



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades



Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**MAITÊ ROCHA SILVEIRA**

**EFEITO DA INCLUSÃO DE TIRAS POLIMÉRICAS DE POLIETILENO  
TEREFTALATO E DA ADIÇÃO DE CIMENTO NA RESISTENCIA  
MECÂNICA DE SOLO ARENOSO LATERÍTICO**

Bauru  
2019

**MAITÊ ROCHA SILVEIRA**

**EFEITO DA INCLUSÃO DE TIRAS POLIMÉRICAS DE POLIETILENO  
TEREFTALATO E DA ADIÇÃO DE CIMENTO NA RESISTENCIA  
MECÂNICA DE SOLO ARENOSO LATERÍTICO**

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Lodi

Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Natália de Souza Correia

Silveira, Maitê Rocha.

Efeito da inclusão de tiras poliméricas de polietileno tereftalato e da adição de cimento na resistência mecânica de solo arenoso laterítico/ Maitê Rocha Silveira, 2019  
117 f.

Orientador: Paulo César Lodi

Co-orientadora: Natália de Souza Correia

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Solo com tiras. 2. Solo com cimento 3. Solo com cimento e tiras. 4. Resistência ao cisalhamento. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MAITÊ ROCHA SILVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 29 dias do mês de novembro do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO CESAR LODI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO do(a) Engenharia Civil e Ambiental / Universidade de Brasília, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MAITÊ ROCHA SILVEIRA, intitulada **EFEITO DA INCLUSÃO DE TIRAS POLIMÉRICAS DE POLIETILENO TEREFALATO E DA ADIÇÃO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLO ARENOSO LATERÍTICO**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO CESAR LODI 

Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES 

Prof. Dr. GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO 



**DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais Deise e Alex.*

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, Alex Niuri Silveira Silva, Deise Cristiane Rocha Toledo, Dana Rocha Silveira e ao meu companheiro Victor Luan Caciatore de Souza, meus sinceros agradecimentos por todo apoio, amor e incentivo, sem vocês este trabalho não seria possível.

Ao Prof. Dr. Paulo César Lodi, pela orientação, constante incentivo desde a graduação, conhecimento compartilhado e dedicação dispensada a este trabalho.

A Prof<sup>ª</sup>. Dra. Natália de Souza Correia pela orientação e contribuições a este trabalho.

A colega e amiga, Gabriela Bolini pelo auxílio na realização dos ensaios de laboratório.

Aos técnicos Gustavo Pinheiro e Sérgio Gimenez Junior, do Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP de Bauru, pelo apoio na prática de ensaios de laboratório.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia de Bauru, pela oportunidade concedida.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para tornar a realização desta pesquisa possível.

## RESUMO

SILVEIRA, M. R. (2019) **Efeito da inclusão de tiras poliméricas de polietileno tereftalato e da adição de cimento na resistência mecânica de solo arenoso laterítico**. Bauru, 117 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

A proposição de uso de materiais alternativos na construção civil que busquem reduzir a produção de resíduos ou utilizar resíduos anteriormente gerados mostra-se cada vez mais necessária, uma vez que a indústria da construção civil situa-se hoje como uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais. Dessa forma, este trabalho avaliou os efeitos que a inclusão de tiras poliméricas de polietileno tereftalato (PET) cortadas a partir de garrafas plásticas descartadas, e de cimento geram na resistência mecânica de um solo arenoso retirado da região de Bauru (SP). Foram realizados ensaios de resistência uniaxial em solo puro e com a inclusão aleatória de tiras de PET em diferentes comprimentos e porcentagens. Além dos ensaios de resistência não confinada, foram realizados também ensaios de compactação com adições de cimento e com adições de tiras de PET, a fim de se analisar os efeitos destas inclusões aos parâmetros compactação da matriz arenosa. Por fim, foram realizados também ensaios de cisalhamento direto em compósitos de solo-tira, solo-cimento e em compósitos de solo-cimento-tira, tornando possível a avaliação dos efeitos individuais de cada tipo inclusão na resistência ao cisalhamento da matriz. Em relação à resistência uniaxial notou-se o aumento da resistência da matriz arenosa devido à inclusão de tiras, independente do tamanho e porcentagens analisadas. Quanto aos ensaios de cisalhamento direto, a adição de cimento foi efetiva aumentando tanto a coesão, quanto o ângulo de atrito do solo em grandes proporções. A adição de tiras ao compósito de solo-cimento, por sua vez, teve seu efeito mais pronunciado no aumento da coesão do solo, apresentando frequentemente diminuição do ângulo de atrito. De modo geral, a adição de tiras e de cimento ao solo arenoso mostrou-se uma opção interessante para o aumento da resistência do solo analisado, podendo se mostrar vantajosa quando aplicada em fundações superficiais, estabilidade de taludes, em barragens de terra, e em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.

**Palavras-chave:** Solo-Tira, Solo-Cimento, Solo-Cimento-Tira, Resistência ao Cisalhamento, Parâmetros de Compactação.

## ABSTRACT

SILVEIRA, M. R. (2019) **Effect of polyethylene terephthalate polymeric strips and cement's inclusion on the mechanical strength of a lateritic sandy soil**. Bauru, 117 p. Dissertation (Master Degree) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

The proposition of using alternative materials in construction that seek to reduce waste production or use previously generated waste is becoming increasingly necessary, as the construction industry is today one of the largest consumers of natural resources. Thus, this work evaluated the effects that the inclusion of polyethylene terephthalate (PET) strips cut from waste plastic bottles, and cement generate on the mechanical strength of a sandy soil from Bauru (SP). Unconfined strength tests were performed in pure soil and with the random inclusion of PET strips in different lengths and percentages. In addition to the unconfined strength tests, were also performed compaction tests with cement additions and with addition of PET strips, in order to analyze the effects of these inclusions on the sandy soil. Finally, direct shear tests were also performed on soil-strip, soil-cement and soil-cement-strip composites, making it possible to evaluate the individual effects of each inclusion on the shear strength of the analyzed soil. Regarding the uniaxial resistance, the soil resistance increased due to the inclusion of strips, regardless of the size and percentages analyzed. As for the direct shear tests, the cement addition was effective increasing both the cohesion and the soil friction angle in large proportions. The addition of strips to the soil-cement composite had its most pronounced effect on increasing soil cohesion, often reducing the friction angle. In general, the addition of strips and cement to the sandy soil proved to be an interesting option for increasing the resistance of the analyzed soil, presenting high application potential of these materials.

**Keywords:** Soil-Strip, Soil-Cement, Soil-Cement-Strip, Shear Strength, Compaction Parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Disposição de uma fibra entre uma fissura.....	27
Figura 3.2: Efeito da orientação das fibras sobre o acréscimo de resistência ao cisalhamento de um compósito.....	30
Figura 3.3: Imagens microscópicas de: (a) solo; (b) solo com adição de 10% de cimento; (c) solo e 0,25% de fibras; (d) solo, 10% de cimento e 0,25% de fibras.....	40
Figura 3.4: Quantidade (em porcentagem) de indústrias brasileiras recicladoras de PET com mais de 5 anos de atividade.....	42
Figura 3.5: Quantidade (em porcentagem) de indústrias brasileiras recicladoras de PET que pretendiam investir na ampliação de sua produção.....	43
Figura 3.6: Quantidade (em Ktons) de PET reciclado no Brasil.....	43
Figura 4.1: Imagem de satélites do ponto de coleta das amostras em Bauru- SP. Coordenadas 22°21'6.03"S; 49°01'57.68"O.....	45
Figura 4.2: Curvas granulométricas obtidas em ensaios com e sem o uso de defloculantes.....	46
Figura 4.3: Curva de compactação na energia Proctor normal, referente ao solo de Bauru (SP).....	46
Figura 4.4: Etapas da preparação das fibras PET de 20 mm, a partir da reutilização de garrafas de Coca- Cola.....	49
Figura 4.5: Solo utilizado em ensaio de compactação (a) após a secagem ao ar (b) após adição de cimento em porcentagem de 10% em relação à massa seca do solo.....	52
Figura 4.6: Solo homogeneizado após adição de cimento e água em quantidades previamente calculadas no ensaio de compactação.....	52
Figura 4.7: Procedimentos executados em ensaio de compactação, evidenciando (a) molde cilíndrico acoplado à base utilizado para compactação do corpo de prova (b) corpo de prova após ser feita sua extração do molde.....	52
Figura 4.8: Detalhe da adição de fibras ao solo em ensaio de resistência uniaxial.....	53
Figura 4.9: Ensaio de resistência não confinada (a) detalhe do equipamento utilizado para compactação dos corpos de prova (b) processo de ruptura dos corpos de prova.....	54
Figura 4.10: Moldagem dos cps para o ensaio de cisalhamento direto (a) colocação do solo sobre o molde (b) compactação do solo com o uso da prensa.....	55
Figura 4.11: Corpo de prova do ensaio de cisalhamento direto já moldado.....	56

