilização e de reforço de fibras, exhibe-se mais ganhos nos parâmetros de resistência do solo, ou seja, mais ganhos de coesão e de ângulo de atrito interno do que comparado ao solo estabilizado somente com cal, conforme a Figura 18.

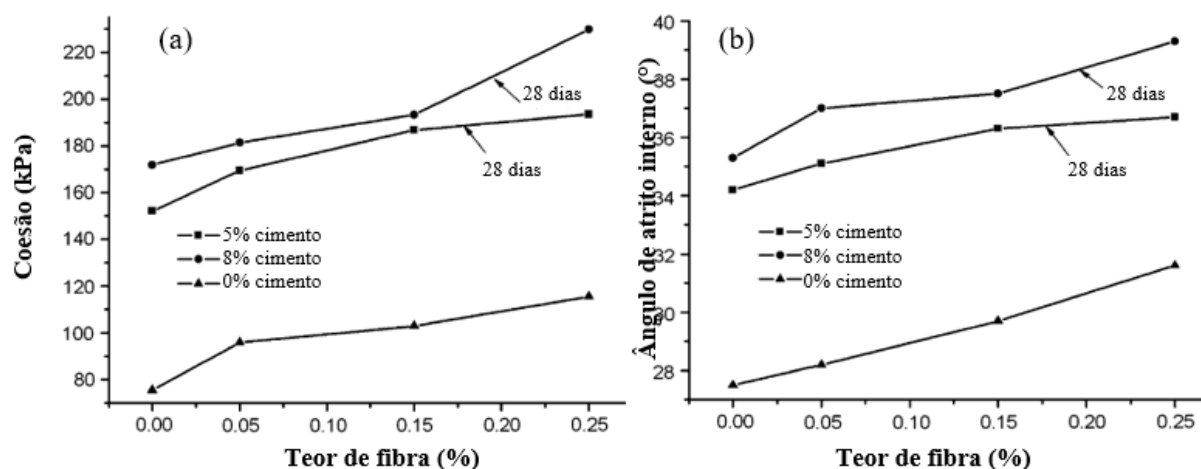
Figura 18 - Efeito do teor de fibras no solo tratado com fibra e cal em amostras após 28 dias de cura: (a) coesão; (b) ângulo de atrito. Adaptado de Caia et al. (2006).



Tang et. al. (2007) pesquisaram os efeitos da inclusão de fibra de PP na resistência e no comportamento mecânico do solo argiloso não cimentado e cimentado, utilizando 12 grupos de amostras de solo em três diferentes porcentagens de teor de fibra de PP com comprimento médio de 12 mm e diâmetro médio de 0,034 mm (0,05%, 0,15% e 0,25% em peso de solo) e duas porcentagens diferentes de teor de cimento (5,0% e 8,0% pelo peso do solo), e por meio do ensaio de compressão não confinada e cisalhamento direto concluíram que a adição de fibras de PP, aliada ao cimento, pode ser um eficiente método para melhoria do solo, já que o aumento na força da inclusão combinada de fibra e de cimento é muito maior do que a soma do aumento causado por eles individualmente, conforme ilustra a Figura 19.

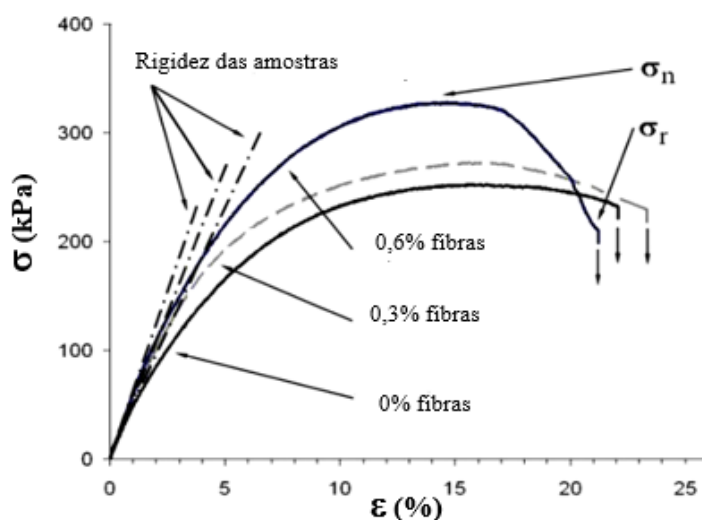
A força de união e o atrito na interface parecem ser os mecanismos dominantes que controlam o benefício do reforço. Em solos não cimentados reforçados com fibra, as interações na interface entre a superfície da fibra e os grãos de argila desempenham papéis-chave no comportamento mecânico. Em solos cimentados reforçados com fibra, as interações entre a superfície da fibra e os produtos hidratados contribuem para a força na interface. O comportamento micromecânico da interface fibra/matriz depende das propriedades do material de ligação no solo, tensão normal ao redor do corpo da fibra, área de contato efetiva e rigidez da fibra (TANG et. al., 2007).

Figura 19 - Relação entre os parâmetros de resistência do solo e teor de fibra: (a) coesão e teor de fibras; (b) ângulo de atrito interno e teor de fibra. Adaptado de Tang et al. (2007).



Plé e Lê (2012) avaliaram o efeito da adição de fibras de PP no comportamento mecânico de solos argilosos empregados em aterros utilizando fibras de 12,0 mm de comprimento e 0,034 mm de diâmetro e teores de 0%, 0,3% e 0,6% em relação a massa seca do solo e foi demonstrado que, em ensaios de compressão, o material composto torna-se cada vez mais rígido (Figura 20); e sob ensaios de tração direta, a argila reforçada exibe um benefício na ductilidade que pode mitigar potenciais rachaduras para o emprego do solo.

Figura 20 - Comportamento mecânico sob ensaio de compressão uniaxial. Adaptado de Plé e Lê (2012).



Anagnostopoulos et al. (2013) avaliaram a resistência ao cisalhamento de seis diferentes solos arenosos reforçados com fibras de PP com comprimento de 12,0 mm e diâmetro de 0,03 mm e com percentuais de fibra variando de 0, 0,1%, 0,3% e 0,5% em relação a massa seca de solo para cada tipo de areia; concluíram que o aumento da resistência residual ao cisalhamento é fortemente dependente da finura da areia, do teor de fibra e da densidade, além disso, as dimensões relativas dos grãos de areia e das fibras têm um efeito importante no comportamento induzido pela inclusão de fibras.

Ao estudar o efeito das fibras de PP na resistência à compressão e a tração de um solo fofo do centro de Portugal, estabilizado artificialmente com aglutinantes, Correia et al. (2015) variaram a quantidade de fibras de 12,0 mm de comprimento e diâmetro de 0,032 mm de 0 a 100 kg/m³ (peso de fibras por volume de solo) com diferentes quantidade de aglutinantes e concluíram que apesar da resistência à compressão e à tração apresentar uma tendência não linear, isto é, as propriedades mecânicas não serem proporcionais à quantidade de fibras adicionadas à pasta, uma adição de 50 a 75 kg/m³ de fibras leva a uma melhoria nas características mecânicas do solo, indicando que este é o melhor valor nessa situação estudada.

Nguyen e Fatahi (2016) estudaram por meio de ensaios triaxiais não drenados o comportamento de um solo argiloso tratado com cimento com teor de 0 e 15% e fibras de PP com diâmetro de 0,017 mm e comprimento de 18 mm, com teores de 0%, 0,3% e 0,5% em relação a massa seca do solo e concluíram que os efeitos combinados cimentação e de reforço de fibras diminuíram à medida que o composto de solo melhorado foi submetido a altas tensões efetivas durante a compressão isotrópica e a deformação por cisalhamento.

Claria e Vettorelo (2016) avaliaram o comportamento mecânico de solo arenoso utilizando fibras sintéticas, por meio de dois tipos de fibras de PP: fibras lisas com aproximadamente 2 mm de largura e 0,10 mm de espessura, com comprimentos variando de 5 a 20 mm e fibras em malha com aproximadamente 27 mm de comprimento; com teores de fibras variaram de 0 a 4,0% do peso seco do solo; e através de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto, concluíram que a adição de fibras no solo produz um incremento na resistência ao cisalhamento e na ductilidade, porém uma perda na rigidez e sugerem que o reforço de solos por meio de inclusão de fibras devem ser avaliados considerando estes dois aspectos (resistência e rigidez). A Figura 21 ilustra a variação do ângulo de atrito interno em função do teor de fibras e a influência do comprimento da fibra no ângulo de atrito interno e a Figura 22 representa o efeito do teor de fibras no módulo de elasticidade de um solo arenoso.

Figura 21 - (a) Variação do ângulo de atrito interno em função do teor de fibra: 1) fibras lisas (triaxiais); 2) fibras lisas (cisalhamento direto); 3) fibras em malha (triaxial); 4) fibras em malha (cisalhamento direto). (b) Influência do comprimento da fibra no ângulo de atrito interno.

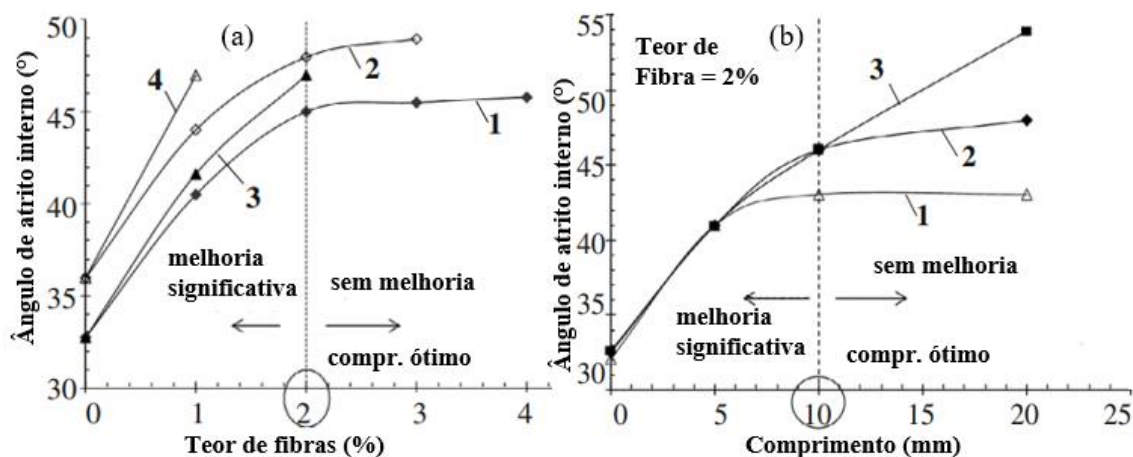
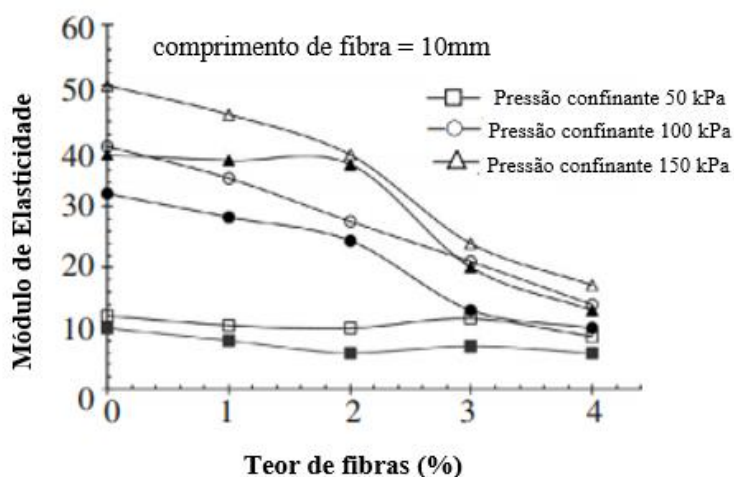


Figura 22 - Efeito do teor de fibras no módulo de elasticidade de areia reforçada em dois níveis de deformação: marcadores vazios para $\varepsilon = 10^{-3}$ e marcadores cheios para $\varepsilon = 10^{-2}$. Adaptado de Claria e Vettorelo (2016).



Mirzababaei et al. (2017), avaliaram o comportamento da tensão de cisalhamento de amostras de solo argiloso expansivo preparadas com diferentes índices de vazios (0,64 e 1,64) reforçadas com fibras de PP com comprimento de 19,0 mm e espessura de 0,032 mm com teores de 0,25% e 0,50% em relação a massa seca do solo, submetidas a diferentes históricos de tensões. Os autores concluíram que o efeito do reforço de fibra na resistência ao cisalhamento

é evidente em pequenas tensões efetivas normais (50 kPa) aplicadas em amostras de solo de argila com menor índice de vazios inicial e que a taxa de melhoria das tensões de cisalhamento da argila reforçada com fibras diminui com um aumento do índice de vazios inicial e tensão efetiva normal.

Rocha (2019) avaliou a influência de fibras de PP na resistência efetiva de um solo argiloso e observou que os mecanismos de interação entre o solo e as fibras não foram significativamente influenciados pela condição de drenagem ou pelo desenvolvimento de pressões neutra durante o cisalhamento, uma vez que os valores de resistência ao cisalhamento efetivo para a condição de ruptura drenada e não drenada foram próximos.

Fibras de Politereftalato de Etileno

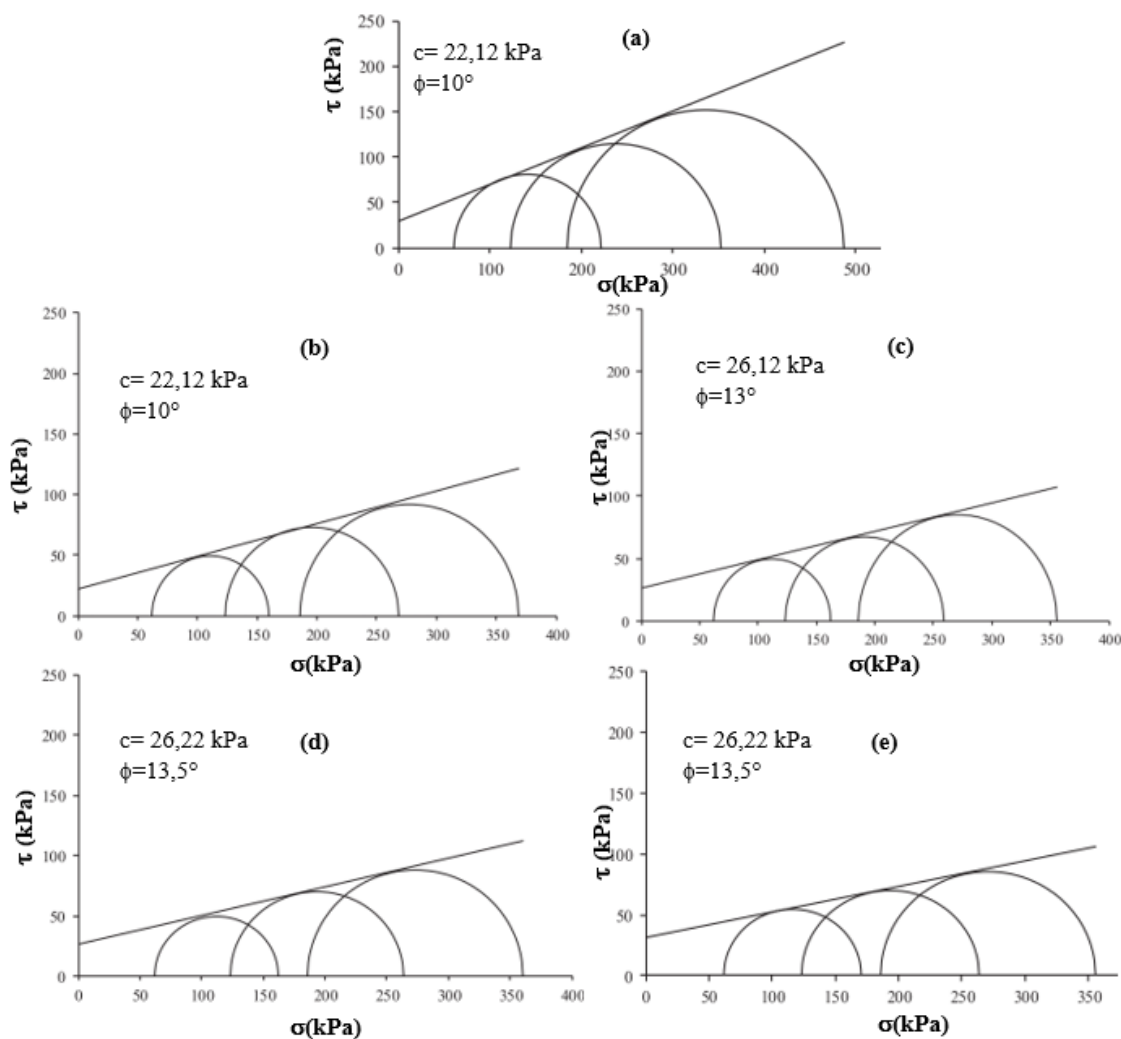
O PET é um polímero termoplástico, com estrutura parcialmente alifática, semicristalino e membro comercialmente mais importante da família dos poliésteres (KARAGIANNIDS et al., 2008). Entre as principais características do PET, pode-se destacar a baixa densidade, a transparência, o brilho, o bom desempenho em diferentes performances, a segurança e a facilidade de moldagem, além de proporcionar uma alta resistência mecânica e química (MARINI, 2012). Algumas das vantagens do PET em relação aos demais termoplásticos, que justificam sua grande e crescente utilização, são: excelente estabilidade térmica, facilidade de processamento, alta resistência química, alta estabilidade hidrolítica, que é a resistência de uma substância à quebra de suas moléculas por meio de reações químicas com água, propriedades mecânicas atrativas a altas temperaturas, propriedades de barreira a gases, leveza, aparência nobre (brilho e transparência) e baixo custo de produção (ROMÃO et al., 2009).

Zhao et al. (2015) investigaram fatores que afetam a melhoria da resistência ao cisalhamento de solo residual misturado com PET e concluíram que pedaços grandes de PET (ou seja, 1,0 cm²) foram favoráveis para solo residual de granulação fina, enquanto pedaços pequenos de PET (ou seja, 0,5 cm²) foram favoráveis para solo residual de granulação grossa. Notou-se também que a melhora na resistência ao cisalhamento obtida para solo residual de granulação grossa misturado com PET foi melhor que para solos residuais de granulação fina.

Consoli et al. (2002) utilizaram ensaios geotécnicos para avaliar o benefício da utilização de fibras provenientes de garrafas PET isoladamente ou combinado com cimento Portland em areia fina e uniforme. Os resultados mostraram que o reforço de fibra de tereftalato

de polietileno melhorou o pico e a resistência máxima do solo cimentado e não cimentado e reduziu um pouco a fragilidade da areia cimentada.

Figura 23 - Círculo de Mohr: (a) solo não reforçado; (b) solo reforçado com teor de 0,1%; (c) solo reforçado com teor de 0,3%; (d) solo reforçado com teor de 0,6%; (e) solo reforçado com teor de 1%. Adaptado de Botero et al. (2015).



A fim de avaliar as propriedades mecânicas de um solo siltoso reforçado com fibras de PET e destacar a reutilização de resíduos sólidos na construção civil, Botero et al. (2015) variaram teores de fibras de PET de 0%, 0,1%, 0,3%, 0,6% e 1,0% em relação a massa seca de solo, realizaram ensaios triaxiais consolidados não drenados e concluíram que a presença de fibras influenciou no ângulo de atrito interno e na coesão do solo reforçado, em que o maior

conteúdo de fibras resultou em um menor ângulo de atrito e maior coesão, como observa-se na Figura 23.

Alterações no ângulo de atrito podem ser atribuídas a uma redução no número de pontos de contato entre as partículas do solo devido à presença de fibras e a maior coesão aparente das partículas da mistura solo e fibra (BOTERO et al., 2015).

Salazar et al. (2019) também estudaram a adição tereftalato de polietileno triturado para reforço de solo argiloso, os resultados mostraram que os parâmetros de resistência do solo são influenciados pela adição do PET triturado havendo uma melhora no ângulo de atrito e coesão da mistura Solo-PET. Além disso, a mistura com 20% de PET triturado se destaca das demais, pois apresentou maior grau de melhoria no solo.

A incorporação de tiras plásticas no solo pode ser utilizada especialmente em solos mais fracos, como é o caso do solo de algodão preto estudado por Hoque et al. (2024), sendo este um solo com propriedades de dilatação e compressão, além de possuir baixa capacidade de suporte. Nesse estudo, foram utilizadas tiras de plástico cortadas de garrafas plásticas de água, nas proporções de 0%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% e 10% de plástico.

O comportamento da tensão de cisalhamento no solo de algodão preto foi grandemente melhorado pela utilização de resíduos de plástico como material de reforço. A redução da resistência ao cisalhamento pós-pico foi menos perceptível do que nas amostras não reforçadas, indicando que as tiras de PET permaneceram sob tensão mesmo após atingirem a resistência máxima. Além disso, a substituição de 5-9% da tira de plástico mostrou um aumento substancial na coesão e no ângulo de atrito (HOQUE; HASAN; DATTA, 2024).

Senez e Casagrande (2017) avaliaram o comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de PET sob ensaios de prova de carga em placa, em que foram adicionadas fibras com um diâmetro de 0,0098 mm e comprimento de 38 mm, distribuídas aleatoriamente na massa do solo com teor de fibra de 0,5% em relação à massa seca do solo. Observou-se que a areia reforçada com fibras de PET apresentou maior capacidade de carga e uma redução de assentamentos em comparação com o solo não reforçado, destacando o uso positivo de fibras de PET na construção, onde o solo local não é resistente, possibilitando o uso deste material como reforço.

Fibras de Nylon

Kumar e Tabor (2003) pesquisaram sobre a inclusão de fibras de nylon em solo argiloso limpo a fim de investigar o ganho de força relativa em termos de compressão não confinada.

As amostras foram testadas em compressão não confinada com fibras de nylon em 0,05%, 0,15% e 0,30%. Os resultados mostram que o grau de compactação afetou os benefícios relativos do reforço de fibras para o solo em questão. As amostras compactadas a 93% da massa específica seca máxima nos ensaios de Proctor Normal mostraram um aumento significativamente maior no pico e nas resistências residuais em comparação às amostras compactadas para maiores densidades. Os resultados também são apresentados para mostrar que a adição de fibras de nylon aumentou a resistência residual dos solos significativamente.

Ameta et al. (2009) abordaram testes laboratoriais sobre o uso de fibras de nylon como meio para aumentar a capacidade de suporte da areia de dunas, em que uma série de testes de carga foram conduzidos com teores de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% a fim de determinar os vários fatores que influenciam a capacidade de suporte da mistura. Os resultados mostram que a capacidade de suporte final da areia reforçada com fibras de nylon aumenta com o conteúdo de fibra.

Attom et al. (2009) avaliaram o efeito da inclusão de fibras curtas, discretas e aleatoriamente orientadas nas propriedades mecânicas (pico de resistência à compressão não confinada, rigidez e ductilidade) de solos argilosos do norte da Jordânia misturados com fibras de nylon em cinco porcentagens diferentes por volume de partículas de solo sólidas: 1,0%, 2,0%, 3,0%, 4,0% e 5,0%. Os resultados mostraram que o pico de resistência à compressão não confinada, rigidez e ductilidade da mistura de fibra de argila aumentou com o teor de fibra.

Estabragh et al. (2011) avaliaram o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de Nylon com comprimento de 4,0 mm, largura de 2,0 mm e espessura de 0,4 mm e a partir de ensaio triaxial consolidado não drenado foi possível estudar o comportamento do solo não reforçado e do solo reforçado com 10,0%, 20,0% e 30,0% de fibras. Os autores apontam que com o aumento da porcentagem de fibra na mistura, a resistência do solo é atribuída ao atrito mobilizado entre argila-fibra, fibra-fibra e argila-argila, o que faz com que o ângulo de atrito aumente (Figura 24).

Estabragh et al. (2012) conduziram uma série de experimentos a fim de investigar o comportamento da argila reforçada com diferentes teores de cimento e fibras de nylon em que foram estudados três grupos de testes: (1) amostras reforçadas com quatro teores de fibras diferentes (0,5%, 0,75%, 1,0% e 1,25%) com comprimento de 20,0 mm e 0,28 mm de diâmetro; (2) amostras estabilizadas com cimento com três teores diferentes de cimento (5,0%, 8,0% e 10,0%); e (3) amostras reforçadas com fibras estabilizadas e com cimento, com os mesmos teores de fibras que as amostras reforçadas não cimentadas. A análise foi realizada por meio de

ensaios de compressão não confinados que foram realizados nas amostras não cimentadas e nas amostras estabilizadas com cimento com e sem inclusões de fibras após 3, 7, 14 e 28 dias de tempo de cura. Os resultados indicaram que a inclusão de fibras dentro do solo não cimentado e estabilizado pelo cimento causou um aumento da resistência à compressão não confinada (Figura 25) e da tensão axial em caso de falha, além de alterar o comportamento frágil do solo cimentado para um comportamento mais dúctil. Também foi demonstrado que as características mecânicas das misturas solo-cimento-fibra dependem do conteúdo de fibras e do tempo de cura.

Figura 24 - Círculo de Mohr de tensões efetivas: (a) solo não reforçado; (b) solo reforçado com 30% de fibras de nylon. Adaptado de Estabragh et al. (2011).

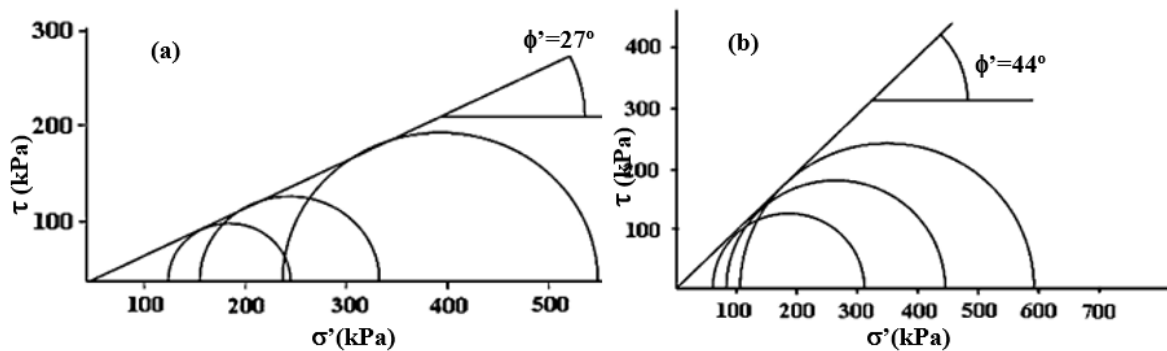
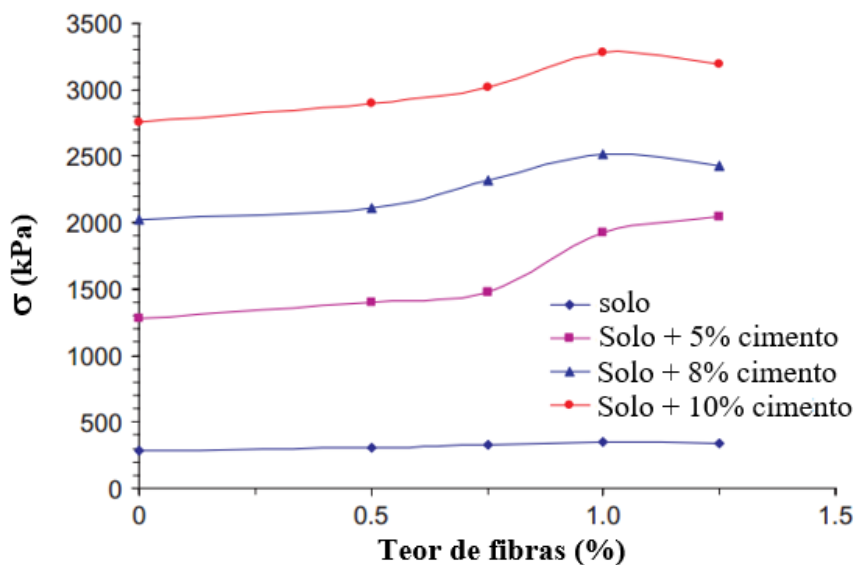


Figura 25 - Resistência à compressão em função do teor de fibras de nylon para solo cimentado com 5%, 8% e 10% de cimento e reforçado com diferentes conteúdos de fibra, em 28 dias de tempo de cura.



Fibras de Poliacetato de Vinila (PVA)

O nome químico do PVA é Poliacetato de Vinila, o qual é o primeiro colóide sintético preparado por Herrmann e Haehnel no ano 1924. Basicamente, o PVA é fabricado por polimerização do monômero vinil acetato em polivinil acetato (PVAc), seguido por hidrólise dos grupos acetato de PVAc em PVA. A conversão do PVAc para PVA em escala industrial é geralmente por álcool alcalino, em que os grupos acetato são hidrolisados por éster e metanol na presença de hidróxido de sódio (THONG et al., 2016). O PVA é um dos principais polímeros utilizados na indústria e, portanto, grandes quantidades de PVA são produzidas anualmente. A excelente resistência química e propriedades físicas do PVA resultou em uma ampla gama de aplicações em diferentes indústrias como o dimensionamento têxtil, adesivos, colóides protetores para polimerização em emulsão, produção de fibras de PVA e polivinil.

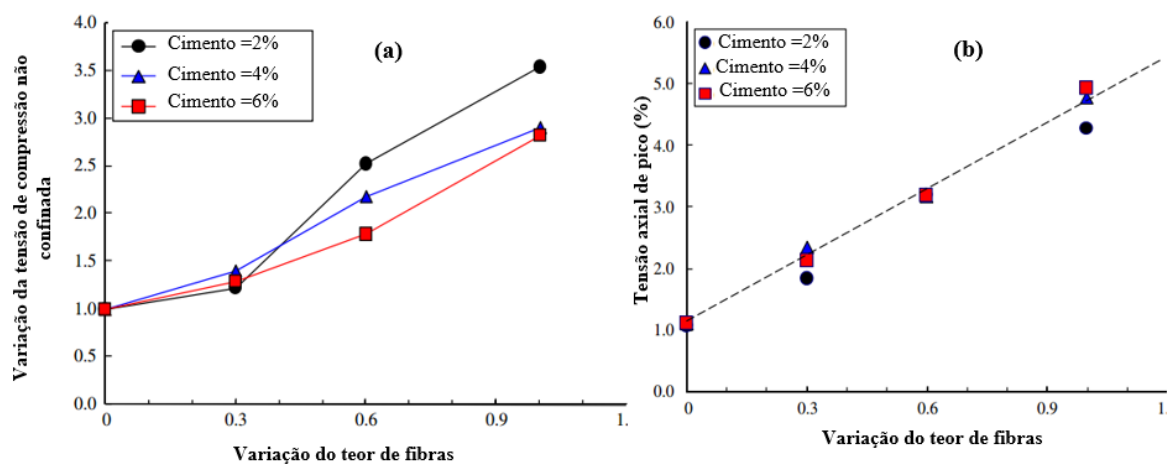
Park et al. (2008) realizaram um estudo sobre areia cimentada reforçada com fibras curtas a fim de melhorar a sua resistência à compressão não confinada e comportamento frágil. A areia do rio Nak-dong foi misturada com cimento Portland e fibras PVA. As amostras da mistura de areia, cimento e fibras foram compactadas em 5 camadas e depois curadas durante 7 dias. O efeito do reforço de fibras em vez da cimentação foi enfatizado usando uma pequena quantidade de cimento. A areia fracamente cimentada com uma relação cimento/areia inferior a 8,0% foi reforçada com fibras com diferentes proporções e testada em ensaios de compressão não confinados e os resultados apontam que a areia cimentada e reforçada com fibra com relação de cimento de 2,0% apresentou os melhores resultados de resistência à compressão.

Park (2009) examinou o efeito do reforço e distribuição de fibras sobre a resistência da areia cimentada reforçada com fibras de poliacetato de vinila em quatro tipos de amostras cilíndricas de 70,0 mm de diâmetro por 140,0 mm de altura: sem fibras; com uma camada de fibra no meio da amostra com teor de 20,0% de fibras; com uma camada de fibra no meio, no topo e no fundo com teor de 60,0% de fibras; e com fibras distribuídas por toda a amostra com teor de 100% de fibras. O estudo apontou que a amostra reforçada com fibra, onde as fibras foram distribuídas uniformemente ao longo das cinco camadas, foi duas vezes mais resistente que uma amostra não reforçada com fibra.

Park (2011) realizou uma série de ensaios de compressão não confinados em amostras de areia reforçada com cimento e fibras para avaliar como a inclusão de fibras afeta a resistência medida e características de ductilidade da areia cimentada. Areia ligeiramente cimentada com

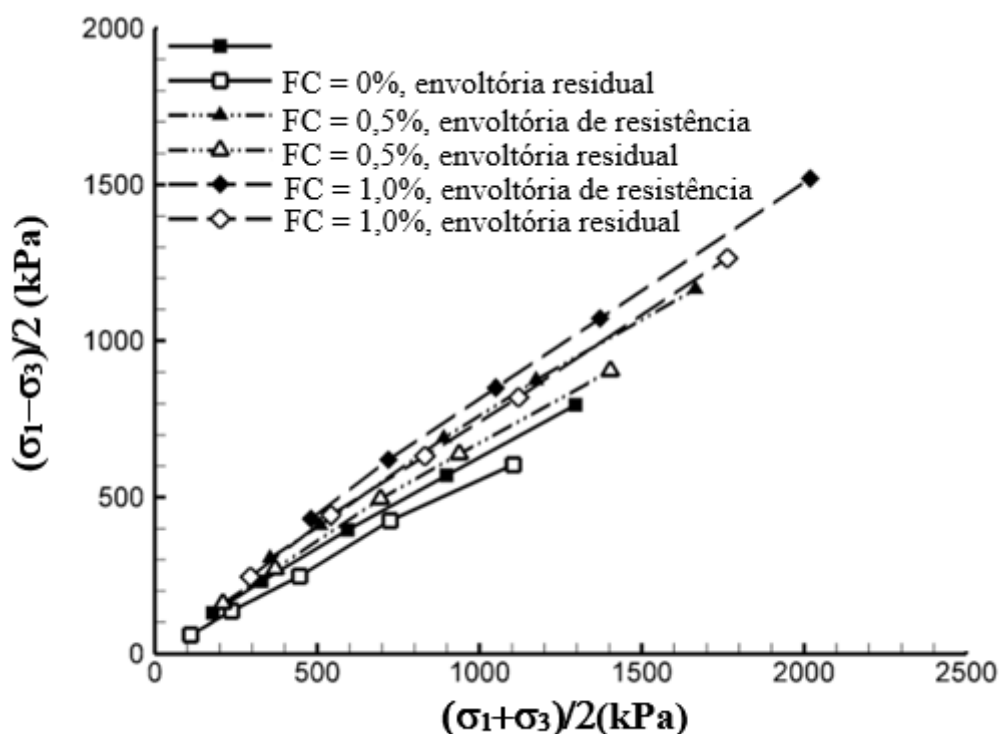
três relações de cimento diferentes (2,0, 4,0 e 6,0% em peso de solo) foi misturada com quatro proporções de fibras diferentes (0, 0,3, 0,6 e 1,0% em peso do solo) e depois compactadas em uma amostra cilíndrica. A fibra de poliacetato de vinila (PVA), que adere bem ao cimento, foi aleatoriamente distribuída em toda a areia cimentada. Os resultados do ensaio indicaram que a inclusão da fibra de PVA tem um efeito significativo tanto na resistência à compressão não confinada quanto na tensão axial máxima (pico). O aumento nos valores da resistência à compressão não confinada foi mais aparente no corpo de prova cimentado a 2% (Figura 26).

Figura 26 - Efeito da inclusão de fibras PVA: (a) aumento da força devido à inclusão de fibras; (b) Tensão axial de pico para diferentes teores de fibras. Adaptado de Park (2011).



Choobbast et al. (2019) estudaram o efeito do uso da fibra (PVA) no comportamento de um solo arenoso por meio de ensaios triaxiais consolidados drenados (CD) com quatro pressões confinantes de 50, 100, 300 e 500 kPa e três teores de fibras (0, 0,5 e 1%). Os resultados experimentais indicam que o reforço de fibras melhora as propriedades mecânicas da areia, visto que a adição de fibra PVA à areia aumenta a tensão máxima de cisalhamento, a tensão axial no ponto de falha e a diminui perda de resistência pós pico (Figura 27).

Figura 27 – Envoltórias de resistência e residual em função do teor de fibras (FC). Adaptado de Choobbast et al. (2019).



Fibras de vidro

As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, ou seja, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente da ordem de 10 μm (TAYLOR, 1994).

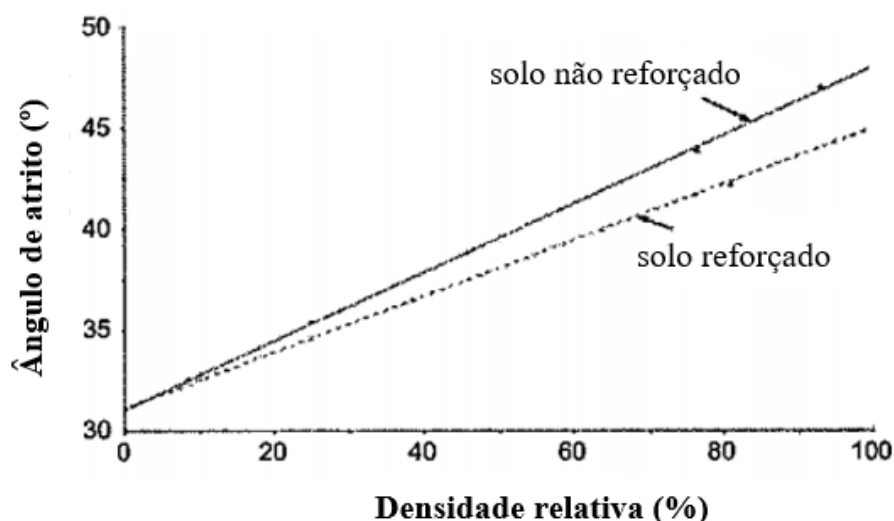
Al-Refai (1991) avaliou o comportamento de solos granulares reforçados com inclusões aleatórias de fibras de vidro com comprimento de 10, 25, 50, 75 e 100 mm e teor de 0,5% em relação à massa seca através de ensaio triaxial, e conclui que o aumento na resistência da amostra é diretamente proporcional ao comprimento da fibra, além disso, também observou que existe um comprimento ótimo de fibra para maximizar a resistência e rigidez da mistura de areias finas e médias reforçadas com fibras, sendo esse comprimento ótimo igual a 75 mm.

Consoli et al. (2004), a partir de ensaios de compressão triaxial consolidado-drenados com medida de deformação, avaliaram os efeitos do uso de três fibras distribuídas aleatoriamente (poliéster, PP e fibras de vidro) e cimento Portland de endurecimento rápido

para melhorar o comportamento de engenharia de uma areia fina uniforme. Além da natureza das fibras, também se analisou o efeito separado e combinado do teor de fibra (0% a 5,0% em peso), o comprimento da fibra (até 36,0 mm), o teor de cimento (de 0% a 7,0% em peso) e a tensão efetiva média inicial (20, 60 e 100 kPa) nas características de deformação e resistência do solo. Os autores concluíram que a inclusão de fibras de poliéster e de vidro (ambas relativamente rígidas) reduziram ligeiramente a rigidez e aumentaram o ângulo de atrito da areia cimentada e não cimentada e também reduziu ligeiramente o intercepto de coesão e a fragilidade do compósito cimentado. Por outro lado, o reforço de fibra de PP relativamente flexível reduziu drasticamente a fragilidade (alterando o modo de falha da areia cimentada de frágil a dúctil para fibras mais longas) e rigidez.

Lovisa et al. (2010) avaliaram o efeito da inclusão aleatória de fibras de vidro de comprimento de 10,0 a 15,0 mm, diâmetro de 0,02 mm e teor de 0,25% em um solo arenoso na condição seca e na condição úmida com teores de umidade de 1,0%, 2,0% e 3,0%, sob diferentes densidades, por meio do ensaio de cisalhamento direto. Concluiu-se que à medida em que o teor de água aumentou, o valor do ângulo de atrito interno da areia sem reforço aumentou, mas diminuiu para a areia reforçada (Figura 28).

Figura 28 - Relação entre o ângulo de atrito e a densidade relativa. Adaptado de Lovisa et al. (2010).



Ateş (2016) avaliou as propriedades mecânicas de uma areia reforçada com cimento com teores de 5, 10, 15 e 20% e fibras de vidro com comprimento de 4,0 mm, 2,0 mm de largura e 0,4 mm de espessura aleatoriamente distribuídas com teores de 1,0, 2,0, 3,0 e 4,0% em relação

ao peso seco do solo e através de ensaios de compactação, de cisalhamento direto e de resistência a compressão não confinado concluiu-se que a utilização de fibra de vidro e cimento aumentou as propriedades de resistência mecânica do solo estudado. A resistência máxima foi alcançada com um teor de fibra de vidro de 3%, enquanto aumentos adicionais de fibra de vidro levaram a uma diminuição nos valores de resistência das misturas.

A Tabela 2 sintetiza as principais fibras sintéticas nesta revisão bibliográfica, bem como suas características (comprimento, teor, tipo de solo na mistura) e principais conclusões das propriedades mecânicas do compósito solo-fibra.

Tabela 2 - Resumo das principais fibras sintéticas.

Tipo de Fibra	Comprimento (mm)	Porcentagem de fibra	Tipo de solo usado na literatura	Conclusões	Referências
Fibras de Polipropileno (PP)	5 mm, 12 mm, 18 mm, 19 mm e 20 mm	0,0 - 0,6%	Arenoso Argiloso	Ganhos de força, coesão, ângulo de atrito interno e ductilidade	Cai et al. (2006), Tang et al. (2007), Plé e Lê (2012), Anagnostopoulos et al (2013), Nguyen e Fatahi (2016), Claria e Vettorelo (2016), Mirzababaei et al (2017).
Fibras de Politereftalato de Etileno (PET)	12 mm, 36 mm e 38 mm	0,0 - 1%	Arenoso Siltoso	Melhora nas propriedades mecânicas do solo.	Consoli et al (2002), Zhao et al. (2015), Botero et al. (2015), Senez e Casagrande (2017).
Fibras de Nylon	4 mm e 20 mm	0,0 – 5,0%	Arenoso Argiloso	Aumento da resistência residual dos solos, da rigidez e da ductilidade.	Kumar e Tabor (2003), Ameta et al. (2009), Attom et al. (2009) Estabragh et al (2011), Estabragh et al (2012)
Fibras de vidro	4 mm, 10 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm e 100 mm	0,0 – 4,0%	Arenoso	O aumento na tensão principal é diretamente proporcional ao comprimento da fibra.	Al-Refai (1991), Consoli et al (2004), Lovisa et al (2010), Ateş (2016).
Fibras de Poliacetato de Vinila (PVA)	12 mm	0,0 – 1,0%	Arenoso	Efeito significativo na resistência à compressão não confinada.	Park et al (2008), Park (2009), Park (2011).

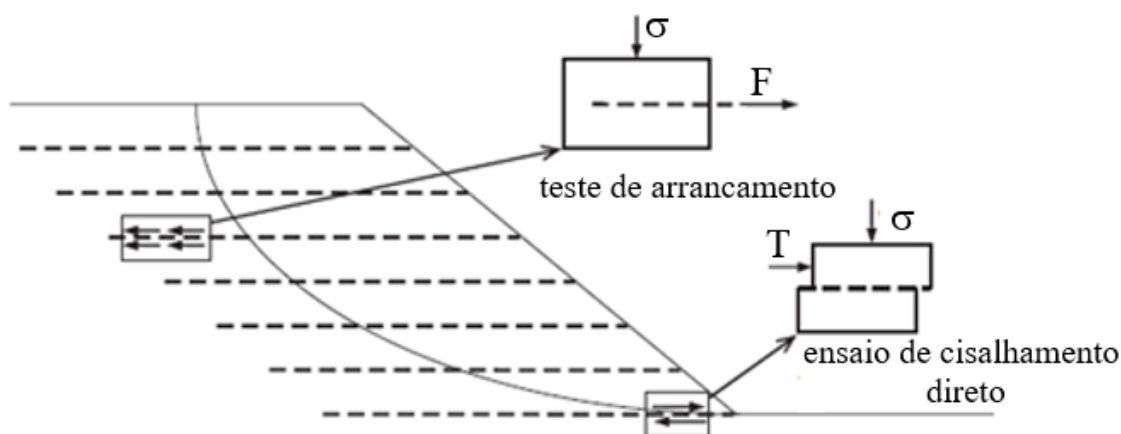
3.4 Mecanismos de Interação Solo-Fibra

Ensaiois laboratoriais tem sido realizados com o objetivo de compreender o comportamento de interação solo-fibra (BAKEER et al., 1998; MORACI & RECALCATI, 2006; KHEDKAR & MANDAL, 2009; SIEIRA et al., 2009; ABIOGHLI et al., 2019; XUE et al., 2020), no entanto o mecanismo ainda não é bem definido. Estudos mostram que a tração pode ser influenciada por muitos fatores, como a massa específica seca do solo, comprimento da fibra a ser incorporada, rugosidade da superfície de reforço, entre outros.

Viera et al. (2013) apontam que a identificação precisa do mecanismo de interação solo-reforço e a escolha do ensaio mais adequado para sua caracterização tem relevância determinante nos projetos geotécnicos e que esse mecanismo depende das propriedades do solo e das características do reforço.

A Figura 29, representa um esquema de ruptura de um talude reforçado. Na parte superior do talude, o reforço tende a ser puxado e a interação solo-reforço pode ser mais bem caracterizada em laboratório por testes de arrancamento, e próximo à base, é esperado um deslizamento do solo e a interação entre os dois materiais é melhor caracterizada por meio de testes de cisalhamento direto (NAKAMURA et al., 1999).

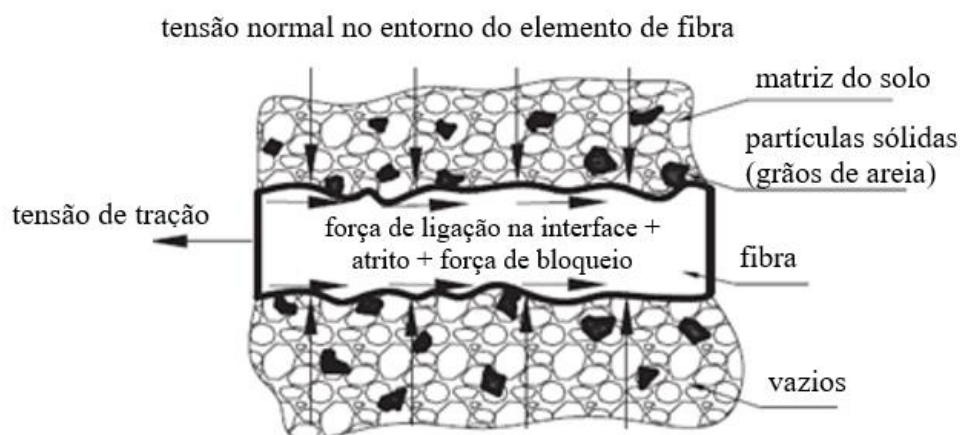
Figura 29 - Mecanismos de ruptura potencial de um talude com solo reforçado e os respectivos ensaios laboratoriais mais adequados para caracterização do reforço do solo. Adaptado de Nakamura et al. (1999).



Para Tang et al. (2007), os deslocamentos gerados por esforços cisalhantes são restringidos em virtude dos elementos de fibra atuarem como uma distribuição espacial tridimensional de maneira a interligar os grãos de solos e auxiliar a formação de uma matriz

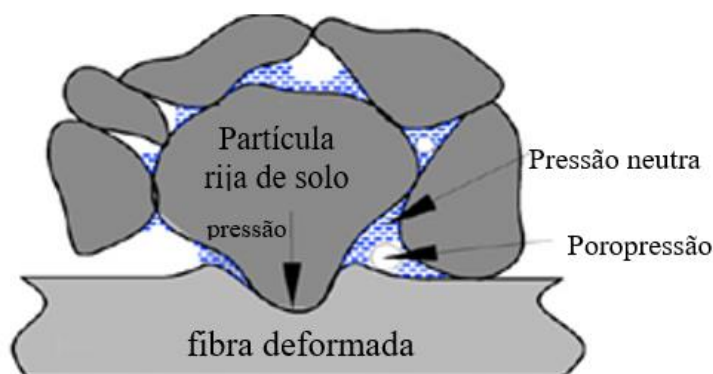
coesa. Desse modo as fibras são impedidas de deslizar devido às forças de ligação na interface, suportando esforços de tração, conforme mostra a Figura 30.

Figura 30 - Esquema do comportamento mecânico na interface entre o elemento de fibra e a matriz do solo. Adaptado de Tang et al. (2007).



Destaca-se que durante a compactação, algumas partículas rijas angulares do solo podem causar deformação plástica do corpo da fibra quando submetidas à altas energias de compactação (TANG et al., 2010), conforme ilustra a Figura 31.

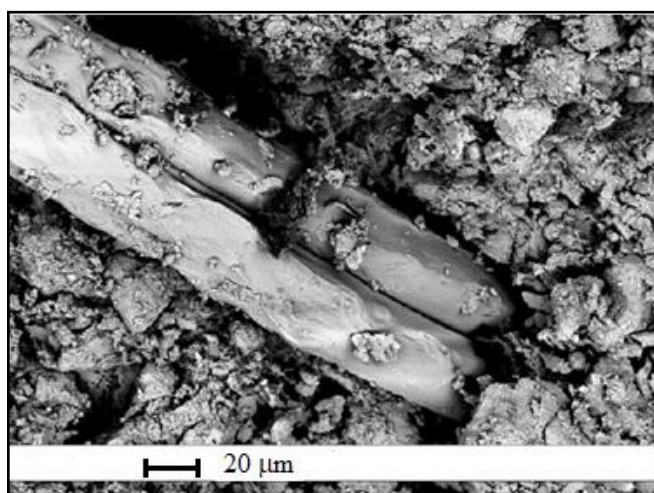
Figura 31 - Esboço da condição de contato entre partículas rijas de solo e superfície da fibra sob pressão. Adaptado de Tang et al. (2010).



Esse fenômeno foi confirmado por Tang et al. (2010) que investigaram as morfologias da interface do solo argiloso reforçado com fibras. Como mostra a Figura 32 algumas fendas evidentes são formadas na superfície da fibra em virtude da pressão transmitida a partir de

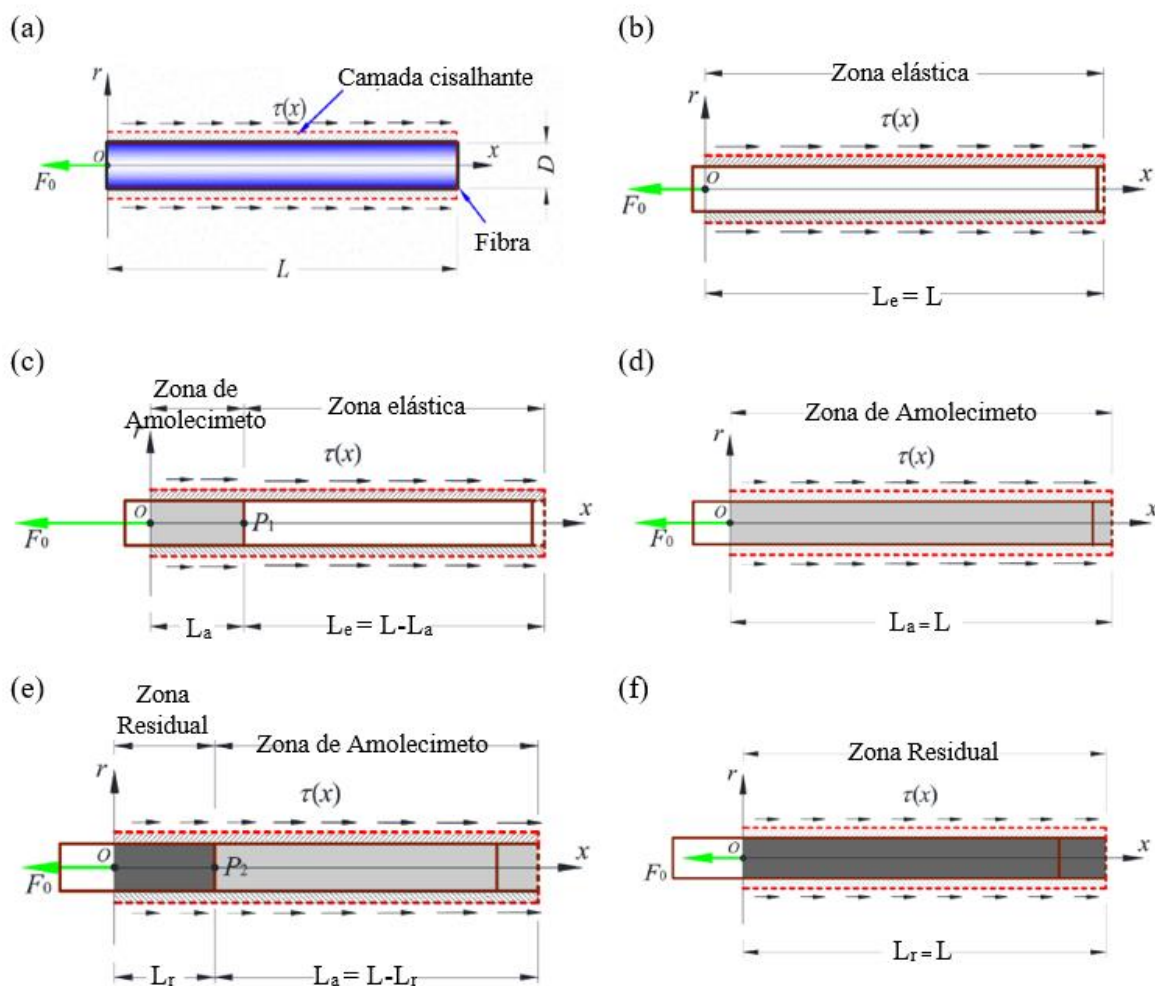
partículas rijas do solo, o que resulta em um aumento tanto na rugosidade da superfície da fibra quanto na força de intertravamento interfacial. Consequentemente, as interações entre a superfície da fibra e a matriz do solo são melhoradas. Shah (1991), Tagnit-Hamou et al. (2005) e Frost e Han (1999) também apontam que a resistência ao deslizamento da fibra é fortemente dependente da rugosidade na superfície da fibra e que tais rugosidades constituem um intertravamento, melhorando as interações solo-fibra.

Figura 32 - Foto microscópica de fendas formadas na superfície da fibra após compactação. Adaptado de Tang et al. (2010).



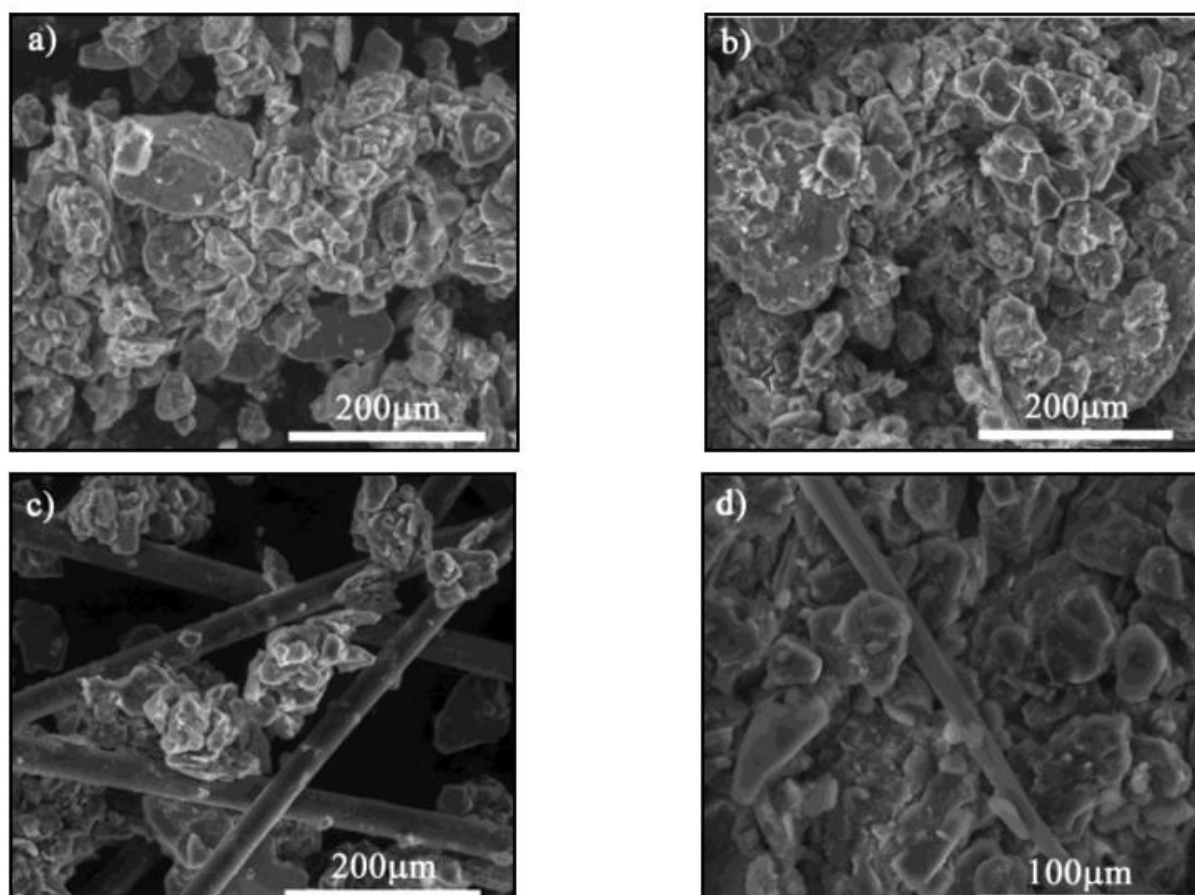
Zhu et al. (2014) apontam que a tração de uma fibra curta no solo é dividida em cinco fases consecutivas: a fase elástica pura inicial (Fase I); a fase de amolecimento elástico (Fase II); a fase pura de amolecimento (Fase III); a fase residual de amolecimento (Fase IV); e fase residual pura final (fase V), conforme ilustra a Figura 33, no estudo, os autores definem que a fibra é idealizada como uma haste cilíndrica com diâmetro e comprimento (L). Durante o arrancamento, presume-se que a fibra seja um elemento carregado com tensão axial enquanto a deformação radial é desprezada. Quando uma força de tração (F_0) é aplicada, as tensões de cisalhamento são mobilizadas na interface solo-fibra para resistir à força de arrancamento. Os autores concluem que as fases II e IV são menos evidentes no tracionamento das fibras quando comparadas às outras fases e que a interação solo-fibra depende significativamente das condições de compactação (ou seja, teor de umidade e massa específica seca do solo).

Figura 33 - Interação solo-fibra: (a) esquema do mecanismo de tração da fibra no solo; (b) fase elástica pura inicial; (c) fase de amolecimento elástico; (d) fase pura de amolecimento; (e) fase residual de amolecimento; (f) fase residual pura final. Adaptado de Zhu et al. (2014).



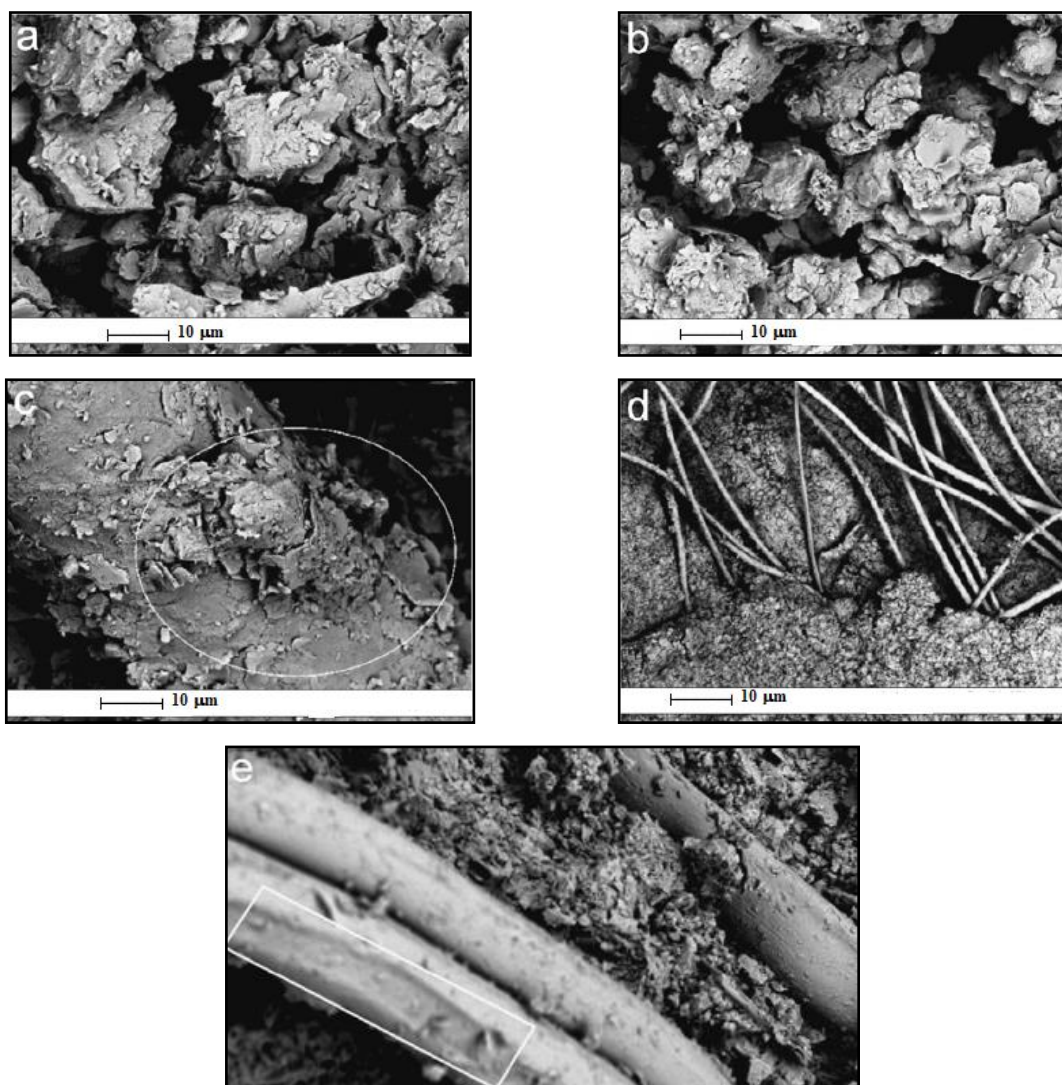
Cristelo et al. (2015) avaliaram a interação solo-fibra de uma argila arenosa estabilizada com cimento. Na Figura 34 tem-se imagens microscópicas do solo sem a adição de fibras e as respectivas misturas com solo-cimento, solo-fibra e solo-fibra-cimento. Os autores apontam que os poros não contribuem com a força de interface solo-fibra, gerando uma perda nas condições de resistência mecânica, uma vez que o contato é prejudicado por não haver forças de atrito. Este inconveniente pode ser reparado por meio da inclusão de cimento no solo que, por ser um material com maior presença da fração de finos, corrige a granulometria do solo, reduzindo os vazios e aumentando a força de ligação na interface solo-fibra, proporcionando ganho nas condições de resistência mecânica da mistura (CRISTELO et al. 2015).

Figura 34 - Imagens microscópicas de: (a) solo; (b) solo e 10% de cimento; (c) solo e 0,25% de fibras; (d) solo, 10% de cimento e 0,25% de fibras. Cristelo et al. (2015).



Por meio de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), Tang et. al (2007) apontam que a inclusão individual de fibra não tem efeito discernível na microestrutura do solo. Os autores avaliaram a resistência e o comportamento mecânico da fibra curta de PP em solo argiloso reforçado e estabilizado com cimento. A Figura 35 (a) mostra que a microestrutura do solo não cimentado reforçado com fibra é semelhante ao do solo não cimentado; (b) em que a estrutura não é compacta e os espaços de poros são grandes; em (c) observa-se que a superfície da fibra está presa por muitos minerais argilosos que contribuem para a resistência e atrito entre a fibra e a matriz do solo. As fibras discretas distribuídas atuam como um espaço tridimensional, Figura 35 (d), para interligar os grãos do solo e ajudar a formar uma matriz coesa unitária e restringir o deslocamento, consequentemente, a resistência ao tracionamento entre as partículas de argila é melhorada (TANG et al., 2007).

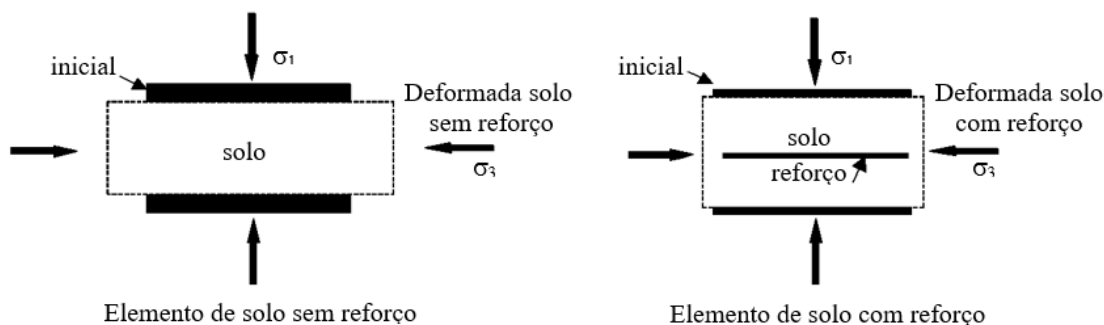
Figura 35 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de solo não cimentado reforçado com fibra: (a) solo não cimentado reforçado com fibra com uma ampliação de 1500 vezes; (b) solo não cimentado com uma ampliação de 1500 vezes; (c) superfície da fibra em solo não cimentado reforçado com fibra, com uma ampliação de 2000 vezes; d) fibra distribuição na matriz do solo; (e) cavidades e sulcos formados na superfície da fibra. Tang et al., (2007).



Já sob a ótica da resistência mecânica, os solos possuem elevada resistência à compressão e baixa resistência aos esforços de tração. Este fato pode ser observado em uma determinada massa de solo carregada verticalmente, na qual ocorrem deformações verticais de compressão e deformações laterais de extensão (tração). Para elevar a resistência à tração do solo pode-se incluir um elemento de reforço que bloqueia os movimentos laterais, devido ao desenvolvimento de esforços de tração no material adicionado. Desse modo, conforme a Figura

36, o solo tende a mover-se em relação ao reforço gerando tensões cisalhantes na interface solo/reforço (WHEELER, 1996).

Figura 36 - Elemento de solo com e sem reforço. Adaptado de Wheeler (1996).



Conclui-se que o efeito do reforço plástico na massa do solo depende vitalmente da natureza da superfície (ou seja, lisa/lisa ou corrugada/ondulada), do tamanho das tiras ou fibras, do conteúdo de plástico e do tipo de solo utilizado para o estudo (Peddaiah et al., 2018).

3.5 Aplicações das fibras na engenharia

3.5.1 Camadas de pavimentos

A utilização de materiais plásticos como reforço para solos fracos, buscando melhorar a sua resistência, é uma forma de reciclar estes materiais de modo significativo, eficiente e econômico. Suas aplicações na estabilização de solos de base, camadas de sub-base de pavimentos, reforços para aterros de terra e para reduzir o recalque de solo em fundações são alguns exemplos de utilização desses materiais para fins da engenharia civil (Peddaiah et al., 2018).

Segundo Peddaiah et al., (2018), o solo reforçado com plástico se comporta como um solo reforçado com fibra. Seus resultados refletem que há incremento significativo no peso específico seco máximo, nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e no valor CBR; a melhoria nas propriedades do solo depende do tipo de solo, do conteúdo de plástico e do tamanho da fibra.

Grogan e Johnson (1994) estudaram a estabilização de argila de alta plasticidade e areias siltosas pela inclusão discreta de geofibras de PP para sub-bases em pavimentos e mostraram

que a inclusão da geofibras permitia até 90% mais resistência ao esforço de tráfego para a argila e 60% para a areia estabilizada.

Santoni e Webster (2001) descrevem ensaios de laboratório e de campo usando uma técnica de estabilização de areias com fibras, em que ensaios de compressão não confinados em laboratório usando fibras de PP monofilamentares de 51 mm de comprimento para estabilizar uma areia mal graduada mostraram um teor ótimo de fibra de 1% (em peso seco). As seções de ensaio de campo foram construídas e o tráfego testado usando tráfego de aeronaves C-130 simuladas com uma carga de pneu de 13.608 kg e um caminhão de carga militar de 4.536 kg carregado com um peso bruto de 18.870 kg. Os resultados dos ensaios mostraram que a estabilização da areia com fibra sobre um subleito de areia suportou mais de 1.000 passagens de uma carga de pneus C-130. Com base em ensaios limitados de tráfego de caminhões, a camada de fibra e areia de 203 mm de espessura, coberta com uma aplicação de resina de árvore por pulverização, suportaria quantidades substanciais de tráfego de caminhões militares.

A fim de verificar os resultados de um extenso experimento de laboratório conduzido para determinar os efeitos de inúmeras variáveis no desempenho de amostras de areia estabilizadas com fibras, Tingle et al. (2002) realizaram ensaios de compressão não confinados em amostras de areia reforçadas com fibras orientadas aleatoriamente para projetar duas seções de ensaio de campo, em escala real, a fim de validar o desempenho das areias reforçadas com fibras para estradas de baixo volume. A conclusão preliminar foi que as areias estabilizadas com fibras são uma alternativa viável aos materiais tradicionais de construção para estradas temporárias ou de baixo volume.

Tutumluer et al. (2004) avaliaram a estabilidade ao cisalhamento ou a melhoria da capacidade de suporte da estabilização de geofibras-areia para a construção rápida de estradas e aeródromos por meio de um equipamento de ensaio triaxial avançado chamada de *FastCell*, da Universidade de Illinois, a qual foi usada em conjunto com ensaios de cisalhamento direto para determinar os módulos resilientes anisotrópicos e as propriedades de resistência de duas areias reforçadas com geofibra (areias mal e uniformemente graduadas) preparadas com três geofibras de 51 mm: fibrilado, monofilamento e fita. O estudo mostra que uma seção de areia siltosa reforçada com fibras de 30 mm forneceu 33% de aumento no número de passagens de tráfego em comparação com a seção não reforçada. Além disso, para que a estabilização das areias com geofibras seja uma alternativa de construção viável, as misturas areia-geofibra devem conter uma quantidade ótima de finos necessários para as geofibras mobilizarem a

resistência ao cisalhamento da mistura efetivamente e assim melhorar a estabilidade ao cisalhamento e a resistência à deformação permanente.

Hafez et al. (2018) investigaram a influência do uso de PET reciclado como material de reforço de um solo argiloso em quatro porcentagens diferentes do plástico reciclado (0%, 0,2%, 0,6% e 1,0%) e concluíram que, economicamente, o custo inicial para a construção de um segmento de estrada de 10 km diminui em 8% usando o subleito reforçado com PET de 0,6% em comparação com o subleito de controle. Além disso, o módulo resiliente de amostras reforçadas com PET 0,6% aumenta 58% em comparação com o módulo resiliente da amostra de controle (0% de PET).

Dessa forma, dos ensaios de CBR observa-se que a adição de tiras plásticas no solo aumenta consideravelmente o valor do CBR. Se tal solo reforçado com tiras de plástico for utilizado como material de subleito na construção de pavimentos, a espessura do subleito pode ser reduzida substancialmente, e a redução da espessura do pavimento leva diretamente à redução do custo de construção do pavimento (PEDDAIAH; BURMAN; SREEDEEP, 2018).

3.5.2 Muros de contenção e proteção de taludes

Parka e Tan (2005) pesquisaram a influência das fibras nos muros reforçadas a partir do método dos elementos finitos utilizando fibras curtas de PP de 60 mm de comprimento e proporção de mistura da fibra de 0,2% em peso do solo. A pressão vertical e horizontal da terra, o deslocamento e o assentamento da face da parede foram analisados. Os resultados foram comparados com os resultados medidos de dois ensaios em escala real. Demonstrou-se que o uso de solo reforçado com fibras curtas aumenta a estabilidade da parede e diminui as pressões de terra e os deslocamentos da parede. Este efeito é mais significativo quando a mistura de solo e fibra curta é usado em combinação com geogrelhas.

Os solos misturados com fibras distribuídas aleatoriamente podem ser usados como remendos no reparo localizado de falhas de taludes como também pode acomodar a forma irregular de taludes danificados. No reforço de camadas superficiais de solo, como coberturas de aterro, o reforço de fibra elimina a necessidade de ancoragem que existe com o reforço planar, bem como reduz as ravinas da erosão (ZORNBERG & KAVAZANJIAN, 2002).

Outro conceito de utilização de fibras na engenharia civil é a construção de fundações em solos com baixa capacidade de carga onde os custos de uma solução de fundação profunda

podem ser incompatíveis com os custos globais para projetos de construção de baixo orçamento. Nesses casos, alternativas para a melhoria do solo local ocorrem por meio da adição de agentes cimentícios ou através da inclusão de elementos discretos aleatoriamente distribuídos, como as fibras (CONSOLI et al., 2010).

3.5.3 Utilização de tiras como reforço

Para aplicações práticas, é possível preparar pedaços cortados de garrafas plásticas PET (polietileno tereftalato) do tamanho e formato necessários. O plástico pode ser usado para estabilização de aterros, subleitos de pavimentos e outras áreas da engenharia civil, conforme a necessidade (Peddaiah et al., 2018).

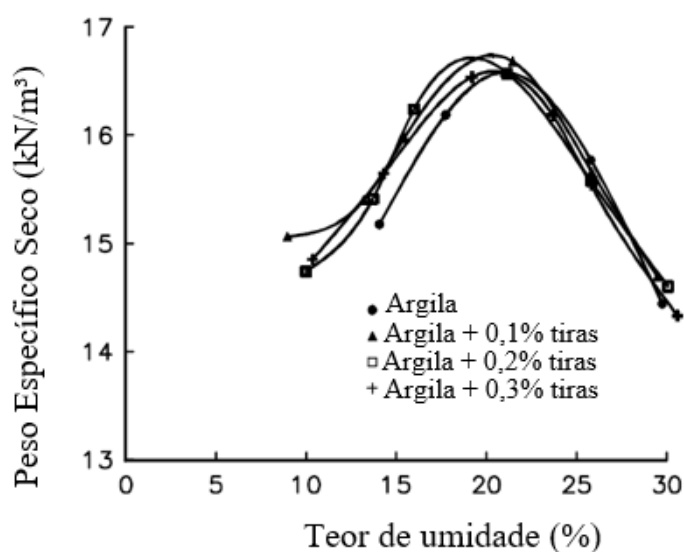
As tiras podem ser definidas como elementos lineares em que a largura é maior que a espessura e podem ser encontradas nas formas de tiras poliméricas, de borracha e de metal. Benson e Khire (1994), avaliaram a inclusão de tiras de PET recicladas de largura de 0,6 cm, comprimentos de 2,4 cm, 4,8 cm e 7,2 cm e espessura de 0,6 mm em solo arenoso com teores variando de 1% a 4% por meio de ensaios CBR e de cisalhamento direto. Os resultados dos ensaios mostraram que o reforço de areia com tiras de PET reciclado não apenas aumenta sua resistência à deformação, mas também melhora os parâmetros de resistência do solo. O estudo sugere que o solo arenoso reforçado com tiras de PET reciclado pode ser útil em aplicações geotécnicas para rodovias.

Marçal et al. (2020) estudaram propriedades de resistência de solos lateríticos compactados reforçados com tiras de resíduos de polipropileno (PP) cortadas de embalagens plásticas recicladas, analisando diferentes teores de tiras de PP (0,25% a 2,0%) e comprimentos (10, 15, 20 e 30 mm) na resistência à compressão não confinada (RCS), o que permitiu encontrar uma combinação ideal de teor e comprimento de tiras de PP.

Nataraj e McManis (1997) avaliaram as propriedades mecânicas de amostras de solo argiloso/arenoso não reforçadas e reforçadas com tiras de Polipropileno (PP) de 25 mm de comprimento e largura de 12 mm e teores de 0,1, 0,2 e 0,3% em relação à massa seca do solo. O comportamento de compactação das amostras argilosas reforçadas para cada teor de conteúdo de tiras exibe um comportamento de compactação semelhante ao de amostras não reforçadas. Entretanto, um aumento no teor de fibras de 0 a 0,2%, aumenta ligeiramente a massa específica seca máxima e diminui o teor de umidade ótimo. Resultados semelhantes foram obtidos em

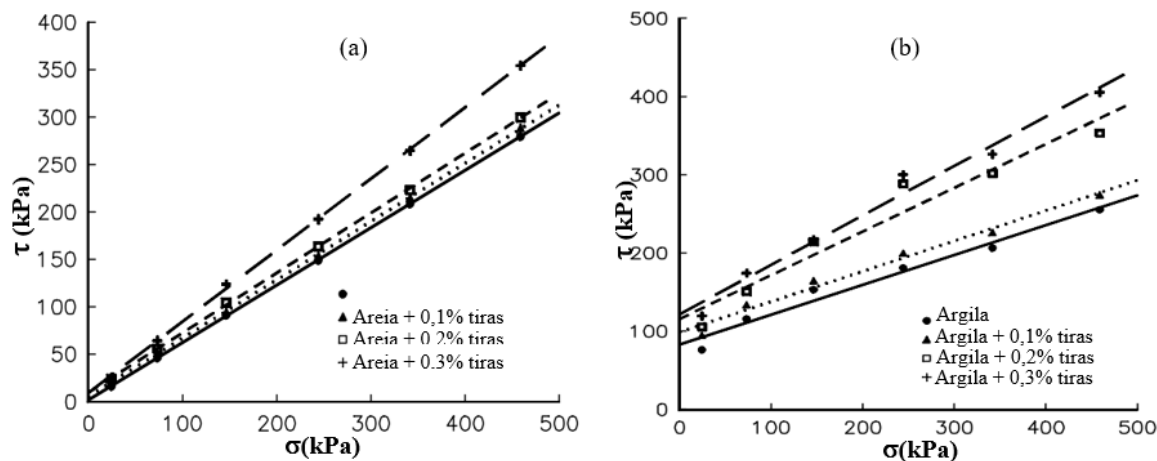
outros estudos (FLETCHER & HUMPHRIES 1991; AL WAHAB 1995; MAHER & HO 1994, KUMAR et al. 2007). A Figura 37 ilustra os resultados de ensaios de compactação para solo argiloso com e sem reforço de tiras PP, de acordo o trabalho de Nataraj e McManis (1997).

Figura 37 - Resultados de ensaios de compactação para solo argiloso com e sem reforço de tiras PP. Adaptado de Nataraj e McManis (1997).



Nataraj e McManis (1997) concluem que nos ensaios de cisalhamento direto a adição de tiras às amostras de argila e areia aumentou o pico de resistência ao cisalhamento do solo e reduziu, em alguns casos, a perda de resistência pós-pico. Além disso, a adição de tiras às amostras de argila e areia resultou em aumentos substanciais nos valores do ângulo de atrito e coesão (Figura 38).

Figura 38 - Parâmetros de resistência: (a) solo arenoso; (b) solo argiloso. Adaptado de Nataraj e McManis (1997).



Akbulut et al. (2007) realizaram um trabalho experimental para investigar a influência da inclusão de tiras de borracha de pneus de sucata e de PET, além de fibras de PP recicladas aleatoriamente distribuídas, com largura de 2,5 mm em diferentes comprimentos (5 mm, 10 mm e 15 mm) e teores de mistura em solos argilosos. As amostras não reforçadas e reforçadas foram submetidas a ensaios de compressão não confinada e de cisalhamento direto, conforme Figuras 39 e 40. Os autores concluem que esses resíduos melhoram as propriedades de resistência e o comportamento dinâmico de solos argilosos e que as tiras podem ser usadas com sucesso como materiais de reforço para solos argilosos.

Choudhary et al. (2010), realizaram uma série de ensaios CBR em solo reforçado com tiras de PET aleatoriamente distribuídas, variando porcentagem de tiras com largura de 12 mm e com diferentes comprimentos (12 mm, 24 mm e 36 mm), nas proporções de 0; 0,25; 0,5; 1,0; 2 e 4%. Os resultados dos ensaios demonstraram que a inclusão de resíduos de tiras de plástico reciclado no solo com quantidades apropriadas melhorou a resistência e comportamento de deformação dos solos do subleito substancialmente (Figura 41). A técnica proposta pode ser usada com vantagem na construção de aterros/estradas.

Babu e Chouksey (2011) avaliaram o comportamento da tensão-deformação de solo reforçado com mistura de tiras de politereftalato de etileno (PET) de garrafas recicladas às quais possuíam 12,0 mm de comprimento e 4 mm de largura e teores de 0%, 0,5%, 0,75% e 1,0% em relação ao peso de solo seco. Foram realizados ensaios triaxiais consolidados não-drenados para cada teor de fibra. Os resultados experimentais mostram que existe uma melhora

significante nos parâmetros de resistência do solo com a inclusão de fibras do plástico de garrafas (Tabela 3) devido ao aumento do atrito entre o solo e o resíduo de plástico e ao desenvolvimento de tensão por tração no resíduo de plástico. A Figura 42 ilustra as tiras de plástico e mistura solo/tiras.

Tabela 3 - Parâmetros de resistência do solo reforçado com tiras plásticas recicladas. Adaptado de Babu e Chouksey (2011).

Amostra	Teor de Tiras	Ângulo de atrito Efetivo (°)	Aumento no ângulo de Atrito efetivo	Coesão (kPa)	Aumento da Coesão (kPa)
1	0,00%	23,2	-	26,30	-
2	0,50%	27,3	1,17	33,60	1,27
3	0,75%	33,4	1,43	35,90	1,36
4	1,00%	36,5	1,57	47,50	1,80

Figura 39 - Resistência a compressão não confinada em função do teor de tiras/fibras para diferentes comprimentos. Adaptado de Akbulut et al. (2007).

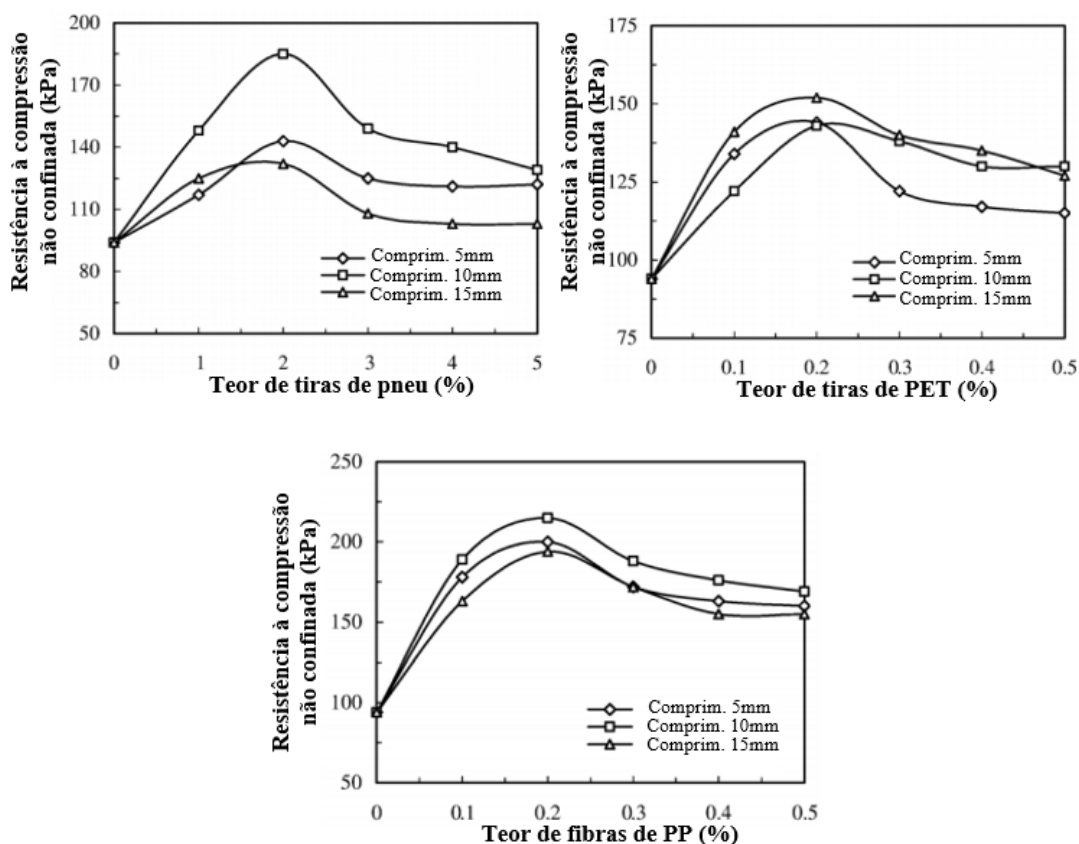


Figura 40 - Variação da coesão e do ângulo de atrito interno para diferentes tipos de tiras e comprimentos. Adaptado de Akbulut et al. (2007).

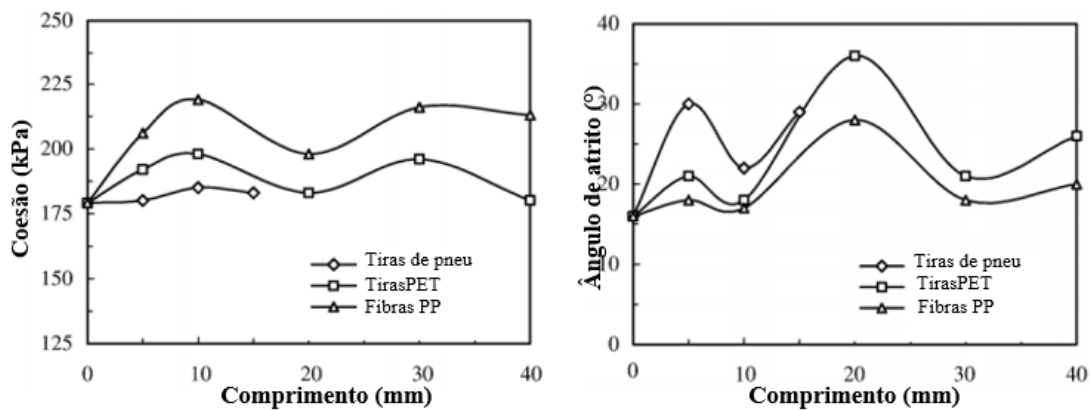


Figura 41 - Variação do índice suporte Califórnia em função do comprimento e teor de tiras. Adaptado de Choudhary et al. (2010).

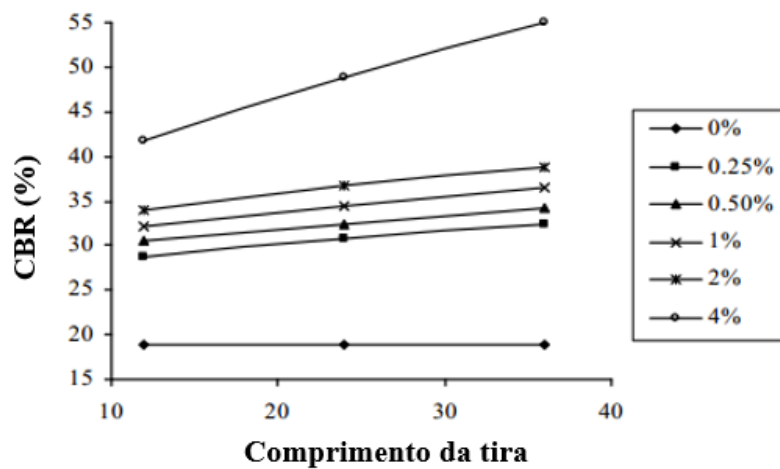


Figura 42 - (a) Tiras de plástico recicladas; (b) Mistura solo/tiras. Babu e Chouksey (2011).



Soltani-Jigheh (2016), analisou as propriedades mecânicas de solos argilosos misturados com vários teores de tiras de 8 mm de comprimento e 4 mm de largura de plástico reciclado (0, 0,5, 1,0, 1,5 e 3,0% em massa de solo seco). De acordo com os resultados, resíduos de plástico não afetam a características de compactação do solo argiloso consideravelmente e a resistência ao cisalhamento do solo argiloso foi melhorada com a adição de mais de 1,0% de resíduos plásticos, em que o aumento da coesão ocorre devido ao desenvolvimento de tensão de tração na tira reciclada.

Fathi et al. (2019) avaliaram a influência da inclusão de tiras de resíduos de plástico PET de garrafas de água cortadas em largura de 10 mm e comprimento de 50 mm misturadas aleatoriamente com quatro teores diferentes (0%, 0,5%, 0,75% e 1%) nos parâmetros de resistência de um solo arenoso (Figura 43). Verificou-se que a adição das tiras de PET à areia pode reduzir a fragilidade do solo sob baixas pressões de sobrecarga e a reciclagem de resíduos plásticos como material de reforço pode tornar-se uma alternativa barata e viável para melhoria do solo.

Figura 43 - Tiras de resíduos de PET e mistura solo-tiras. Fathi et al. (2019).



Se as tiras de plástico preparadas a partir de resíduos de garrafas plásticas forem utilizadas para a estabilização do solo, em vez de aditivos de elevado custo, como cimento e cal, o custo da estabilização do solo é minimizado. Além disso, o problema da eliminação de resíduos plásticos também seria atenuado de forma eficaz. Assim, métodos dispendiosos para o processo de estabilização podem ser substituídos pelo reforço de plástico, o que tornará a construção econômica e será útil para a reciclagem de resíduos plásticos não biodegradáveis (Peddaiah et al., 2018).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Coleta e caracterização das amostras

Os solos utilizados para a realização dos ensaios dessa pesquisa foram o solo arenoso, da região de Bauru – SP, e o solo argiloso da região de Pederneiras – SP. Tais ensaios buscam avaliar o potencial de aproveitamento e aplicação de tiras plásticas nos solos típicos da região.

ALVES (2009), afirma que a camada superficial da região de Bauru tem origem no afloramento pré-cambriano e apresenta-se recoberta, predominantemente, por um solo residual de arenito, conhecido como Arenito Bauru, não saturado e poroso. As propriedades de ser não saturado, poroso e ter partículas de areia cimentadas em argila e silte conferem ao solo características colapsíveis. Essa característica do solo é mais perceptível em períodos chuvosos, em que a saturação, que ocasiona a dissolução de suas partículas cimentantes, diminui sua resistência ao cisalhamento e provoca, quando submetido a determinados estados de tensão, reduções de volume.