Figura 4.12: Montagem do ensaio de cisalhamento direto (a) cápsula em que ocorrerá o cisalhamento (b) processo de colocação do corpo de prova no interior da cápsula.....	57
Figura 4.13: Processo de cisalhamento do corpo de prova no ensaio de cisalhamento direto..	57
Figura 4.14: Fluxograma indicando todas as etapas de execução desta pesquisa.....	58
Figura 5.1: Valores de massa específica seca máxima, obtidos em ensaios de Proctor para diferentes inclusões de tiras do tipo PET (em tamanhos e porcentagens).....	60
Figura 5.2: Valores de umidade ótima, obtidos em ensaios de Proctor para diferentes inclusões de tiras do tipo PET (em tamanhos e porcentagens).....	62
Figura 5.3: Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 10 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.....	63
Figura 5.4: Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 15 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.....	64
Figura 5.5: Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 20 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.....	64
Figura 5.6: Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 30 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.....	65
Figura 5.7: Curvas de compactação referentes ao solo arenoso puro e com a adição de cimento em porcentagens de 2% e 10%.....	66
Figura 5.8: Valores médios das resistências não confinadas obtidos com a inclusão de tiras do tipo PET em solo arenoso.....	67
Figura 5.9: Curvas tensão-deformação obtidas em ensaio (a) para o solo arenoso puro e (b) para o solo arenoso com a inclusão do parâmetro ótimo solo-tiras (tiras com 20 mm de comprimento e teor de 1,5% em relação à massa seca do solo).....	70
Figura 5.10: Valores de resistência obtidos para o solo arenoso sem inclusão de tiras e com inclusão do parâmetro ótimo solo-tiras encontrado, variando-se a umidade em que os corpos de prova foram moldados.....	72
Figura 5.11: Valores de resistência obtidos para o solo arenoso com e sem tiras nos parâmetros ótimos solo-tira encontrados, variando-se a umidade em que os corpos de prova foram moldados.....	73
Figura 5.12: Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com o teor de 1,5% de tiras PET de 20 mm (S+F) e sem tiras (S) com GC = 100%.....	74
Figura 5.13: Envoltórias de resistência ao cisalhamento de matriz arenosa com inclusão de cimento em quantidades de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%.....	75
Figura 5.14: Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de cimento em quantidades de 2, 4, 6, 8 e 10%.....	77

Figura 5.15: Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso puro.....	78
Figura 5.16: Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtida através dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, para adição de tiras de 10 mm de comprimento.....	80
Figura 5.17: Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtida através dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, para adição de tiras de 15 mm de comprimento.....	80
Figura 5.18: Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtida através dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, para adição de tiras de 20 mm de comprimento.....	81
Figura 5.19: Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtida através dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, para adição de tiras de 30 mm de comprimento.....	81
Figura 5.20: Plano de ruptura obtido com o rompimento de corpo de prova com adição de 2% de cimento.....	85
Figura 5.21: Plano de ruptura obtido com o rompimento de corpo de prova com adição de 2% de cimento e tiras de maneira aleatória.....	85
Figura 5.22: Plano de ruptura obtido com o rompimento de corpo de prova com adição de 2% de cimento e tiras de maneira aleatória e posicionamento das tiras em relação a este plano.....	87
Figura 5.23: Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 10 mm de comprimento em diferentes porcentagens.....	88
Figura 5.24: Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 15 mm de comprimento em diferentes porcentagens.....	88
Figura 5.25: Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 20 mm de comprimento em diferentes porcentagens.....	89
Figura 5.26: Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 30 mm de comprimento em diferentes porcentagens.....	89
Figura A1: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento.....	107
Figura A2: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 4% de cimento.....	107
Figura A3: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 6% de cimento.....	107
Figura A4: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 8% de cimento.....	108

Figura A5: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 10% de cimento.....	108
Figura A6: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.....	108
Figura A7: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.....	109
Figura A8: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 1,5%.....	109
Figura A9: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 2,0%.....	109
Figura A10: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.....	110
Figura A11: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.....	110
Figura A12: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 1,50%.....	110
Figura A13: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 2,00%.....	111
Figura A14: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.....	111
Figura A15: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.....	111
Figura A16: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 1,50%.....	112
Figura A17: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 2,00%.....	112



Figura A18: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.....	112
Figura A19: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.....	113
Figura A20: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 1,50%.....	113
Figura A21: Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 2,00%.....	113
Figura A22: Envoltória de resistência obtida em ensaio com o solo arenoso puro.....	114
Figura A23: Curvas Tensão x Deslocamento horizontal obtidas em ensaios de cisalhamento direto para o solo arenoso puro e com a inclusão de diferentes quantidades de cimento.....	115
Figura AN1: Certificado de ensaios físicos e químicos do cimento CP II- F-32 fornecido pela CSN.....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Mudanças no comportamento dos solos com a inclusão de fibras.....	29
Tabela 3.2: Processos de cura utilizados na prática, além do tempo destinado para a hidratação do cimento em cada um dos trabalhos desenvolvidos.....	37
Tabela 4.1: Caracterização e compactação do solo.....	47
Tabela 4.2: Propriedades típicas do PET.....	48
Tabela 4.3: Resistência do PET a determinados agentes agressivos.....	49
Tabela 4.4: Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado.....	50
Tabela 4.5 Síntese da Pesquisa.....	59
Tabela 5.1: Parâmetros ótimos de compactação obtidos em ensaios de Proctor com energia normal, para solo arenoso com inclusão de diferentes tamanhos e porcentagens de tiras tipo PET.....	61
Tabela 5.2: Parâmetros de compactação obtidos em ensaio de Proctor normal, em solo arenoso com e sem adição de cimento.....	65
Tabela 5.3: Valores médios de resistência (em kPa) obtidos em função dos comprimentos das tiras e das porcentagens de tiras adicionadas, assim como o coeficiente de variação obtido para cada amostra, em se tratando do solo arenoso.....	68
Tabela 5.4: Valores médios de resistência obtidos para o solo sem inclusão de tiras e com inclusão do parâmetro ótimo solo-tiras encontrado, variando-se a umidade em que os corpos de prova foram moldados.....	71
Tabela 5.5: Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos em ensaio de cisalhamento direto, para solo arenoso com e sem a inclusão de tiras.....	72
Tabela 5.6: Parâmetros de resistência ao cisalhamento, obtidos para a matriz arenosa com e sem inclusões de cimento.....	75
Tabela 5.7: Resumo das tensões de rupturas obtidas para adição de 2% de cimento e de diferentes porcentagens e comprimentos de tiras à matriz arenosa.....	82
Tabela 5.8: Parâmetros de resistência ao cisalhamento, encontrados para cada envoltória de solo-cimento-tira, com adição de 2% de cimento à matriz arenosa e de tiras em diferentes tamanhos e porcentagens.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ASTM	American Society For Testing and Materials
CBR	Capacidade de Suporte Califórnia
CP	Cimento Portland
cps	Corpos de Prova
CSI	Cement Sustainable Initiative
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CD	Ensaio triaxial consolidado e drenado
CU	Ensaio triaxial consolidado e não drenado
GC	Grau de Compactação
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno Tereftalato
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UU	Ensaio triaxial não consolidado e não drenado
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Símbolos do Alfabeto Latino*

$c'$	Coesão efetiva do solo
$c$	Coesão do solo
$D$	Largura das fibras
$e$	Índice de vazios
$F_a$	Resistência de aderência
$F_t$	Resistência à tração
$L$	Comprimento da fibra
$w$	Teor de Umidade
$w_{opt}$	Teor de Umidade Ótimo

### *Símbolos do Alfabeto Grego*

$\gamma$	Peso específico
$\gamma_{dmáx}$	Peso específico aparente seco máximo
$\varepsilon$	Deformação axial específica da amostra
$\rho$	Massa específica
$\rho_d$	Massa específica seca
$\rho_{dmax}$	Massa específica seca máxima
$\sigma$	Tensão normal atuante
$\sigma'$	Tensão normal efetiva atuante
$\sigma_1$	Tensão normal principal maior
$\sigma_3$	Tensão normal principal menor
$\phi$	Ângulo de atrito interno do solo
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo interno do solo
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\tau_{máx}$	Tensão de cisalhamento máxima

## SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
2.OBJETIVO.....	16
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Compósito Solo-Tira.....	17
3.1.1 Reforço do solo com o uso de polímeros.....	17
3.1.2 Tipos de materiais utilizados no reforço de solos.....	20
3.1.3 Mecanismos de interação entre a matriz e o reforço .....	24
3.2 Compósito Solo-cimento.....	31
3.2.1 Reforço do solo a partir da adição de cimento.....	31
3.2.2 Tipos de cimentos utilizados nos compósitos.....	32
3.2.3 Tipos de solos utilizados nos compósitos.....	32
3.2.4 Vantagens na utilização do solo-cimento.....	33
3.2.5 Aplicações do solo-cimento.....	34
3.2.6 Cura do solo-cimento.....	35
3.2.7 Interação do Solo-cimento.....	38
3.3 Reforço de solos com o uso de polímeros e cimento.....	39
3.4 Importância do uso de materiais alternativos na construção.....	41
4.MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1 Materiais utilizados.....	45
4.1.1 Solo.....	45
4.1.2 Tiras Poliméricas.....	48
4.1.3 Cimento.....	50
4.2 Métodos aplicados.....	51
4.2.1 Ensaios de Compactação .....	51
4.2.2 Ensaios de resistência uniaxial.....	53
4.2.3 Ensaios de cisalhamento direto.....	55

4.3 Síntese da pesquisa.....	58
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1 Ensaio de compactação.....	60
5.1.1 Ensaio de compactação em compósitos de solo-tira.....	60
5.1.2 Ensaio de compactação em compósitos de solo-cimento.....	65
5.2 Ensaio de resistência não confinada.....	66
5.3 Ensaio de cisalhamento direto.....	72
5.3.1 Ensaio de cisalhamento direto em compósitos de solo-tira.....	72
5.3.2 Ensaio de cisalhamento direto em compósitos de solo-cimento.....	74
5.3.3 Ensaio de cisalhamento direto em compósitos de solo-cimento-tira.....	79
5.4 Comparações com a literatura.....	90
5.5 Síntese dos Resultados Obtidos.....	93
6. CONCLUSÕES .....	96
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS E CONSULTADAS.....	97
APÊNDICES.....	106
ANEXOS.....	116

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Novos materiais vêm sendo estudados por meio da incorporação de elementos de reforço em materiais tradicionais. Para tanto, é necessário que as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais de constituição sejam conhecidas, bem como suas possibilidades de combinação. Diversas pesquisas têm sido realizadas avaliando o reforço dos solos com o uso de fibras poliméricas. (vide, por exemplo, os trabalhos de: GRAY & OHASHI, 1983; HANNANT, 1994; BUDINSKI, 1996; SCHAEFER et al.,1997; VENDRUSCOLO, 2003; CASAGRANDE, 2005; DONATO, 2007; GIRARDELLO, 2010).

Esses materiais são chamados de materiais compósitos e, de acordo com Budinski (1996), definidos como “a combinação de dois ou mais materiais que possui propriedades que os materiais componentes não possuem por si próprios”. Dessa forma, estes são constituídos por uma matriz (como concretos, silicones, argamassas, dentre outras) e um elemento de reforço (a exemplo dos polímeros, aço, papel ou outros materiais capazes de melhorar as características da matriz) de forma a serem enfatizados os pontos fortes de cada parte.

Higgins (1994) classifica os materiais compósitos em dois grandes grupos: os materiais compósitos particulados, em que é adicionado à matriz algum material em forma de partícula, e os materiais compósitos fibrosos, em que são adicionados materiais em forma de fibras à matriz, de modo que as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras, distribuindo de forma mais uniforme as tensões dentro da matriz. Existe um consenso de que o maior potencial de aplicação dos materiais reforçados com fibras está no estado pós- fissuração, em que as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, mantendo a interface das fissuras juntas e aumentando a capacidade de absorção de energia, ductibilidade e tenacidade do material (HANNANT, 1994; TAYLOR, 1994; FEUERHARMEL, 2000; SPECHT, 2000; CASAGRANDE, 2005; SILVA, 2007).

Após inúmeros estudos indicarem um alto potencial de aplicação dos compósitos reforçados com fibras poliméricas na melhoria das características mecânicas dos solos, estudos mais recentes passaram a avaliar a influência da utilização de tiras poliméricas como materiais de reforço. (vide, por exemplo, os trabalhos de: SIVAKUMAR BABU & CHOUKSEY, 2011; SOLTANI-JIGHEH, 2014; LUWALAGA, 2016; SHUKLA, 2017; PEDDAIAH, BURMAN & SREEDEEP, 2018). A principal diferença entre os dois tipos de inclusão está na forma dos materiais. Enquanto as fibras poliméricas são materiais muito finos

e alongados, como filamentos, as tiras são materiais com maior largura e espessura, usualmente cortados de estruturas plásticas já existentes. A utilização das tiras apresenta diversas vantagens como a possibilidade de reutilização de rejeitos plásticos para aumento da resistência de solos sem necessidade da aplicação de um processo de reciclagem, como no caso das fibras.

A proposição de uso de materiais alternativos na construção civil que busquem reduzir a produção de resíduos ou utilizar resíduos anteriormente gerados mostra-se cada vez mais necessária. A indústria da construção civil situa-se hoje como um setor conservador, considerado um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais, consumindo enormes quantidades de materiais com significativo conteúdo energético, que necessitam ser transportados por grandes distâncias (MOTTA et al., 2014).

Embora a utilização de tiras oriundas do reuso de rejeitos da sociedade apresente alto potencial na melhoria das características dos solos, o campo de estudo destes materiais é relativamente novo, motivo pelo qual é um consenso entre diversos autores a necessidade de uma avaliação mais profunda das características destes materiais compósitos, verificando a utilização de diferentes tipos de plásticos e as características de cada tipo de inclusão em conjunto com solos distintos, além de avaliações do comportamento dos materiais em escalas reais (CHEBET & KALUMBA, 2014; LUWALAGA, 2016; PEDDAIAH, BURMAN & SREEDEEP, 2018).

Neste cenário, encontram-se também na literatura diversos trabalhos que abordam a utilização de cimento, cal ou cimento e fibras em conjunto para melhoria das características de solos. O elevado número de pesquisas que avaliaram a utilização de solo-cimento pode ser justificado pelas características obtidas com este material compósito, que apresenta significativo aumento de resistência e rigidez quando comparado ao solo natural, tornando sua aplicação interessante em fundações superficiais, em proteção de taludes, em barragens, e, principalmente, em base e sub-base de pavimentos flexíveis. (vide, por exemplo, os trabalhos de LIMA et al., 1996; BUENO, 1996; SPECHT, 2000; SANTOS, 2004; CONSOLI et al., 2012; FATAHI, LE & KHABBAZ, 2013; SANBONSUGE, 2013; BITTENCOURT et al., 2014; CRISTELO et al., 2015; SILVA, 2015; LLJARUNA, 2016; WEI et al., 2018).

Embora o cimento seja hoje considerado um material de alto impacto ambiental cuja produção libera na atmosfera altas quantidades de gases causadores do efeito estufa, sua



proposta de utilização nos compósitos de solo-cimento é de diminuir o uso de outros materiais poluidores como o aço, cal, areia e brita (cuja extração e transporte são danosas ao meio ambiente), visando à obtenção de um material com elevada resistência, ductibilidade e durabilidade a partir da inclusão de pequenas quantidades de cimento.

Dessa forma, esse trabalho procura ampliar a compreensão do comportamento mecânico de um solo arenoso laterítico cimentado com adição de tiras poliméricas, buscando estabelecer uma relação entre as propriedades individuais das matrizes (solo, solo-tira, solo-cimento e solo-cimento-tira). Serão avaliados os parâmetros de compactação e os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e atrito), bem como o comportamento tensão x deformação do solo, solo-cimento e solo-cimento-tira.