Viviani e Giachetti (2006), em estudos de classificação do solo realizados com 46 amostras retiradas em 300 km de estradas não-pavimentadas de Bauru - SP, através da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), concluíram que o solo apresenta comportamento laterítico em 14 dos 46 pontos estudados, inclusive nas proximidades do local em que foram coletadas as amostras de solo para realização desta pesquisa. Embora o emprego da classificação MCT tenha resultado majoritariamente na classificação do solo como areia não laterítica, a posição dos pontos no gráfico de classificação ficou muito próxima aos limites de transição entre comportamento laterítico e não laterítico. Alves (2009) avaliou as características geotécnicas de estradas não pavimentadas no município de Bauru - SP e seus estudos também evidenciaram o comportamento laterítico deste solo, em função da maior capacidade de suporte alcançada com teores de umidade menores que a ótima.

Os solos lateríticos são típicos das regiões tropicais e são caracterizados em sua formação pela intensa migração de partículas sob a ação de infiltrações e evaporações, dando origem a um horizonte superficial poroso, permanecendo quase que exclusivamente os minerais mais estáveis – quartzo, magnetita, ilmelita e caulinita. Nesses solos é comum a agregação das partículas de argila e silte, pela ação dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, o que gera a estes solos características de comportamentos mecânicos e hidráulicos não condizentes com a sua textura (FAGUNDES, 2014).

As amostras de solo arenoso foram retiradas do campo experimental da UNESP de Bauru - SP, localizado entre Avenida Engenheiro Edmundo Carrijo Coube e a Rodovia Estadual Comandante João Ribeiro de Barros km 223, com coordenadas 22°21'6.03"S; 49°01'57.68". A retirada das amostras seguiu as recomendações estabelecidas pela NBR 9604 (ABNT, 2016). Já as amostras de solo argiloso foram retiradas de uma jazida superficial no município de Pederneiras, SP, na Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros km 202, sentido Bauru-Jaú, coordenadas 22°19'52.5"S; 48°45'32.26"O.

A caracterização das amostras de solos foi realizada por meio de ensaios de granulometria seguindo-se as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016), limites de consistência conforme a NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016), compactação de acordo com as NBR 6457 (ABNT, 2016) e NBR 7182 (ABNT, 2016) e massa específica dos sólidos segundo a NBR 6508 (ABNT, 2016).

As dimensões das partículas compreendidas entre determinados limites convencionais, permitem designar a amostra de solo arenoso como uma areia média a fina pouco argilosa, e a amostra de solo argiloso como uma argila arenosa, de acordo com a classificação adotada pela NBR 6502 (ABNT, 1995). As curvas granulométricas dos solos estão apresentadas na Figura 44.

Para a amostra de solo arenoso, em virtude de não ser plástico, conseguiu-se apenas obter o valor do limite de liquidez (LL) de 16%. Enquanto para a amostra de solo argiloso obteve-se LL = 34%, limite de plasticidade (LP) = 23%, e índice de plasticidade (IP) de 11%, considerada argila de plasticidade média.

O ensaio de compactação na energia Proctor Normal foi realizado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016) e NBR 7182 (ABNT, 2016) e a curva de compactação dos solos está representada na Figura 45.

SC refere-se ao solo arenoso e CL ao solo argiloso. Esta abreviação se baseia na classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) – ASTM D2487 (2013).

Figura 44 - Curva de distribuição granulométrica dos solos.

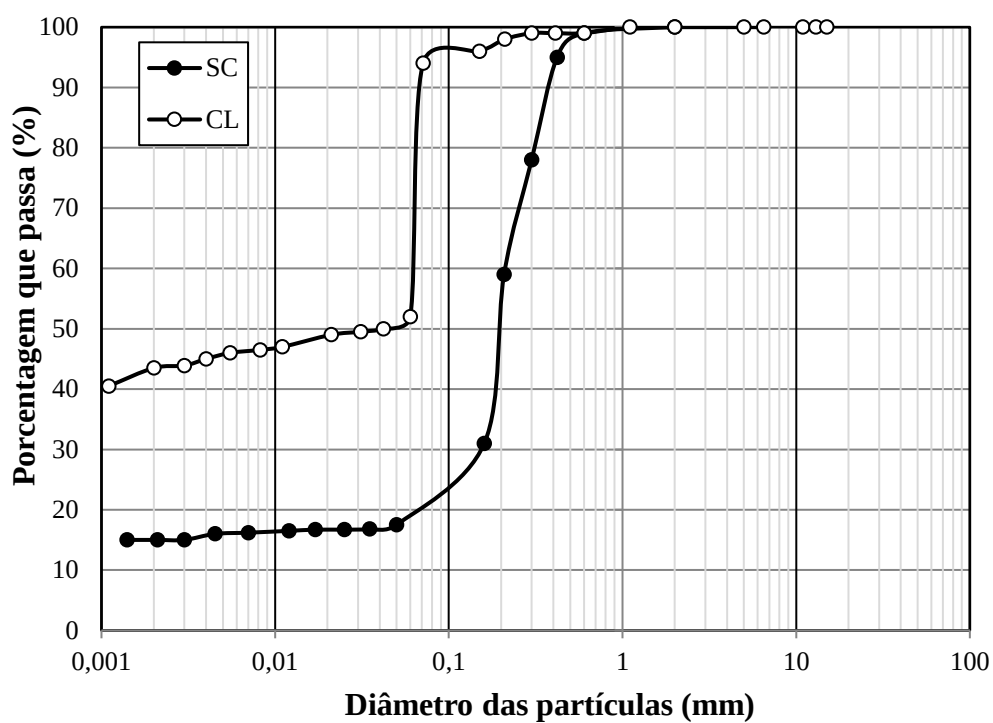
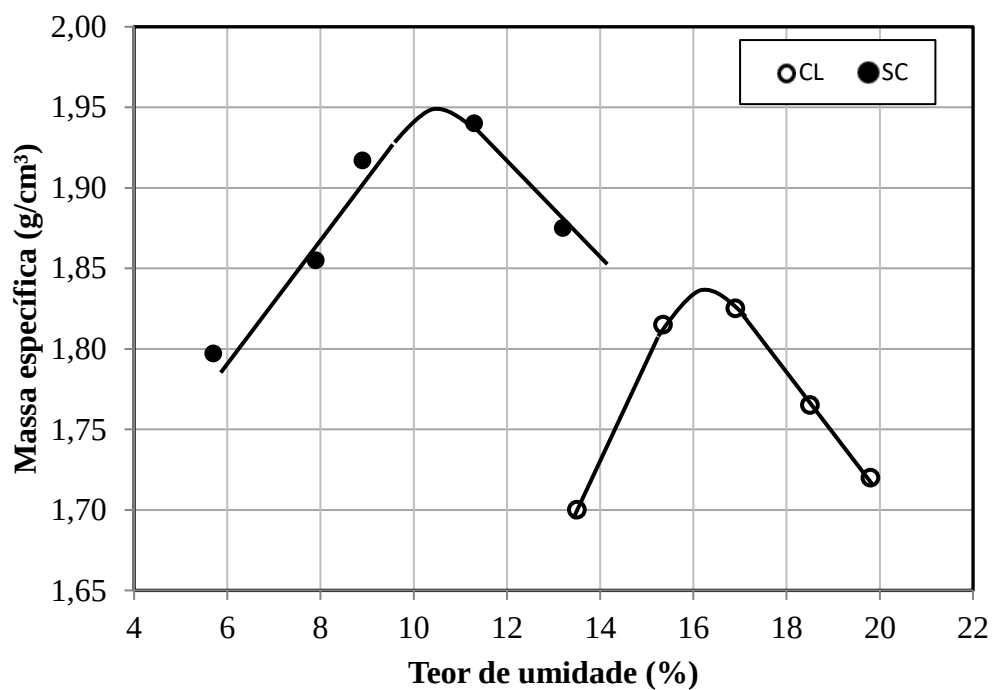


Figura 45 - Curva de compactação.



Nota-se que o solo CL, apesar de ser um solo argiloso, é um solo de boa competência, apresentando uma porcentagem significativa de areia em sua composição. As frações granulométricas, os limites de consistência, os valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo para as amostras de solos estão resumidamente apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização das amostras de solo estudadas.

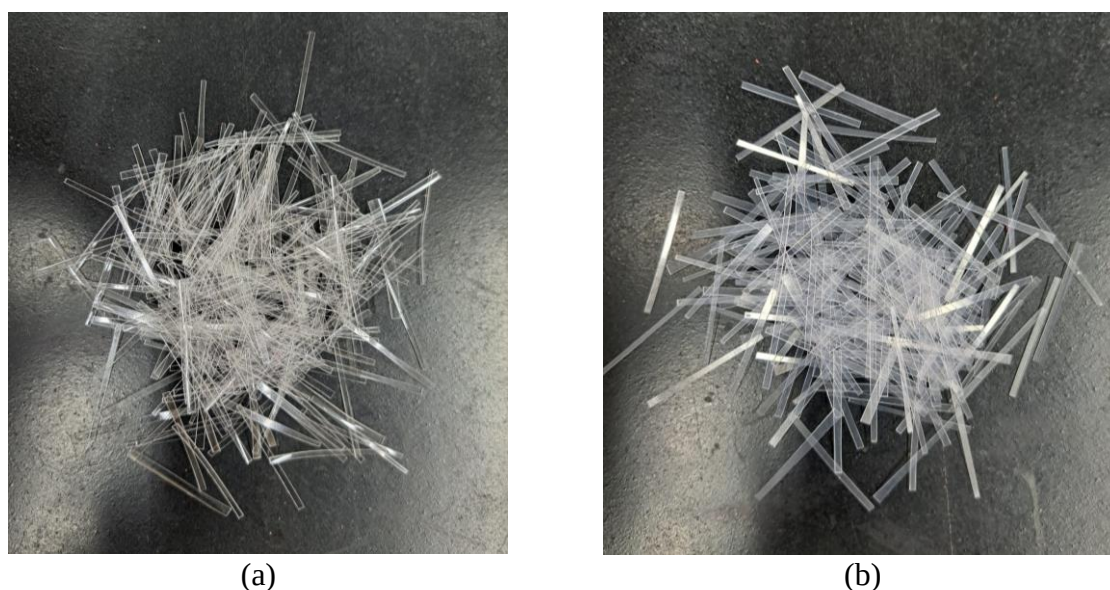
Parâmetro	unidade	Solo arenoso	Solo argiloso
Argila	%	14,0	45,5
Silte	%	5,8	12,0
Areia	%	80,2	42,5
Limite de Liquidez, LL	%	16,00	34,0
Limite de Plasticidade, LP	%	-	23,0
Índice de Plasticidade, IP	%	Não Plástico	11,0
Massa específica seca máxima, $\rho_{dm\acute{a}x}$	g/cm ³	1,95	1,837
Teor de umidade ótimo, $w_{\acute{o}timo}$	%	10,6	16,1
Massa específica dos sólidos, ρ_s	g/cm ³	2,649	2,688
Índice de vazios, e	-	0,358	0,463
Grau de saturação, S_r	%	78,40	93,5

4.2 Preparação das tiras plásticas

As tiras poliméricas de PET foram provenientes de garrafas que foram higienizadas em água corrente e secas; as tampas, fundos e rótulos foram descartados. As tiras poliméricas de PP foram provenientes de potes para armazenagem de alimentos; as partes rígidas das bordas dos recipientes foram descartadas, e as partes planas da tampa e fundo dos recipientes foram cortados para a confecção das tiras.

Após a coleta e preparo, os recipientes de PET e potes de PP foram recortados com largura de 1,5 mm e comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm, sendo então armazenadas separadamente. A largura das tiras foi escolhida com base na literatura, buscando diferenciar e ampliar os resultados encontrados durante o levantamento bibliográfico. No levantamento nota-se, em sua maioria, a utilização de tiras com larguras iguais ou superiores a 4 mm, então, a utilização de tiras de 1,5 mm é justificada para avaliar a interação mecânica de maiores superfície de contato entre as tiras e o solo, de modo que, em um mesmo valor de massa de tiras, tenhamos um número maior de tiras plásticas misturada ao solo (Figura 46).

Figura 46 - Tiras de PET (a) e PP (b) cortadas e prontas para a mistura com solo.



A Tabela 5 apresenta as propriedades típicas do PET e PP. A Tabela 6 apresenta a resistência do PET e do PP a determinados agentes agressivos

Tabela 5 - Propriedades típicas do PET e do PP. Adaptado de Shukla (2017).

Polímero	Densidade	Temperatura de fusão (°C)	Resistência à tração à 20°C (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)
PET	1,22 - 1,38	260	800 - 1200	12 - 18	8 - 15
PP	0,90 - 0,91	160 - 165	400 - 600	1,3 - 1,8	10 - 40

Tabela 6 - Resistência do PET e do PP a determinados agentes agressivos. Adaptado de Shukla (2017)

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

4.3 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Após a caracterização dos solos, foram iniciados os ensaios para avaliação da resistência à compressão não-confinada dos compósitos solo arenoso-tiras e solo argiloso-tiras com diferentes dosagens e comprimentos de tiras PET e PP, bem como dos solos sem reforço, conforme NBR 12770 (ABNT, 1992). A velocidade de deformação axial utilizada foi de 1,27mm/min.

As moldagens dos corpos de prova foram realizadas com os parâmetros ótimos obtidos do ensaio de compactação Proctor normal (GC=100%) dos solos sem reforço, em um cilindro com dimensões médias de 10,35 cm de altura e 5,10 cm de diâmetro, conforme NBR 12770 (ABNT, 1992) em que a relação altura-diâmetro deve estar compreendida entre 2 e 2,5. As tiras foram adicionadas aleatoriamente ao solo, em porcentagens previamente definidas por 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50 e 2,00% em relação à massa de solo seca. Verificou-se na literatura teores até 1% para o PET e PP e este trabalho busca dobrar o percentual verificando a possibilidade de maior aplicação sustentável para estes materiais. A Figura 47 ilustra o processo de mistura e homogeneização solo-tiras. Não foi observada dificuldade para homogeneização da mistura.

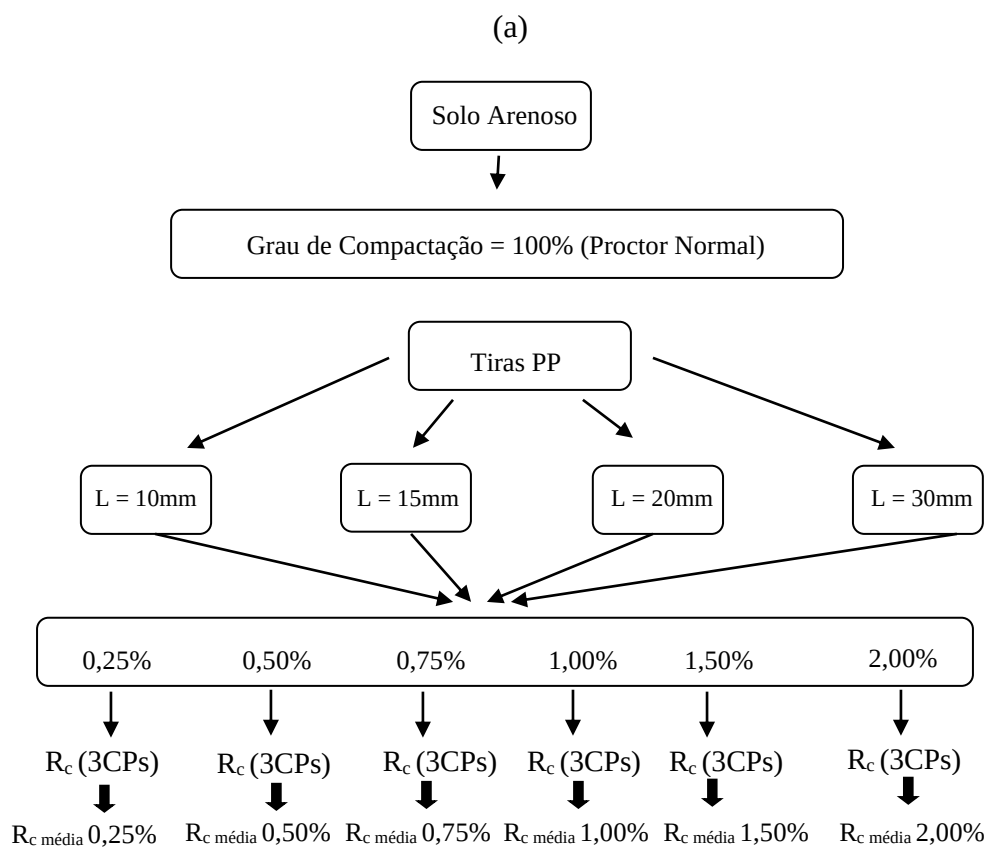
Figura 47 - Mistura solo-tira após homogeneização para areia/argila com tiras PET e PP.



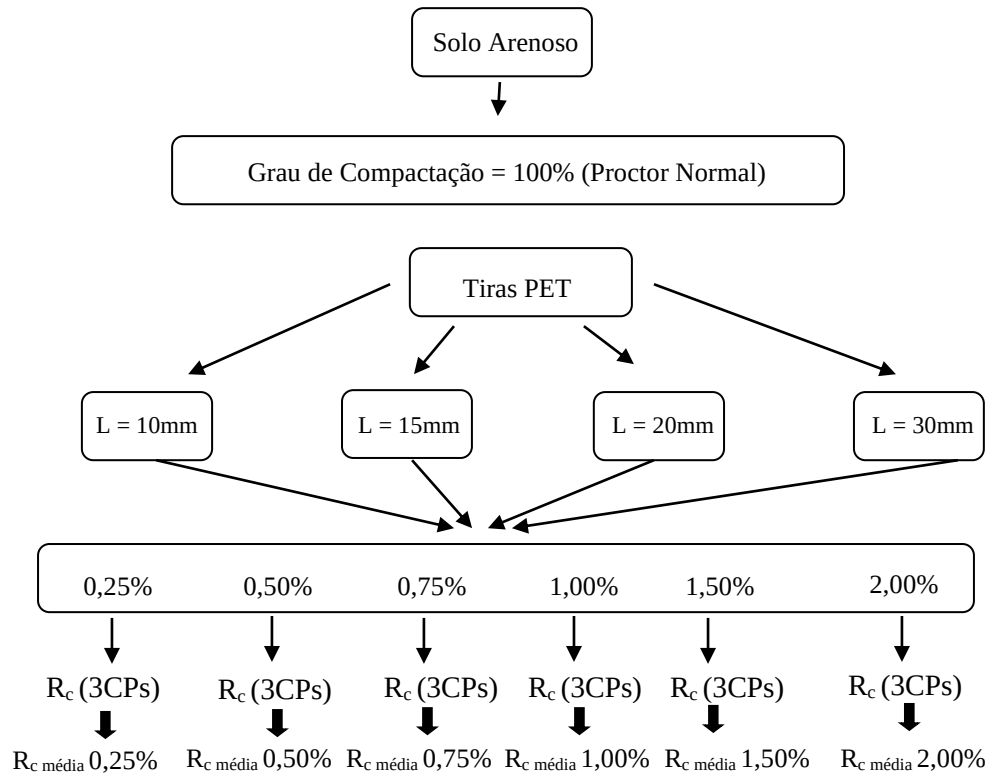
Os ensaios de RCS foram realizados com 3 corpos de prova para cada comprimento e respectivo teor de tira, totalizando 96 ensaios, além de mais 2 ensaios considerando o solo arenoso e argiloso sem tiras. Para cada ensaio obteve-se o valor médio entre os 3 corpos de prova, considerando-se para aceitação o coeficiente de variação da média de até 15%.

A partir do teor ótimo identificado nos ensaios de RCS como sendo o comprimento e o teor de tiras que conduz ao maior valor de resistência à compressão simples da mistura, foram moldados os corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto, CBR e resistência à tração por compressão diametral. Essa metodologia foi utilizada de forma a otimizar a quantidade de ensaios a serem realizados, além de buscar uma correlação entre propriedades mecânicas investigadas nesta pesquisa. A Figura 48 ilustra os fluxogramas dos ensaios.

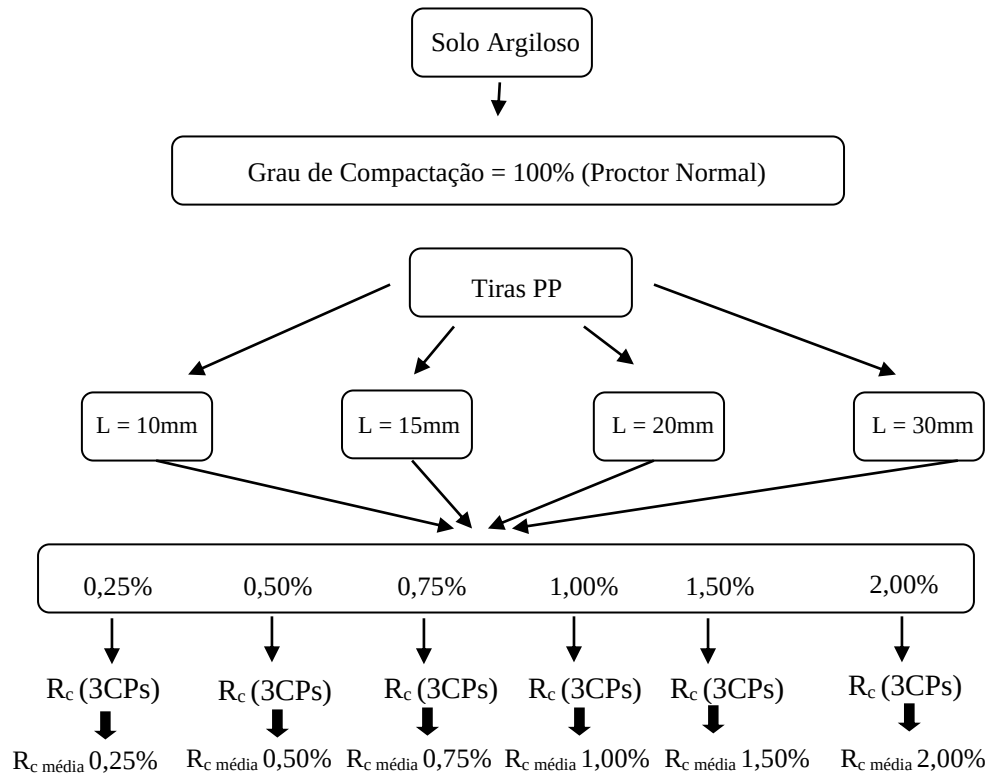
Figura 48 - Fluxogramas dos ensaios: (a) solo arenoso e tiras PP; (b) solo arenoso e tiras PET; (c) solo argiloso e tiras PP; (d) solo argiloso e tiras PET.

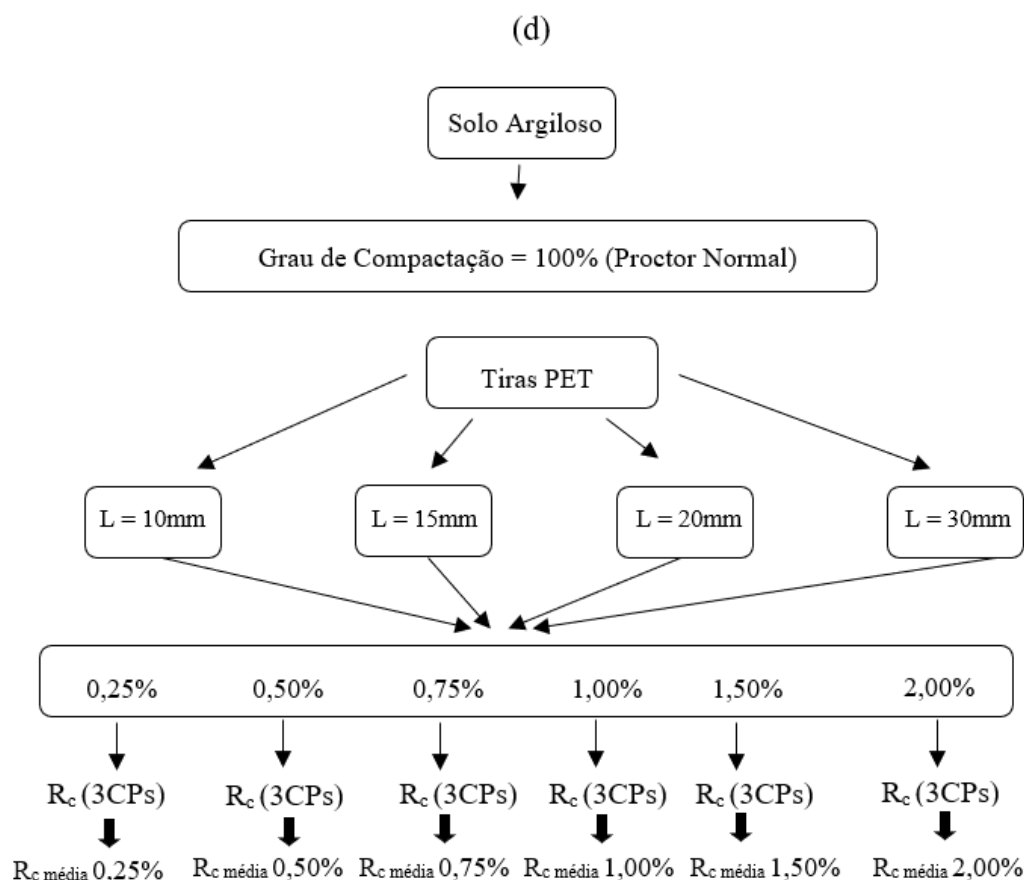


(b)



(c)





A partir do comprimento e o teor de tiras que conduz ao maior valor de resistência à compressão simples da mistura, a fim de verificar a influência do teor de umidade na RCS, também foram compactadas amostras em 2% abaixo e 2% acima do teor de umidade ótimo para comparar estes resultados de RCS com os das amostras compactadas no teor de umidade ótimo para ambos os tipos de solos e tiras.

4.4 Ensaio de capacidade de suporte Califórnia

A capacidade de suporte de um solo compactado pode ser medida através do método do índice de suporte, que fornece o “Índice de Suporte Califórnia - ISC” (*California Bearing Ratio* - CBR).

O ensaio é padronizado pela NBR 9895 (ABNT, 2017) e consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão de 49,6 mm de diâmetro em um corpo de prova de solo à uma velocidade de 1,27 mm/min, e a pressão

necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente.

Nesta pesquisa, adotou-se a energia intermediária de compactação para fins de verificação da possibilidade de aplicação do material em sub-base de pavimento. Foi também verificada a expansão dos corpos de prova após quatro dias imersos em água.

4.5 Ensaio de cisalhamento direto

Nesta pesquisa, realizou-se o ensaio de cisalhamento direto normatizado pela *American Society For Testing And Materials* ASTM D3080/ 2004. As tensões normais adotadas foram 30 kPa, 60 kPa e 120 kPa, as quais permanecem constantes até o final do ensaio.

A umidade das amostras foi corrigida considerando a umidade ótima encontrada no ensaio de resistência à compressão simples, então as tiras foram misturadas na proporção também baseada nos resultados do mesmo ensaio, sendo para as amostras de argila 1,5% da massa seca, tanto para as tiras de PET quanto de polipropileno (PP), e para a areia 1,5% da massa seca para tiras PET e 2% para tiras PP (Figura 49 a).

A mistura solo-tiras foi moldada e compactada utilizando prensa estática e transferida para o equipamento de ensaio de cisalhamento direto (Figura 49 b,c,d).

Figura 49 - Preparação e montagem do corpo de prova para ensaio de cisalhamento direto.



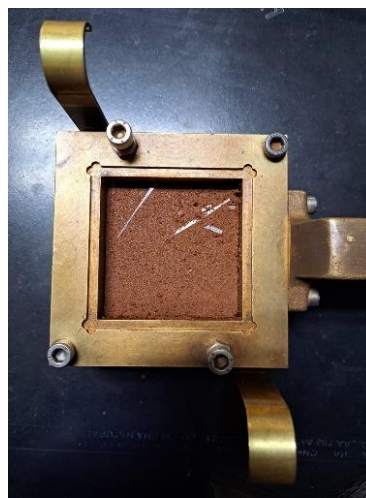
(a)



(b)



(c)



(d)

O equipamento de cisalhamento direto está vinculado a um software que recebe os dados que serão usados para a obtenção de curvas e envoltórias para as análises. Após a finalização do ensaio as amostras foram desmontadas e conferida a umidade após ensaio

Adotam-se como ruptura do solo os pontos máximos das curvas tensão-deslocamento, que conjugados com as tensões normais correspondentes, permitem a definição de pontos em um diagrama $\sigma \times \tau$, o qual fornece os parâmetros de resistência ao cisalhamento: intercepto de coesão e ângulo de atrito.

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto drenados em amostras de solo arenoso e argiloso sem reforço, bem como para respectivas misturas com tiras com comprimento e teor ótimo obtidos do ensaio de compressão simples com solo arenoso e argiloso, a fim de comparar os resultados. A caixa utilizada no ensaio possui dimensões de 2" x 2".

Finalizado o ensaio, retira-se três amostras de cada corpo de prova, que são pesadas e secas em estufa para confirmação do teor de umidade pós ensaio.

4.6 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, utilizou-se como referência a norma DNER-ME 181/94.

Para a preparação das amostras, as tiras foram misturadas na proporção ótima, com base nos resultados do ensaio de compressão simples, sendo para as amostras de argila 1,5% da

massa seca, tanto para as tiras de PET quanto de polipropileno (PP), e para a areia 1,5% da massa seca para tiras PET e 2% para tiras PP.

Também foram adicionadas quantidades de cimento variando entre 2%, 4%, 6% e 8% da massa seca, a umidade foi corrigida considerando a umidade ótima.

Após as misturas seca e úmida, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A moldagem foi realizada em 5 camadas de igual altura, com grau de compactação igual a 100%.

Figura 50 - Mistura seca (a) e mistura úmida (b) de solo, cimento e tiras plásticas



(a)



(b)

Figura 51 - Corpos de prova em câmara úmida para cura.



Finalizada a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida para cura por 7 dias e depois foram ensaiados em prensa EMIC disponível no laboratório de construção civil, na Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) a uma velocidade de 0,5 Mpa por segundo.

Obtidas as curvas de Força versus Deformação, foi possível calcular o valor da resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) pela Equação 1

$$R_{cd} = \frac{2 * F}{100 * \pi * d * l} \quad (1)$$

Sendo:

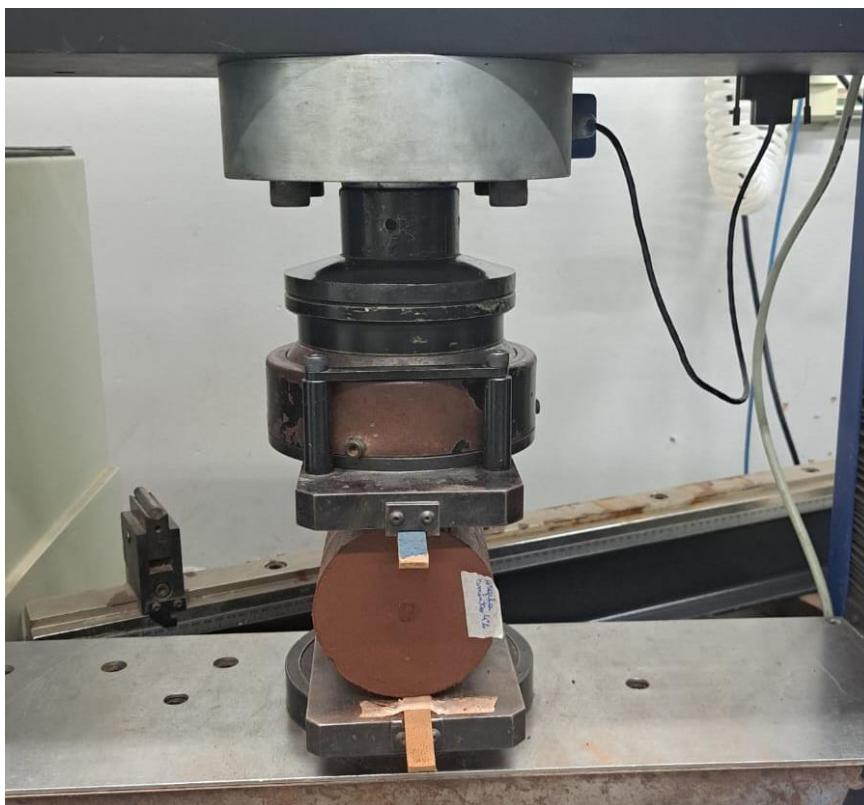
R_{cd} a resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F a carga máxima obtida no ensaio (N)

d o diâmetro do corpo de prova (cm)

l a altura do corpo de prova (cm)

Figura 52 - Equipamento e montagem para ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados para a avaliação da adição de tiras reutilizadas de recipientes fabricados com PET e PP por meio dos ensaios de laboratório, bem como a discussão destes, seguido por considerações finais que englobam, de forma geral, o comportamento da mistura solo-tiras.

5.1 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Os corpos de prova foram ensaiados à compressão não confinada, que, a partir da leitura das molas vertical e horizontal, foram obtidas as Tensões Axiais, σ (kPa), e suas respectivas Deformações Axiais, ϵ (%), plotados em um gráfico Tensão *versus* Deformação.

Dos três corpos de prova moldados sem tiras, obteve-se os seguintes valores de resistência média: 56,72kPa para o solo arenoso e 507,90kPa para o solo argiloso.

Ressalta-se que mesmo com a elevada resistência do solo argiloso em relação ao solo arenoso, objetiva-se sobretudo avaliar o potencial sustentável da inclusão de tiras plásticas recicladas no solo.

A partir de então, foram moldados e ensaiados corpos de prova para ambos os solos, arenoso e argiloso, com a inclusão das tiras PET e PP. A metodologia dos ensaios com inclusão de tiras foi a mesma utilizada para os ensaios de solo sem tiras.

Dos resultados, pode-se fazer uma análise da resistência do solo sem a inclusão de tiras e o efeito desta inclusão em termos de ganho de resistência.

5.1.1 Análise do solo arenoso

A seguir serão apresentadas as curvas obtidas no ensaio, nas quais pode-se observar quais teores de mistura solo-tiras geraram valores ótimos de resistência; bem como os resultados que geraram essas curvas em forma de tabelas, com valores médios e coeficiente de variação para cada teor de tiras analisado.

Os gráficos de Tensão de Ruptura (kPa) *versus* Percentual de tiras estão apresentados nas Figuras 53 e 54 para as tiras PET e PP, respectivamente. As médias dos valores obtidos em função dos comprimentos e teores de tiras, bem como o coeficiente de variação (CV) estão apresentados nas Tabelas 7 a 14.

Figura 53 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PET em solo arenoso.

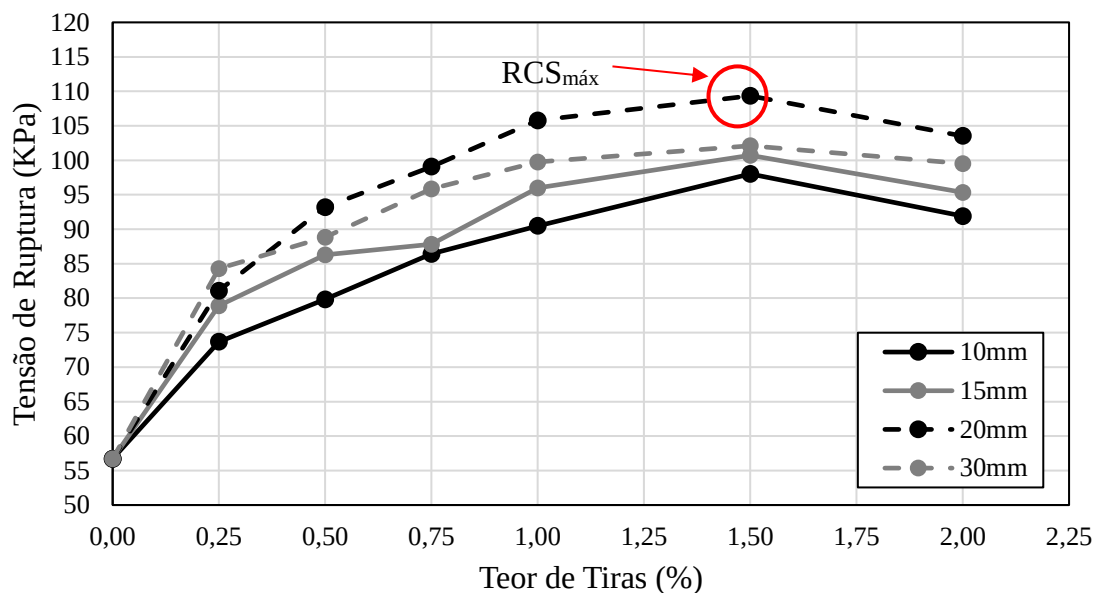


Figura 54 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PP em solo arenoso.

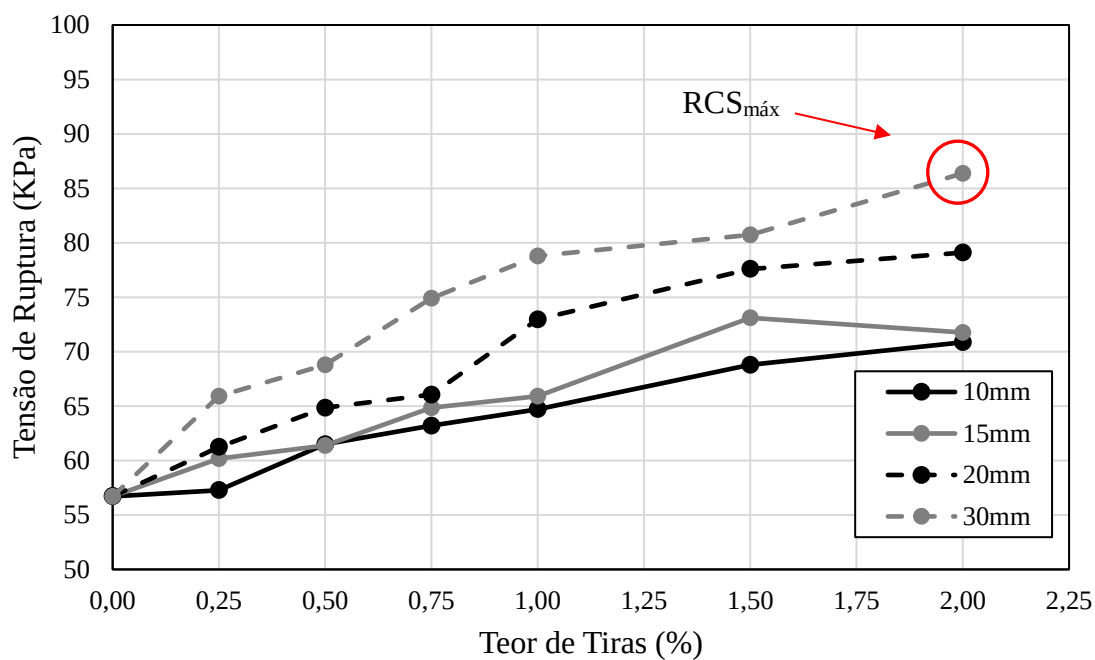


Tabela 7 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 10 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	76,0	78,4	66,7	73,7	6,8%
0,50%	78,5	81,4	79,6	79,8	1,5%
0,75%	83,0	90,4	85,8	86,4	3,5%
1,00%	89,5	91,8	90,2	90,5	1,1%
1,50%	95,7	100,7	97,7	98,0	2,1%
2,00%	92,1	94,5	89,0	91,9	2,5%

Tabela 8 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 15 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	75,5	77,0	84,2	78,9	4,8%
0,50%	85,4	84,4	89,0	86,3	2,3%
0,75%	85,6	87,4	90,4	87,8	2,3%
1,00%	95,7	94,5	97,7	96,0	1,4%
1,50%	100,9	99,7	101,6	100,7	0,8%
2,00%	100,7	93,5	91,8	95,3	4,0%

Tabela 9 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 20 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	84,20	79,40	79,60	81,10	2,7%
0,50%	93,40	94,90	91,30	93,20	1,6%
0,75%	99,10	101,90	96,30	99,10	2,3%
1,00%	103,40	107,50	106,40	105,80	1,6%
1,50%	105,20	111,30	111,50	109,30	2,7%
2,00%	102,00	103,40	105,20	103,50	1,3%

Tabela 10 - Solo arenoso com inclusão de tiras PET – 30 mm de comprimento

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	78,40	84,10	90,40	84,30	5,8%
0,50%	87,20	83,70	95,50	88,80	5,6%
0,75%	95,20	96,10	96,30	95,90	0,5%
1,00%	99,70	96,10	103,40	99,70	3,0%
1,50%	103,60	100,90	101,80	102,10	1,1%
2,00%	98,10	98,30	102,20	99,50	1,9%

Tabela 11 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 10 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	53,30	57,30	61,20	57,27	5,63%
0,50%	60,49	61,20	62,78	61,49	1,56%
0,75%	65,20	62,90	61,40	63,17	2,47%
1,00%	65,30	63,20	65,65	64,72	1,67%
1,50%	70,20	67,80	68,35	68,78	1,49%
2,00%	73,20	70,10	69,28	70,86	2,38%

Tabela 12 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 15 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	62,30	60,70	57,49	60,16	3,32%
0,50%	61,37	62,50	60,23	61,37	1,51%
0,75%	65,70	63,20	65,66	64,85	1,80%
1,00%	65,92	64,10	67,75	65,92	2,26%
1,50%	73,11	75,10	71,11	73,11	2,23%
2,00%	71,77	72,80	70,74	71,77	1,17%

Tabela 13 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 20 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	58,90	64,80	60,05	61,25	4,17%
0,50%	65,90	63,10	65,55	64,85	1,92%
0,75%	63,90	64,75	69,50	66,05	3,73%
1,00%	74,20	71,30	73,38	72,96	1,67%
1,50%	75,90	78,47	78,40	77,59	1,54%
2,00%	81,20	77,60	78,50	79,10	1,93%

Tabela 14 - Solo arenoso com inclusão de tiras PP – 30 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	61,90	69,67	66,20	65,92	4,82%
0,50%	70,10	68,90	67,35	68,78	1,64%
0,75%	73,10	75,60	76,03	74,91	1,72%
1,00%	80,10	80,83	75,40	78,78	3,05%
1,50%	78,70	81,50	82,03	80,74	1,81%
2,00%	84,90	87,10	87,10	86,37	1,20%

O coeficiente de variação (CV) demonstra a razão do desvio padrão pela média. Em síntese, considerando o solo arenoso e tiras PET, os valores de CV obtidos são baixos, próximos do coeficiente de variação de 4,14% obtido para o solo natural e representando variações de

8,4% no maior valor obtido (ensaio com tiras de 10 mm e teor de 0,25%). Observando-se os resultados, constata-se que a maior variabilidade dos dados corresponde aos teores de 0,25% de tiras PET para o solo arenoso. Nota-se uma variação diversificada de CV para diferentes teores: para tiras de 10 mm, a maior variabilidade dos dados se refere aos teores de 0,25% e 0,75%; no que tange às tiras de 15 mm, a maior variabilidade corresponde aos teores de 0,25% e 2,0%; em relação às tiras de 20 mm os maiores CVs correspondem aos teores de 0,25% e 1,50%; e para tiras de 30 mm, nota-se maiores valores de CV para os teores de 0,25% e 0,50%.

De maneira análoga, considerando-se o solo arenoso e tiras PP, nota-se que as maiores variações ocorrem considerando teor de tiras de 0,25% e a diversificação dos valores de CV para cada ensaio, com diferentes teores e comprimentos de tiras.

Em virtude da variabilidade que a adição de tiras de maneira aleatória pode conferir ao compósito, análises estatísticas mais aprofundadas podem ser realizadas, verificando se estes comportamentos se repetem a partir de um número maior de repetição dos ensaios.

Analisando o solo arenoso com adição de tiras PET, observa-se a maior resistência do compósito quando foram incorporadas tiras de comprimento de 20 mm a um teor de 1,50% em relação à massa de solo seco, resultando em um valor de 109,34 kPa (resistência não confinada). Esse valor representa um aumento de resistência em 93% em relação ao solo sem adição de tiras. Para os compósitos de solo arenoso e tiras PP, observa-se que a maior resistência, de 86,4 kPa, ocorreu para um comprimento de tiras de 30 mm e teor de 2,00% em relação à massa de solo seca, representando um aumento de resistência em relação ao solo sem adição de tiras de 52,30%.

As Figuras 55 a 58 a seguir ilustram o aumento da RCS máxima em relação ao solo sem inclusão de tiras, para cada teor e comprimento.

Verifica-se maiores ganhos na tensão de ruptura para o solo arenoso e tiras PET até o teor de 1,5% e que inclusões de 2,0% geraram ganhos menores na tensão de ruptura para todos os comprimentos de tiras. Além disso, ressalta-se que a inclusão das tiras PET de 20 mm, com porcentagem de 1,5 em relação à massa seca, resultou no maior incremento na máxima RCS.

Figura 55 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural para tiras de 10 mm de comprimento.

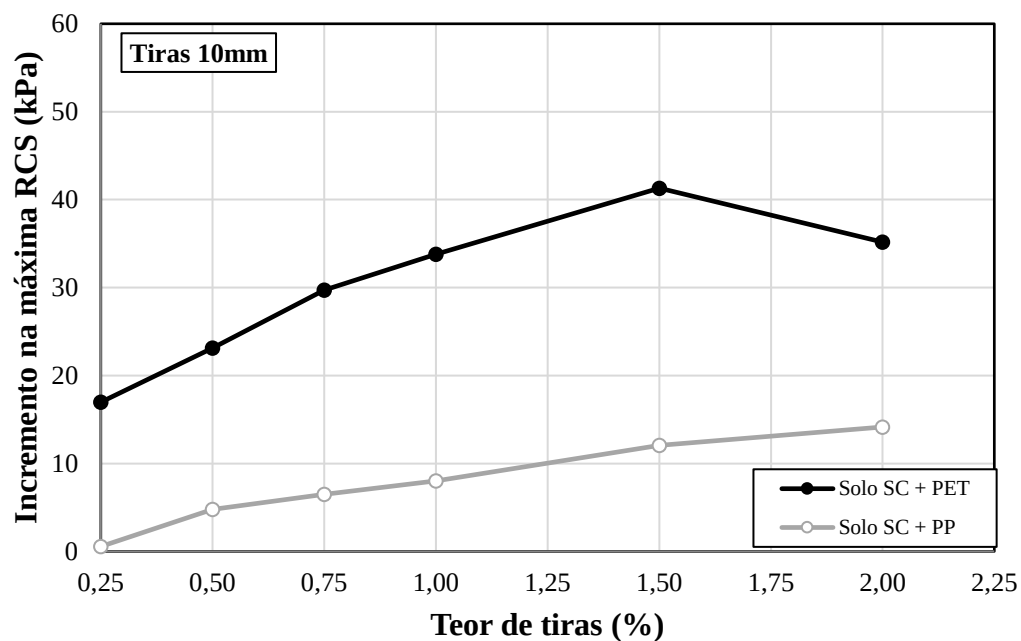


Figura 56 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural tiras de 15 mm de comprimento.

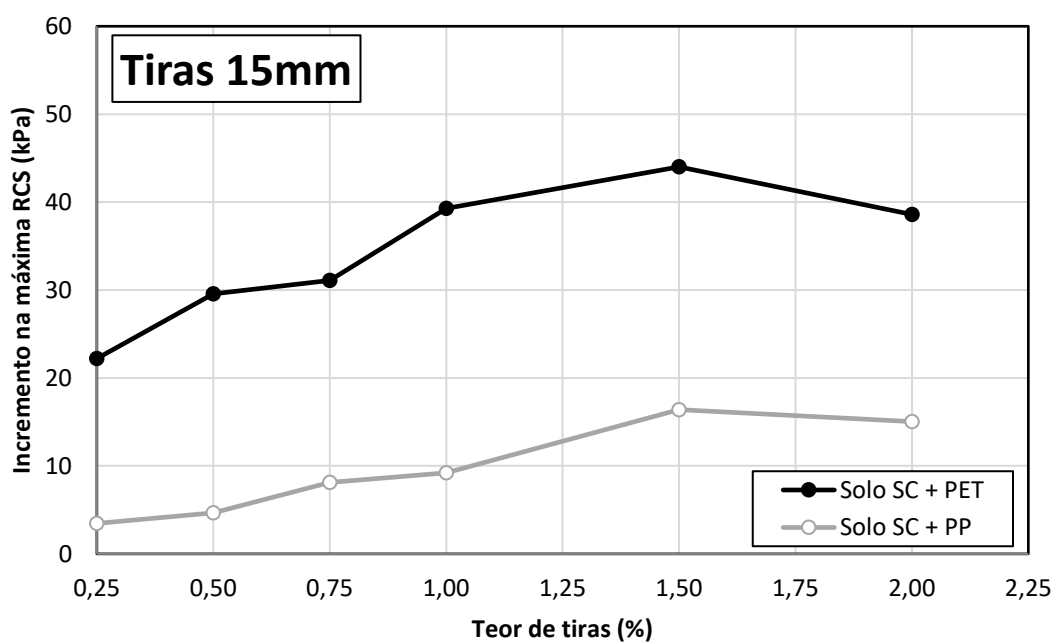


Figura 57 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural para tiras de 20 mm de comprimento.

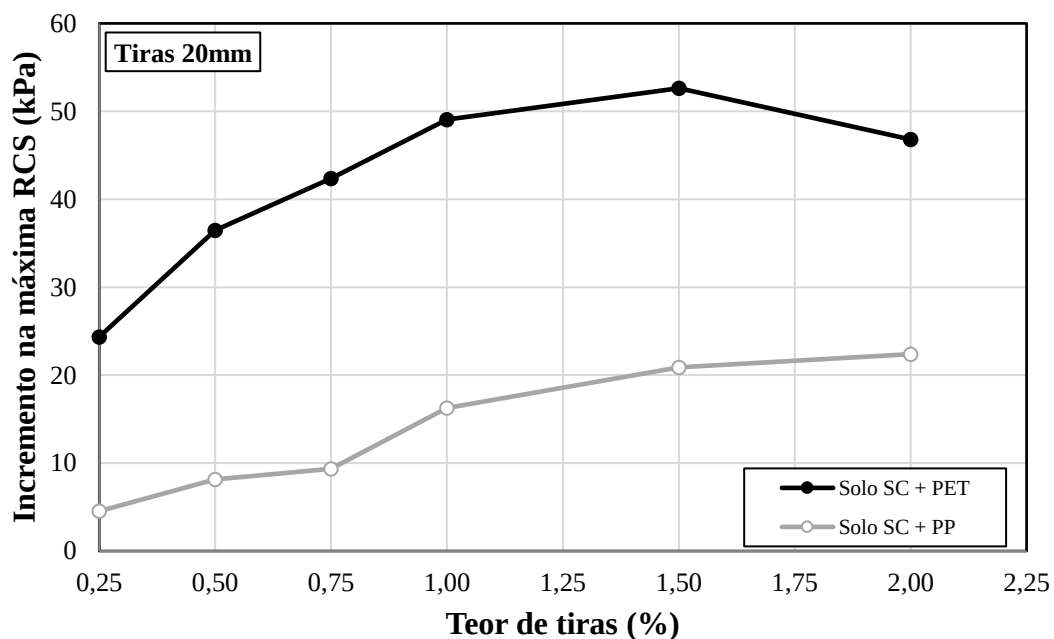
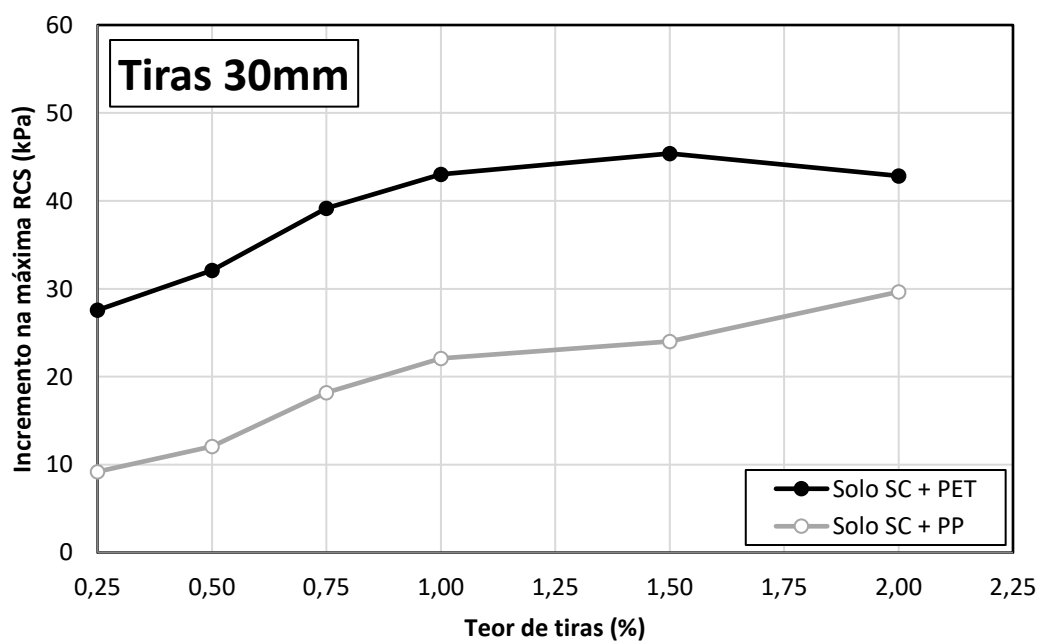


Figura 58 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo natural para tiras de 30 mm de comprimento.



No caso das tiras PP, o aumento da resistência à compressão simples ocorreu de forma crescente conforme o aumento do comprimento e do teor de tiras, exceto para a tira de 15 mm, a qual apresentou a maior resistência no teor de 1,50%. As tiras de comprimento de 30 mm, em geral, demonstraram os melhores resultados de resistência à compressão simples comparados aos demais comprimentos. No melhor caso, comprimento de 30 mm e porcentagem de 2,00 em relação à massa seca, apresentou maior incremento na máxima RCS.

Dessa forma, o aumento na resistência obtida com o aumento no comprimento das tiras pode ser atribuído, conforme Gray e Ohashi (1983), ao mecanismo de atuação dos elementos de reforço. Com o aumento no seu comprimento, uma parcela das tiras que falhavam por deslizamento, pela falta de aderência à matriz, passaram a falhar por ruptura, mobilizando toda a resistência das tiras. Além disso, embora o ensaio seja de compressão simples, a ruptura dos corpos de prova ocorre de forma cisalhada, conforme ilustra a Figura 59 e os maiores ganhos de resistência para o PET podem ser atribuídos à sua maior resistência à tração em relação ao PP, observada na Tabela 5, em que nota-se que a resistência à tração do PET pode chegar até três vezes a resistência à tração do PP. A Figura 60 ilustra a resistência à compressão simples em função da deformação axial para diferentes teores de tiras PP, considerando o comprimento de tira de 30 mm.

Figura 59 – Resistência à compressão simples: (a) Solo SC natural; (b) solo SC e tiras PET 1,5% e 30mm de comprimento; (c) solo SC e tiras PP 1,5% e 30mm de comprimento.

(a)

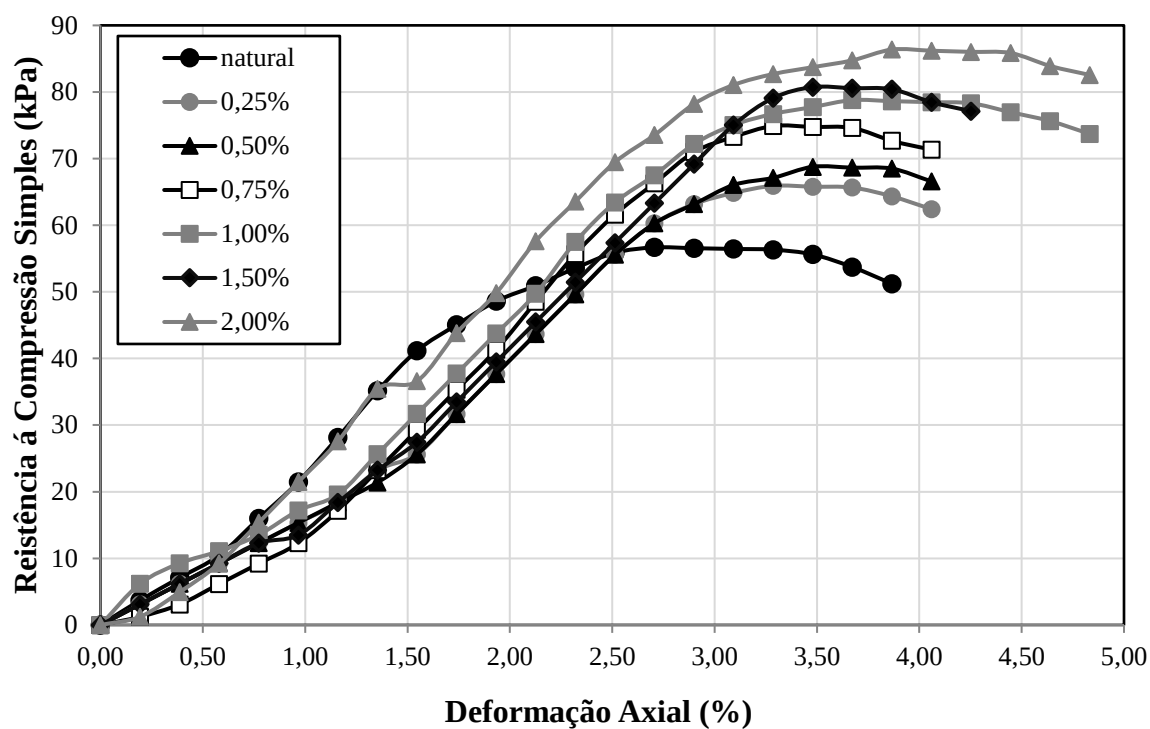


(b)

(c)



Figura 60 – Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PP de 30 mm e diferentes teores.

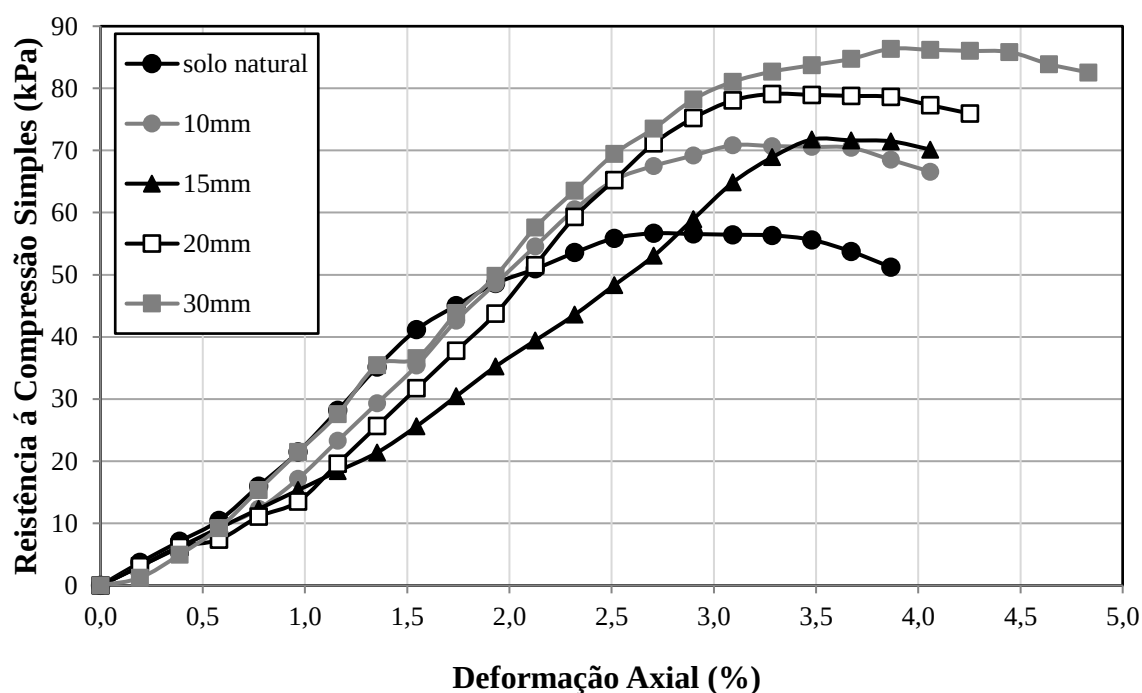


Por meio da análise das curvas é possível observar que a inclusão de tiras não aumenta apenas a capacidade de carga do solo, como também a ductibilidade, aumentando em cerca de 1,5% a deformação do solo antes da ruptura considerando teor ótimo de 2,0%.

A Figura 61 representa a resistência à compressão simples em função da deformação axial considerando o teor de 2,0% PP para diferentes comprimentos de tiras, na qual é possível observar que, em geral, a capacidade de carga do solo aumenta à medida que o comprimento de tiras é aumentado e que o comprimento de 30 mm se mostra mais vantajoso uma vez que apresenta comportamento mais dúctil em relação aos demais comprimentos.

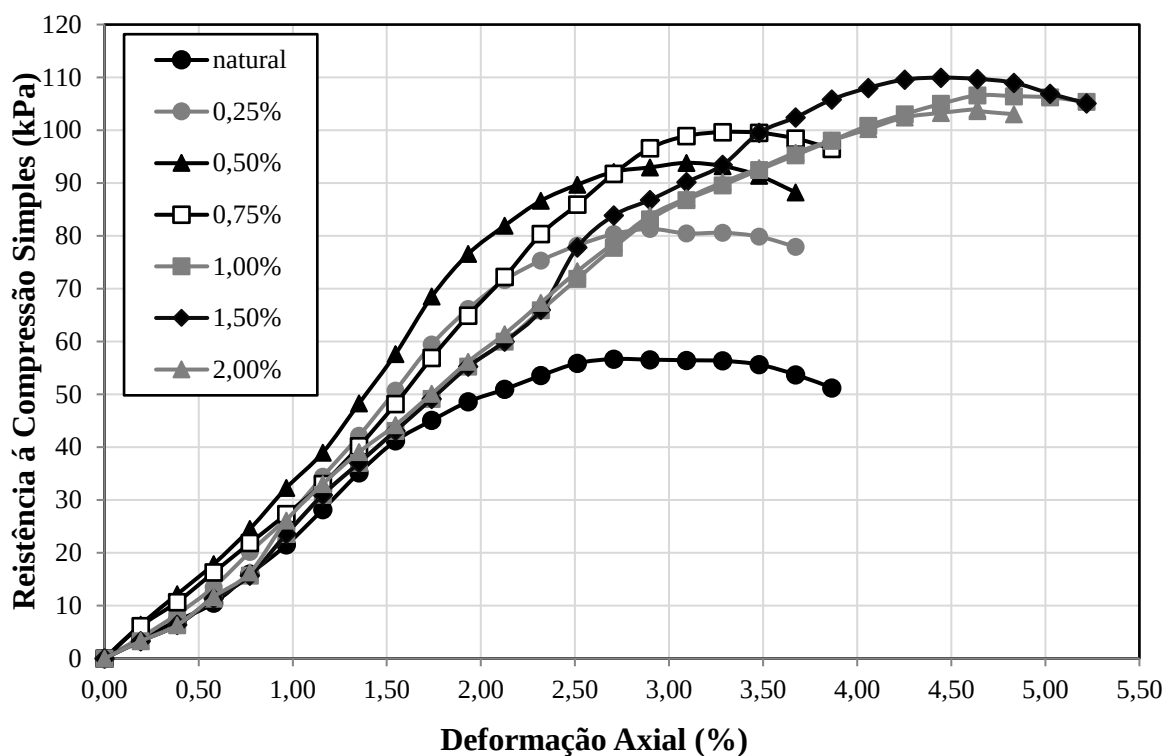
A Figura 62 ilustra a resistência à compressão simples em função da deformação axial para diferentes teores de tiras PET, considerando o comprimento de tira de 20 mm.

Figura 61 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 2,0% PP e diferentes comprimentos de tiras.



Assim como nas tiras PP, é possível notar que a inclusão de tiras PET aumenta capacidade de carga do solo arenoso e sua ductibilidade, aumentando em cerca de 1,5% a deformação do solo antes da ruptura considerando teor ótimo de 1,5%.

Figura 62 – Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PET de 20 mm e diferentes teores.



A Figura 63 representa a resistência à compressão simples em função da deformação axial considerando o teor de 1,5% PET para diferentes comprimentos de tiras, em que é possível observar o aumento na ductilidade do solo arenoso para os diferentes comprimentos de tiras PET com maior tensão de ruptura para tiras de 20 mm.

Definidos o melhor teor e tamanho de tiras (TOT), foram realizados ensaios variando-se a umidade em 2,00% acima e abaixo do valor ótimo.

O mesmo procedimento foi realizado para o solo sem tiras. Os resultados estão ilustrados na Tabela 15 e Figura 64 a seguir.

Figura 63 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 1,50% PET e diferentes comprimentos de tiras.

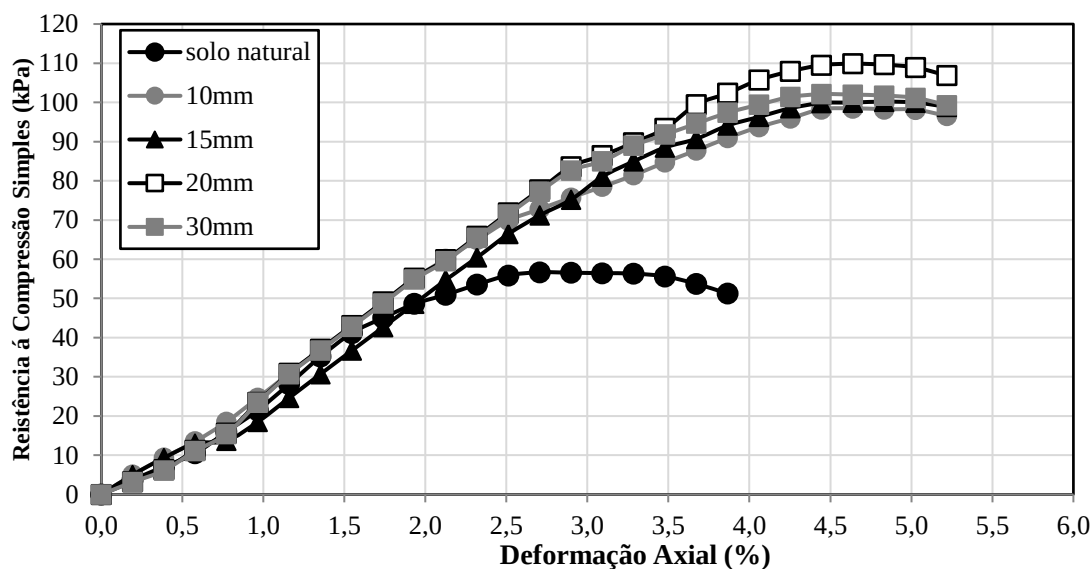
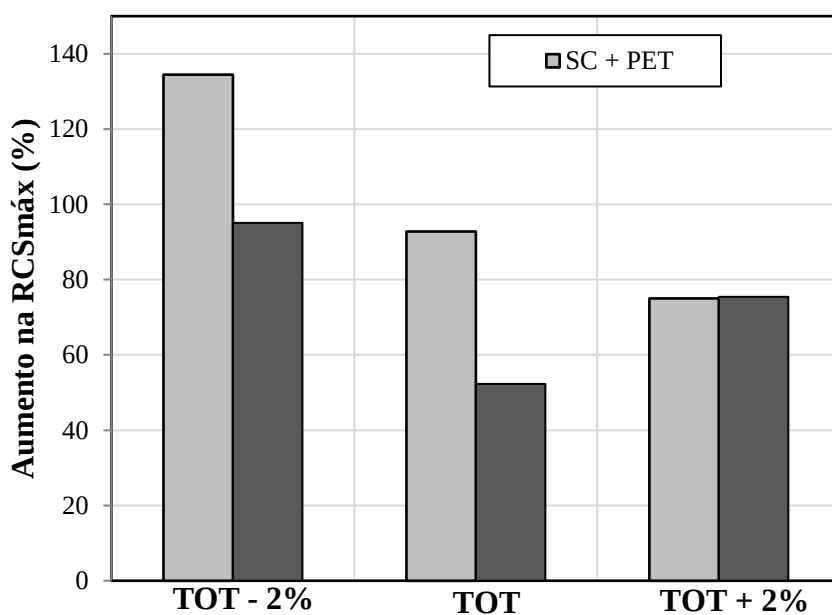


Tabela 15 - Resistências comparativas, sem e com tiras, em diferentes umidades.

Condição	W _{ótimo} -2%	W _{ótimo}	W _{ótimo} +2%
Natural	71,28 kPa	56,72 kPa	48,37 kPa
TOT PET	167,10 kPa	109,34 kPa	84,65 kPa
TOT PP	139,08 kPa	86,37 kPa	84,87 kPa

Figura 64 - Influência do teor de umidade nos resultados de RCS para solo arenoso combinado com teor ótimo de tiras PET e PP.



Avaliando-se a variação da umidade, pode-se perceber que, para todos os casos, as maiores resistências à compressão simples ocorrem abaixo da umidade ótima. No entanto, pode não ser vantajoso considerar a umidade que apresentou a maior resistência como ótima, uma vez que, no campo, caso haja saturação do solo, a queda de resistência poderá ser maior quanto menor for a umidade de compactação do solo.

De forma geral, em todos os casos, tanto na adição de tiras PET quanto PP no solo arenoso, ocorreu uma melhora na resistência do solo devido à inclusão das tiras, no entanto, é notável um melhor desempenho do compósito com a tira PET.

5.1.2 Análise do solo argiloso

Seguindo a mesma sequência do solo arenoso, foram plotados os gráficos de Tensão de Ruptura (kPa) *versus* Percentual de tiras apresentados nas Figuras 65 e 66, para as tiras PET e PP, respectivamente.

Figura 65 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PET em solo argiloso.

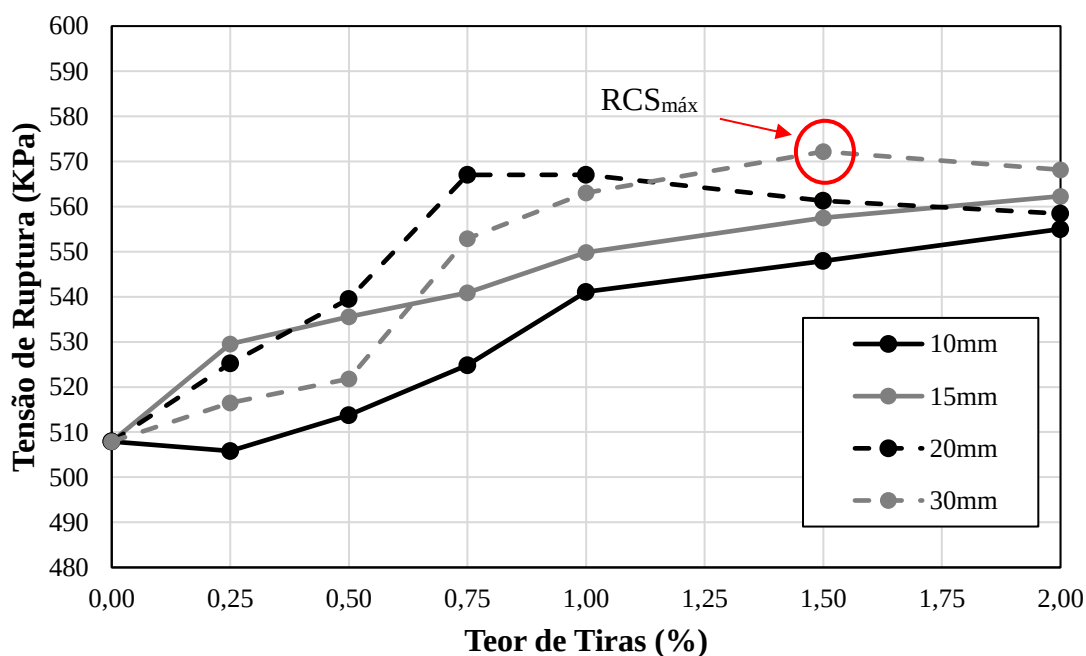
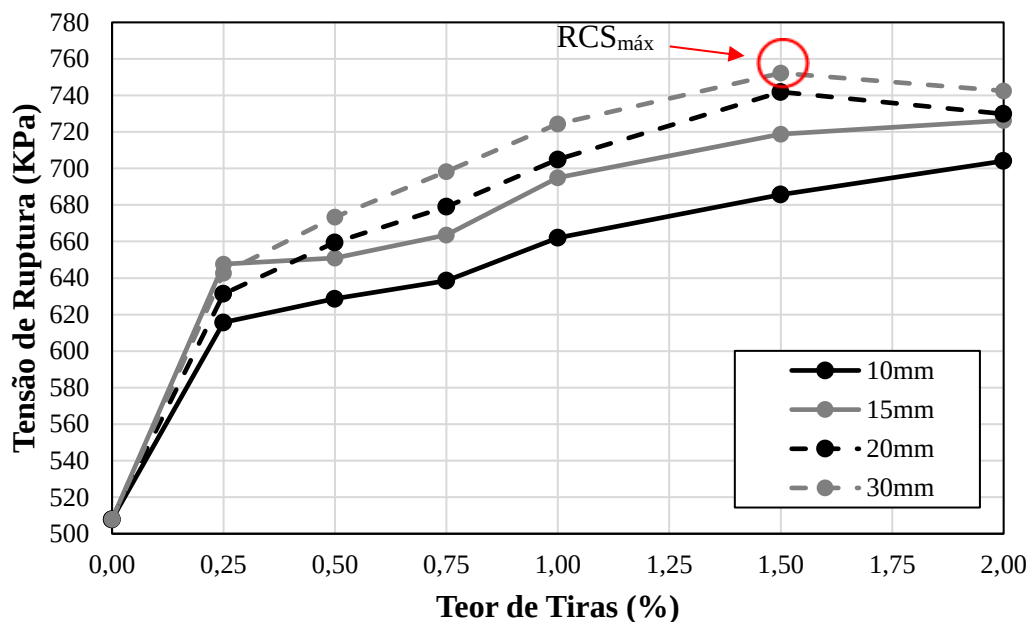


Figura 66 - Valores médios das resistências não confinadas devido à inclusão de tiras do tipo PP em solo argiloso.



As médias dos valores obtidos em função dos comprimentos e percentagens de tiras estão dispostos nas Tabelas 16 a 23.

Tabela 16 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 10 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	495,10	508,26	514,09	505,82	1,6%
0,50%	513,05	525,59	502,67	513,77	1,8%
0,75%	513,99	516,17	544,41	524,86	2,6%
1,00%	552,80	546,00	525,44	541,41	2,1%
1,50%	536,25	569,51	538,03	547,93	2,8%
2,00%	544,90	555,20	564,92	555,01	1,5%

Tabela 17 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 15 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	515,03	539,17	534,53	529,57	2,0%
0,50%	525,44	547,26	534,09	535,59	1,7%
0,75%	548,37	544,90	529,44	540,90	1,5%
1,00%	568,36	544,85	536,25	549,82	2,5%
1,50%	571,22	555,81	545,51	557,51	1,9%
2,00%	574,07	571,22	541,56	562,28	2,6%

Tabela 18 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 20 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	516,17	535,17	524,37	525,24	1,5%
0,50%	529,44	548,33	540,89	539,55	1,4%
0,75%	571,21	562,07	567,79	567,02	0,7%
1,00%	556,34	572,38	572,37	567,03	1,3%
1,50%	560,92	556,34	566,64	561,30	0,8%
2,00%	555,20	563,20	556,93	558,44	0,6%

Tabela 19 - Solo argiloso com inclusão de tiras PET - 30 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	508,59	525,83	515,03	516,48	1,4%
0,50%	512,27	522,00	531,16	521,81	1,5%
0,75%	549,51	560,92	548,33	552,92	1,0%
1,00%	560,92	558,65	569,51	563,03	0,8%
1,50%	573,51	570,66	572,38	572,18	0,2%
2,00%	571,22	569,51	563,78	568,17	0,6%

Tabela 20 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 10 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	609,60	618,20	619,30	615,70	0,7%
0,50%	621,00	630,80	634,20	628,67	0,9%
0,75%	635,50	636,60	643,50	638,53	0,6%
1,00%	656,70	665,30	664,10	662,03	0,6%
1,50%	688,20	685,40	683,60	685,73	0,3%
2,00%	704,30	705,40	702,60	704,10	0,2%

Tabela 21 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 15 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS ₁ (kPa)	RCS ₂ (kPa)	RCS ₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	646,90	646,50	649,40	647,60	0,2%
0,50%	655,00	646,90	651,00	650,97	0,5%
0,75%	665,30	660,70	665,00	663,67	0,3%
1,00%	687,10	695,10	702,60	694,93	0,9%
1,50%	711,20	723,80	721,50	718,83	0,8%
2,00%	722,90	727,20	728,70	726,27	0,3%

Tabela 22 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 20 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS₁ (kPa)	RCS₂ (kPa)	RCS₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	630,80	629,70	633,70	631,40	0,3%
0,50%	654,00	658,00	666,60	659,53	0,8%
0,75%	673,50	681,00	682,70	679,07	0,6%
1,00%	708,00	701,10	705,70	704,93	0,4%
1,50%	740,20	741,30	744,20	741,90	0,2%
2,00%	727,00	729,80	733,00	729,93	0,3%

Tabela 23 - Solo argiloso com inclusão de tiras PP - 30 mm de comprimento.

Teor de tiras	RCS₁ (kPa)	RCS₂ (kPa)	RCS₃ (kPa)	Média (kPa)	CV (%)
0,25%	637,90	646,50	643,60	642,67	0,6%
0,50%	669,50	673,50	677,00	673,33	0,5%
0,75%	690,80	704,20	700,00	698,33	0,8%
1,00%	719,50	731,00	722,90	724,47	0,7%
1,50%	748,20	755,70	752,80	752,23	0,4%
2,00%	740,20	741,30	745,90	742,47	0,3%

Em síntese, os valores de coeficiente de variação (CV) obtidos para o solo argiloso são baixos. Destaca-se valores de CV menores que 1,0% para ensaios de solos argiloso e tiras PP. Considerando solo argiloso e tiras PET, nota-se maiores valores de CV em relação às tiras PP, com destaque às tiras de 10 mm e teor de 1,5%, a qual corresponde a maior variabilidade obtida, ou seja 2,8%.

As Figuras 67 a 70 ilustram o aumento da RCS máxima em relação ao solo argiloso sem inclusão de tiras.

Figura 67 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 10 mm de comprimento.

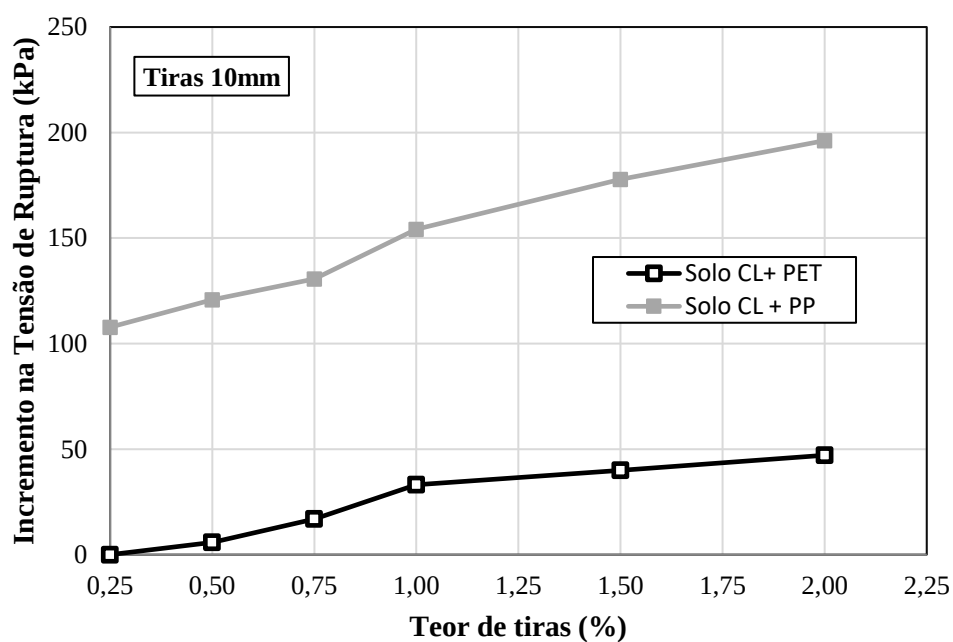


Figura 68 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 15 mm de comprimento.

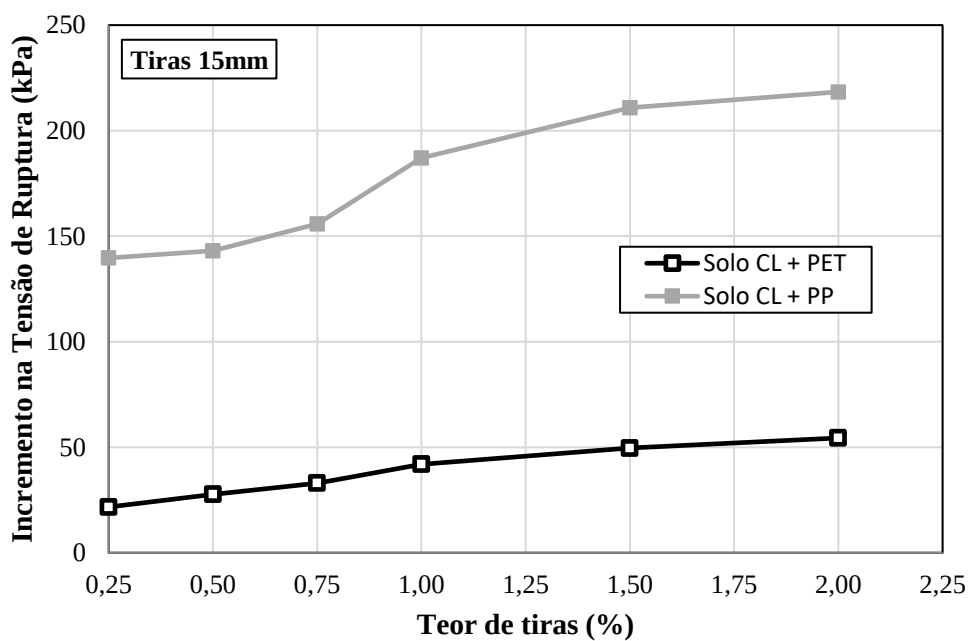


Figura 69 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 20 mm de comprimento.

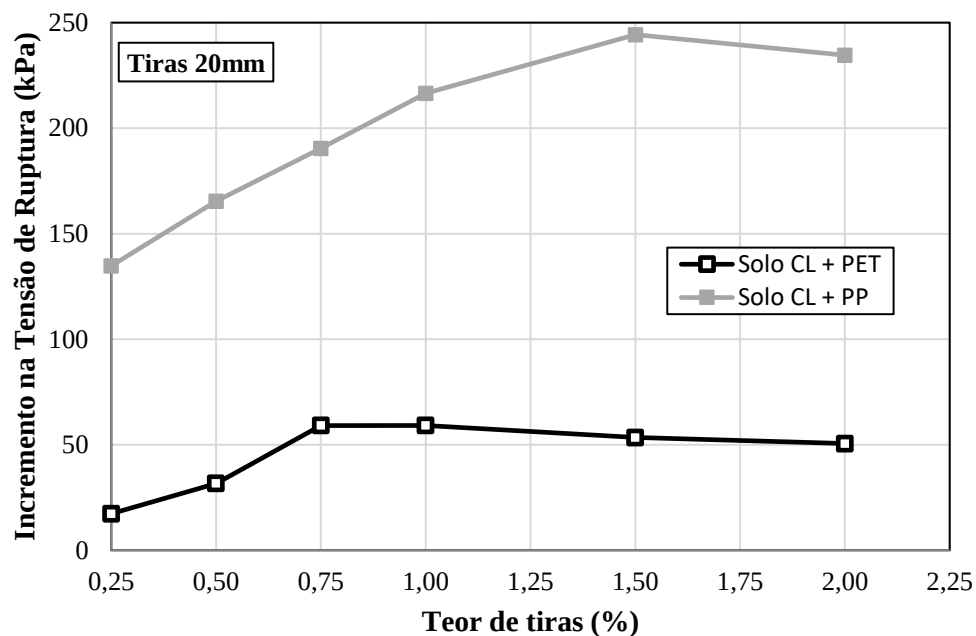
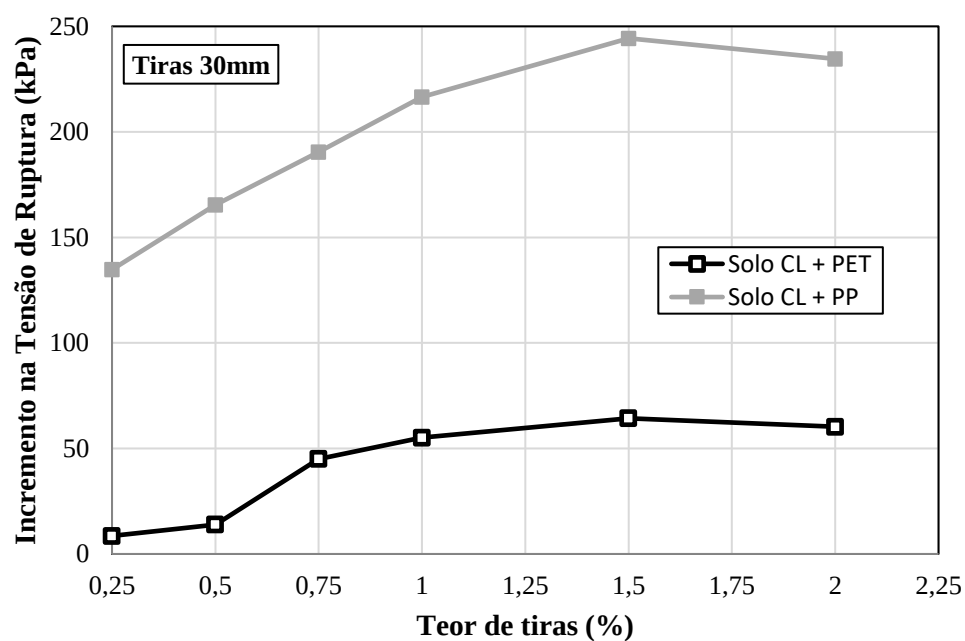


Figura 70 - Incremento na RCS máxima em relação ao solo puro para tiras de 30 mm de comprimento.



Verifica-se que, em relação às tiras PET, para os comprimentos de 10 mm e 15 mm, houve um constante aumento no valor de tensão de ruptura conforme aumento da porcentagem de tiras, ou seja, ambas atingiram a maior resistência à compressão não confinada quando incorporados 2,00% de tira em relação à massa de solo seca. O comprimento de tira de 20 mm se mostrou uma opção vantajosa em relação aos demais até a inclusão de 1,00%, atingindo a sua maior tensão de ruptura na porcentagem de 0,75. Já o comprimento de 30 mm, mostrou-se competitivo a partir da inclusão de 1,00%, atingindo a máxima tensão de ruptura, com valor de 572,18kPa, no percentual de 1,50 em relação à massa de solo seca, o qual gerou maior ganho de resistência, cerca de 65 kPa.

De forma análoga, as inclusões de tiras PP também geraram ganhos na tensão de ruptura do solo, porém mais expressivos que as inclusões de tiras PET. No melhor caso, comprimento de 30 mm e porcentagem de 1,5% em relação à massa seca, o ganho aproximado foi de 250 kPa. Destaca-se que, com relação às tiras PP, o ganho de resistência à compressão observado para ambos os solos em estudo foi aproximadamente o mesmo, cerca de 50%, o que vai de encontro ao que diz respeito às propriedades do polipropileno apontadas por Maddah (2016), isto é, material quimicamente inerte. As Figuras 71 a 74 ilustram o comportamento da RCS em função da deformação axial.

Figura 71 – Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PP de 30 mm e diferentes teores.

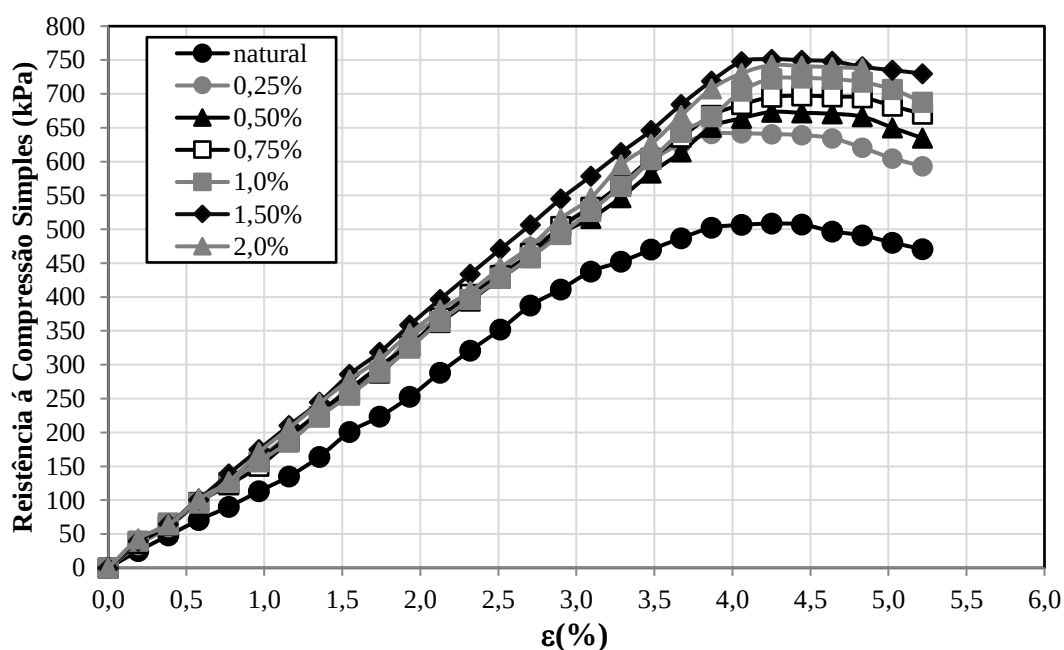


Figura 72 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 1,5% PP e diferentes comprimentos de tiras.