## **2. OBJETIVO**

Avaliar os efeitos provocados na resistência mecânica de um solo arenoso laterítico com a inclusão de diferentes comprimentos e percentagens de tiras de poliéster (PET), de diferentes percentagens de cimento, e com a inclusão de tiras e de cimento em conjunto, por meio da avaliação dos parâmetros de resistência (coesão e atrito) bem como do comportamento das curvas tensão-deformação resultantes dos ensaios de cisalhamento direto. Serão avaliados também os efeitos destas inclusões nos parâmetros de compactação e, no caso da adição de fibras, na resistência não confinada do solo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Compósito Solo-Tira

##### 3.1.1 Reforço do solo com o uso de polímeros

Entende-se por solo reforçado todo tipo de solo em que são incorporados diferentes tipos de materiais, de modo a formar um vínculo entre suas partículas, melhorando suas propriedades mecânicas como a resistência, deformabilidade, compressibilidade e porosidade, além de criar um material cujas propriedades divergem das propriedades dos materiais que lhe deram origem.

De acordo com Casagrande (2005) a técnica de reforço de solos com o uso de fibras é conhecida e empregada desde a antiguidade. A pirâmide de Ziggurat e a torre de Agar Quf, na Mesopotâmia foram construídas (em 1400 A.C.) intercalando-se camadas de solo com mantas de raízes. Existem também indícios do emprego de técnicas como estas na Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, com o uso de lã de lhama.

Uma das primeiras técnicas mundialmente reconhecidas utilizadas no reforço de solos foi a Terra Armada, patenteada na década de 1960, pelo engenheiro Henri Vidal, método que consistia na melhoria da resistência à tração do solo através da implantação de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto.

A técnica do reforço do solo com fibras passou a ser mais investigada há algumas décadas, com a inclusão de raízes ao solo, distribuídas de maneira aleatória, de modo a avaliar a melhoria da resistência ao cisalhamento dos solos na estabilidade de taludes (GRAY & OHASHI, 1983; SCHAEFER et al.,1997).

Diversos trabalhos abordam a utilização de fibras poliméricas para a melhoria de pavimentos, solos de fundação, solos de reaterro de estruturas de contenção e de estabilização de solos, evidenciando situações em que o solo reforçado mostra-se extremamente competitivo com outras soluções tradicionais. Entre os campos de aplicação que se mostram promissores para as misturas de solos com fibras está o seu emprego como reforço de terraplenos de estradas e em camadas estruturais de rodovias não pavimentadas, englobando-se nessa categoria estradas florestais. Além disso, sua utilização mostra-se promissora em

casos de estabilização de taludes de aterro e para uso em aumento de resistência de solos submetidos a elevados esforços.

Feuerharmel (2000) avaliou a influência da inclusão de teor de 0,5% de fibras de polipropileno em comprimentos de 12 e 36 mm em três tipos de solo (solo argiloso, arenoso e arenoso-siltoso) através de ensaios triaxiais drenados e ensaios de condutividade hidráulica. O autor pôde concluir que o aumento de resistência do solo dado pela inclusão de fibras mostrou-se mais pronunciado para solos granulares. Além disso, a adição de fibras promoveu uma redistribuição dos esforços modificando a forma de distribuição das deformações no solo mediante uma solicitação externa. Em relação ao comportamento do solo quando solicitado por tensões cisalhantes, o autor pôde separar a resistência do solo em três etapas. Na etapa inicial o comportamento do solo é rígido basicamente pelas características da matriz. Em uma fase intermediária o comportamento do compósito irá depender das características da matriz e dos elementos de reforço. Por fim, o comportamento do material se dará exclusivamente pelas fibras. A transição entre a fase inicial e intermediária se dá com a predominância de deformações plásticas na matriz do solo.

Casagrande (2001) pesquisou o comportamento mecânico de camadas de um solo residual areno-siltoso reforçado com adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo, visando sua utilização no assentamento de fundações superficiais. Resultados de ensaios de placa realizados em camadas de solo com e sem reforços fibrosos demonstraram aumento significativo da capacidade de suporte com a inclusão de fibras, além de redução considerável de recalques, quando comparado ao comportamento do solo residual compactado.

Donato (2007) estudou a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno através do ensaio de prova de carga em placa circular, com medidas diretas de tensão pelo uso de células de tensão total. Com isso, verificou que o comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte e, ainda, alterando os mecanismos de ruptura.

Girardello (2010) investigou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem fibras, através de ensaios de placa realizados em densidade relativa de 50 e 90%. Nos casos em que houve reforço foi acrescentado 0,5% de fibras de polipropileno, em relação

à massa seca do solo. No estudo em questão o autor obteve resultados satisfatórios, evidenciando que a inclusão de fibras influenciou significativamente no comportamento carga- recalque do material.

Louzada, Malko & Casagrande (2019) avaliaram o comportamento mecânico de um solo arenoso com adição de PET em diferentes formatos, misturado o solo com 10%, 20% e 30% do material triturado e com adições de 3% e 5% de flocos de PET. Em relação aos parâmetros de compactação do solo, a adição do material triturado atuou diminuindo a umidade ótima e a massa específica seca máxima do solo, em função dos baixos valores de massa específica do PET triturado que, quando adicionado ao compósito, diminui a massa específica da mistura. A adição de flocos de PET, por sua vez, apresentou aumento da umidade ótima e pequena diminuição da massa específica seca máxima. Ensaio triaxiais (CD) indicaram considerável aumento da resistência do solo em função das inclusões, atuando no aumento do ângulo de atrito do solo e apresentando pequeno decréscimo da coesão. Melhores resultados foram encontrados para adição de 30% de material triturado, uma vez que este material atuou no preenchimento dos vazios, melhorando a interação entre o solo e as partículas de PET.

Após inúmeros estudos indicarem um alto potencial de aplicação dos compósitos reforçados com fibras poliméricas no aumento da resistência e ductibilidade dos solos, alguns autores avaliaram também a influência da inclusão de tiras poliméricas no reforço de solos. A principal diferença entre os dois tipos inclusão está na forma dos materiais: as fibras poliméricas são materiais muito finos e alongados, como filamentos, que formam cilindros com um determinado diâmetro. As tiras são materiais que, usualmente cortados de estruturas plásticas já existentes, apresentam maior espessura e potencial para reutilização de resíduos plásticos, sem a necessidade da reciclagem do material. Alguns autores, como é o caso de Shukla (2017), não fazem grande distinção entre os dois tipos de materiais por considerar que as tiras são um tipo de fibra, apresentando comportamentos semelhantes.

Sivakumar Babu & Chouksey (2011) avaliaram o efeito da inclusão de tiras de 12 mm de comprimento e 4 mm de largura, em quantidades de 0,50%, 0,75% e 1,0%, em um solo arenoso através de ensaios de resistência uniaxial e ensaios triaxiais do tipo CU (consolidado e não drenado). Os autores obtiveram significativos aumentos nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos (coesão e ângulo de atrito interno), que se mostraram maior para

maiores quantidades de tiras adicionadas. Além disso, os ensaios de resistência não confinada indicaram um aumento da ductibilidade, proporcional à inclusão de tiras.

Soltani-Jigheh (2014) estudou a inclusão de tiras plásticas de 4 mm de largura e 8 mm de comprimento em quantidades de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5 e 2% em relação à massa do solo argiloso, por meio da realização de ensaios triaxiais do tipo CU. Os resultados mostraram um pequeno aumento da resistência do cisalhamento do solo, que foi de 11% no maior dos casos. Em geral, as mudanças obtidas nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo também foram pequenas, resultando, de modo geral, em aumento da coesão e diminuição do ângulo de atrito.

Luwalaga (2016) avaliou a inclusão de flocos de garrafas PET, com diferentes cores e tamanhos que variaram entre 1,18 e 10 mm em uma areia, por meio da realização de ensaios de CBR, compactação e cisalhamento direto. A inclusão de PET variou entre as quantidades de 12,5; 22,5 e 32,5%. Melhores resultados foram encontrados para adição de 22,5% do material, que gerou um aumento de 15,32% do ângulo de atrito e de 225,81% da coesão.

Peddaiah, Burman & Sreedeeep (2018) avaliaram o efeito da inclusão de tiras de PET em uma areia siltosa, através da realização de ensaios de compactação, cisalhamento direto e CBR. Os resultados refletiram que a inclusão de tiras de largura de 15 mm e comprimento de 25 mm resultaram em um aumento na densidade seca máxima, nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e no valor do Índice de Suporte Califórnia. Foi avaliada a inclusão de tiras nas porcentagens de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8% em relação à massa seca do solo. A inclusão de 0,4% de tiras resultou em melhor desempenho em relação ao aumento da coesão e ângulo de atrito do solo.