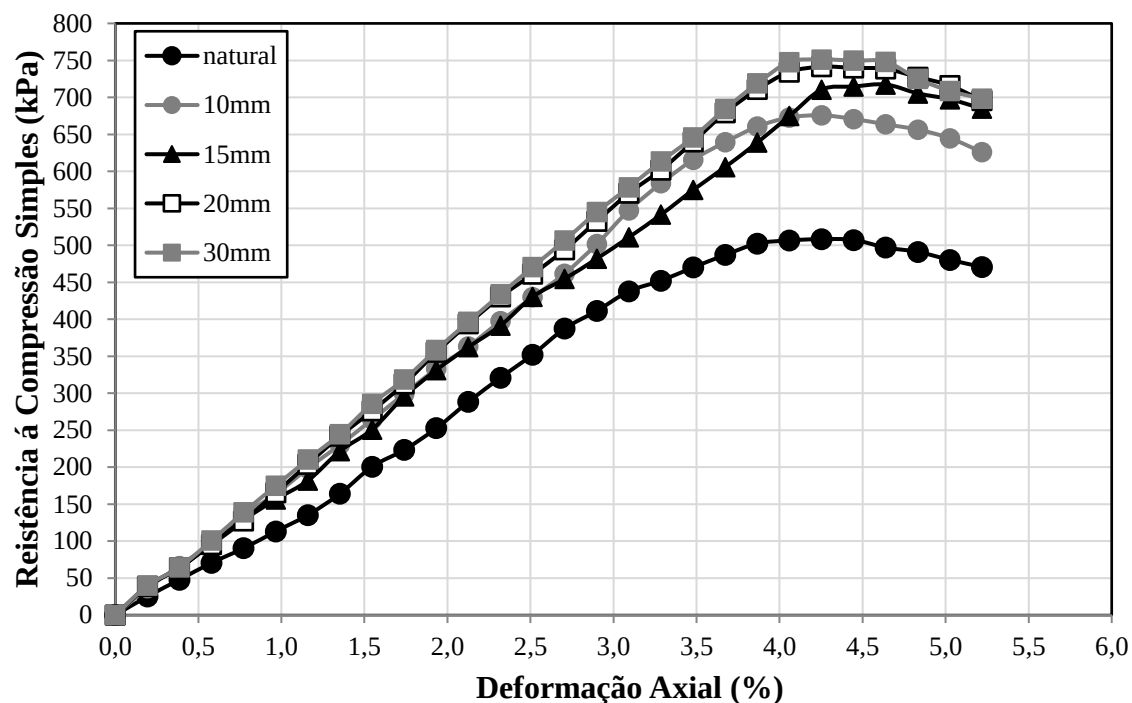


Figura 73 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o comprimento de tiras PET de 30 mm e diferentes teores.

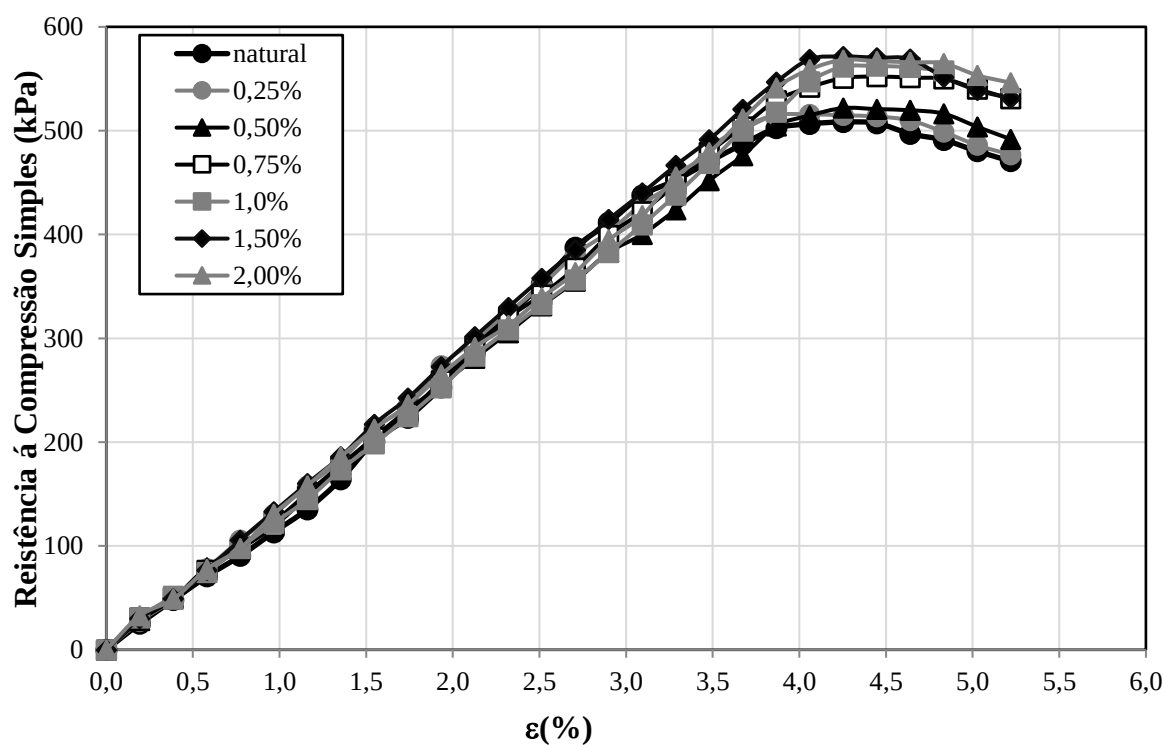
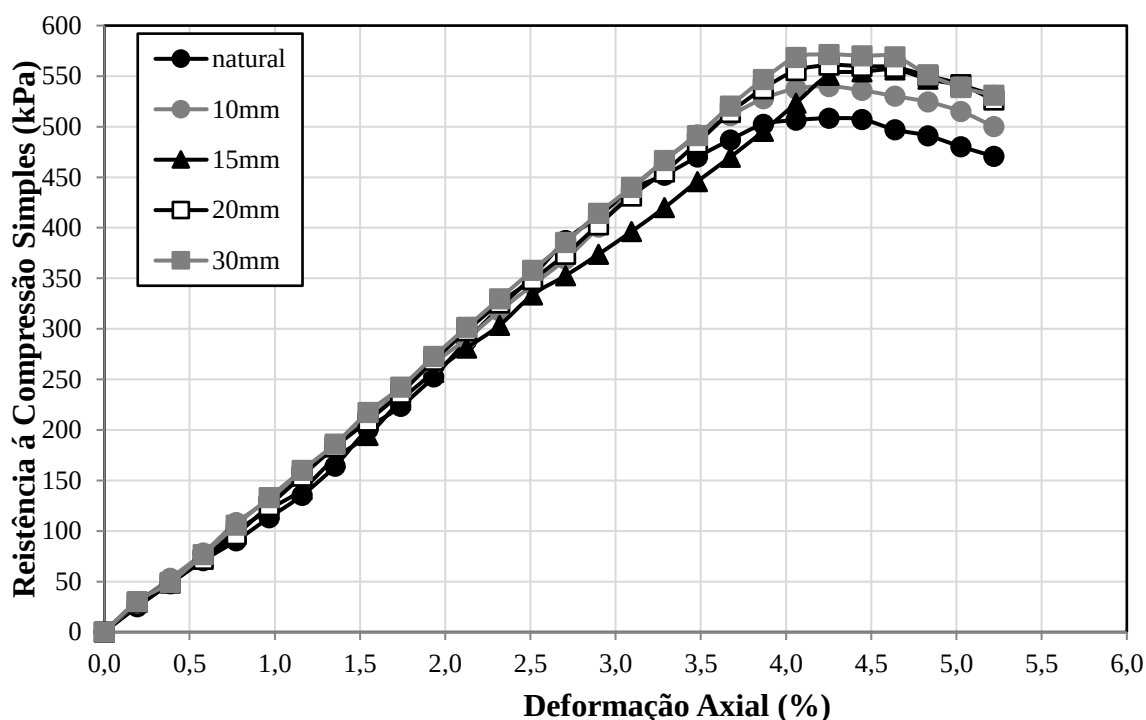


Figura 74 - Resistência à compressão simples em função da deformação axial para o para teores de 1,50% PET e diferentes comprimentos de tiras.



Na Figura 73 é possível observar que o aumento nos teores de tiras proporciona maior capacidade de carga ao solo argiloso e tiras PET, porém não ocorrem alterações na deformação na tensão de ruptura, diferente do solo arenoso, o qual apresentou-se mais dúctil com a inclusão de tiras. Da mesma forma, na Figura 74, nota-se que o aumento no comprimento de tiras proporciona ganhos na tensão de ruptura, sem modificações quanto à deformação. Comportamento análogo quando analisado solo argiloso e tiras PP, em que se nota ganhos na tensão de ruptura com o aumento de comprimento de tiras e não variação da deformação axial.

Definidos o melhor teor e tamanho das tiras, foram realizados, também para o solo argiloso, ensaios variando-se a umidade em 2,00% para mais e para menos do parâmetro ótimo.

O mesmo foi feito para o solo sem tiras e o resultado está ilustrado na Tabela 24 e Figura 75 a seguir.

Avaliando-se a variação da umidade, nota-se que o aumento da umidade em 2% para mais do parâmetro ótimo, gera queda aproximada de 35% na tensão de ruptura do solo argiloso e tiras PET e ganho de aproximadamente 55% para o solo argiloso e tiras PP. A diminuição da umidade para 2% do parâmetro ótimo gera ganhos maiores para o solo argiloso com inclusão de tiras PP (ganho de aproximado de 25%), e ganho de aproximado de 9%. Diferente do solo

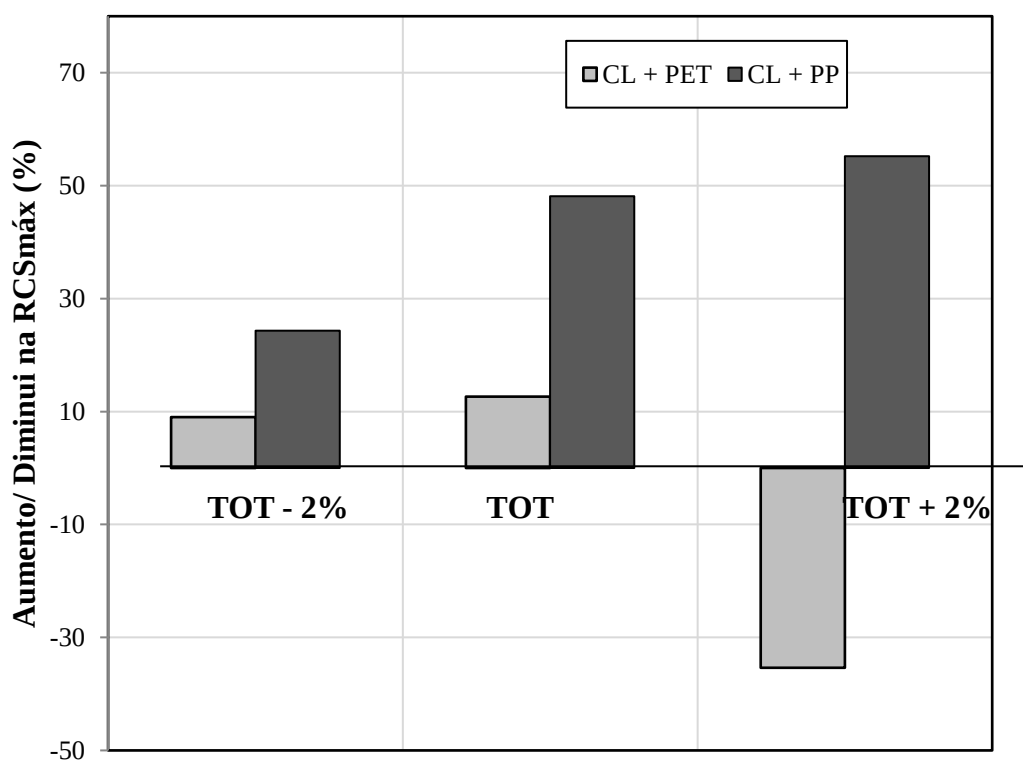
arenoso, para o solo argiloso, a variação do teor de umidade em 2% para mais e para menos não demonstra ganhos significativos em relação à situação TOT, em que o ganho na $RCS_{máx}$ para o solo argiloso e tiras PET foi de aproximadamente 12% e para tiras PP, aproximadamente 50%. Destaca-se que os teores ótimos apresentados nesta pesquisa foram obtidos para as condições específicas aqui analisadas, com base nos solos e tipos de plásticos estudados.

Tabela 24 - Resistências comparativas, sem e com tiras, em diferentes umidades.

Condição	W _{ótimo} -2%	W _{ótimo}	W _{ótimo} +2%
Sem tiras	715,45 kPa	507,92 kPa	348,26 kPa
Teor ótimo de tiras PET	780,00 kPa	572,18 kPa	225,00 kPa
Teor ótimo de tiras PP	889,27 kPa	752,23 kPa	540,51 kPa

A Figura 75 representa a influência do teor de umidade nos resultados de RCS para a situação TOT e solo argiloso com a inclusão de tiras PET e PP.

Figura 75 - Influência do teor de umidade nos resultados de RCS para solo argiloso combinado com teor ótimo de tiras.



5.2 Ensaio Índice de Suporte Califórnia (CBR)

5.2.1 Resultados para o solo arenoso

A Figuras 76 e 77 ilustram os resultados dos ensaios de determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) – curva pressão x penetração – para o solo arenoso com e sem a inclusão de tiras PP e PET, respectivamente.

A Tabela 25 representa os resultados da expansão e do ensaio CBR para o solo arenoso sem tiras e com reforço de tiras PP e PET

A Figura 78 representa a variação do CBR do solo SC em função da inclusão das tiras plásticas no solo.

Figura 76 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo SC e tiras PP.

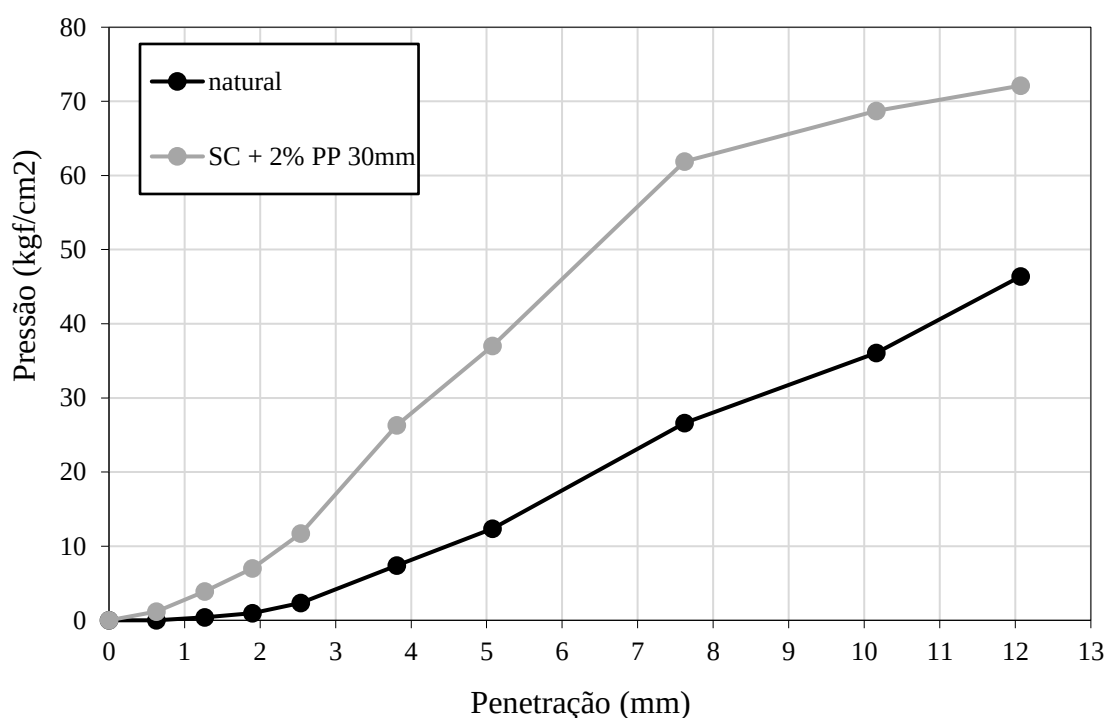
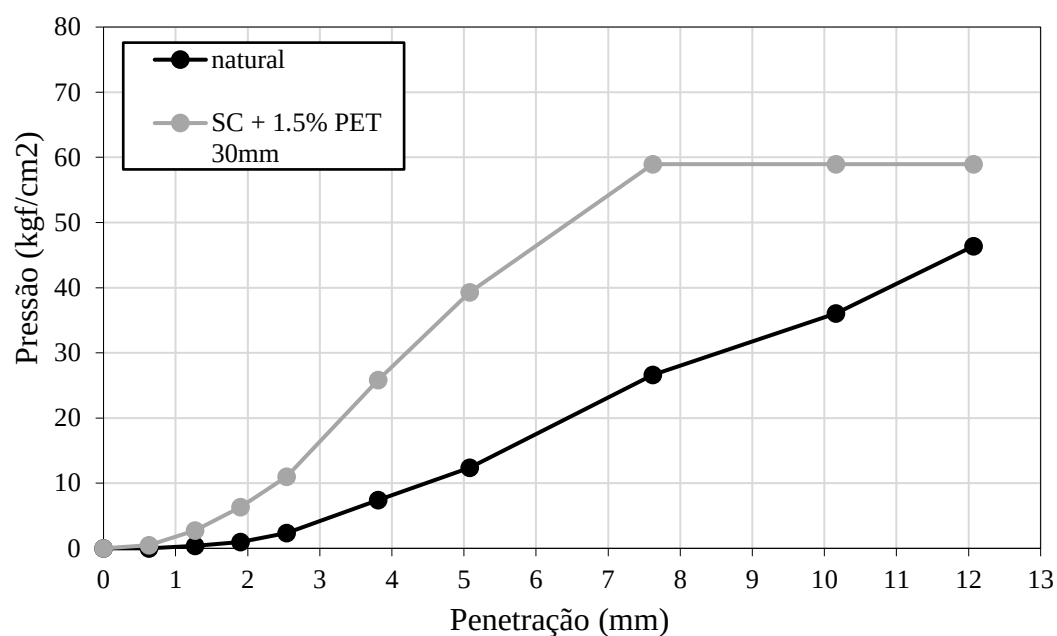
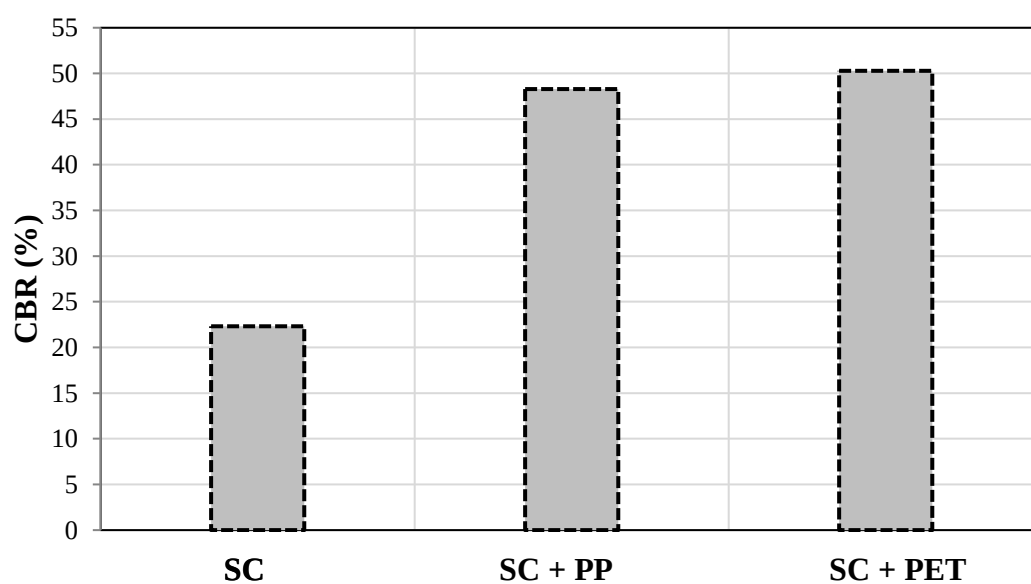


Figura 77 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo SC e tiras PET.



Material	Expansão (%)	CBR (%)
Solo natural	0	22,3
Solo + 2,0% PP	0	48,3
Solo +1,5% PET	0	50,3

Figura 78 – Variação do CBR do solo SC em função da inclusão de tiras PP e PET.



5.2.2 Resultados para o solo argiloso

A Figura 79 e 80 ilustram os resultados dos ensaios de determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) – curva pressão x penetração – para o solo argiloso com e sem a inclusão de tiras PP e PET, respectivamente.

A Tabela 25 representa os resultados da expansão e do ensaio CBR para o solo argiloso sem tiras e com reforço de tiras PP e PET.

A Figura 81 representa a variação do CBR do solo argiloso em função da inclusão das tiras plásticas no solo.

Figura 79 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo argiloso natural e com tiras PP.

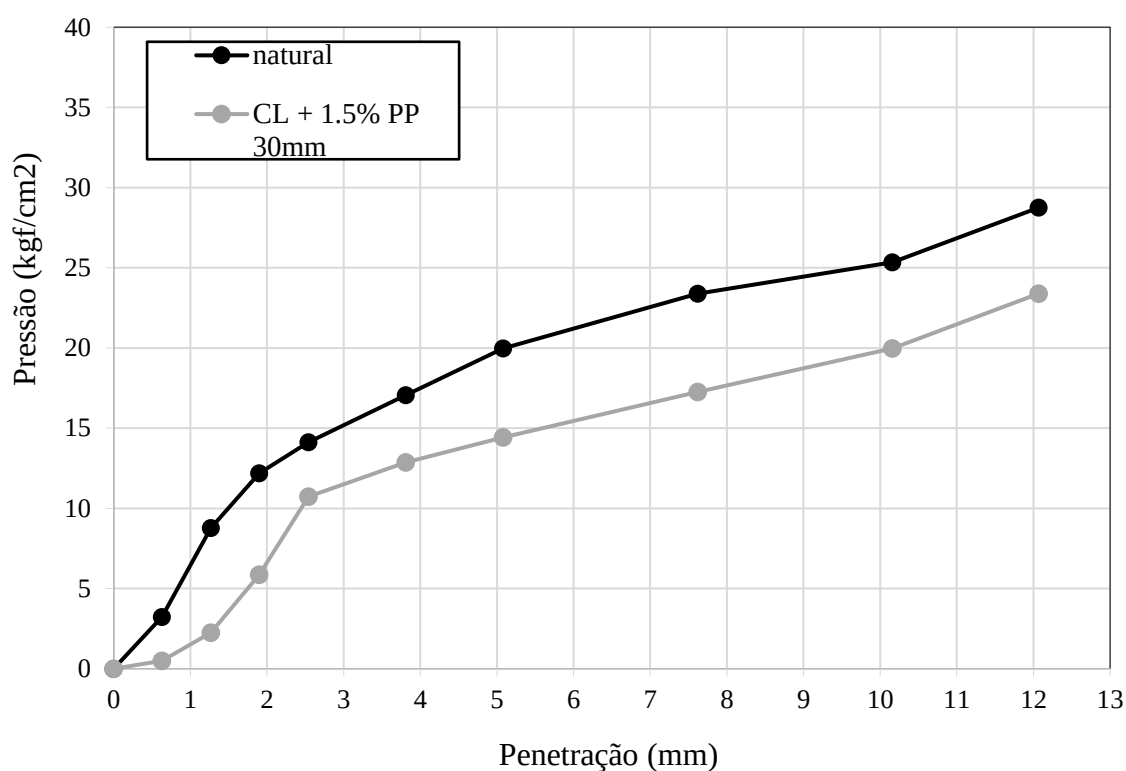
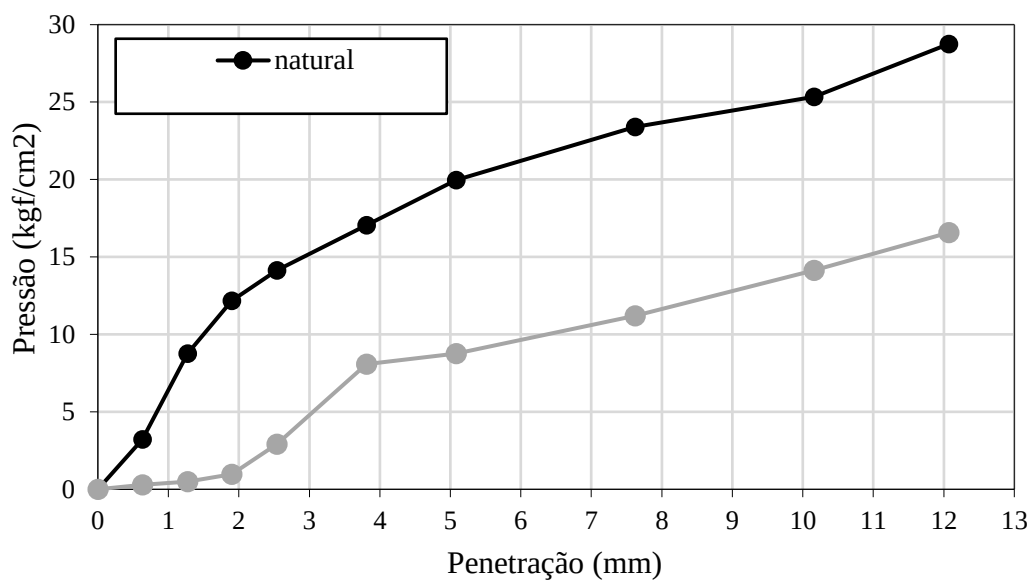
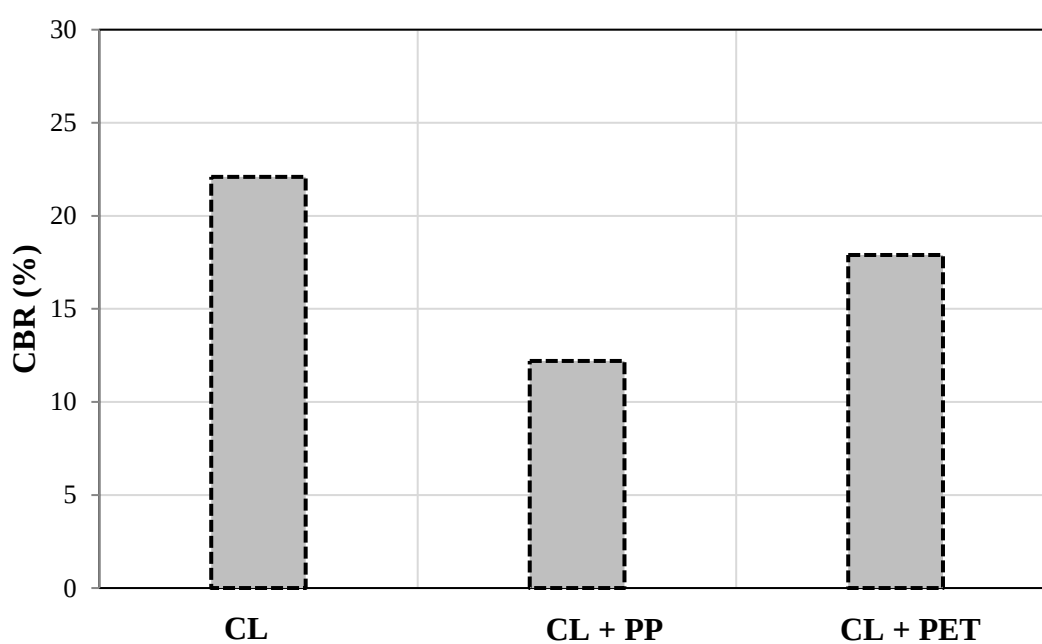


Figura 80 - Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo argiloso sem e com tiras de PET.



Material	Expansão (%)	CBR (%)
Solo Natural	0,03	21
Solo + 1,5% PP	0,14	17,9
Solo + 1,5% PET	0,17	12,2

Figura 81 - Variação do CBR do solo CL em função da inclusão de tiras PP e PET.



A Tabela 25 representa a síntese dos resultados.

Tabela 25 - Síntese dos resultados de CBR.

Solo	Tira/ Teor	Expansão (%)	CBR (%)	Variação CBR (%)
Arenoso	-	0,00	22,30	-
	PET (1,50%)	0,00	50,30	+28,00
	PP (2,00%)	0,00	48,30	+26,00
Argiloso	-	0,03	21,00	-
	PET (1,50%)	0,17	12,20	-8,80
	PP (1,50%)	0,14	17,90	-3,10

No que se refere ao solo arenoso, nota-se que a inclusão de tiras não afeta a expansão do solo e que se constata melhora no CBR tanto para inclusão de tiras PET e PP. O valor de CBR de 22,30% foi obtido para a amostra de solo arenoso não reforçado e os valores de 50,30% e 48,30% para as tiras PET e PP, respectivamente. Isto representa um incremento no CBR em relação à amostra sem tiras de 28,00% para as amostras reforçadas com tiras PET e 26,00% com tiras PP. Estes resultados condizem com os trabalhos de Fletcher e Humphries (1991) e Nataraj e Mcmanis (1997), em que o conteúdo crescente de tiras aumentou significativamente o valor de CBR quando comparado a amostras não reforçadas para solos arenosos.

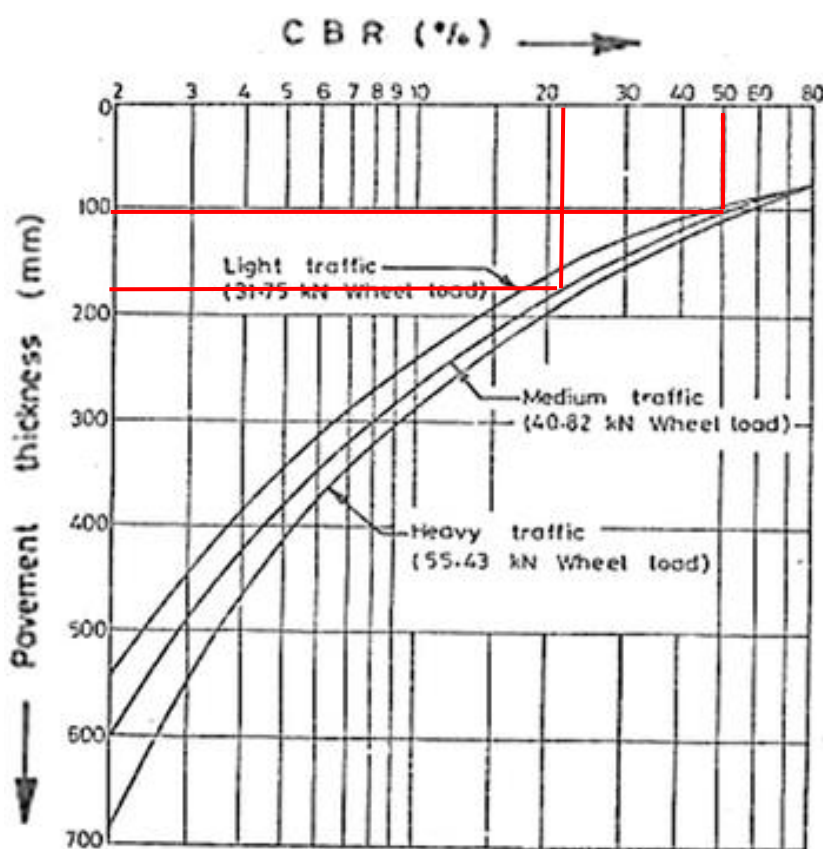
Com relação ao solo argiloso, constata-se que a inclusão de tiras afeta a expansão do solo. Nota-se que o solo argiloso sem tiras possui expansão de 0,03% e que a inclusão de tiras aumentou a expansão para 0,17% para tiras PET e 0,14% para as tiras PP. Observa-se que a inclusão de tiras não foi vantajosa para os resultados de CBR.

A amostra argilosa sem tiras apresentou um CBR de 21,00%, enquanto a adição de tiras resultou um CBR de 12,20% e 17,90% para o solo argiloso com a inclusão de tiras PET e PP, respectivamente; ou seja, uma diminuição no CBR em relação ao solo sem tiras de 8,80% para a adição de tiras PET e 3,10% para a adição de tiras PP. A redução do CBR pode ser atribuída ao aumento da expansão do solo e de acordo com Fletcher e Humphries (1991), que explicam que a inclusão de tiras no solo argiloso pode ter criado mais caminhos para a água se infiltrar na amostra. Os resultados também vão de encontro com o trabalho de (MARÇAL et al., 2020), cujos resultados do ensaio de suporte da Califórnia (CBR) indicam que o solo arenoso

experimentou um aumento de 70% no CBR após o reforço, enquanto o CBR do solo argiloso não foi afetado pela inclusão de tiras.

A Figura 82 apresenta uma estimativa de espessura de camada do pavimento de acordo com o valor de CBR para projetos de pavimentos flexíveis.

Figura 82 - Curvas de CBR(%) versus espessura do pavimento para diferentes condições de tráfego. (HANSEN 1959, Apud PEDDAIAH et al., 2018)



De acordo com a Figura 82 e com base nos valores de CBR obtidos, uma espessura de pavimento para o solo arenoso utilizado nesta pesquisa (CBR = 22,3%) é de aproximadamente 18 cm para condições de tráfego médio. A espessura do pavimento reduz para cerca de 10 cm para a mesma condição de tráfego para 2,0% de resíduos plásticos PP misturados ao solo (CBR = 48,3%) ou para 1,5% de resíduos plásticos PET misturados ao solo (CBR = 50,3%).

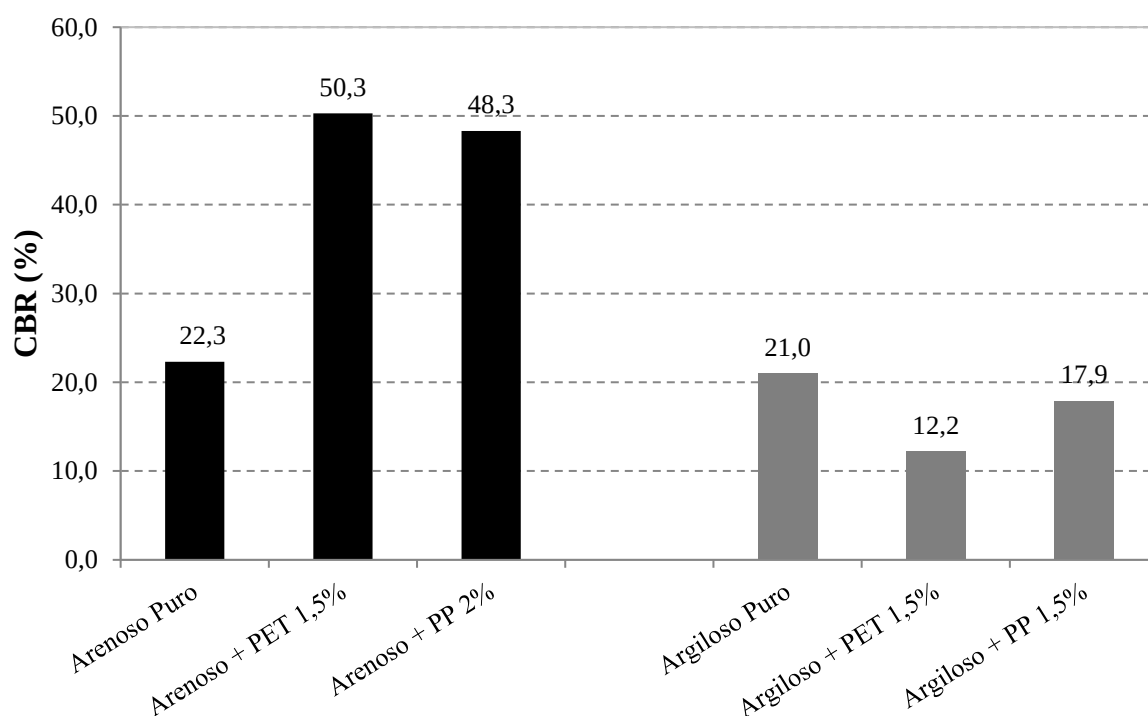
Essa diminuição na espessura da camada de pavimento de 18 cm para 10 cm implica na redução no uso de recursos naturais (materiais agregados e solo emprestado) utilizados; a quantidade de betume utilizado na espessura da base também diminui. Portanto, o custo de

construção é reduzido consideravelmente junto com o tempo na execução de obras de pavimentação.

O solo argiloso natural, sem a adição de tiras, apresentou boas condições para ser utilizado como subleito ou sub-base de camadas de pavimento, entretanto a adição das tiras plásticas não se mostrou vantajosa para utilização como reforço de subleito ou sub-base, devido à diminuição no valor do CBR, não atendendo aos 20% necessários para utilização, entretanto pode ser indicado para outras aplicações.

A análise de espessuras apresentada foi feita com base no método proposto por Hansen (1959), porém existem outras metodologias para a determinação da espessura das camadas. A DNER determina que as características mínimas dos materiais por camadas devem ser: $\text{CBR} \geq 2\%$ para subleito; $\text{CBR} \geq 20\%$ para sub-base; e $\text{CBR} \geq 80\%$ para aplicação como base de pavimentos. A Figura 83 ilustra graficamente os resultados.

Figura 83 – Síntese dos resultados do ensaio de Capacidade de Suporte Califórnia (CBR).



5.3 Ensaio de cisalhamento direto

5.3.1 Solo arenoso e tiras PP

As Figuras 84, 85 e 86 apresentam os resultados para o ensaio de cisalhamento direto no solo arenoso com adição em massa de 2% de tiras de Polipropileno com 30 mm de comprimento.

Figura 84 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PP.

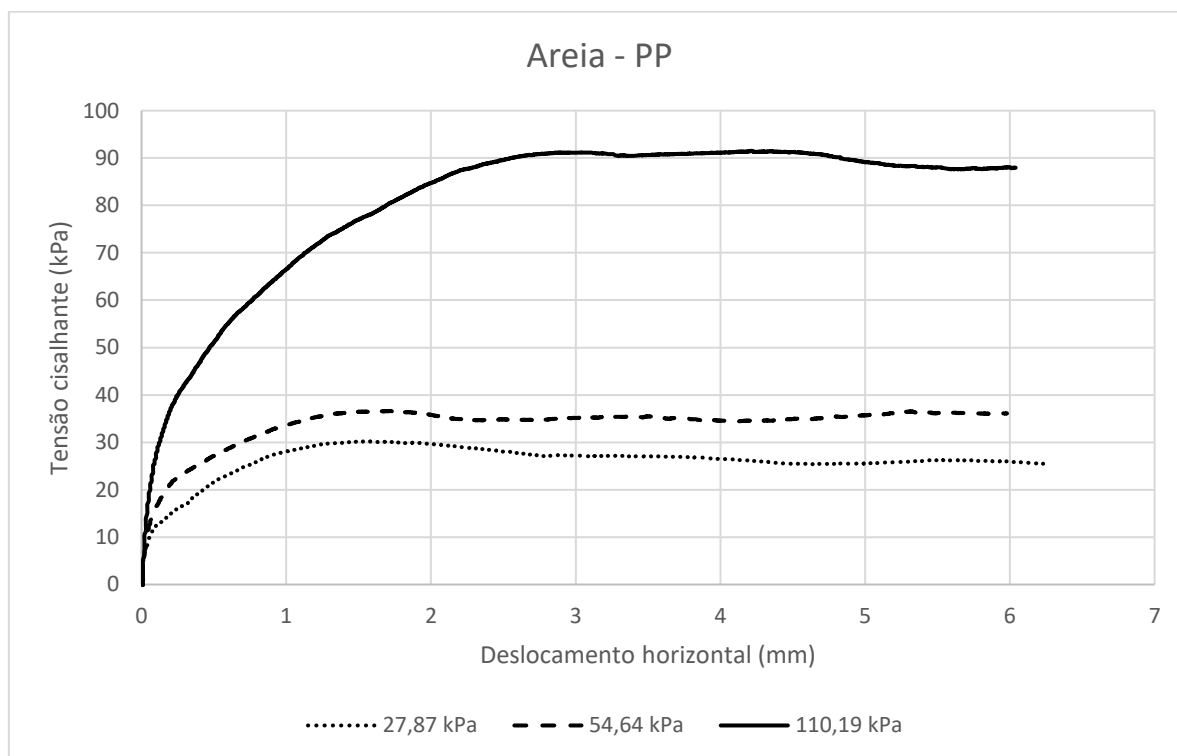


Figura 85 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PP.

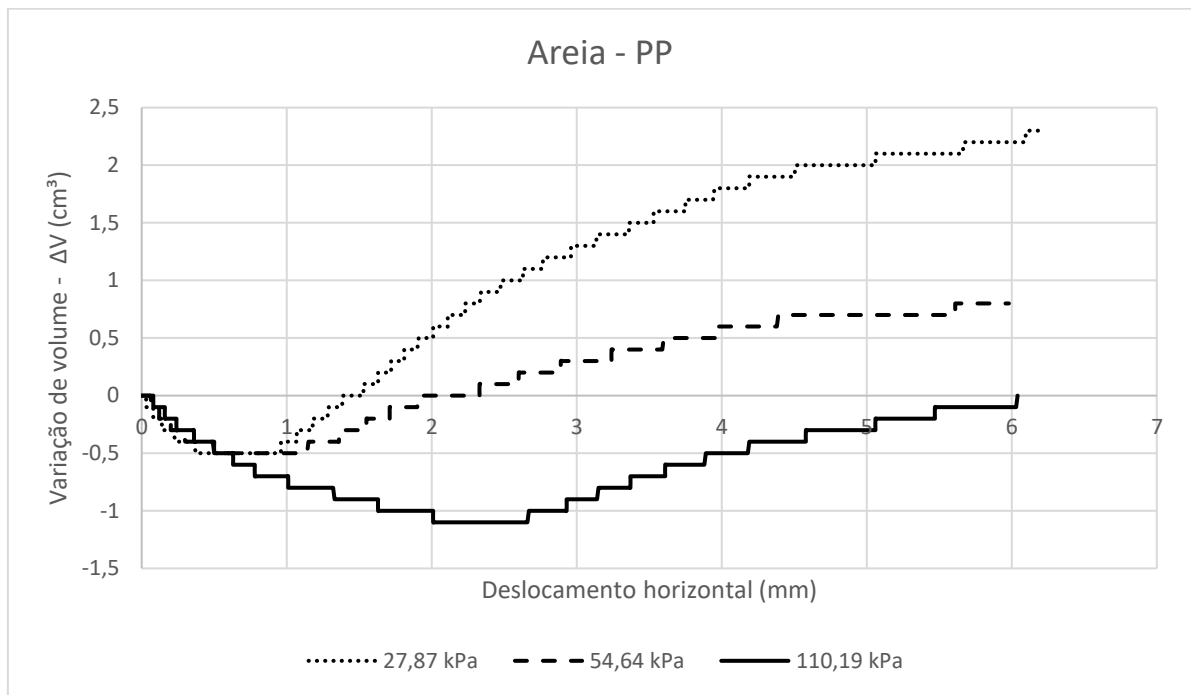
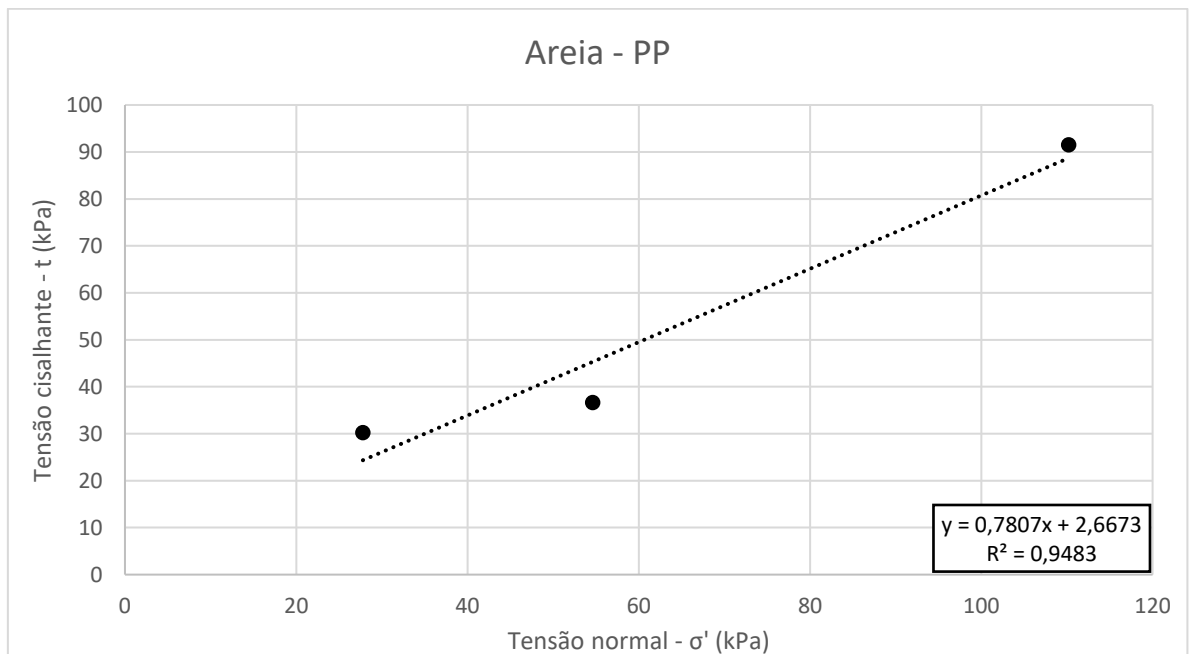


Figura 86 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso com adição de tiras PP.



5.3.2 Solo arenoso e tiras PET

As Figuras 87, 88 e 89 apresentam os resultados para o ensaio de cisalhamento direto no solo arenoso com adição em massa de 1,5% de tiras de PET com 20 mm de comprimento.

Figura 87 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PET.