### 3.1.2 Tipos de materiais utilizados no reforço de solos

Em se tratando de compósitos fibrosos existem diversos tipos de materiais que podem ser utilizados. As propriedades físicas, mecânicas e químicas de cada tipo de reforço dependerão do material que o forma, assim como de seu processo de fabricação. Tais propriedades irão influenciar o comportamento do material compósito. De acordo com Feuerharmel (2000) a compreensão do mecanismo de interação matriz- reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito é de

fundamental importância para a escolha do tipo de reforço a ser utilizado. Esta escolha dependerá das características que se busca alcançar no material compósito, assim como das características da matriz a ser reforçada.

Para a escolha do material de reforço devem ser tomadas certas precauções, uma vez que estes não devem ser suscetíveis a ataques de fungos, bactérias ou álcalis, seu uso não deve ser prejudicial à saúde humana e, além disso, devem ser quimicamente neutros e não-deterioráveis (CASAGRANDE, 2005). Outro fator importante a ser considerado é a durabilidade, ou seja, a capacidade que um produto possui de manter suas condições de serviço durante o tempo para o qual foi projetado e construído.

Em geral, as fibras e tiras podem ser classificadas em naturais, minerais, metálicas e poliméricas.

#### Fibras naturais

Foram os primeiros tipos de fibras a serem utilizados pela humanidade. As fibras vegetais utilizadas nos materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim de elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar (HANNANT, 1994). Algumas dessas fibras podem atingir grandes resistências, como por exemplo, as fibras de bambu que atingem resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade variando entre 10 e 25 GPa (CASAGRANDE, 2001).

SILVA (2007) afirma que o uso de fibras naturais oriundas de espécies vegetais pode trazer diversas vantagens como a abundância, fácil acesso e baixo custo. Entretanto, destaca que deve ser considerada sua baixa durabilidade, devido ao acelerado processo de decomposição, além da grande variabilidade de suas propriedades.

#### Fibras minerais

As principais fibras minerais são as fibras de carbono, vidro e amianto.

##### *Fibras de carbono*

É uma fibra sintética, baseada na resistência e leveza das ligações dos átomos de carbono. Apresentam alta resistência à tração, cerca de 2400 GPa, e elevado módulo de elasticidade, em torno de 420 GPa (CASAGRANDE, 2001).

### *Fibras de Vidro*

As fibras de vidro geralmente são produzidas na forma de fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. Um fator não tão estimulante sobre o uso destas fibras é o fato de a grande maioria ser produzida a partir do vidro tipo E, que é suscetível ao ataque de álcalis (CASAGRANDE, 2001).

### *Fibras de Amianto*

Apesar da alta resistência à tração, em torno de 1000 MPa, estas fibras não são indicadas para uso na construção civil, uma vez que, quando cortadas liberam partículas muito pequenas, em função do seu diâmetro reduzido, que se aspiradas pelo homem danificam os alvéolos pulmonares. Atualmente, são proibidas em mais de 50 países e, de acordo com a Organização Mundial de Saúde, responsáveis por cerca de 100 mil mortes por ano.

### Fibras metálicas

As fibras metálicas mais comuns são as de aço, cuja resistência à tração é de aproximadamente 200 GPa. Seu formato pode variar, variando assim sua aderência com a matriz. Dependendo-se do local onde estão inseridas, requerem cuidado especial com a corrosão. (CASAGRANDE, 2001).

### Fibras Poliméricas

Devido às suas características, facilidade de aquisição dos polímeros e grande diversidade, as fibras poliméricas apresentam grande potencial de utilização no reforço de solos. Considerando que o tempo de degradação dos plásticos é superior a 100 anos, podendo se mostrar maior que 500 anos dependendo do tipo de plástico, o uso destas fibras evidencia-se relativamente seguro, em função da vida útil das obras geotécnicas.

De acordo com Casagrande (2001), existem vários formatos de fibras poliméricas que podem ser misturados à matriz, formando assim o material compósito. Um exemplo seriam as fibras chamadas fibriladas, as quais apresentam formato trançado quando esticadas transversalmente e são projetadas para se abrir em contato com o solo. Outros formatos que se diferenciam um pouco dos formatos de fibras mais comuns são as malhas, que rendem melhor intertravamento com as partículas do solo, e o Textsol, desenvolvido na França, que consiste em um filamento contínuo distribuído aleatoriamente na matriz.



### *Fibras de poliéster*

As fibras de poliéster possuem alta rigidez e resistência, além de elevada densidade, podendo então conferir estas características aos materiais a que forem adicionadas. Suas características são muito similares às fibras de polipropileno e costumam ser usadas para aplicações semelhantes. O poliéster mais conhecido é o polietileno tereftalato (PET). (CASAGRANDE, 2001).

O PET é atualmente um material de grande utilização no mundo, sendo utilizado principalmente na produção de garrafas plásticas usadas no armazenamento de refrigerantes, água e óleos. No último censo de reciclagem do PET no Brasil (10<sup>a</sup> Ed., publicado pela Associação Brasileira da Indústria do PET - ABIPET) apenas 51% do total produzido é reciclado. Assim, devido ao baixo custo, grande disponibilidade e às propriedades que podem conferir a um determinado compósito, o material apresenta grande potencial de utilização na construção civil.

### *Fibras de poliamida*

As características das fibras de poliamida dependem muito do arranjo das moléculas do material. Normalmente, são formadas por polímeros de baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Não obstante, as fibras de poliamida aromática, conhecidas comercialmente como Kevlar, apresentam altos índices de rigidez e resistência. O Kevlar pode ser dividido em 2 tipos, o Kevlar 29, cuja resistência se aproxima de 3000 MPa e o módulo de elasticidade é de cerca de 64 GPa; e o Kevlar 49, com a mesma resistência do Kevlar 29, mas com módulo de elasticidade de cerca de 300 GPa (CASAGRANDE, 2001).

### *Fibras de Polietileno*

As fibras de polietileno possuem alta durabilidade e são resistentes aos álcalis, pontos positivos para sua aplicação em obras permanentes. Entretanto, seu módulo de elasticidade é baixo e apresentam maiores deformações de fluência, de modo que são contraindicadas para suportar altas tensões em um compósito fissurado, pois irão apresentar altas deformações ao longo do tempo. Quando adicionadas a uma matriz cimentada apresentam problemas de adesão. De modo a resolver o problema de adesão à matriz cimentada e o baixo módulo de elasticidade desenvolveu-se o polietileno de alta densidade (HANNANT, 1994).

### *Fibras de polipropileno*

As fibras de polipropileno são constituídas de material termoplástico, ou seja, adquirem consistência plástica com o aumento da temperatura. Em função de sua constituição molecular essas fibras possuem grande tenacidade e flexibilidade. Seu módulo de elasticidade é considerado muito baixo e gira em torno de 8 GPa. Possuem alta resistência a ataques de várias substâncias químicas e aos álcalis. Sua resistência a tração é de aproximadamente 400 MPa. Quando adicionadas a um material lhe conferem uma considerável resistência ao impacto, além de provocar um aumento na resistência e na ductibilidade do mesmo, apresentando um acréscimo à resistência e mudança no comportamento tensão-deformação, especialmente em se tratando de grandes deformações (CASAGRANDE, 2001).

Atualmente as fibras de polipropileno possuem diversas aplicações promissoras como, por exemplo, seu uso em revestimentos secundários de túneis, melhorando consideravelmente a resistência do concreto ao fogo (SILVA 2007).

O uso deste tipo de fibras é bastante difundido nos Estados Unidos e na Europa, especialmente quando utilizado em compósitos (FIGUEIREDO et al., 2002).

#### 3.1.3 Mecanismos de interação entre a matriz e o reforço

O início da influência das fibras sobre o material compósito se dá no momento da compactação da mistura, em que a adição de fibras aumenta o índice de vazios da matriz, resultando em porosidades superiores a da matriz, para uma mesma energia de compactação. Este aumento se dá de forma linear em relação à quantidade de fibra adicionada e independe do tipo de compactação empregada. Além disso, em um material submetido a carregamentos externos, a influência da fibra só ocorre quando o material compósito sofre deformações, e esta influência passa a depender das características de deformabilidade do solo e da distribuição dos esforços. Quando submetidas aos esforços de tração, as fibras transferem os esforços para o solo provocando uma redistribuição de tensões. (HOARE, 1979; FEUERHARMEL, 2000).

O aumento da resistência do solo devido à inclusão de um elemento de reforço é refletido por meio do surgimento de um intercepto de coesão aparente (nesses casos a ruptura ocorre em função da falha no elemento de reforço) ou por meio de aumento do ângulo de

atrito interno (em que a ruptura ocorre geralmente em função de um deslizamento). Neste tipo de reforço, o comportamento tensão-deformação deste solo irá depender da quantidade de fibras adicionadas, atrito entre as fibras e o solo, proporção fibras-solo, distribuição e orientação das fibras, além das características de resistência de cada um deles. (SHUKLA, SIVAKUGAN & DAS, 2009).

A resistência de um solo é afetada por quatro parâmetros principais, o atrito, a força de ligação, a sucção da matriz e as morfologias da interface, que são controlados pelo teor de água, peso seco do solo, inclusão de cimento e tamanho das partículas. Como resultado de aplicação de uma carga em um solo reforçado por compósitos fibrosos, as partículas de solo presentes na interface solo-fibra podem rotacionar, de modo que as fibras sob tensão venham a apresentar deformações plásticas em suas extremidades. Na presença de cal ou cimento, a rotação das partículas de solo da interface solo-fibra é restrita devido ao aumento da força de ligação oriunda do processo de cimentação, apresentando maior eficiência. (SHUKLA, 2017).

Quanto à resistência ao cisalhamento dos compósitos fibrosos, Shukla (2017) afirma que fibras com baixos módulos de elasticidade (naturais ou sintéticas) se comportam como “inclusões idealmente extensíveis” de modo que estas não se rompem durante ensaios de cisalhamento direto, sendo sua principal função aumentar o pico de resistência e limitar a magnitude da redução de resistência pós-pico. Além disso, envoltórias de resistência obtidas com solo reforçado com fibras indicam a existência de um limite claro de tensão normal a partir do qual as fibras tendem a escorregar ou sofrer arrancamento. As fibras tendem a apresentar efeitos maiores sobre os parâmetros de coesão dos solos arenoso, com pequenas influências sobre o ângulo de atrito da matriz.

Em relação à influência das fibras sobre os parâmetros de compactação de um solo, Al Wahab & Al-Qurna (1995) estudando o efeito da inclusão de fibras na curva de uma argila concluíram que ocorre um decréscimo da massa específica seca máxima e um acréscimo na umidade ótima para a adição de 2% de fibra, considerados não muito significativos. Vários outros autores relataram também não ter encontrado nenhuma alteração significativa aos parâmetros de compactação dos solos com a inclusão de fibras (MAHER e HO, 1994; NATARAJ et al., 1996; ULBRICH, 1997; CONSOLI et al., 1999).

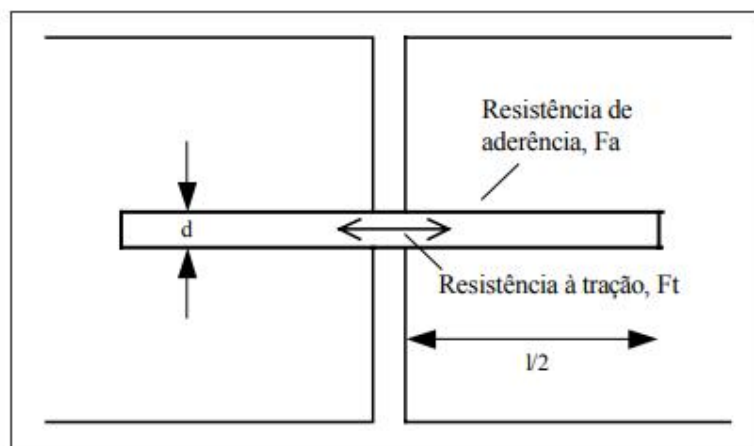
O maior potencial do uso das fibras no compósito fibroso esta no estado pós-fissuração, onde as fibras apresentam maior contribuição na resistência do material

compósito, uma vez que estas não impedem a formação de fissuras em um material reforçado, mas atuam no controle de sua propagação mantendo a interface das fissuras juntas e aumentando a ductibilidade do material. Assim, o comportamento do material compósito é controlado pelo teor, comprimento e propriedades físicas das fibras, propriedades da matriz e pela aderência entre as duas fases. (SHUKLA, 2017).

Assumindo que a variação das propriedades a seguir são atingidas de maneira independente, o material compósito será influenciado pelo teor de fibras adicionado, de modo que teores mais elevados tendem a conferir maiores resistências em estados pós-fissurados e maior ductibilidade aos materiais, diminuindo a dimensão das fissuras. Além disso, fibras com maiores módulos de elasticidade apresentam maior probabilidade de arrancamentos. As propriedades do material compósito, tais qual a resistência, deformação e padrões de ruptura dependem da aderência entre a fibra e a matriz. A dimensão das fissuras, assim como sua distribuição, melhora com uma maior aderência. Assumindo que haja aderência entre a fibra e a matriz, uma maior resistência da fibra resulta em um compósito mais dúctil e quanto maior o comprimento da fibra, menor a possibilidade de arrancamento, devido à melhor distribuição das tensões. (CASAGRANDE, 2001).

Taylor (1994) e Ilston (1994) equacionaram um suposto equilíbrio de forças para um compósito com as fibras solicitadas (figura 3.1). O fator de forma, equacionado pela divisão comprimento/ diâmetro, supondo uma fibra circular e considerando o comprimento como sendo 1, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência da aderência entre a fibra e a matriz.

Em se tratando das modificações que a adição de fibras gera nas propriedades de um compósito, uma delas é a resistência ao cisalhamento de pico. Diversos trabalhos abordam a questão enfocando os solos argilosos e arenosos. De acordo com Casagrande (2005) o fenômeno se deve às características das fibras de inibirem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito, o que culmina em um aumento nas áreas sob as curvas tensão x deformação. Esta propriedade é comumente referida como tenacidade e é responsável por diminuir a perda de resistência pós-pico de um material.



$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot F_t = \pi \cdot d \cdot \frac{l}{2} \cdot F_a$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a}$$

**Figura 3.1** – Disposição de uma fibra entre uma fissura (Adaptado de CASAGRANDE, 2001).

Além da resistência pós-pico, outra característica do solo modificado pelas fibras é, no caso de solos argilosos, a coesão que, conforme estudado por diversos autores sofre acréscimos pela inclusão de fibras (vide, por exemplo: BUENO et al., 1996; NATARAJ et al., 1996; TEODORO, 1999; HEINECK, 2002). Outros autores como Andersland & Kattak (1979), Al Wahab & El Kedrah (1995), Teodoro (1999) e Heineck (2002) avaliaram em ensaios triaxiais que ocorre também um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras.

Em se tratando de solos arenosos, a inclusão de fibras faz surgir um intercepto de coesão bem como um aumento do ângulo de atrito. Já para o solo cimentado, as fibras têm uma influência maior sobre a coesão última e o ângulo de atrito último (VENDRUSCOLO, 2003). Teodoro (1999) através da realização de ensaios de compressão uniaxial observou um aumento da resistência de um areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno com o aumento do comprimento das fibras, sendo o comprimento máximo avaliado de 30 mm. O mesmo autor notou um comportamento distinto para um solo argiloso, onde a máxima resistência foi alcançada para um comprimento de 15 mm.

SILVA (2007) realizou ensaios de granulometria, compressão simples, cisalhamento direto e CBR com o objetivo de avaliar a melhoria das propriedades física e mecânicas de solos siltosos ao se adicionar fibras do tipo PET, sisal, polipropileno, raspas de pneu, aditivos químicos e orgânicos. Os resultados dos ensaios mostram que as fibras de polipropileno apresentaram melhores desempenhos em relação ao aumento da resistência do solo puro. Em relação aos aditivos, houve grande variação do resultado de acordo com a dosagem adotada. Em seu trabalho SILVA (2007) reuniu, com o uso de uma tabela, as mudanças apresentadas por diferentes estudos no comportamento dos solos com a adição de fibras, conforme mostrado a seguir (tabela 3.1).