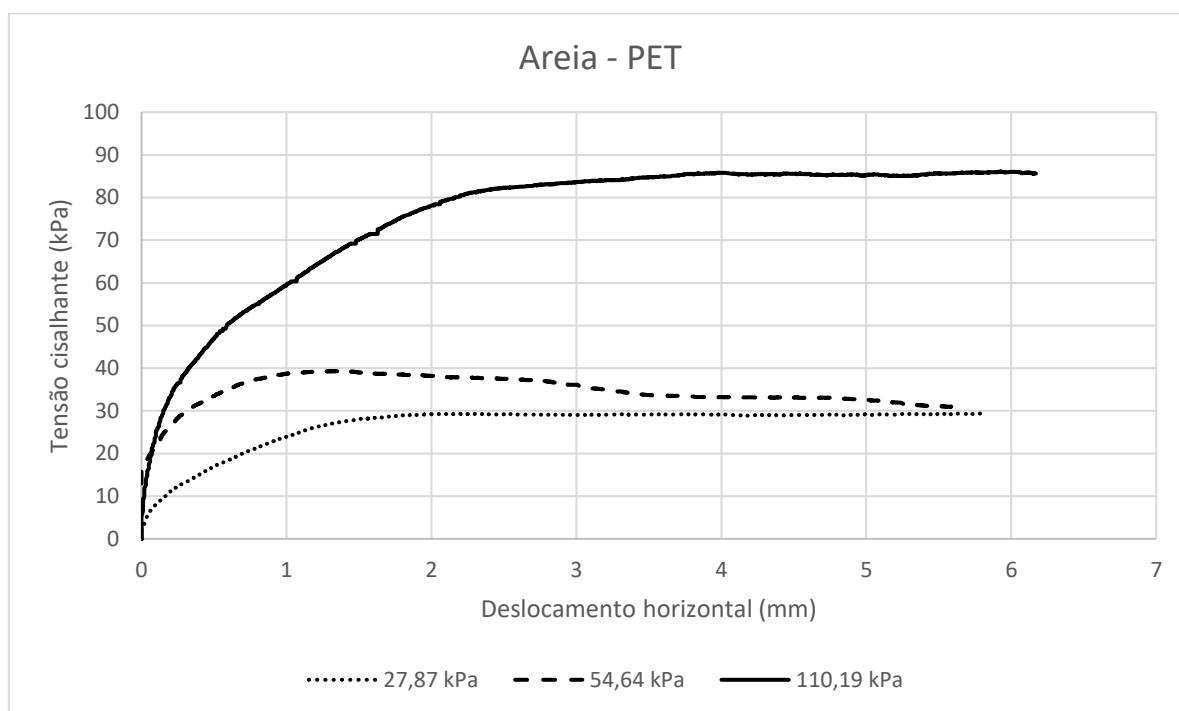


Figura 88 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de tiras PET.

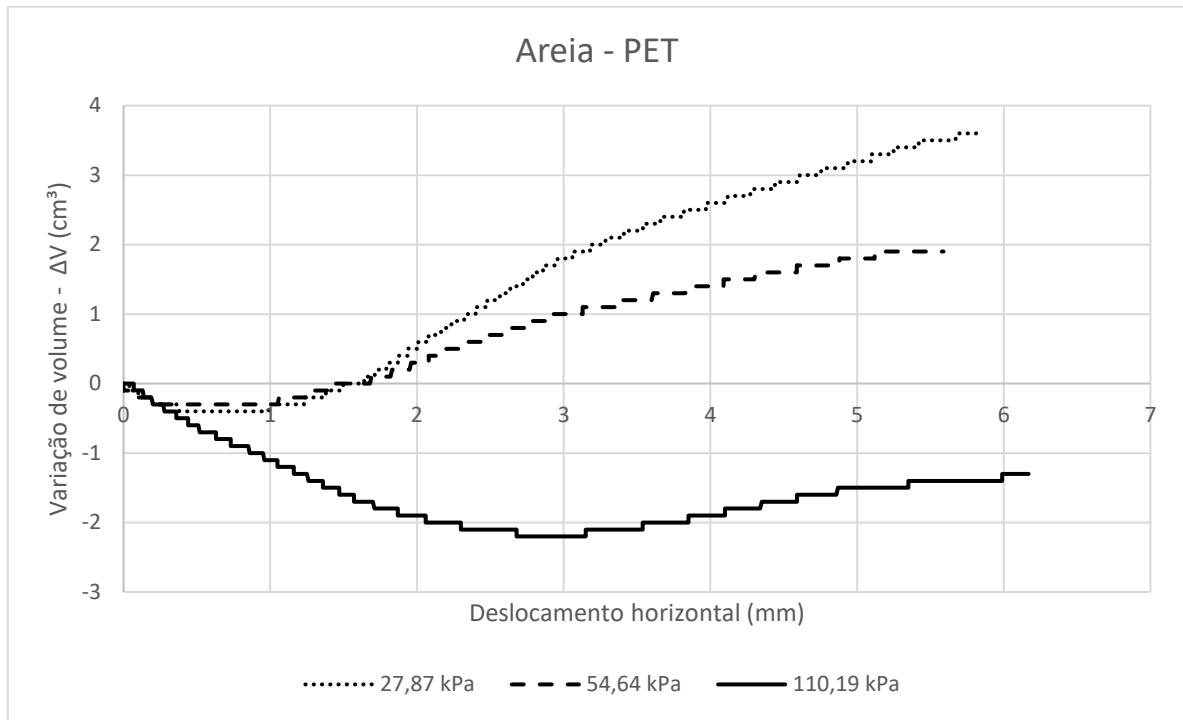
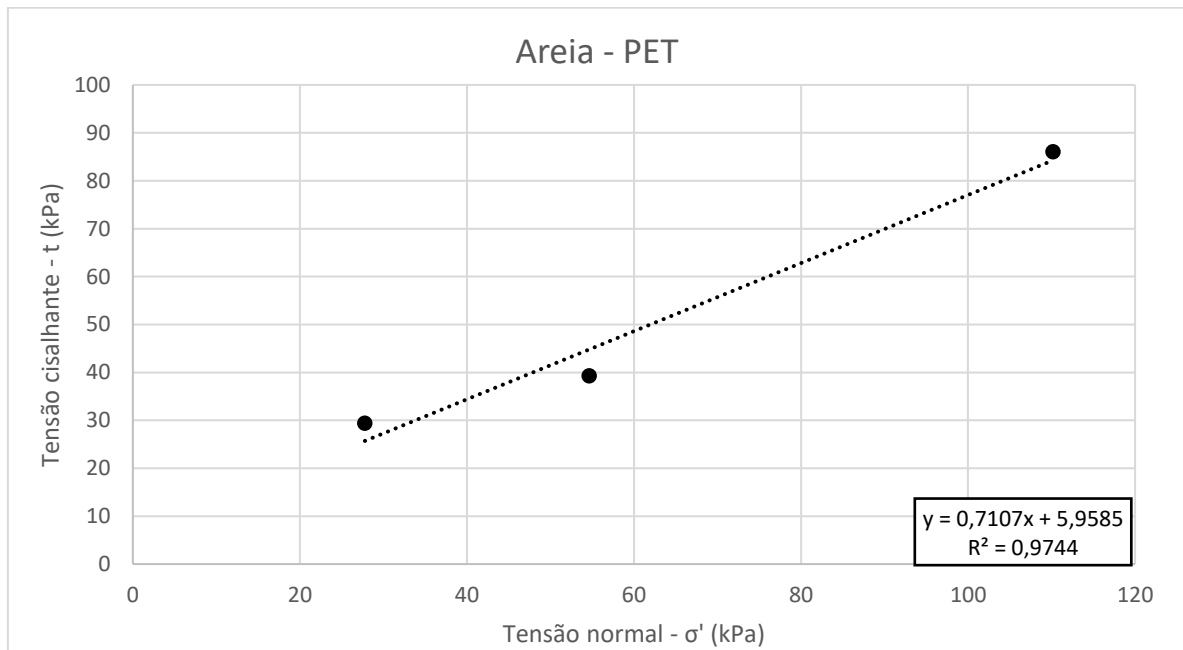


Figura 89 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso com adição de tiras PET.



Para o solo arenoso com adição de tiras de PP, nota-se que, para a maior tensão normal aplicada, o corpo de prova não apresentou variação de volume ao final da ruptura. Já para o mesmo solo com a dição de tiras PET, notou-se uma ligeira diminuição de volume no momento da ruptura.

Isso deve-se ao fato de que a areia diminui de volume quando é carregada axialmente em seu estado fofo e de dilata se estiver em estado compacto. Existindo assim um índice de vazios no qual o corpo de prova não apresenta nem diminuição nem aumento de volume quando ocorre a ruptura, conhecido como índice de vazios crítico da areia. Dessa forma, se a areia estiver com um índice de vazios menor do que o crítico, precisará se dilatar para romper, e se estiver maior que o crítico, a areia precisará se comprimir. Essa variação está relacionada ao entrosamento dos grãos da areia, nas fofas, ocorre uma reacomodação, que gera redução de volume.

Então, quando a areia é carregada axialmente e possui índice de vazios crítico, ela apresenta inicialmente uma ligeira diminuição de volume, seguida de um aumento de volume, sendo a variação no momento da ruptura nula.

Nota-se com isso que, para as duas tensões axiais menores, a areia, durante o ensaio de cisalhamento, encontrava-se com índice de vazios menor que o crítico. Já para a maior tensão axial aplicada, o adensamento realizado antes de iniciar o ensaio do solo arenoso e tiras PET fez com que o corpo de prova tivesse índice de vazios maior que o crítico, o que explica a sua diminuição de volume na ruptura, enquanto que no corpo de prova moldado com solo arenoso e tiras PP, a tensão axial aplicada durante seu adensamento foi suficiente para que essa amostra atingisse seu índice de vazios crítico, sendo a variação de volume nula no momento da ruptura.

5.3.3 Solo argiloso e tiras PP

As Figuras 90, 91 e 92 apresentam os resultados para o ensaio de cisalhamento direto no solo argiloso com adição em massa de 1,5% de tiras de Polipropileno com 30 mm de comprimento.

Figura 90 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PP.

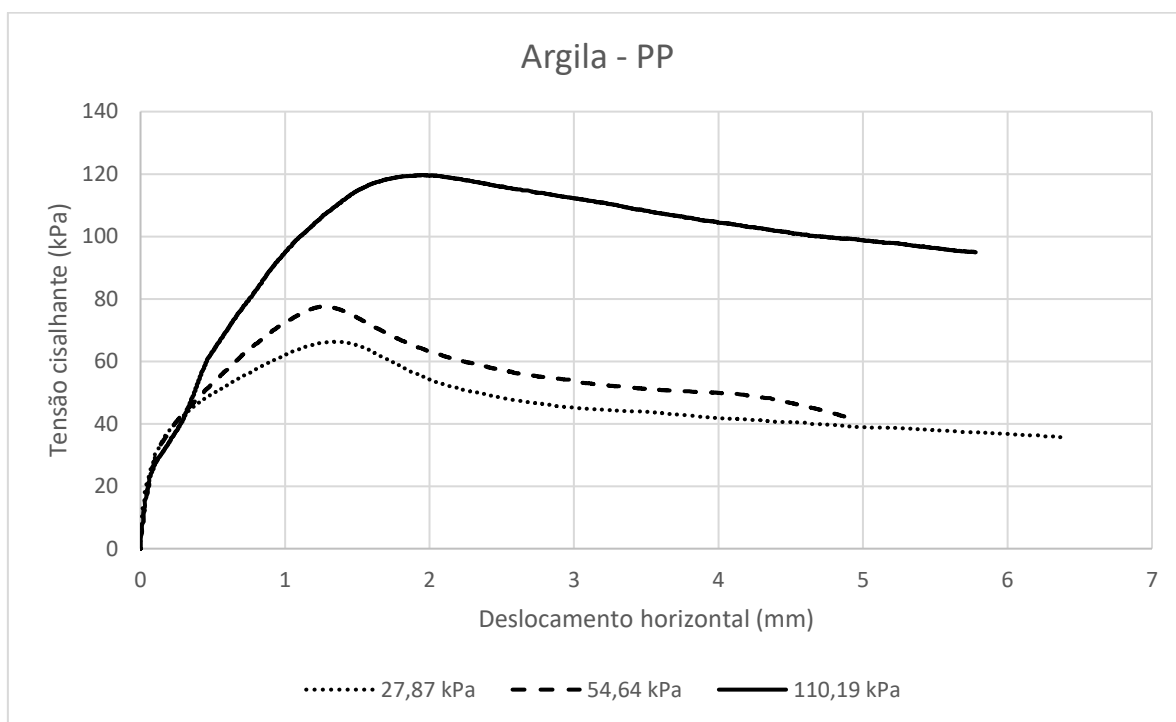


Figura 91 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PP.

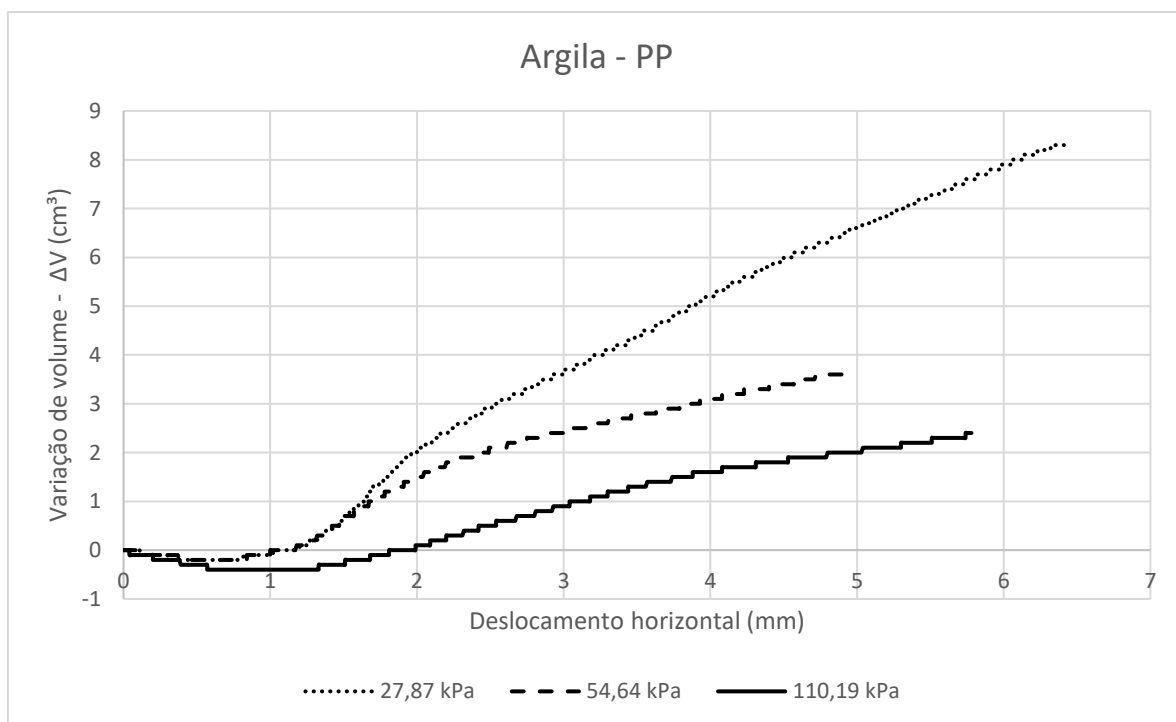
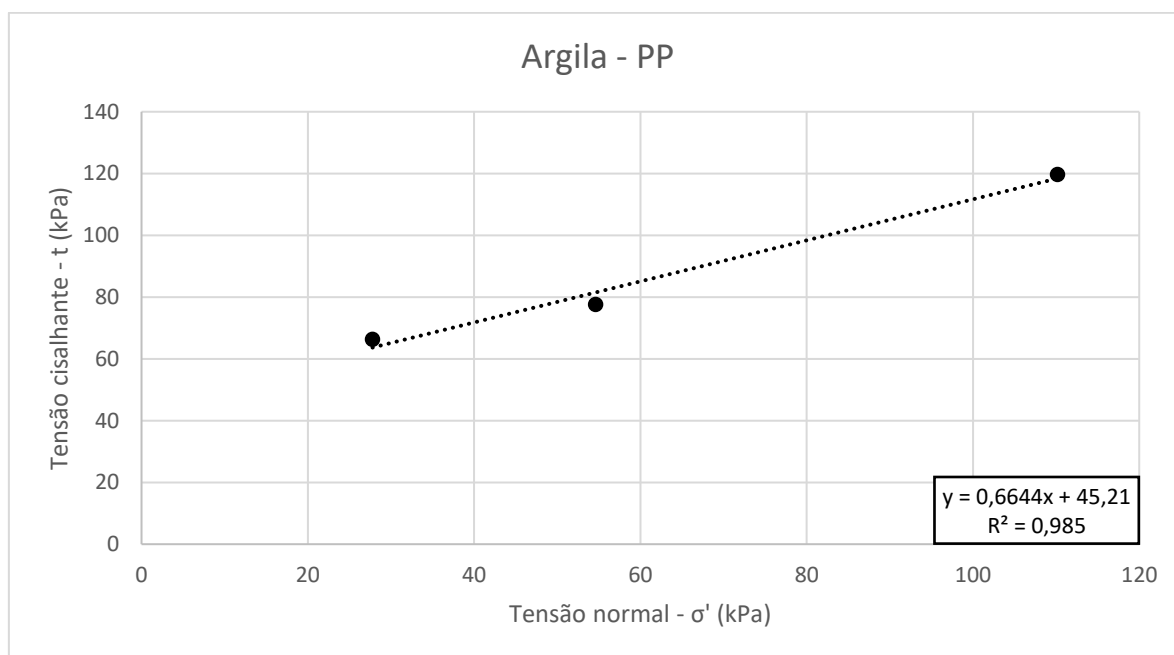


Figura 92 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso com adição de tiras PP.



5.3.4 Solo argiloso e tiras PET

As Figuras 93, 94 e 95 apresentam os resultados para o ensaio de cisalhamento direto no solo argiloso com adição em massa de 1,5% de tiras de PET com 30 mm de comprimento.

Figura 93 - Tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PET.

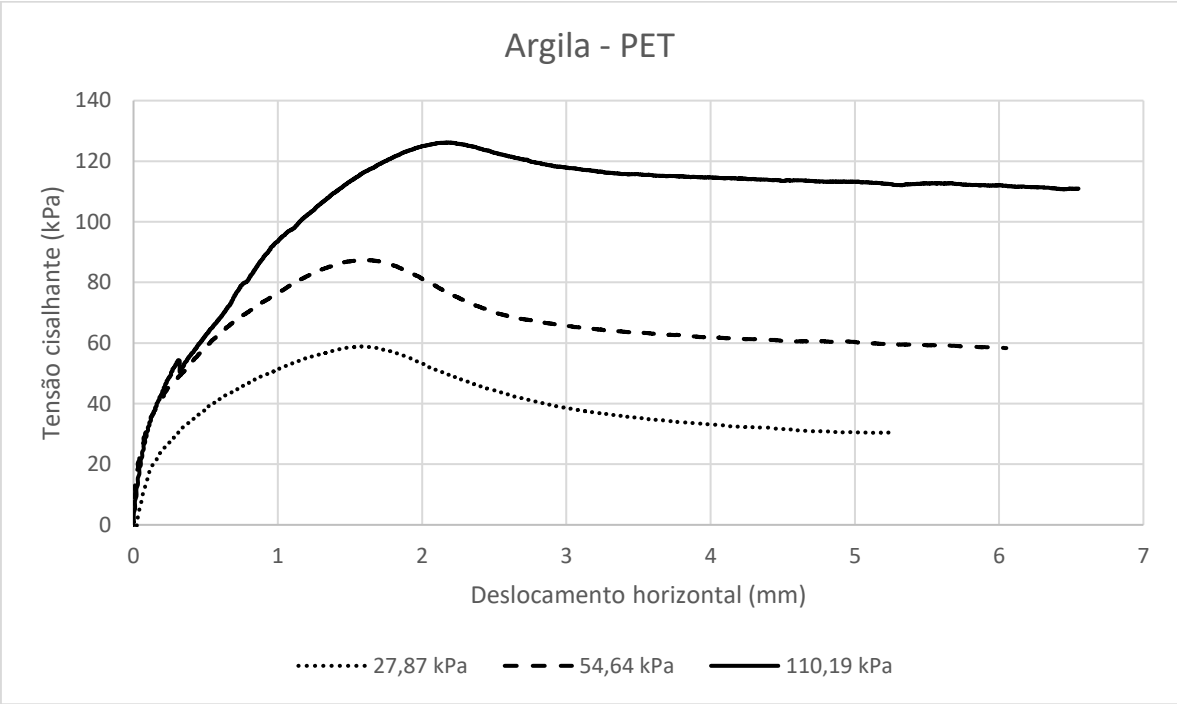


Figura 94 - Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de tiras PET.

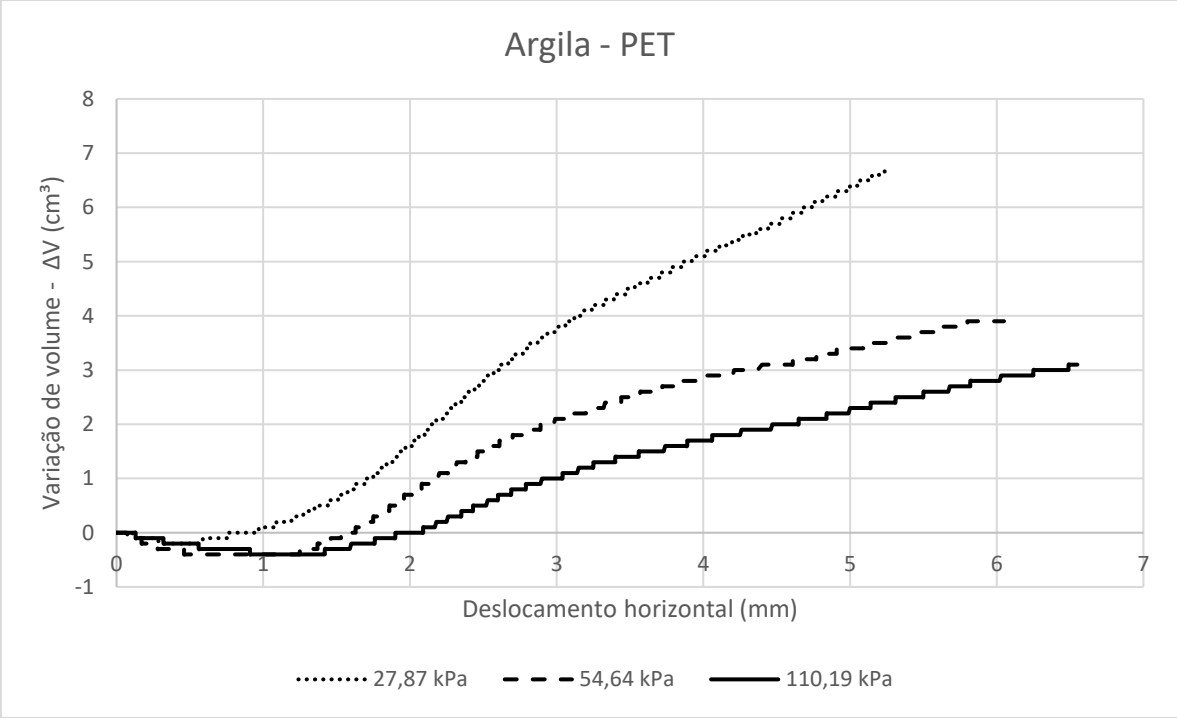
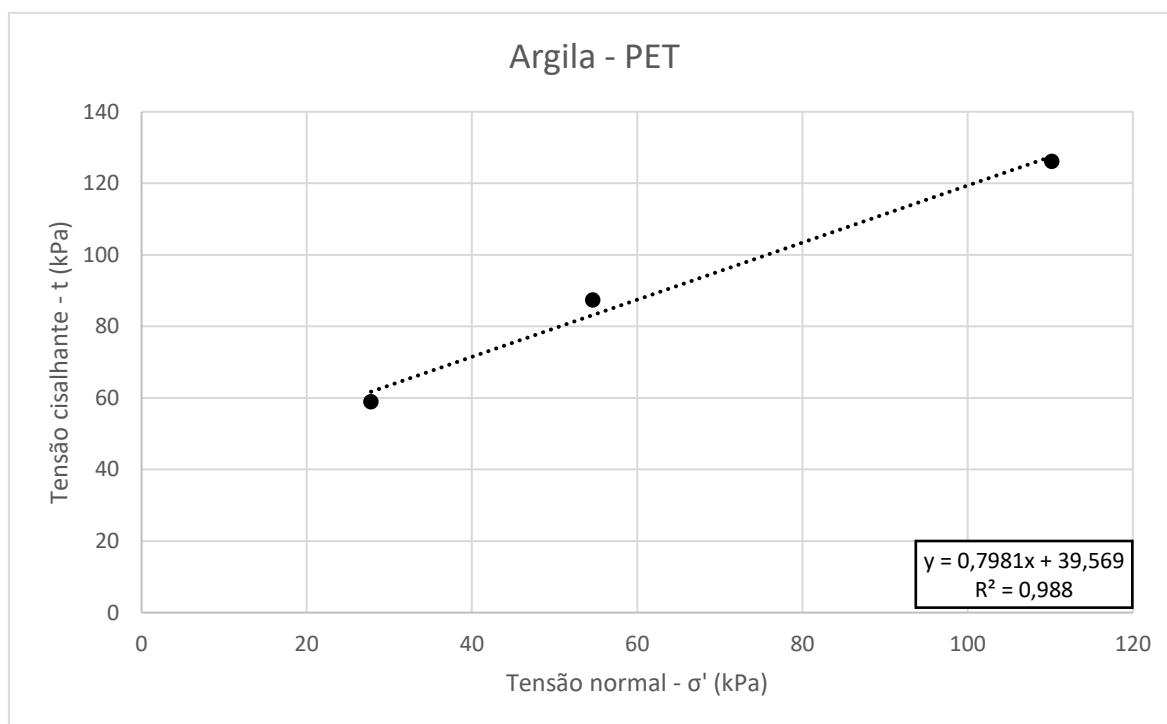


Figura 95 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso com adição de tiras PET.



Com relação ao solo argiloso, para todos os níveis de carga axial aplicados, notou-se um aumento de volume dos corpos de prova na ruptura para ambos os tipos de tiras adicionadas; sendo o comportamento semelhante às areias compactas, o que permite concluir que o solo utilizado se trata de uma argila pré-adensada.

Assim, da mesma forma que se identifica um índice de vazios crítico para as areias, pode-se identificar uma RSA crítica para as argilas (variação de volume zero); abaixo da qual o corpo de prova apresenta dilatação na ruptura e acima dela, diminuição do volume na ruptura.

O índice de vazios crítico não é uma característica do material e depende do nível de tensão confinante, ou seja, quanto maior for a tensão confinante, menor será o índice de vazios crítico. Ou ainda, a tendência de dilatação será tanto maior quanto maior for o índice de vazios crítico ou menor for a tensão confinante (altas tensões confinantes reduzem a capacidade de dilatação do solo). Dessa forma, para uma determinada tensão confinante, o solo apresenta comportamento de solo compacto, caso seu índice de vazios seja inferior ao crítico. (PINTO, CARLOS DE SOUSA, 2006)

A capacidade do solo de mudar seu comportamento dependendo do nível de tensão aplicada está relacionado ao embricamento entre as partículas, que nada mais é que o trabalho realizado para movimentar a partícula do solo.

No caso do solo compacto, ocorre um trabalho adicional para superar o embricamento entre as partículas, o que causa uma expansão volumétrica durante o cisalhamento, chamada de dilatação.

As Figuras 96 e 97 apresentam as envoltórias resultantes do ensaio de cisalhamento direto para os solos arenoso e argiloso, sem nenhuma adição de tiras.

Figura 96 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso.

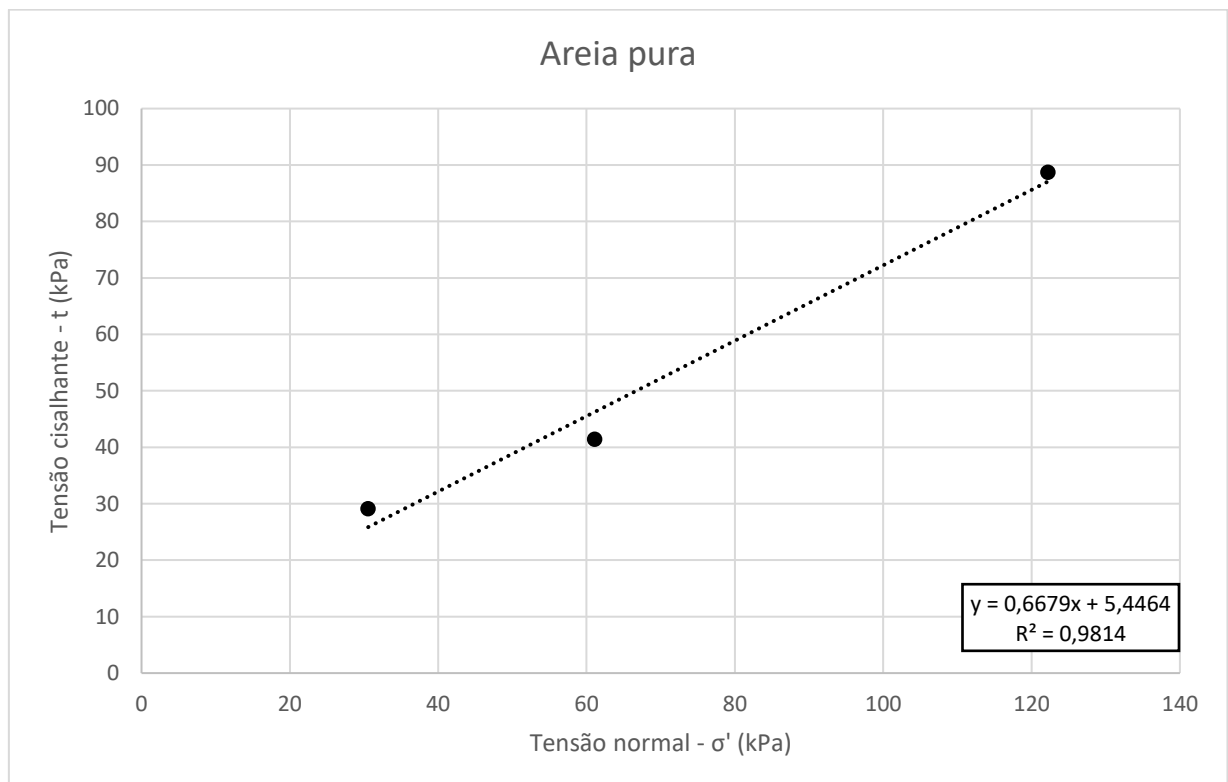


Figura 97 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso.

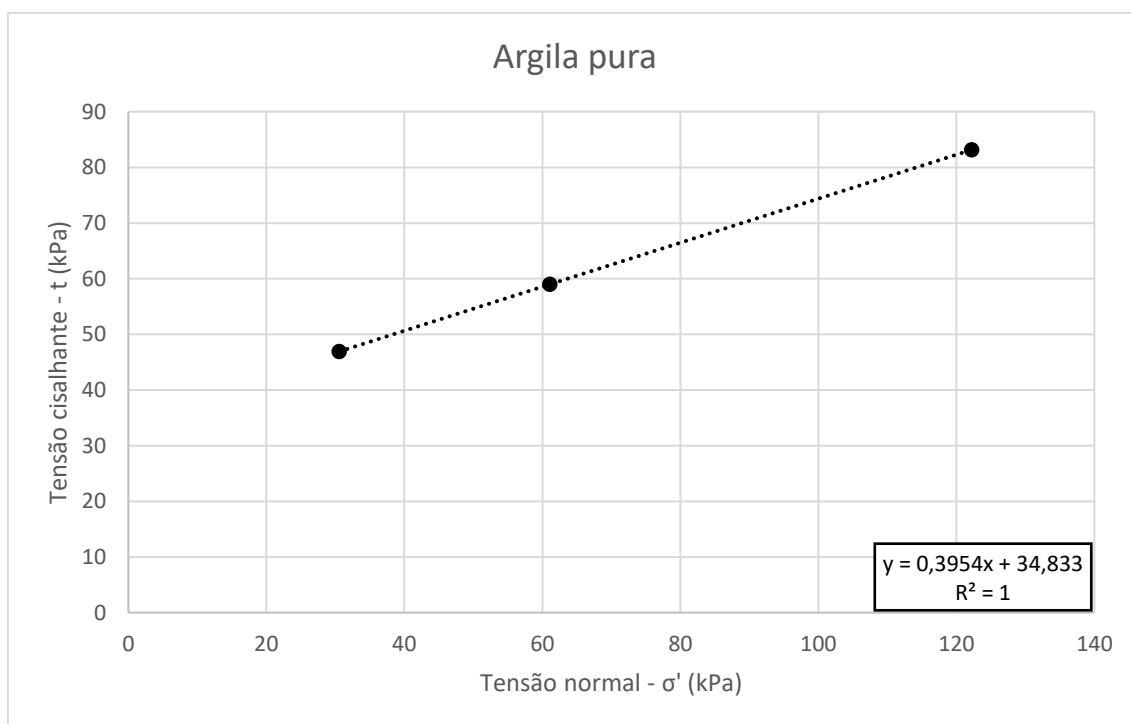


Tabela 26 - Resumo dos valores de coesão e ângulo de atrito obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.

		PET	PP	SEM TIRAS (REFERÊNCIA)
AREIA	Intercepto de coesão (kPa)	5,96	2,67	5,45
	Ângulo de atrito (°)	35,40	37,98	33,74
ARGILA	Intercepto de coesão (kPa)	39,57	45,21	34,80
	Ângulo de atrito (°)	38,59	33,60	21,57

As figuras 98 e 99 apresentam um comparativo entre os resultados para o solo sem e com adição de tiras plásticas.

Figura 98 - Envoltória de cisalhamento do solo arenoso sem e com adições de tiras plásticas.

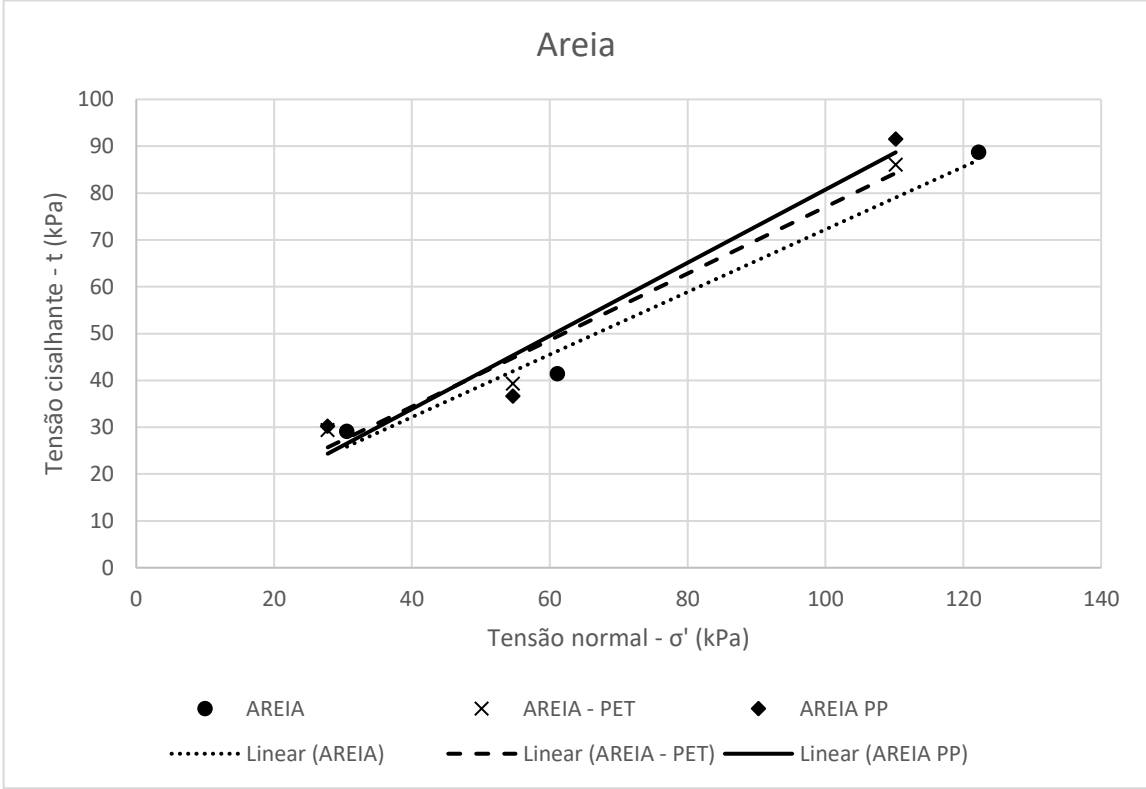


Figura 99 - Envoltória de cisalhamento do solo argiloso sem e com adições de tiras plásticas.

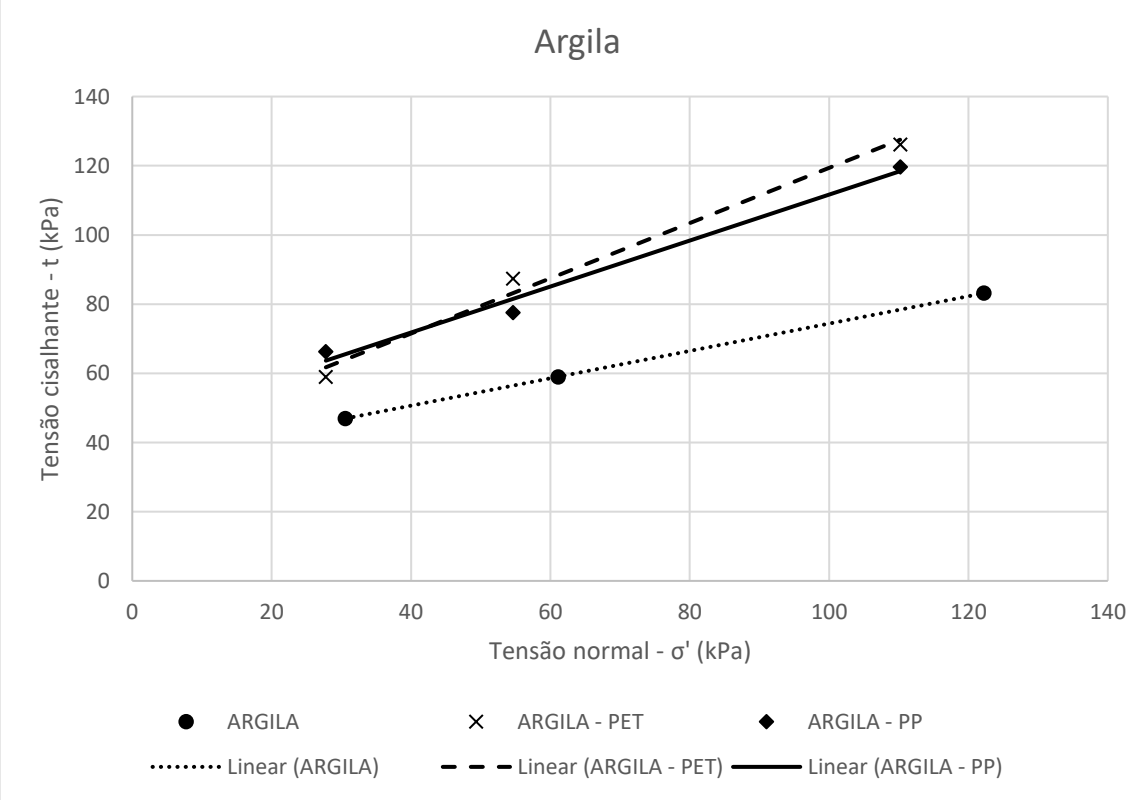


Tabela 27 - Variação percentual entre valores de coesão e ângulo de atrito obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, comparado com o solo sem adição de tiras (referência).

		PET		PP	
AREIA	Intercepto de coesão (kPa)	↑	9,4%	↓	-51,0%
	Ângulo de atrito (°)	↑	4,9%	↑	12,6%
ARGILA	Intercepto de coesão (kPa)	↑	13,7%	↑	29,9%
	Ângulo de atrito (°)	↑	78,9%	↑	55,7%

Para ambos os tipos de solos estudados, nota-se melhora na resistência com a adição de tiras, tanto PET quanto PP, comparado ao solo puro, sem adição de tiras. No solo arenoso, o valor do intercepto de coesão diminui apenas para a mistura com tiras PP, enquanto o ângulo de atrito aumenta para as misturas com adição dos dois tipos de tiras analisados.

Na argila, valor do intercepto de coesão e do ângulo de atrito aumentam em todas as situações estudadas, tanto para a adição de tiras PET quanto PP.

O ângulo de atrito é o principal componente de resistência ao cisalhamento dos solos, representa o deslizamento de um corpo sobre outro. Quando maior o ângulo de atrito, maior a resistência à ruptura. Ambas as adições de tiras PET e PP aumentaram o ângulo de atrito, dificultando o deslizamento das partículas do corpo de prova.

A coesão representa a atração química entre as partículas. Para a areia, a adição de tiras não apresentou melhora significativa, principalmente na adição de tiras de Polipropileno, que diminuiu a atração entre as partículas; diferentemente da argila, que apresentou certa melhora nesse aspecto.

Assim, se o ângulo de atrito está relacionado à resistência ao deslizamento entre corpos e com a adição de tiras o ângulo de atrito aumenta, pode-se dizer que as tiras tornam o deslizamento entre partículas mais difícil. Se o movimento entre partículas fica mais difícil, o embricamento (que é o trabalho para movimentar a partícula ascendentemente) aumenta, assim como quando há aumento da tensão normal (σ_1).

$$\tau = \sigma * \tan(\phi' + \alpha), \quad \text{sendo } \alpha \text{ o ângulo de dilatância}$$

O efeito da dilatância está relacionado à tendência ao movimento ascendente durante o cisalhamento do solo. Portanto, o aumento da tensão confinante gera menor tendência ao movimento ascendente e, conseqüentemente, menor dilatância. Além disso, a adição de tiras faz com que seja mais difícil movimentar a partícula, e com isso há um aumento da resistência do solo.

Como exposto acima, o ângulo de atrito interno das misturas apresentou melhora em todas as situações estudadas, apresentando aumento mais significativo no solo argiloso, chegando a um acréscimo de quase 79% comparado ao solo argiloso puro. Tais resultados condizem com o estudo de Plé e Lê (2012), em que a adição de tiras PP aumenta o ângulo de atrito do solo. Os resultados também convêm com o trabalho de Claria e Vettorelo (2016) que realizaram ensaios de cisalhamento direto com diferentes teores de tiras PP em solo arenoso e enfatizam que o ângulo de atrito interno aumenta com o teor de tiras até um teor de tiras de 2,00% em peso de solo seco e que além dessa porcentagem de tiras, nenhuma melhora significativa do ângulo de atrito interno é observada. Babu e Chouksey (2011) concluem que o aumento é devido ao atrito entre o solo e o resíduo reciclado e o desenvolvimento de tensão de tração no resíduo de plástico.

Já para os compósitos com tiras PET, embora apresente um aumento menos significativo no valor do ângulo de atrito, também apresentou aumento tanto para o solo arenoso quanto para o solo argiloso, que vai de encontro com o trabalho de Consoli et. al (2002), em que se conclui que o ângulo de atrito aumenta com a inclusão de tiras de PET recicladas e com o aumento do comprimento (12 mm e 36 mm) das tiras, destacando-se, porém, que o teor de tiras PET recicladas utilizado na pesquisa foi de 0,50%.

Com relação ao intercepto de coesão, nota-se que a areia apresentou pouca (9,4%) ou nenhuma (-51,0%) melhora com a adição de tiras PET e PP, respectivamente. Como a parcela coesiva pouco influencia na resistência do solo arenoso, esse pequeno aumento ou redução não impediu que o comportamento da mistura solo-tiras apresentasse uma melhora na resistência da areia comparado ao solo puro (Figura 98).

A análise dos resultados do solo argiloso mostrou um aumento mais significativo no intercepto de coesão em ambas as misturas solo-tiras, chegando a um aumento de quase 30% em seu valor para o solo com adição de tiras de Polipropileno. Como a parcela coesiva é importante para a resistência dos solos argilosos, esse aumento favoreceu o aumento da resistência das amostras com as misturas, deslocando para cima as envoltórias obtidas nos ensaios (Figura 99).

Castilho et al. (2021) notaram que a análise das curvas de variação volumétrica foi importante para mostrar que a adição das tiras passou a modificar o comportamento do solo para os maiores níveis de tensões aplicadas, o material passa a apresentar comportamento mais dúctil. Além disso, afirmam que a inclusão de tiras de PET foi mais eficaz em solo arenoso, que

apresentou aumento em torno de 60% no intercepto coesivo, essa última análise diverge do encontrado nessa pesquisa. Também de acordo com Castilho et al. (2021), faltam pesquisas utilizando inclusões de tiras poliméricas retiradas de materiais recicláveis como reforço em solos lateríticos tropicais em condições não saturadas, embora tiras provenientes de reaproveitamento de resíduos tenham alto potencial para melhorar as características do solo.

De acordo com Senez (2016), o comportamento do solo reforçado pode ser definido em três etapas distintas: a primeira, onde o comportamento do material é controlado basicamente pela matriz do solo; a segunda, em que o comportamento do material é controlado em conjunto, tanto pela tira quanto pela matriz de solo; e a última etapa, quando o comportamento do material é controlado apenas pelas tiras.

Em geral, com o colapso da matriz do solo, grande parte dos esforços de cisalhamento que antes eram suportados por ele são transferidos para as tiras, reduzindo a queda de resistência pós-pico, adquirindo características mais dúcteis tanto para as tiras PET quanto para as tiras PP em ambos os tipos de solo. Ao serem solicitadas, as tiras provocam redistribuição de esforços e deformações (JEWELL & WROTH, 1987).