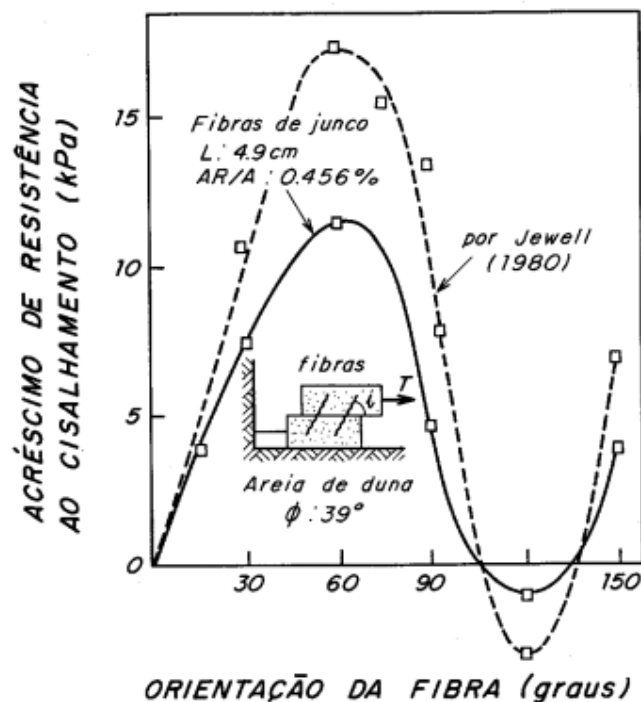
Estudos realizados por Gray & Ohashi (1983) indicam que certa mudança na orientação do material utilizado como reforço do solo pode resultar em variação na resistência de um compósito. Empregando ensaios de cisalhamento direto os autores puderam notar (conforme figura 3.2) que uma inclinação de  $60^\circ$  em relação ao plano de ruptura apresenta maiores contribuições em questões de resistência. A inclinação de  $90^\circ$  é a que melhor representa um sistema em que existe uma inclusão de fibras aleatoriamente distribuída.

Em se tratando do comportamento das tiras nos solos, estudos mais recentes indicam que podem ser obtidos resultados semelhantes aos gerados pela inclusão de fibras, apresentando vantagens como economia, maior praticidade, reuso de materiais classificados como rejeitos, grande possibilidade de variação do comprimento e largura das tiras, além de utilização de diferentes polímeros.

Apesar das extensas possibilidades oferecidas pelo uso das tiras oriundas do reuso de rejeitos, o campo de estudo destes materiais é relativamente novo, motivo pelo qual é um consenso entre diversos autores a necessidade de uma avaliação mais profunda da utilização destas tiras como material de reforço, verificando sua influência nos mais diversos tipos de solos, além da avaliação de diferentes tipos de plásticos e condução de testes referentes ao desempenho dos compósitos em escalas reais (CHEBET & KALUMBA, 2014; LUWALAGA, 2016; PEDDAIAH, BURMAN & SREEDEEP, 2018).

**Tabela 3.1** – Mudanças no comportamento dos solos com a inclusão de fibras (Adaptado de Silva, 2007).

<b>Estudos</b>	<b>Resultados obtidos</b>
<b>Ensaio de Compactação</b>	
AL WAHAB & AL QURNA (1995) Avaliaram os efeitos que da adição de fibras nas quantidades de 0,5; 1 e 2% em relação à massa seca do solo nas curvas de compactação de uma argila	As fibras foram responsáveis por um decréscimo de 4% da densidade e, para adições de 2% de fibras, os autores obtiveram um pequeno acréscimo na umidade ótima (11%).
BUENO et al. (1996) Avaliaram a influência das inclusões de fibras em solos arenosos e argilosos	No caso dos solos arenosos, verificaram pequeno acréscimo na umidade ótima (11%) com a inclusão de 2% de fibras e não foram verificadas mudanças na densidade máxima. No caso dos solos argilosos, não se observou alteração na umidade ótima e nem na densidade máxima.
MAHER & HO (1994), NATARAJ et al. (1996) avaliaram a influência da adição de fibras em solos argilosos e CONSOLI et al. (1999) fez o mesmo para solos granulares	Não encontraram nenhuma alteração significativa tanto para a umidade quanto para a densidade máxima com a inclusão de fibras
<b>Resistência ao cisalhamento</b>	
MAHER & HO (1994) realizaram uma série de ensaios de compressão não confinada e diametral em solos argilosos	Os resultados obtidos indicaram o aumento do pico da resistência à compressão e à tração, além de aumento da ductibilidade do material
NATARAJ et al. (1995) avaliaram ensaios de cisalhamento direto em solos argilosos	A inclusão de fibras ocasionou o aumento do ângulo de atrito do material
TEODORO (1999) analisou o comportamento de uma areia siltosa enquanto aumentava o comprimento das fibras de polipropileno	Obteve aumento de resistência com o aumento do comprimento das fibras de polipropileno
CASAGRANDE (2001) avaliou o comportamento de um solo residual arenoso-siltoso com inclusão de fibras de polipropileno	A adição de fibras provocou grande aumento na coesão do material, mantendo seu ângulo de atrito praticamente inalterado. O aumento de teor de fibras no solo aumenta sua resistência (foram avaliados teores de 0,25; 0,50 e 0,75%).
FEURHARMEL (2000) avaliou a inclusão de 0,5% de fibras de polipropileno e de 7% de cimento em três tipos de solo: uma argila, uma areia e uma areia-siltosa	Os acréscimos de resistência devido à inserção das fibras de polipropileno a solos não cimentados se mostraram mais expressivos para os solos mais granulares. Em relação aos solos cimentados, o aumento do comprimento das fibras causou uma diminuição da resistência de pico.
<b>Modo de ruptura</b>	
CASAGRANDE (2001) avaliou a inclusão de fibras de polipropileno em um solo residual arenoso-siltoso	Os resultados indicaram um crescimento constante da resistência com um aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico e as fibras apresentaram contribuição mais significativa para o aumento de resistência do material em aproximadamente 2,5% de deformação axial.
FEURHARMEL (2000) avaliou a inclusão de fibras de polipropileno e de cimento em três tipos de solo: uma argila, uma areia e uma areia-siltosa	A adição de fibras a solos cimentados alterou sua forma de ruptura, diminuindo a fragilidade, além de provocar uma expansão da superfície de cisalhamento



**Figura 3.2** – Efeito da orientação das fibras sobre o acréscimo de resistência ao cisalhamento de um compósito (GRAY & OHASHI, 1983).

Chebet & Kalumba (2014) avaliaram a utilização de tiras oriundas de sacolas plásticas de PET no reforço de dois solos arenosos, utilizando ensaios de cisalhamento direto e ensaios de placa. As tiras foram cortadas com largura de 6 mm, e em comprimentos de 15, 30 e 45 mm, de modo que foram avaliadas tiras sem perfurações em seu interior e com perfurações de 1 e 2 mm de diâmetro. Os ensaios de cisalhamento direto indicaram um aumento na resistência ao cisalhamento em função do aumento do ângulo de atrito, que se mostrou ainda maior para as tiras perfuradas. Os ensaios de placa indicaram aumento da capacidade de carga em função deste tipo de inclusão, além de maiores deslocamentos antes na ruptura.

Karmacharya & Acharya (2017) investigaram o efeito da inclusão aleatoriamente distribuída de tiras de PET de 3 mm de largura e 30 mm de comprimento, em porcentagens de 0,5; 1,0 e 1,5%, em três diferentes tipos de solo (uma areia bem graduada, uma areia pouco graduada e um areia argilosa) partir da realização de ensaios triaxiais do tipo UU. Em todos os três solos a inclusão de tiras gerou aumento na resistência ao cisalhamento dos solos, que variaram entre 24 e 129%. Efeitos mais pronunciados foram verificados em inclusões de quantidades maiores de tiras. O aumento da resistência encontrado se deveu a um aumento na fricção entre as partículas do solo e ao desenvolvimento de tensões nas tiras plásticas.



## 3.2 Compósito Solo-cimento

### 3.2.1 Reforço do solo a partir da adição de cimento

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) “*o solo-cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas.*” O compósito gerado por essa mistura apresenta uma boa resistência à compressão, maior durabilidade e menor índice de retração volumétrica.

Specht (2000) define o reforço do solo como a utilização de processos físicos e/ ou químicos visando à melhoria das propriedades mecânicas do solo, em especial o aumento da resistência e a diminuição das características de compressibilidade e permeabilidade.

Higgins (1994) classifica os materiais compósitos em dois grupos: os materiais compósitos particulados, em que são adicionados materiais na forma particulada a uma matriz, e os materiais compósitos fibrosos, em que são adicionadas fibras a uma matriz analisada.

Em se tratando dos materiais compósitos particulados, Consoli et al. (2004) afirmam que qualquer quantidade de cimento adicionada ao solo pode vir a modificar as propriedades do mesmo. Entretanto, quanto maiores forem as quantidades adicionadas, maiores serão as mudanças verificadas, como o aumento da resistência e da durabilidade e a diminuição da permeabilidade.