As Figuras 100 e 101 ilustram os corpos de prova após o ensaio de cisalhamento direto para os solos arenoso e argiloso com tiras PET.

Figura 100 - Corpo de prova de solo arenoso com adição de tiras plásticas pós ensaio de cisalhamento direto. (a) CP fora do molde; (b) corpo de prova aberto com tiras distribuídas de forma aleatória; (c) CP com tiras desmanchado.



(a)



(b)



(c)

Figura 101 - Corpo de prova de solo argiloso com adição de tiras plásticas pós ensaio de cisalhamento direto. (a) fibras impedindo a tendencia ao cisalhamento do CP; (b) corpo de prova fora do molde com tiras distribuídas de forma aleatória; (c) CP com tiras desmanchado.



(a)



(b)



(c)

5.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para estudar a resistência à tração por compressão diametral, devido a maior dimensão dos corpos de prova e ao solo apresentar pouca resistência à tração, optou-se por acrescentar cimento às amostras, a fim de melhorar o manuseio e garantir a realização dos ensaios, permitindo que fosse possível observar o comportamento das tiras plásticas. O esforço de resistência à tração é uma das principais análises a ser realizada em solos reforçados, já que esta função é transferida aos geossintéticos, os quais possuem capacidade de resistir a tais esforços, enquanto o solo possui pouca ou nenhuma resistência à tração. Com isso, variou-se também o teor de cimento em 2, 4, 6 e 8% da massa seca de cada amostra, visando obter o teor ótimo da mistura solo-cimento-tiras. O valor de resistência à tração é obtido indiretamente a partir da força de compressão aplicada, de acordo com a Equação 1 apresentada no item 4.6.

5.4.1 Solo argiloso

As Figuras 102 a 105 apresentam os resultados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral no solo argiloso com adição em massa de 2% a 8% de cimento. Analisou-se também a adição em massa seca de 1,5% de tiras de Polipropileno (PP) com 30 mm de comprimento e a adição em massa seca de 1,5% de tiras de PET com 30 mm de comprimento.

Figura 102 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.

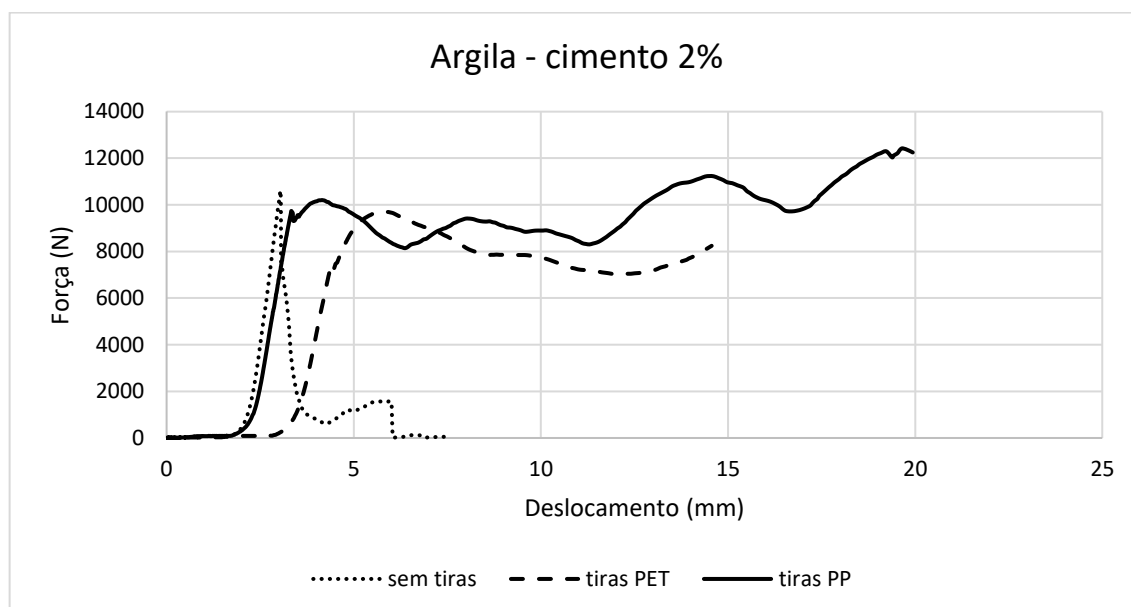


Figura 103 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.

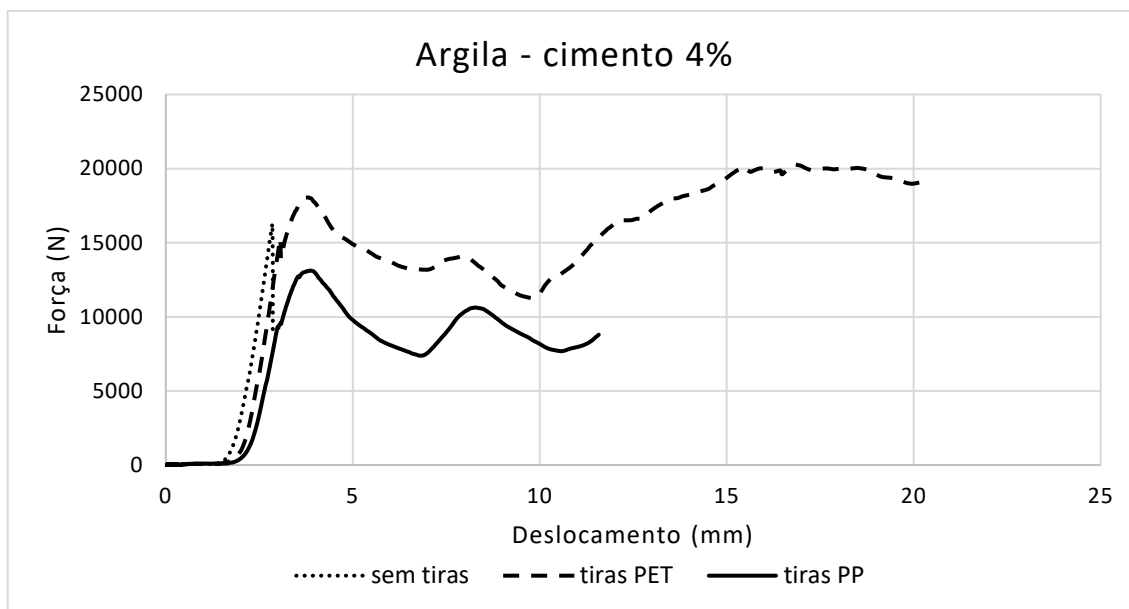


Figura 104 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.

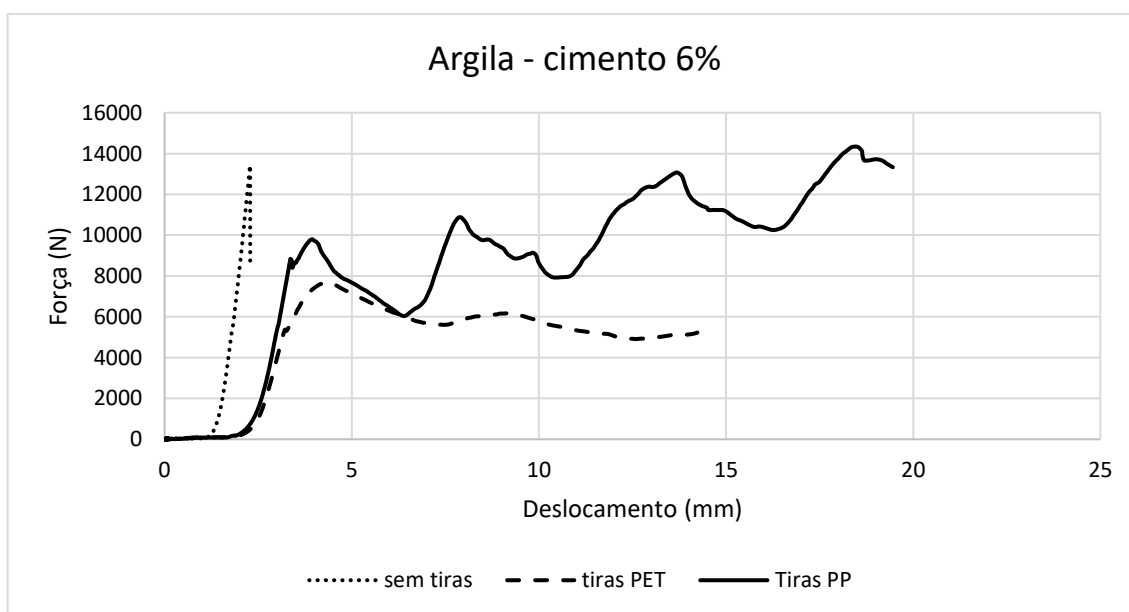
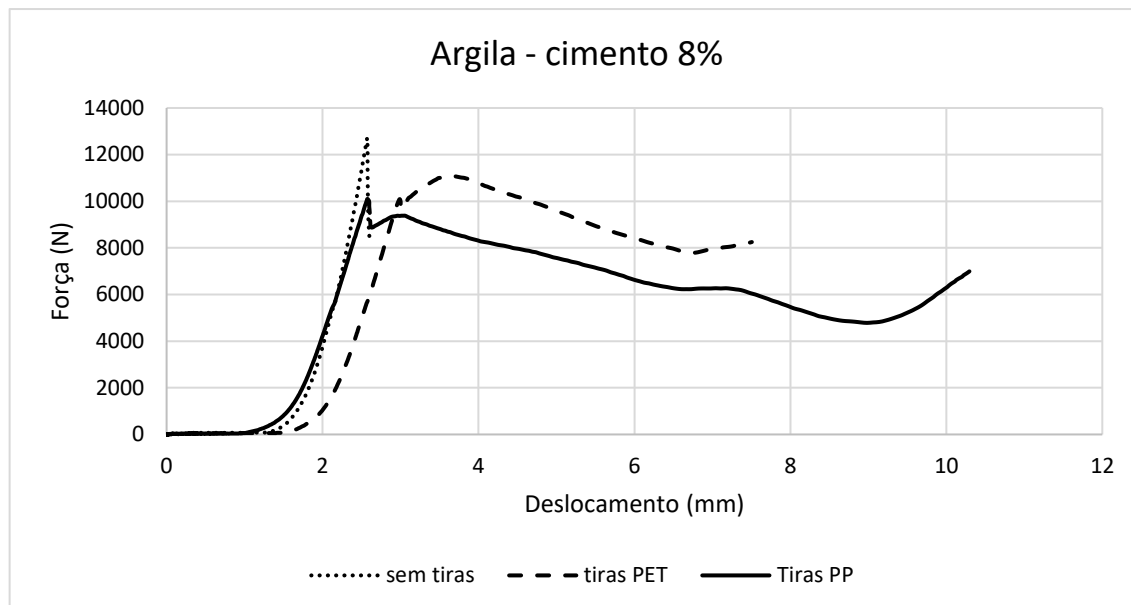


Figura 105 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo argiloso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.



Observou-se, inicialmente, a mudança no comportamento das curvas na inserção das tiras plásticas. Sem tiras, o solo apresentou um comportamento frágil, como espera-se que se comporte quando submetido a esse tipo de solicitação; tendo uma queda brusca na resistência após o pico onde ocorre a ruptura. Com o acréscimo de tiras, tanto PET quanto PP, nota-se que o comportamento muda, e passa a apresentar características mais dúcteis com deformação plástica, não possuindo uma queda brusca no valor da resistência após o pico de ruptura. Essa característica de alterar o comportamento da curva tensão *versus* deformação foi atribuída a presença das tiras plásticas nas amostras, visto que foi observado comportamento semelhante para as diferentes porcentagens de cimento analisadas. Além disso, a curva tensão *versus* deformação de polímeros como o PET e o PP apresentam uma região elástica inicial, seguida por uma região plástica, de forma que a ruptura ocorre de maneira dúctil. Dessa forma, entende-se que a curva obtida nos ensaios é representativa da mistura solo-tiras.

Obtidas as curvas de força *versus* deformação, foi possível calcular o valor da resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) conforme Equação 1.

Para uma melhor análise dos resultados, foram calculados valores de resistência à tração por compressão diametral para três pontos da curva força de compressão *versus* deformação, definidos com base no comportamento típico apresentado pelas curvas com a dição de tiras (tanto para PP quanto para PET).

Nota-se que nas curvas com adição de tiras ao solo, é nítido um primeiro pico onde acontece a ruptura, mas devido à ação das tiras, o valor da força logo volta a subir, atingindo um valor maior que o da ruptura inicial (esse comportamento é notado em todas as curvas com adição de tiras plásticas), dessa forma, definiu-se um segundo ponto para cálculo da resistência à tração, chamado de ponto de ruptura pós pico. Após esse segundo pico, nota-se também que as tiras agem de forma a manter unido o corpo de prova, de modo que continua resistindo às forças de compressão aplicadas até o momento que o ensaio foi interrompido (Figura 106), então, definiu-se um terceiro ponto, considerando uma deformação residual de 10 mm do corpo de prova, a fim de analisar as variações que acontecem na resistência à tração caso seja mantida a aplicação da carga no corpo de prova. A Figura 107 exemplifica os pontos que foram considerados para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral das amostras.

Figura 106 - Corpos de prova com solo argiloso após a finalização dos ensaios (a) sem tiras; (b) tiras PP; (c) tiras PET.

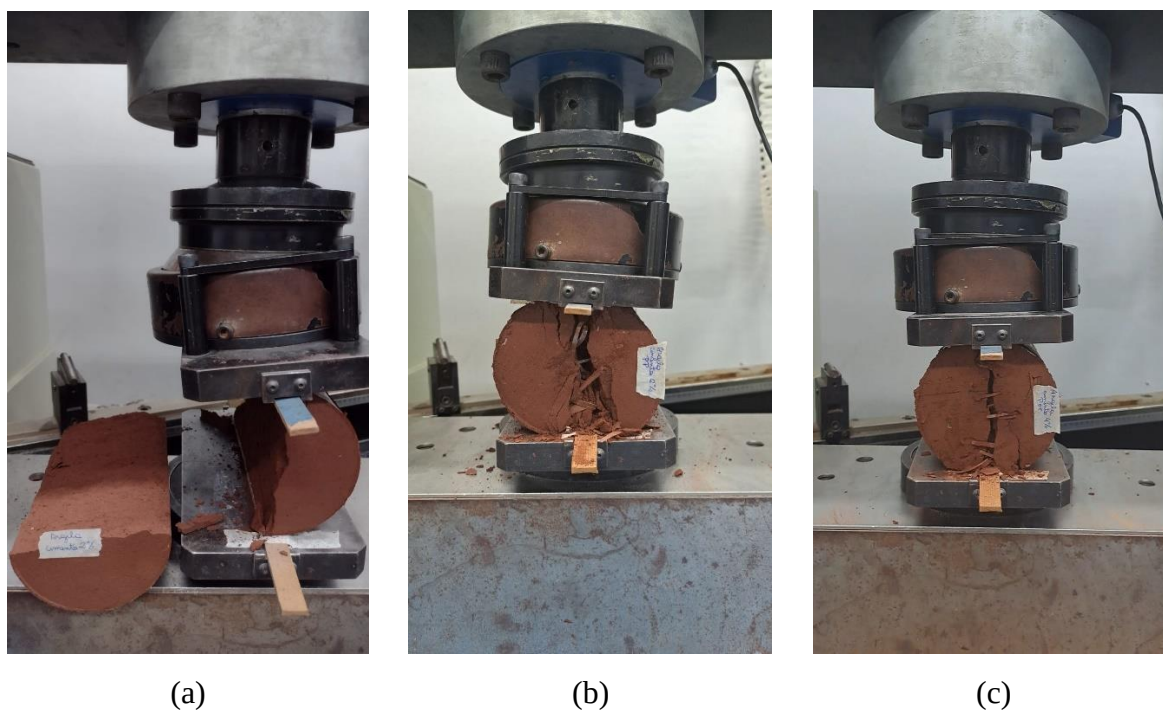
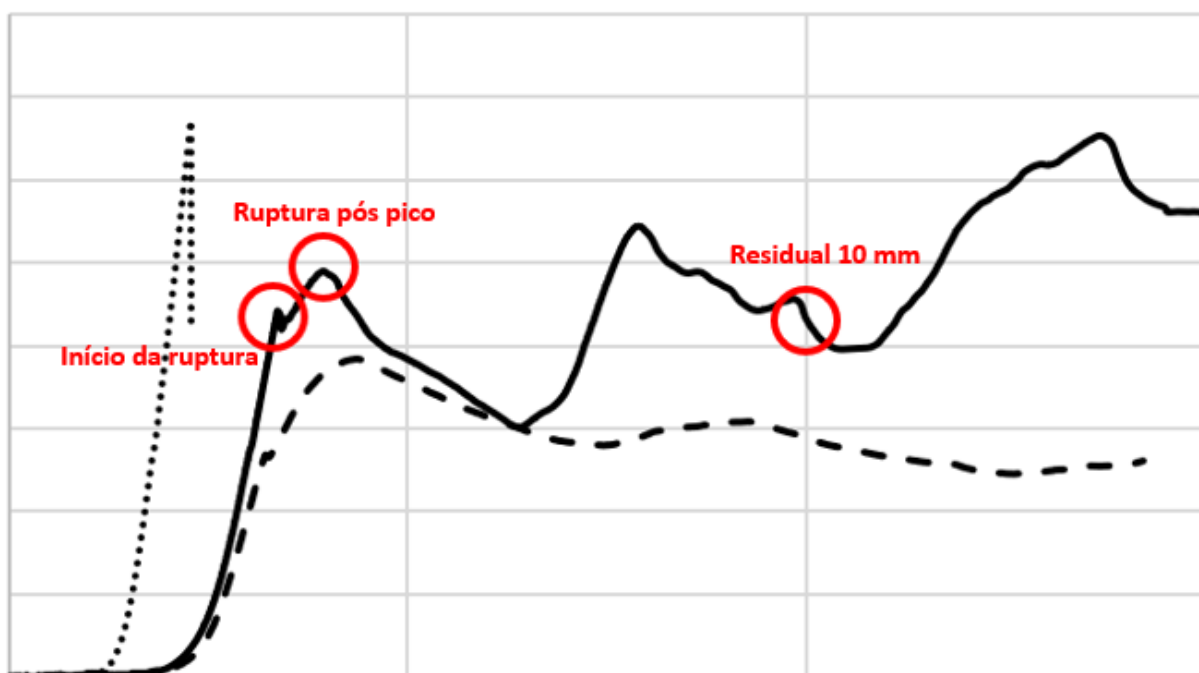


Figura 107 - Pontos considerados para cálculo da resistência à tração por compressão diametral.



Definidos estes pontos, foram calculados os valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}), apresentados nas Tabelas 28 a 31 e nas Figuras 108 a 111 para melhor comparação.

Tabela 28 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo argiloso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.

	Rcd - sem tiras (Mpa)	Rcd - PET (Mpa)	Rcd - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,338	0,237	0,310
Ruptura pós pico	-	0,309	0,325
Residual 10 mm	-	0,247	0,283

Figura 108 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.

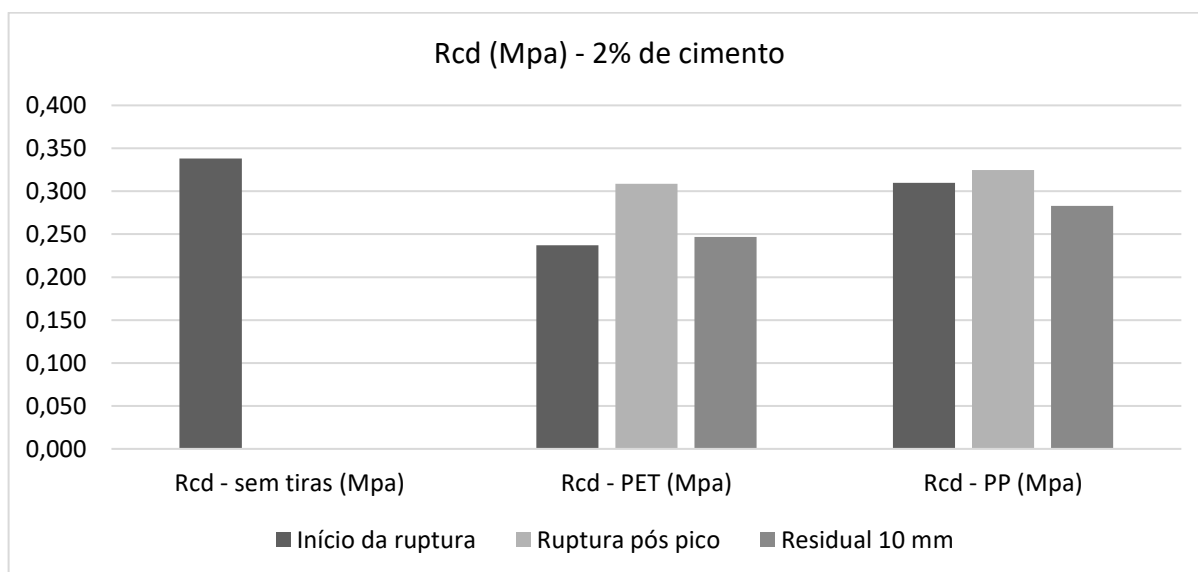


Tabela 29- Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.

	Rcd - sem tiras (Mpa)	Rcd - PET (Mpa)	Rcd - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,519	0,487	0,297
Ruptura pós pico	-	0,575	0,418
Residual 10 mm	-	0,368	0,262

Figura 109 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.

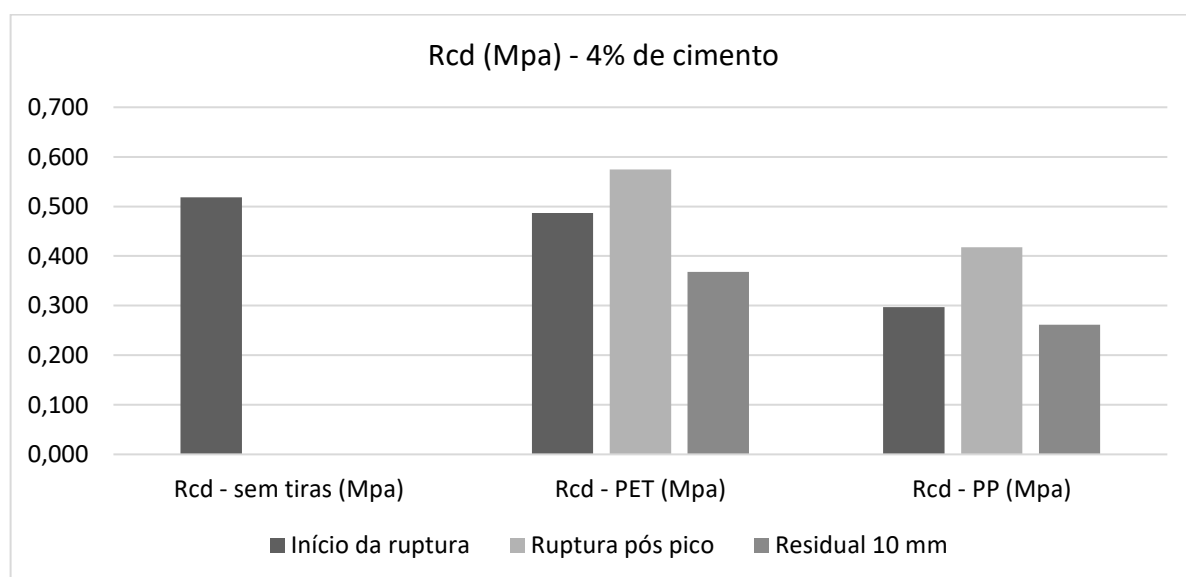


Tabela 30 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.

	Rcd - sem tiras (Mpa)	Rcd - PET (Mpa)	Rcd - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,427	0,171	0,282
Ruptura pós pico	-	0,245	0,312
Residual 10 mm	-	0,186	0,277

Figura 110 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.

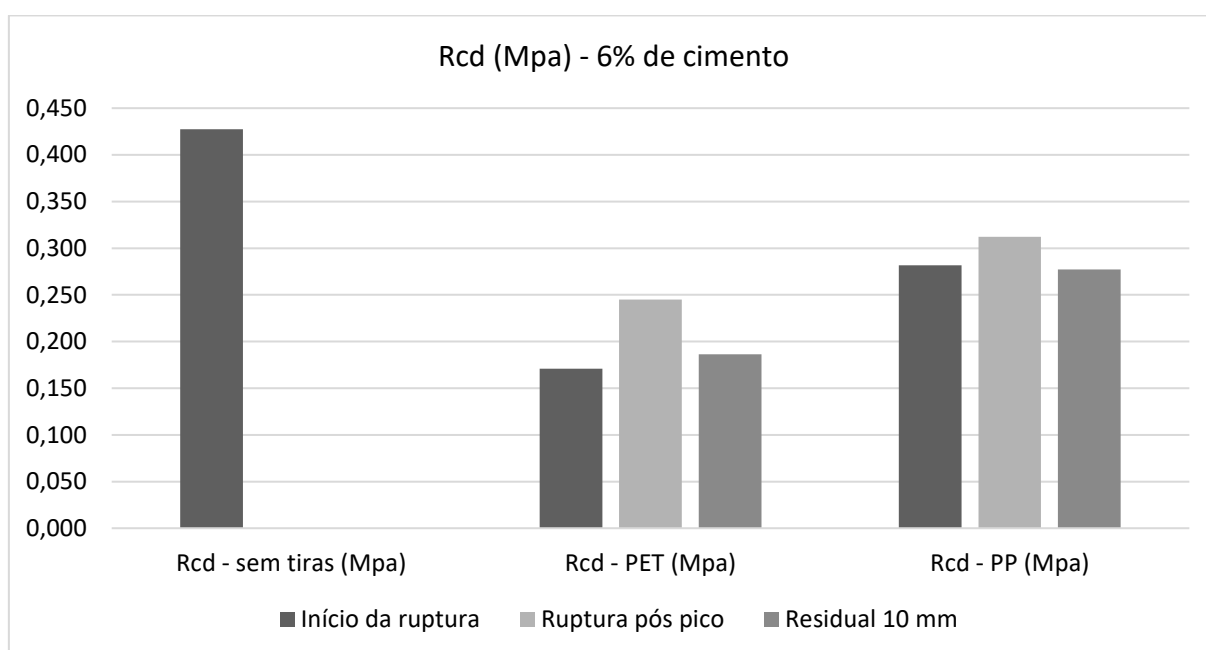
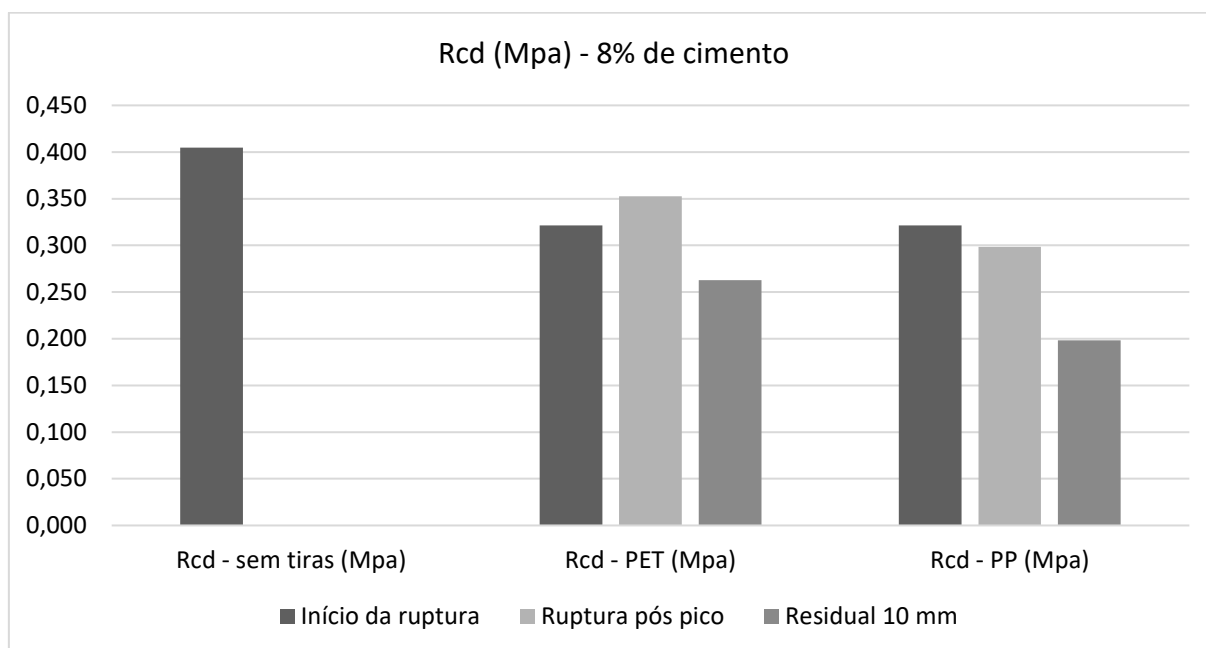


Tabela 31 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo argiloso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.

	Rcd - sem tiras (Mpa)	Rcd - PET (Mpa)	Rcd - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,405	0,321	0,322
Ruptura pós pico	-	0,353	0,299
Residual 10 mm	-	0,263	0,198

Figura 111 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo argiloso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.



Durante a moldagem dos corpos de prova, notou-se uma tendência de expansão das amostras com a adição de tiras, tanto PP quanto PET, o que gerou também um efeito de borda nos corpos de prova, fazendo com que as tiras mais superficiais ficassem expostas (Figura 112), gerando o que pareciam pontos de fragilidade. A dimensão maior das amostras foi positiva nesse sentido, pois minimiza esses efeitos de borda. Essas fissuras podem ter favorecido o menor valor do ponto considerado com o de ruptura inicial dos corpos de prova com tiras, quando comparado ao corpo de prova de controle, sem tiras.

A Figura 113 traz um resumo comparando as diferentes porcentagens de cimento analisadas para o solo argiloso, considerando o valor de ruptura (primeiro pico).

Tanto para o solo argiloso sem tiras plásticas tanto para o solo com tiras de PET, o teor de cimento de 4% da massa seca foi o que teve melhor desempenho no valor de R_{cd} , sendo considerado o teor ótimo. Já para o solo com tiras de PP, a variação foi pequena entre as porcentagens de cimento, ficando em torno de 0,3 Mpa, o teor de cimento igual a 8% foi ligeiramente superior que os demais para o valor de R_{cd} .

Figura 112 - Corpo de prova com tiras plásticas após moldagem. (a) solo argiloso; (b) solo arenoso.

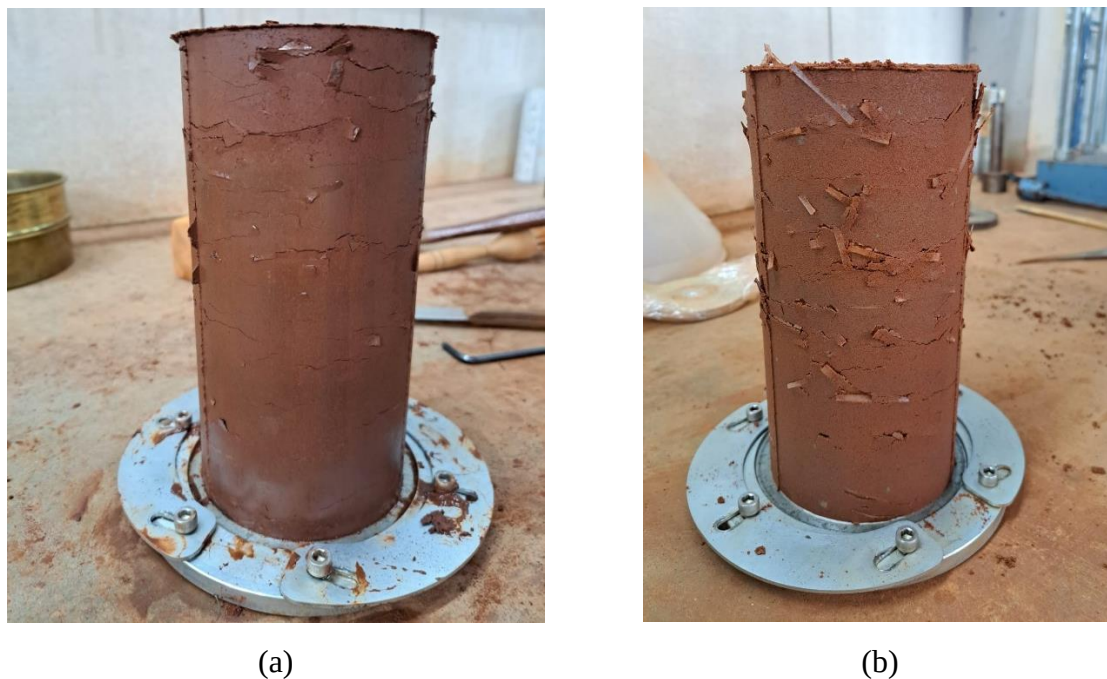
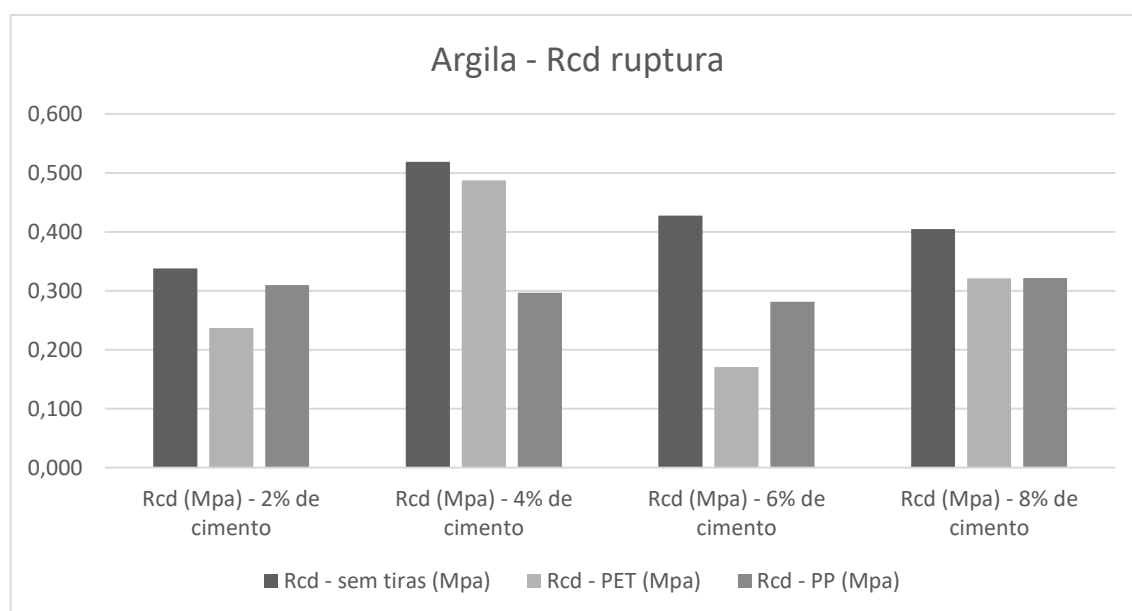


Figura 113 - Resumo dos valores de ruptura para diferentes porcentagens de cimento e misturas.



5.4.2 Solo arenoso

As Figuras 114 a 117 apresentam os resultados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral no solo arenoso com adição em massa de 2% a 8% de cimento. Analisou-se também a adição em massa seca de 2% de tiras de Polipropileno (PP) com 30 mm de comprimento e a adição em massa seca de 1,5% de tiras de PET com 20 mm de comprimento. Figura 114 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.

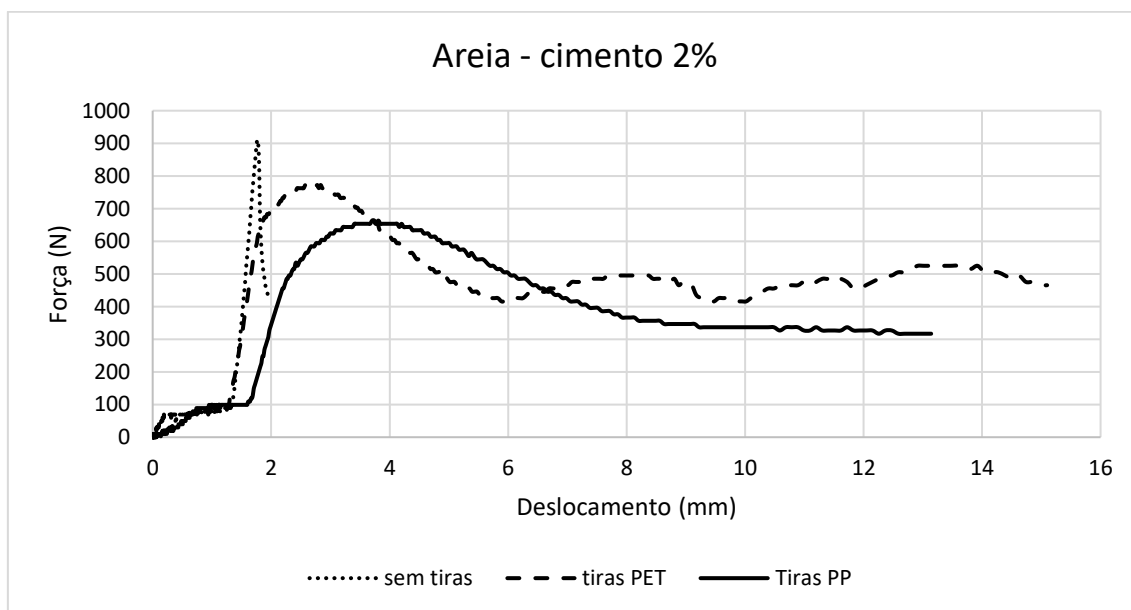


Figura 115 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.

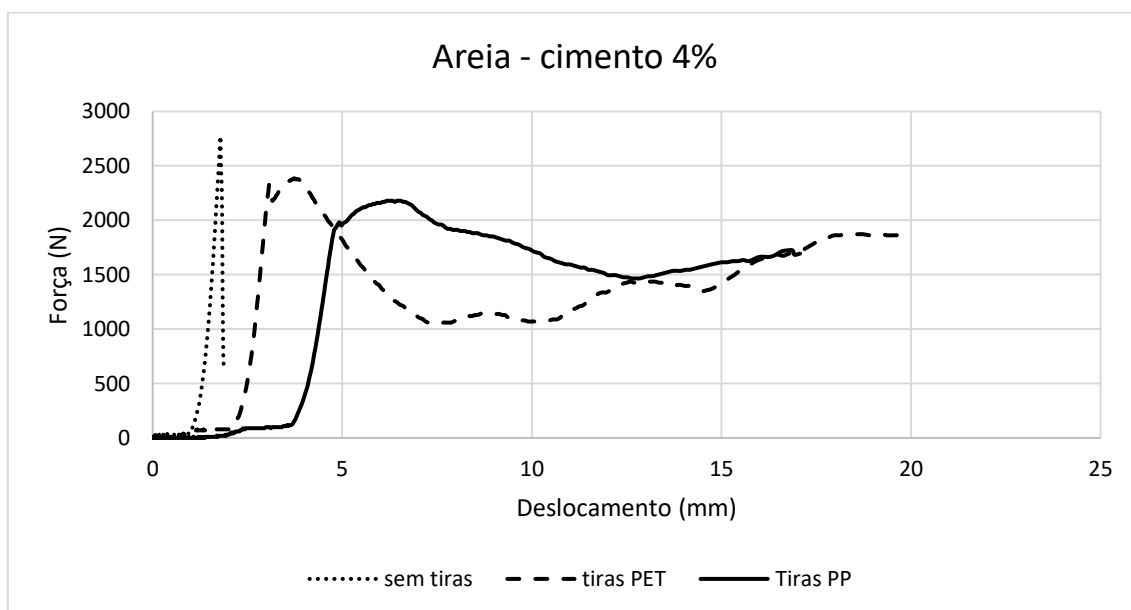


Figura 116 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.

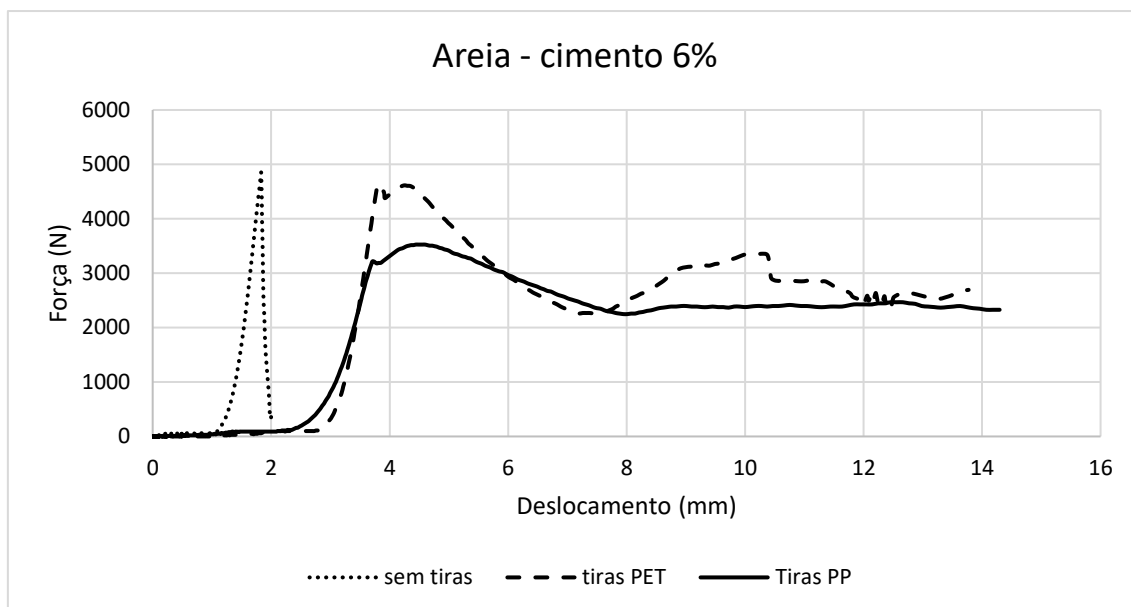
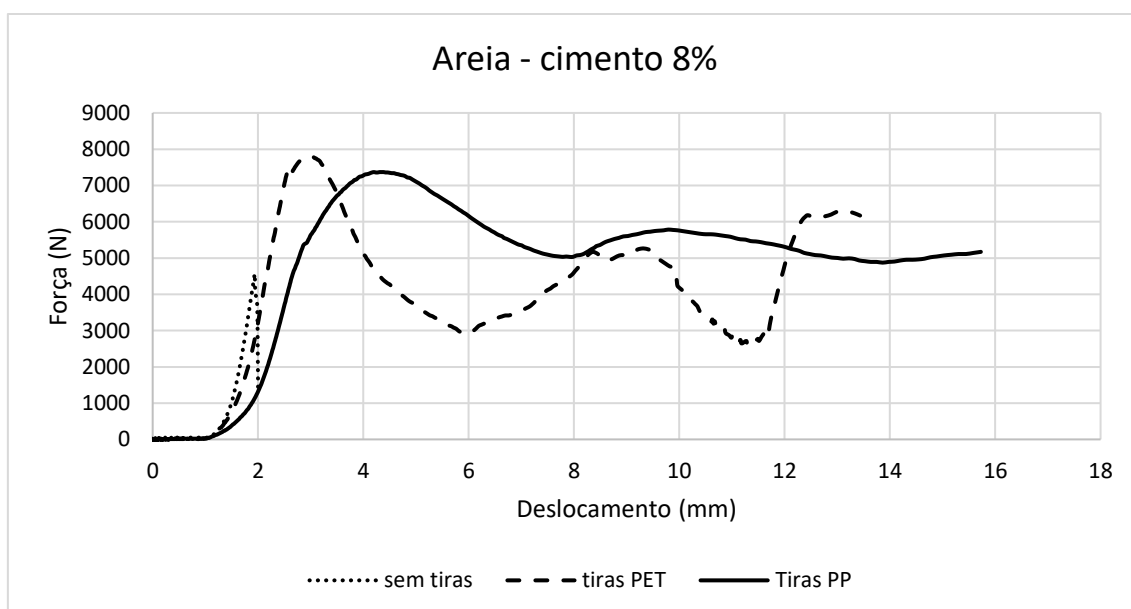


Figura 117 - Força de compressão aplicada em função do deslocamento horizontal do solo arenoso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.

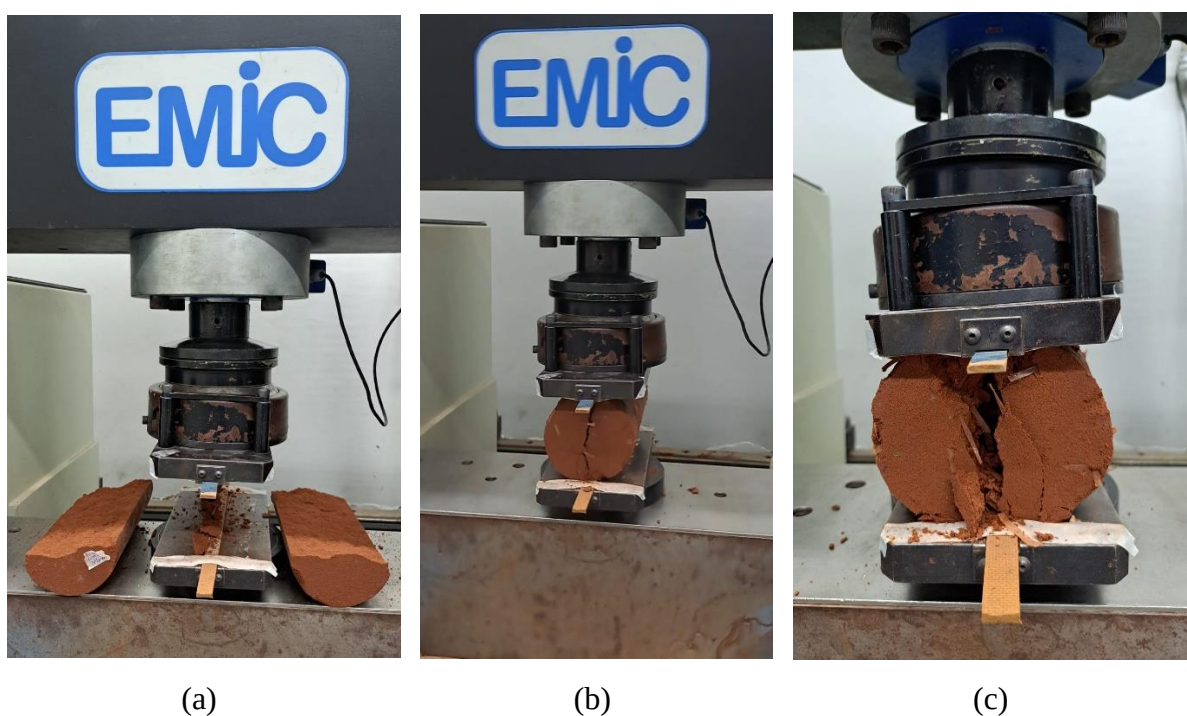


As curvas resultantes do ensaio para o solo arenoso apresentaram o mesmo comportamento observado para o solo argiloso. Passando de uma curva com características de material frágil do solo sem tiras para uma curva com características mais dúcteis para a mistura solo-tiras.

Obtidas as curvas de força *versus* deformação, foi possível calcular o valor da resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) conforme Equação 1.

Para uma melhor análise dos resultados, foram calculados valores de resistência à tração por compressão diametral para três pontos da curva força de compressão *versus* deformação, definidos com base no comportamento típico apresentado pelas curvas com adição de tiras (tanto para PP quanto para PET), conforme mostrado na Figura 107.

Figura 118 - Corpos de prova com solo arenoso após a finalização dos ensaios (a) sem tiras; (b) tiras PP; (c) tiras PET.



Definidos estes pontos, foram calculados os valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}), apresentados nas Tabelas 32 a 35 e nas Figuras 119 a 122 para melhor comparação.

Tabela 32 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo arenoso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.

	R_{cd} - sem tiras (Mpa)	R_{cd} - PET (Mpa)	R_{cd} - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,029	0,021	0,017
Ruptura pós pico	-	0,025	0,021
Residual 10 mm	-	0,013	0,011

Figura 119 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 2% de cimento, tiras PP e PET.

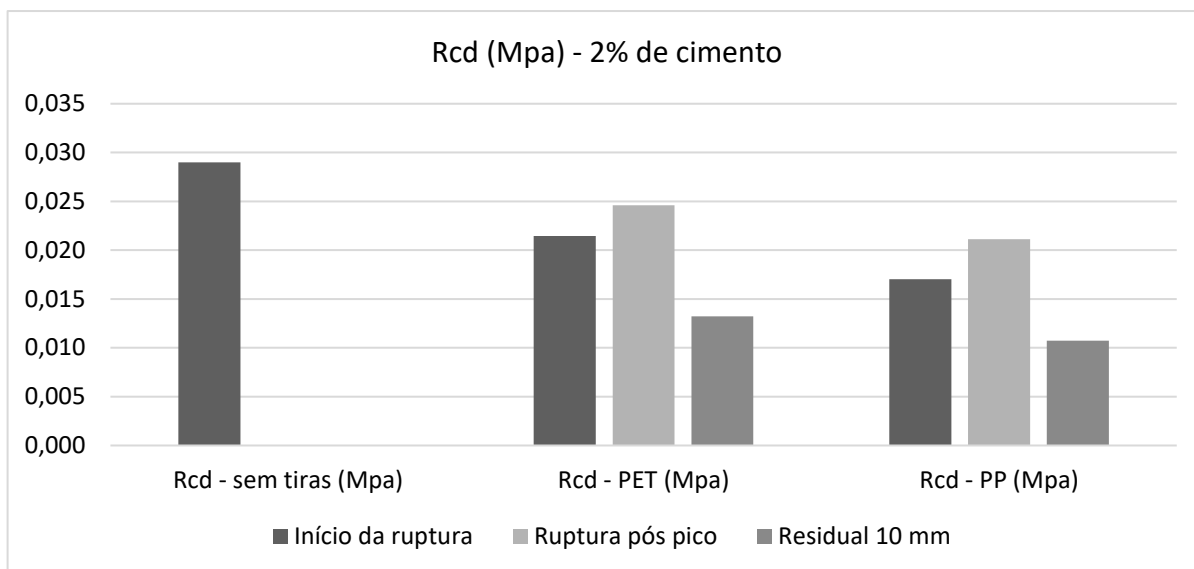


Tabela 33 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.

	Rcd - sem tiras (Mpa)	Rcd - PET (Mpa)	Rcd - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,088	0,074	0,063
Ruptura pós pico	-	0,076	0,069
Residual 10 mm	-	0,034	0,055

Figura 120 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 4% de cimento, tiras PP e PET.

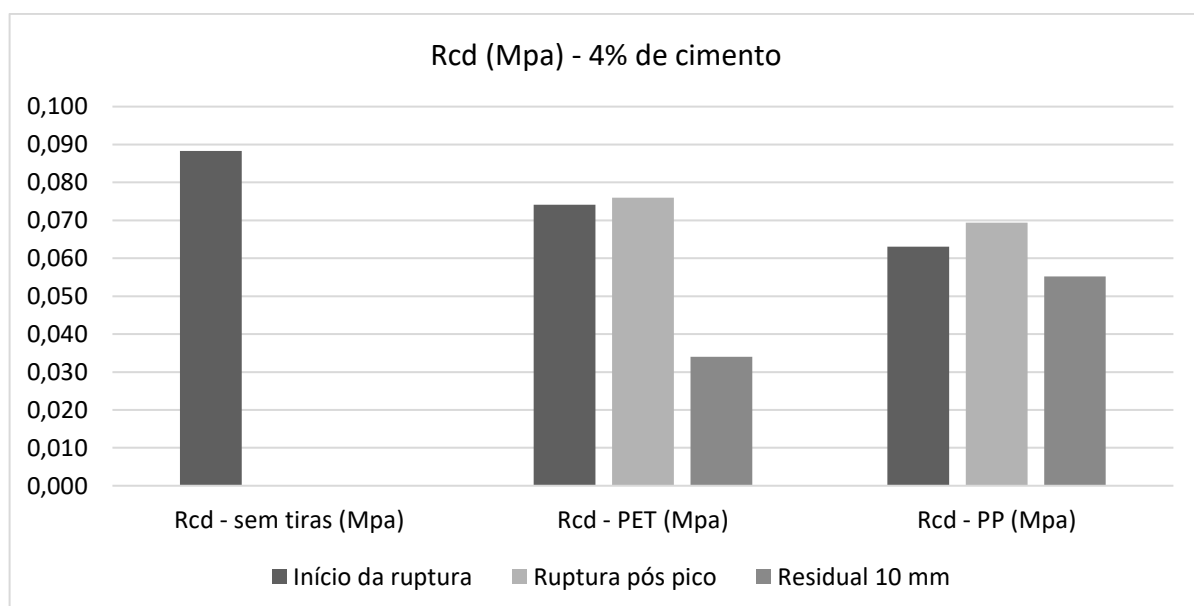


Tabela 34 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.

	Rcd - sem tiras (Mpa)	Rcd - PET (Mpa)	Rcd - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,154	0,146	0,102
Ruptura pós pico	-	0,147	0,112
Residual 10 mm	-	0,106	0,076

Figura 121 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 6% de cimento, tiras PP e PET.

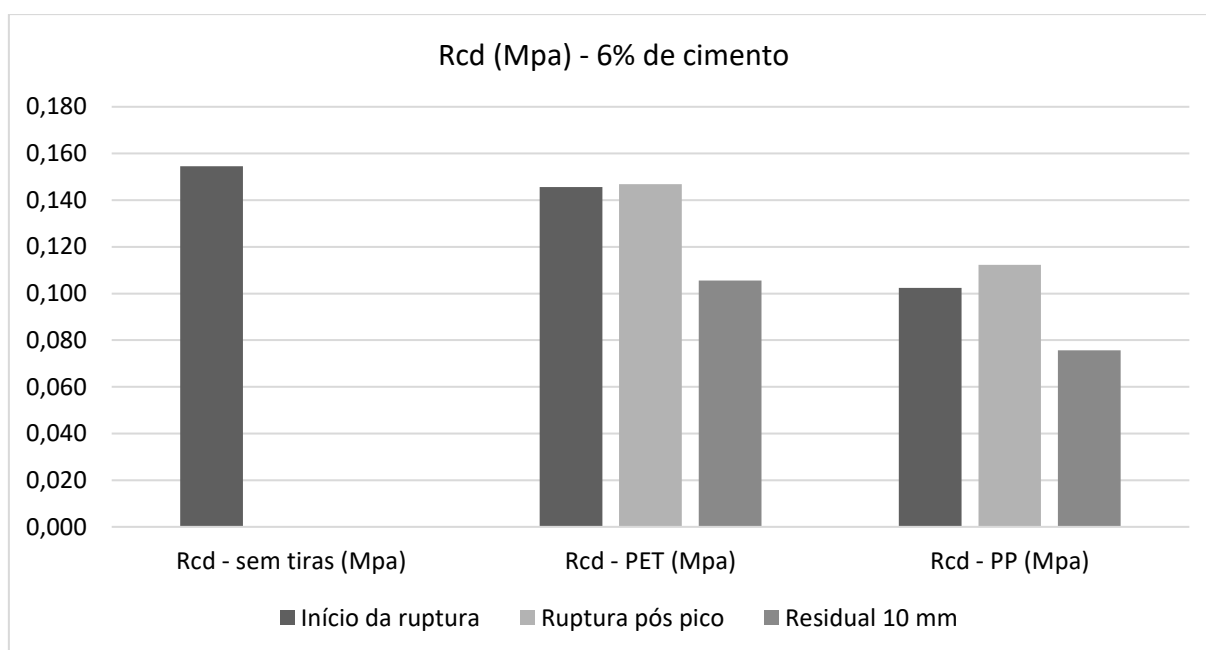
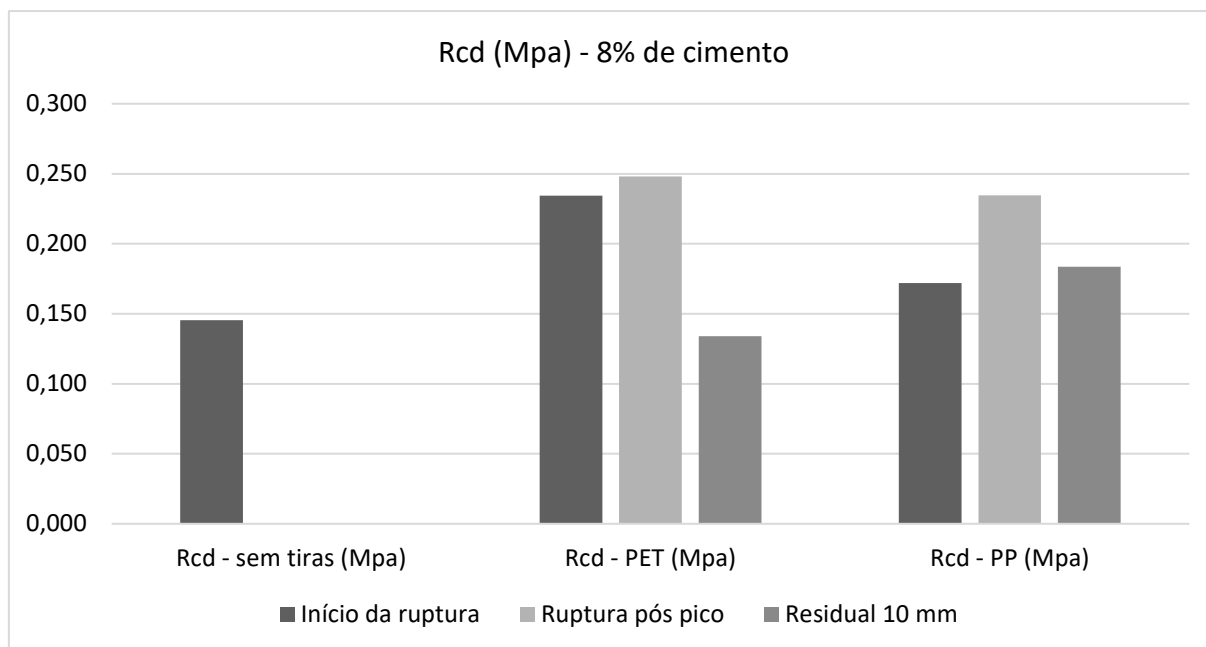


Tabela 35 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (Rcd) para solo arenoso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.

	Rcd - sem tiras (Mpa)	Rcd - PET (Mpa)	Rcd - PP (Mpa)
Início da ruptura	0,145	0,234	0,172
Ruptura pós pico	-	0,248	0,235
Residual 10 mm	-	0,134	0,183

Figura 122 - Valores de resistência à tração por compressão diametral (R_{cd}) para solo arenoso com adição de 8% de cimento, tiras PP e PET.



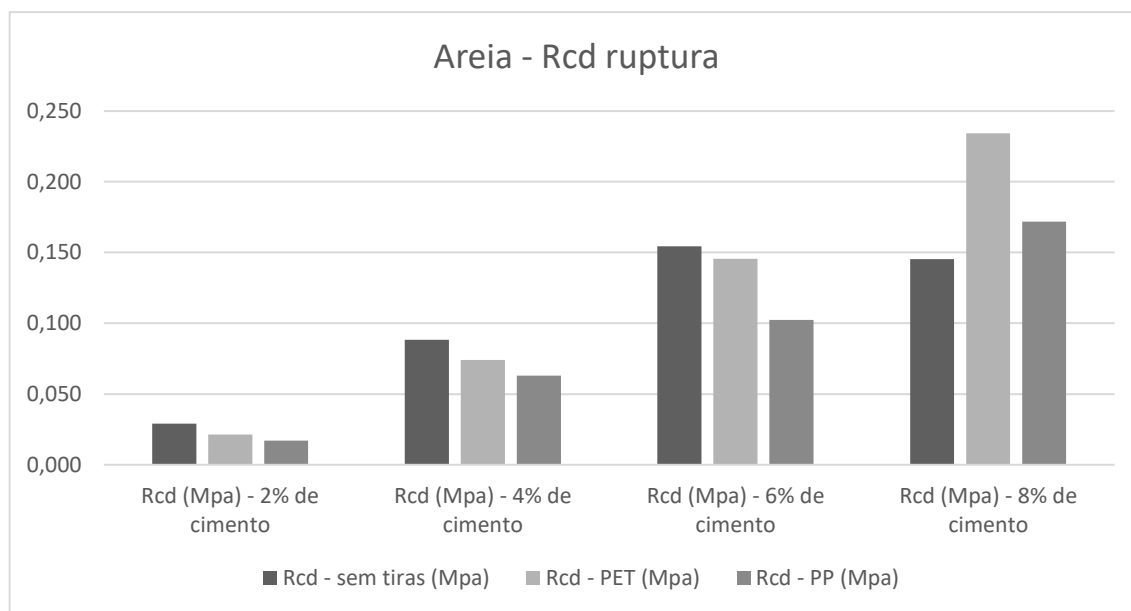
O solo arenoso apresentou comportamento semelhante ao solo argiloso, de forma que a análise a seguir engloba ambos os tipos de solo.

Não foram encontrados trabalhos na literatura que apresentam valores de resistência à tração por compressão diametral para solos semelhantes aos utilizados nessa pesquisa com adição de tiras plásticas. Entretanto, nota-se que de maneira geral, as tiras de PP e PET reduzem o valor de pico de resistência das amostras, mas impedem que o corpo de prova tenha uma ruptura brusca, como ocorre na amostra sem tiras. O solo ensaiado sem a adição de tiras plásticas apresenta uma ruptura brusca, que ocorre instantaneamente quando a tensão de ruptura é atingida.

Nas amostras de solo com adição de tiras PET e PP, observou-se que as tiras nas dimensões utilizadas para este corpo de prova, geraram o que parece ser um caminhamento preferencial por onde ocorre a fissura de ruptura por tração da matriz de solo, o que explica o valor reduzido de R_{cd} quando comparado ao solo sem tiras. O comportamento das tiras foi segurar o bloco da mistura solo-tiras para que a ruptura não ocorresse de forma brusca, então as tiras impedem que o maciço se desprenda imediatamente no momento da ruptura, permitindo que este se deforme antes de ocorrer o desprendimento do material.

A Figura 123 traz um resumo comparando as diferentes porcentagens de cimento analisadas para o solo arenoso, considerando o valor de início da ruptura (primeiro pico).

Figura 123 - Resumo dos valores de ruptura para diferentes porcentagens de cimento e misturas.



No solo arenoso, o comportamento para os diferentes teores de cimento mostrou-se mais regular, de modo que a adição de tiras PET mostrou-se mais interessante que a adição de tiras de PP. O teor de 8% de cimento em relação a massa seca foi o que apresentou melhor resultado no valor de *Rcd*, tendo uma ligeira diminuição, comparado ao teor de cimento inferior analisado (6%), apenas para o solo sem tiras, no qual o valor de *Rcd* manteve-se em torno de 0,15 MPa.

Diferente do observado nos teores de cimento entre 2% e 6%, a mistura com 8% de cimento apresentou valores superiores de resistência à tração nas amostras com adição de tiras PET e PP quando comparado à amostra sem tiras, todavia, como este foi um comportamento particular para apenas uma porcentagem de cimento, não é recomendado considerar o valor de resistência à tração maior do que a resistência do solo sem tiras para fins de dimensionamentos, garantindo a estabilidade do maciço.

Esta análise pode representar casos como de camadas de pavimentos expostos diretamente à ação de tráfego, sendo submetidos constantemente a ciclos de carga e descarga; visto que esse processo da aplicação de carga e descarga faz surgir fissuras e deformações, sendo as primeiras relacionadas ao esforço da tração indireta das camadas.

Como já citado anteriormente, Senez (2016) explica que o comportamento do solo reforçado pode ser definido em três etapas distintas, sendo que na primeira o comportamento do material é controlado basicamente pela matriz do solo; a segunda, em que o comportamento do material é controlado em conjunto, tanto pela tira quanto pela matriz de solo; e finalmente, na terceira etapa, o comportamento do material é controlado apenas pelas tiras.

Isso fica muito claro neste ensaio, onde o ponto definido como “início da ruptura” está relacionado ao colapso da matriz do solo; o ponto “ruptura pós pico” relaciona-se ao trabalho em conjunto, solo-tiras; e a partir do momento que o solo não atua mais contribuindo com a resistência do corpo de prova, as tiras passam a desempenhar este papel (Figura 107).

Zhu et al. (2014) apontam que a tração de uma fibra curta no solo é dividida em cinco fases consecutivas: a fase elástica pura inicial (Fase I); a fase de amolecimento elástico (Fase II); a fase pura de amolecimento (Fase III); a fase residual de amolecimento (Fase IV); e fase residual pura final (fase V). Essas variações no comportamento das tiras podem explicar as variações que acontecem na curva força *versus* deslocamento, que apresentaram comportamento semelhante à um carregamento cíclico.

A redução no valor de ruptura também pode ser explicada pela superfície lisa das tiras, que além de facilitar o deslizamento entre a matriz de solo e as tiras, quando submetido à esforços de tração, também gera caminhos ao longo do corpo de prova, facilitando o caminhar da fissura e, conseqüentemente, fazendo com que a ruptura do solo aconteça mais facilmente.

Dessa forma, com o colapso da matriz do solo, grande parte dos esforços que antes eram suportados por ele são transferidos para as tiras, reduzindo a queda de resistência pós-pico e fornecendo características mais dúcteis ao material, tanto para as tiras PET quanto para as tiras PP, em ambos os tipos de solo.

5.5 Considerações finais

Ensaaios de resistência à compressão simples foram realizados a fim de entender a alteração na resistência do solo em função da adição de tiras plásticas de PET e PP e de obter o teor ótimo da mistura solo-tiras, tanto para o solo arenoso quanto para o solo argiloso.

Para o solo arenoso com adição de tiras PET, observou-se maior resistência à compressão com a adição de tiras de 20 mm de comprimento misturadas na proporção de 1,5% da massa de solo seco, representando um aumento da resistência de 93% em relação ao solo sem adição de tiras. Para a adição de tiras PP, obteve-se a maior resistência com a adição de tiras de 30 mm e teor de 2,00% em relação à massa de solo, o que representa um aumento de 52,30% na resistência comparado ao solo arenoso ensaiado sem tiras. Tanto para tiras PET quanto PP, os maiores valores de resistência à compressão simples ocorreram abaixo da umidade ótima e, embora ambos os tipos de tiras tenham apresentado melhorias no solo, a mistura com tiras PET teve melhor desempenho.

Estudando o comportamento do solo argiloso, notou-se que, para a adição de tiras PET, a maior resistência à compressão simples foi obtida para a inclusão de tiras de 30 mm de comprimento misturadas na proporção de 1,5% da massa de solo, gerando um ganho de resistência de 65 kPa. Na inclusão de tiras PP de 30 mm na proporção de 1,5% obteve-se um ganho de resistência em torno de 250 kPa. Esse ganho, comparado ao solo sem tiras, foi cerca de 50% tanto para o solo arenoso quanto argiloso, para a adição de tiras PP. Esses teores, considerados valores ótimos, foram utilizados na realização dos demais ensaios para suas respectivas misturas.

O ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia mostrou melhora no valor do CBR do solo arenoso, tanto para a adição de tiras PET quanto para a adição de tiras PP, aumentando seu valor em 28% e 26% respectivamente. Entretanto, o solo argiloso não apresentou melhora no valor do CBR para a adição de ambas as tiras estudadas, tendo uma redução de até 8,8%. Além disso, notou-se que a adição de tiras afetou a expansão do solo argiloso, mostrando que o uso de tiras plásticas em solo argiloso nesse caso não é interessante para aplicações práticas.

Com base na metodologia desenvolvida por Hansen, 1959 para obtenção da espessura de camadas de pavimento, observou-se uma redução na espessura do subleito considerada de 18 cm com o solo natural para 10 cm, tanto para a adição de tiras PET quanto PP no solo

arenoso, essa redução se mostrou vantajosa e implica na redução de custos, materiais e tempo de execução de obras de pavimentação.

No ensaio de cisalhamento direto, observou-se que, para a maior tensão normal aplicada, o corpo de prova não apresentou variação de volume ao final da ruptura. O adensamento realizado antes de iniciar o ensaio do solo arenoso com tiras PET fez com que o corpo de prova tivesse índice de vazios maior que o crítico, o que explica a sua diminuição de volume na ruptura, enquanto que no corpo de prova moldado com solo arenoso e tiras PP, a tensão axial aplicada durante seu adensamento foi suficiente para que essa amostra atingisse seu índice de vazios crítico, sendo a variação de volume nula no momento da ruptura. Já para as duas tensões axiais menores, a areia, durante o ensaio de cisalhamento, encontrava-se com índice de vazios menor que o crítico. Com relação ao solo argiloso, para todos os níveis de carga axial aplicados, notou-se um aumento de volume dos corpos de prova na ruptura para ambos os tipos de tiras adicionadas; sendo o comportamento semelhante às areias compactas, o que permite concluir que o solo utilizado se trata de uma argila pré-adensada.

Ainda nesse ensaio, para ambos os tipos de solos estudados, nota-se melhora na resistência com a adição de tiras, tanto PET quanto PP, comparado ao solo puro, sem adição de tiras. No solo arenoso, o valor do intercepto de coesão diminui apenas para a mistura com tiras PP, enquanto o ângulo de atrito aumenta para as misturas com adição dos dois tipos de tiras analisados; como a parcela coesiva pouco influencia na resistência do solo arenoso, essa redução não impediu que o comportamento da mistura solo-tiras apresentasse uma melhora na resistência comparado ao solo puro. Na argila, valor do intercepto de coesão e do ângulo de atrito aumentaram em todas as situações estudadas, tanto para a adição de tiras PET quanto PP.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral mostrou uma redução no valor de ruptura por tração com a adição de tiras, de modo que foi observado um caminhamento preferencial por onde ocorreu a fissura de ruptura do corpo de prova com adição de tiras PET e PP; as superfícies lisas de ambos os tipos de tiras estudados também pode ter colaborado com essa redução. Entretanto, houve uma significativa mudança no comportamento de ruptura das amostras com a adição de tiras, as quais deixam de apresentar uma ruptura brusca no momento em que a tensão de ruptura é atingida e passam a apresentar um comportamento mais dúctil, tendendo a deformar mais antes que ocorra o desprendimento do maciço de solo. As tiras agem de forma a manter unido o corpo de prova.

Comportamento semelhante foi observado tanto para tiras PET quando PP, ademais, observou-se no solo arenoso um melhor desempenho de tiras PET quando comparado às tiras PP.

Portanto, pode-se concluir que o estudo apresenta uma alternativa de melhoria do solo que é tecnicamente viável, promovendo o reaproveitamento de garrafas PET e recipientes de Polipropileno, dando a esses materiais uma destinação ambientalmente correta, além de promover benefícios sociais e econômicos.

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados, as principais conclusões podem ser elencadas:

- A mistura de solo arenoso e PET resultou na maior resistência à compressão com a adição de tiras de 20 mm de comprimento na proporção de 1,5% da massa de solo seco, enquanto a mistura com PP obteve maior resistência com tiras de 30 mm e teor de 2,00% em relação à massa de solo;
- O solo arenoso teve um aumento de 93% na resistência à compressão em relação ao solo natural com a adição de tiras de garrafa PET, e 52% com a adição de tiras de Polipropileno;
- A mistura de solo argiloso com tiras PET resultou na maior resistência à compressão simples para tiras de 30 mm de comprimento misturadas na proporção de 1,5% da massa de solo, e para a mistura com PP, tiras de 30 mm na proporção de 1,5%;
- Considerando a adição de tiras de polipropileno (PP), o ganho de resistência à compressão foi cerca de 50% tanto para o solo arenoso quanto argiloso;
- O CBR mostrou melhora no solo arenoso, tanto para a adição de tiras PET quanto para a adição de tiras PP, aumentando seu valor em 28% e 26% respectivamente;
- O solo argiloso não apresentou melhora no valor do CBR para a adição de ambas as tiras estudadas, tendo uma redução de até 8,8%;
- No ensaio de cisalhamento direto, para ambos os tipos de solos estudados, nota-se melhora na resistência com a adição de tiras, tanto PET quanto PP, comparado ao solo puro, sem adição de tiras;
- No solo arenoso com adição de tiras PET, os valores de coesão e ângulo de atrito aumentam 9,4% e 4,9%, respectivamente. Para a adição de tiras PP, notou-se uma diminuição no valor da coesão de 51% e um aumento no ângulo de atrito de 12,6%;
- No solo argiloso os valores de coesão e ângulo de atrito aumentam 13,7% e 78,9% respectivamente, com adição de tiras PET. Para a adição de tiras PP, notou-se um aumento no valor da coesão de 29,9% e no ângulo de atrito de 55,7%;
- A resistência à tração por compressão diametral apresentou uma redução para a adição de ambos os tipos de tiras estudadas, entretanto as tiras alteraram o comportamento da curva força *versus* deformação, passando a impedir que o corpo de prova se desprendesse no momento da ruptura, permitindo que ocorressem maiores níveis de deformação.

7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho apresenta resultados para condições específicas de tipos de solo e materiais plásticos estudados, podendo fundamentar outras pesquisas sobre temas similares, dessa forma, são apresentadas sugestões para continuação deste trabalho, a saber:

- Encontrou-se no mercado um processo de transformação de resíduos de embalagens de polipropileno em grânulos para fins de reutilização e reciclagem, sugere-se que este tipo de material seja analisado como adição ao solo, visto que já possui um processo de fabricação em grande escala.
- A fim de aprofundar a possibilidade de utilização de tiras PET e PP em camadas de pavimentos, sugere-se que seja analisado seu comportamento quando submetido à carga cíclica, simulando tráfego de veículos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS E CONSULTADAS

ABIOGHILI, H.; HAMIDI, A. A constitutive model for evaluation of mechanical behavior of fiber-reinforced cemented sand. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11(2), p. 349-360, 2019.

ABIPET. **O PET é o plástico número um em reciclagem**. Associação Brasileira da Indústria PET. Disponível em: < <https://abipet.org.br/> > Acesso em: 25 maio.2024.

AKBULUT, S.; ARASAN, S.; KALKAN, E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. **Applied Clay Science**, 38(1-2), 23-32. 2007

AL-REFEAI, T.O. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. **Geotextiles and Geomembranes**,v. 10, n.4, p.319-333, 1991.

AL WAHAB, R. M. Fiber reinforced soils for application in earth structures. In Proc. of Geosynthetics' 95 Conf. (pp. 433-446). Industrial Fabric Association International. 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2004). **D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2013). **D2487**: Standard Practice for classification of Soils for Engineering purposes. 8 p.

AMETA, N. K.; PUROHIT, D. G. M.; WAYAL, A.S. Behavior of square footing on dune sand. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 3, n.2, p. 313-317, 2009.

ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; PAPALIANGAS, T. T.; KONSTANTINIDIS, D.; PATRONIS C. Shear Strength of Sands Reinforced with Polypropylene Fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**,v. 31, n.2, p. 401–423, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181** - Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502** - Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1995.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2017.

ATEŞ, A. Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC). **Composites Part B: Engineering**, v. 96, p. 295-304, 2016.

ATTOM, M.F.; AL-AKHRAS, N. M.; MALKAWI, A.I.H. Effect of fibres on the mechanical properties of clayey soil. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, v. 162, n. 5, p. 277-282, 2009.

BABU, G. L. S.; CHOUKSEY S. K. Stress–strain response of plastic waste mixed soil. **Waste Management**, v. 31, n. 3, p. 481-488, 2011.

BABU, G. L. S.; CHOUKSEY, S. K. Analytical model for stress-strain response of plastic waste mixed soil. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 16, n. 3, p. 219–228, 2012.

BAKEER, R. M.; ABDEL-RAHMAN, Ahmed H.; NAPOLITANO, Phillip J. Geotextile friction mobilization during field pullout test. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, n. 2, p. 73-85, 1998.

BENINI, K. C. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS / fibra da casca do coco verde e bagaço de cana de açúcar**. 2011. 125 f. Dissertação de Mestrado – UNESP, São Paulo, 2011.

BENSON, C. H., KHIRE, M. V. Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene. **Journal of Geotechnical Engineering**, 120(5), 838-855. 1994.

BORDOLOI, S. V.; KASHYAP, A.; GARG, S.; SREEDEEP, L. Measurement of mechanical characteristics of fiber from a novel invasive weed: A comprehensive comparison with fibers from agricultural crops. **Measurement**, v. 113, p. 62 –70, 2018.

BOTERO, E.; OSSA, A.; SHERWELL, G.; OVANDO-SHELLEY, E. Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, n. 4, p. 363-369, 2015.

CAIA, Y.; SHI, B.; CHARLES, W.W. N.; TANG C. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. **Engineering Geology**, v. 87, n. 3-4, p. 230-240, 2006.

CASTILHO, T. W.; RODRIGUES, R. A.; LODI, P. C. Use of Recycled Polyethylene Terephthalate Strips in Soil Improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 39, n. 8, p. 5943–5955, 2021.

CHOOBASTI, A. J.; Kutanaei, S. S.; Ghadakpour, M. Shear behavior of fiber-reinforced sand composite. **Arabian Journal of Geosciences**, 12(5), 157. 2019.

CHOUDHARY, A. K; JHA, J. N.; GILL, K. S. A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. **Emirates journal for engineering research**, v. 15, n. 1, p. 51-57, 2010.

CHU, J. **Solutions to Sustainability in Construction: Some Examples**. Procedia Engineering. **Anais...**2016.

CLARIA, J. J.; VETTORELO, P. V. Mechanical Behavior of Loose Sand Reinforced with Synthetic Fibers. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**, v. 53, n. 1, p. 12–18, 2016.

CONSOLI, N. C. et al. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 6, p. 462–472, 2002

CONSOLI, N. C. et al. Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites. **Ground Improvement**, v.8, n. 2, p. 77-90, 2004.

CONSOLI, N. C. et al. Effect of fiber reinforcement on the isotropic compression behavior of a sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 11, p. 1434-1436, 2005.

CONSOLI, N. C. et al. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v.28, n. 4, p. 344–51, 2010.

CPBR. **Recycling rate for PET bottles**. Council for PET Bottle Recycling. Disponível em: < <https://www.petbottle-rec.gr.jp/english/actual2.html> > Acesso em: 25 maio.2024.

CRISTELO, N.; CUNHA, V. M. C. F.; DIAS, M.; GOMES, A. T.; MIRANDA, T.; ARAÚJO, N. Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, n. 1, p. 1-13, 2015.

DANSO H.; MARTINSON D. B.; ALI M.; WILLIAMS J. B. Mechanisms by which the inclusion of natural fibres enhance the properties of soil blocks for construction. **Journal of Composite Materials**, v. 51, n. 27, p. 3835-3845, 2017.

DEJALLOUD H.; JAFARIAN Y. A micromechanical-based constitutive model for fibrous fine-grained composite soils. **International Journal of Plasticity**, v. 89, p. 150-172, 2016.

EICHHORN S. J; BAILLIE C. A; ZAFEIROPOULOS N.; MWAIKAMBO L.Y.; ANSELL M. P.; DUFRESNE A. Current international research into cellulosic fibres and composites. **Journal of materials Science**, v.39, n. 9, p.2107–31, 2001.

ESTABRAGH A. R.; BORDBAR A. T.; JAVADI A. A. Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, V. 29, n.5, p. 899-908, Set. 2011.

ESTABRAGH A.R.; NAMDAR P.; JAVADI A.A. Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber. **Geosynthetics International**, V. 19, n. 1, p. 85-92, 2012.

ESTABRAGH, A. R.; BORDBAR, A. T.; JAVADI, A. A. A study on the mechanical behavior of a fiber-clay composite with natural fiber. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 31, n. 2, p. 501-510, 2013.

FARUK O.; BLEDZKI A. K.; FINK H.; SAIN M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p.1552–1596, 2012.

FATHI, H.; CHENARI, R. J.; VAFAEIAN, M. Shaking Table Study on PET Strips-Sand Mixtures Using Laminar Box Modelling. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1-12. 2019.

FIDELIS M. E. A.; PEREIRA T. V. C.; GOMES O. F. M.; SILVA F. A.; FILHO R. D. T. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of materials reserch and technology**, v.2, n. 2, p. 149–157, 2013.

FINKLER M. **Desenvolvimento de compósitos com base de rejeito em tecidos de algodão e acrílico em matriz de polietileno de alta densidade**. 2005. 127 f. Dissertação de mestrado - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, 2005.

FLETCHER, C. S.; HUMPHRIES, W. K. California bearing ratio improvement of remolded soils by the addition of polypropylene fiber reinforcement. **Transportation Research Record**, n. 1295, 1991.

FROST, J. D., HAN, J. Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, 125(8), 633-640, 1999.

GASSAN J.; CHATE A.; BLEDZKI A. K. Calculation of elastic properties of natural fibers. **Journal of Materials Science**, v.36, p.3715–3720, 2001.

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of geotechnical engineering**, 109(3), 335-353, 1983.

GROGAN P.; JOHNSON G. Stabilization of high plasticity clay and silty sand by inclusion of discrete fibrillated polypropylene fibers for use in pavement subgrades. Technical report CPAR-GL-94-2. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.

GÜLLÜ, H.; KHUDIR A. Effect of freeze–thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime. **Cold Regions Science and Technology**, v. 106–107, p. 55-65, 2014.

HAFEZ, M.; MOUSA, R.; AWED, A.; EL-BADAWY, S. Soil Reinforcement Using Recycled Plastic Waste for Sustainable Pavements. In International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology, p. 7-20. Springer, Cham, 2018.

HANNANT, L. Fiber-reinforced cements and concretes. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behavior**. 2 ed. London: J. M. Illston/ E & FN Spon, p.359-403 1994.

HIGGINS, R. A. Properties of engineering materials. **London: E. Arnold**, 2 ed., 495p. 1994.

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

HOQUE, M. I.; HASAN, M.; DATTA, S. D. Effect of waste plastic strip on the shear strength and permeability characteristics of black cotton soil. **Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)**, v. 27, n. 2, p. 2019–2028, 2024.

IRAVANIAN, A.; ALI, S. **Soil Improvement Using Waste Plastic Bags: A Review Paper**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...**2020.

JEWELL, R. A.; WROTH, C. P. Direct shear tests on reinforced sand. **Geotechnique**, 37(1), p. 53-68, 1987.

JIANG, H.; CAI, Y.; LIU, J.. Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber. **Journal of Materials in civil Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1315-1322, 2010.

KARAGIANNIDIS, P. G.; STERGIOU, A. C.; KARAYANNIDIS, G. P. “Study of Crystallinity and Thermomechanical Analysis of Annealed Poly(ethylene terephthalate) Ffilms”, **European Polymer Journal**, v. 44, pp. 1475–1486. 2008

KHEDKAR, M. S.; MANDAL, J. N. Pullout behaviour of cellular reinforcements. **Geotextiles and geomembranes**, v. 27, n. 4, p. 262-271, 2009.

KUMAR, A.; WALIA, B. S.; BAJAJ A. Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. **Journal of materials in civil engineering**, 19(3), 242-248. 2007.

KUMAR, S.; TABOR, E. Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 10, 2003.

LOVISA, J.; SHUKLA, S.K.; SIVAKUGAN, N. Shear strength of randomly distributed moist fibre-reinforced sand. **Geosynthetics International**, v. 17, n. 2, p. 100-106, 2010.

MADDAH, H. A. Polypropylene as a promising plastic: A review. **American Journal of Polymer Science**, 6(1), p. 1-11, 2016.

MAHER, M. H.; HO, Y. C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. **Journal of Geotechnical Engineering**, 120(8), 1381-1393. 1994

MARÇAL, R. et al. Reinforcing effect of polypropylene waste strips on compacted lateritic soils. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 22, p. 1–16, 2020.

MARINI, J. **Influencia da nanocarga na estruturação, orientação e propriedades de filmes tubulares de nonocompósitos. PA6**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2012.

MASUD, M. A. A. et al. A critical review of sustainable application of biochar for green remediation: Research uncertainty and future directions. **Science of the Total Environment**, v. 904, 2023.

MICHALOWSKI R. L.; ZHAO A. Failure of Fiber-Reinforced Granular Soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 3, p. 226-234, 1996.

MIRZABABAEI M.; ARULRAJAH A.; HORPIBULSUK S.; ALDAVAD M. Shear strength of a fibre-reinforced clay at large shear displacement when subjected to different stress histories. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 5, p. 422-429, 2017.

MORACI, Nicola; RECALCATI, Piergiorgio. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 24, n. 4, p. 220-242, 2006.

MUNTOHAR, A. S. et al. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 9, p. 1260–1270, 2013.

NAKAMURA, T; MITACHI, T.; IKEURA, I. S. A. O. Direct shear testing method as a means for estimating geogrid-sand interface shear-displacement behavior. **Soils and Foundations**, v. 39, n. 4, p. 1-8, 1999.

NAPCOR. **Napcor's 2022 pet recycling report demonstrates bottle-to-bottle circularity continues on the rise**. National Association for PET Container Resources. 2024. Disponível em: <<https://napcor.com/news/2022-pet-recycling-report/>> Acesso em: 25 maio.2024.

NATARAJ, M. S.; MCMANIS, K. L. Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. **Geosynthetics International**, v. 4, n. 1, p. 65-79, 1997.

NETO F. L.; PARDINI L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. **Editora Blucher**, 2016.

NGUYEN L.; FATAHI B. Behaviour of clay treated with cement & fibre while capturing cementation degradation and fibre failure – C3F Model. **International Journal of Plasticity**, v. 81, p. 168-195, 2016.

ÖZKUL, Z. H.; BAYKAL, G. Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading. **Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering**, v. 133, n. 7, p. 767-781, 2007.

PARK S.; KIM Y.; CHOI S.; SHIN E. Unconfined compressive strength of cemented sand reinforced with short fibers. **Journal of the korean society of civil engineers**, v. 28, n. 4, p.213–20, 2008.

PARK S. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 2, p. 162-166, 2009.

PARK S. Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. **Construction and Building Materials**. Volume 25, n. 2, p. 1134-1138, 2011.

PARKA T.; TAN A. Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 4, p.348–361, 2005.

PEDDAIAH, S.; BURMAN, A.; SREEDEEP, S. Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 36, n. 5, p. 2907–2920, 2018.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PLÉ O.; LÊ T.N.H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty Clay. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 32, p. 111-116, 2012.

ROCHA, S. **Avaliação da influência de fibras de polipropileno na resistência efetiva de um solo argiloso**. 2019. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, campus 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, pp. 121-132. 2009

ROWELL R. M. Natural fibres: types and properties. In: **Properties and performance of natural-fibre composites**. Woodhead publishing, p. 3-66. 2008.

RUSSO, F.; ORETO, C.; VEROPALUMBO, R. Promoting resource conservation in road flexible pavement using jet grouting and plastic waste as filler. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 187, 2022.

SALAZAR, L. A.; DIAZ, F. R.; RAMIREZ, G. D. **Shear strength of a reinforced clayey soil with crushed polyethylene terephthalate**. 2019 Congreso Internacional de Innovacion y Tendencias en Ingenieria, CONIITI 2019 - Conference Proceedings. **Anais...2019**.

SANTONI, L.; WEBSTER, L. Airfields and road construction using fiber stabilization of sands. **Journal of transportation engineering**, v. 127, n. 2, p. 96-104, 2001.

SENEZ, P.; CASAGRANDE, M. **Evaluation of load-settlement behavior of a Polyethylene Terephthalate (PET) fibers reinforced sand under plate load tests**. ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2017, Pages 505-508. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE 2017; Coex Convention Center Seoul; South Korea; 17 September 2017 through 22 September 2017.

SHAH, S. P. Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrix?. **Materials Journal**, 88(6), 595-602. 1991.

SHEIKH, F. et al. PET waste management in Pakistan through use of PET shreds as additive in backfill soil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 10, 2023.

SIEIRA, A. C.; GERSCOVICH, D.; SAYAO, A. Displacement and load transfer mechanisms of geogrids under pullout condition. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 4, p. 241-253, 2009.

SOLTANI-JIGHEH, H. Compressibility and shearing behavior of clayey soil reinforced by plastic waste. **International Journal of Civil Engineering**, 14(7), 479-489. 2016.

SUKONTASUKKUL, P.; JAMSAWANG, P. Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil–cement column. **Construction and Building Materials**. Volume 29, p. 201-205, 2012.

SYDENSTRICKER, T. H.; MOCHNAZ, S.; AMICO, S. C. Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. **Polymer testing**, v.22, n. 4, p. 375–80, 2003.

TAGNIT-HAMOU, A.; VANHOVE, Y.; PETROV, N. Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes. **Cement and concrete research**, 35(2), 364-370. 2005

TANG, C.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, n. 3, p. 194-202, 2007.

TANG, C.; SHI, B.; ZHAO, L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 1, p. 54-62, 2010.

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

THONG, C.C.; TEO, D.C.L.; NG, C.K. Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 172-180, 2016.

TINGLE, S.; SANTONI, S.; WEBSTER, L.; Full-scale field tests of discrete fiber-reinforced sand. **Journal of transportation engineering**, v. 128, n. 1, p. 9-16, 2002.

TUTUMLUER, E.; KIM, I.; SANTONI, L. Modulus anisotropy and shear stability of geofiber-stabilized sands. **Transportation research record**, v. 1874, n. 1, p. 125-135, 2004.

VIEIRA, C. S.; LOPES, M. D. L.; CALDEIRA, L. M. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests. **Geosynthetics International**, v. 20, n. 1, p. 26-38, 2013.

WANG, X. et al. Surficial soil stabilization against water-induced erosion using polymer-modified microbially induced carbonate precipitation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 10, 2018.

WANG, Y. et al. State-of-the-art review of soil erosion control by MICP and EICP techniques: Problems, applications, and prospects. **Science of the Total Environment**, v. 912, 2024.

WHEELER, P. Earth bound: reinforced soil and BS8006. Ground engineering, reinforcement soil supplement, London, UK., p. 3-5, 1996.

WWF. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico**. World Wide Fund For Nature. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/wwf_brasil/wwf_mundo/wwf/> Acesso em: 25 maio.2024.

YETIMOGLU T.; SALBAS O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. **Geotextiles and Geomembranes**, 21(2), 103-110. 2003.

YILMAZ Y. Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil. **Engineering geology**, v. 188, p. 168-177, 2015.

XUE, G.; YILMAZ, E.; SONG, W.; CAO, S. Fiber length effect on strength properties of polypropylene fiber reinforced cemented tailings backfill specimens with different sizes. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020.

ZHAO, J.-J. et al. Unconfined compressive strength of PET waste-mixed residual soils. **Geomechanics and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 53–66, 2015.

ZHAO, L. S.; ZHOU, W. H.; SU, L. J.; GARG, A.; YUEN, K. V. Selection of Physical and Chemical Properties of Natural Fibers for Predicting Soil Reinforcement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, 2019.

ZHU, Hong-Hu et al. Modeling the pullout behavior of short fiber in reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 42, n. 4, p. 329-338, 2014.

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