O cimento pode agir de formas distintas, que dependem da granulometria da matriz a ser estabilizada e do seu número de vazios: quando seu emprego é feito sobre uma matriz predominantemente fina, ocorre a criação de uma pasta, a qual recobre os grãos de solo, fixando-os. Quando for utilizada uma matriz formada por materiais granulares o efeito do cimento ocorre de forma pontual, não recobrando as partículas devido ao tamanho das mesmas e também pela quantidade de vazios existente entre os grãos (SANBONSUGE, 2013)

Silva (2015) ressalta que assim como em concretos e argamassas, a natureza do cimento deve ser considerada na elaboração dos compósitos, uma vez que diferentes composições de cimento conduzem a comportamentos distintos da mistura de solo- cimento.

### 3.2.2 Tipos de cimentos utilizados nos compósitos

De acordo com a NBR 16697: 2018, o cimento Portland comum é definido como “Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.”

O Guia Básico de Utilização do Cimento Portland da ABCP (2002) indica a utilização do cimento comum (CP I), cimento composto (CP II – E, CP II – F e CP II – Z), de alto forno (CP III) e pozolânico (CP IV), quando se tratando do solo- cimento. De acordo com o guia, o CP I seria o cimento Portland comum sem quaisquer adições além do gesso, que é usado como retardador de pega. O CP II possui desempenho equivalente ao cimento Portland comum, apresentando em alguns casos alguma vantagem adicional, enquanto que os cimentos Portland de alto-forno (CP III) e pozolânicos (CP IV) possuem menor velocidade de hidratação, podendo apresentar menor desenvolvimento inicial de resistência.

### 3.2.3 Tipos de solos utilizados nos compósitos

A ABCP afirma que praticamente qualquer tipo de solo pode ser utilizado para se criar o solo-cimento. O solo será o material mais utilizado, com a quantidade de cimento variando entre 5% a 10% do peso do solo, apenas o suficiente para conferir as propriedades de resistência desejadas ao composto. A Associação indica que solos com teor de areia entre 45% e 50% apresentam melhores resultados, embora muitas vezes seja mais pratico a utilização do solo local da obra. Apenas solos que contêm matéria orgânica em sua composição não podem ser utilizados, uma vez que a matéria orgânica influencia significativamente na resistência do compósito, por interferir nas reações químicas entre a água e o cimento.

Bernucci et al. (2006) indicam que a utilização de uma matriz contendo areia torna o processo mais econômico, uma vez que em solos com teor elevado de argila pode ser necessária a adição de um maior teor de cimento.

Sanbonsuge (2013) concluiu que a utilização de porcentagens de cimento maiores que 5% em relação ao peso do solo conferem um enrijecimento significativo ao compósito,

enquanto que a adição de porcentagens da ordem de 3% apresenta melhoria parcial das propriedades da matriz, principalmente em se tratando da trabalhabilidade, com certo aumento da capacidade de suporte.

Solos compostos por frações de argila ou silte não são ideais, uma vez que o compósito poderá sofrer fissuras, trincas ou rachaduras depois de seco, em consequência da retração, além de redução de sua resistência. Já a areia, caracterizada por uma boa resistência e por ser um material inerte, contribui para maior estabilidade e resistência final. Entretanto, solos com grandes quantidades de areia exigem maior tempo para que apresentem resistência suficiente e possam suportar a compactação de outra camada de solo-cimento (SILVA, 2005).

### 3.2.4 Vantagens na utilização do solo-cimento

Dentre as vantagens do solo-cimento estão a grande disponibilidade de solo, o que propicia o uso intensivo de recursos do local, diminuindo gastos com transporte e escavação. Além disso, a tecnologia simples e a fácil aplicação não demandam mão de obra especializada. O compósito apresenta ainda grande durabilidade e manutenção reduzida, devido às elevadas resistências e menor grau de permeabilidade. Em se tratando de construções em que os tijolos são produzidos a partir do uso deste compósito temos ainda diversas outras vantagens como a redução de energia na construção, devido à facilidade de acesso do material e a não necessidade da queima dos tijolos, além disso, apresentam boas condições de conforto térmico e acústico quando comparadas às edificações em alvenaria de tijolo cerâmico. Outro fator considerado é que as paredes não oferecem condições para a proliferação e instalação de insetos nocivos à saúde, além de se mostrarem resistentes ao fogo. Não obstante, uma das grandes desvantagens que surgem com a utilização do solo-cimento em larga escala é a grande variedade de solos existentes, a qual faz necessária uma avaliação em laboratório do solo-cimento a ser utilizado, embora os ensaios requeridos sejam de simples execução como granulometria, compactação e resistência não confinada (SILVA, 2005).

Consoli et al. (2012) apontam o uso frequente deste compósito em bases para pavimentos no campo da infra-estrutura de transporte, devido à resistência e vida útil do material. Kuhlman (1994) afirma que o solo-cimento possui diversas vantagens quando

aplicado em bases de pavimentos semi-rígidos como resistência, economia, transferência de tensões menores ao subleito, menor deformabilidade e permeabilidade.

Além disso, Llajaruna (2016) cita a necessidade, cada vez maior, da construção civil de buscar materiais alternativos de construção, devido à escassez de recursos naturais. O solo-cimento surge então como alternativa.

Embora o cimento esteja hoje entre os materiais cuja produção libera altas quantidades de gases causadores do efeito estufa, sua proposta de utilização no compósito de solo-cimento é de diminuir o uso de outros materiais poluidores como o aço, cal, areia e brita (cuja extração e transporte são danosas ao meio ambiente) ou do próprio cimento, através da utilização do compósito em obras como estabilidade de taludes de aterro, estabilização e aumento de resistência em solos utilizados em camadas de rodovias ou no aumento de resistência de solos submetidos a elevados esforços, a exemplo dos solos em que se apóiam fundações, especialmente no caso das fundações consideradas superficiais em que a aplicação do solo-cimento se mostra viável.

### 3.2.5 Aplicações do solo-cimento

Este compósito possui uma grande gama de aplicações. Em se tratando de edificações, pode ser empregado em duas formas principais, em paredes monolíticas e em tijolos ou blocos prensados. A técnica do solo-cimento pode ainda ser aplicada em muros, contenções, fundações, passeios, contrapisos, coberturas abobadadas e em lajes mistas (SILVA, 2005).

Para Llajaruna (2016) o solo-cimento pode ser aplicado na pavimentação como camada resistente de pavimento, além disso, também pode ser utilizado em fundações de edificações no estado plástico ou autoadensável, ou como vedações de estruturas (utilizando-se paredes monolíticas ou tijolos pré-fabricados).

O solo-cimento possui diversas aplicações na construção civil, que vão desde o paisagismo ao uso em edificações, pavimentação, contenção de encostas e de córregos, além de criação de pequenas barragens. As principais utilizações do compósito hoje se encontram na construção de paredes monolíticas, na construção de pavimentos e no uso de tijolos ecológicos, os quais são produzidos por prensas, dispensando a queima em fornos (LIMA, 2010).

As paredes monolíticas são estruturas formadas através da compactação do solo-cimento na umidade ótima, geralmente em formas de madeira, que são facilmente desmontáveis e vão sendo sobrepostas até se atingir a altura desejável para a parede (LIMA, 2010). A técnica trás diversas vantagens como bom comportamento estrutural e conforto térmico, além de baixo custo, com uma execução simples e não necessidade de mão de obra especializada. Esta é uma alternativa de construção sustentável, com pequeno impacto ao meio ambiente.

Os tijolos prensados, constituídos de solo-cimento, formam outra alternativa ecológica no âmbito da construção civil. Além disso, esses tijolos trazem diversas vantagens como melhor conforto térmico e acústico quando comparado aos tijolos cerâmicos convencionais, além de menor custo devido à grande disponibilidade de matéria-prima, facilidade de execução, não necessidade de mão de obra especializada, além de redução da maior parte de gastos com transporte, uma vez que a execução dos mesmos se dá no próprio canteiro de obras ou em localidades próximas (LIMA, 2010).

Specht (2000) argumenta que quando tratado com cimento, o solo apresenta diversas mudanças em suas propriedades, especialmente nos quesitos de resistência e rigidez, o que trás diversas vantagens quando aplicado aos campos da engenharia civil como estabilidade de taludes, barragens, fundações superficiais e quando aplicado como base e sub-base de pavimentos flexíveis.

### 3.2.6 Cura do solo-cimento

Specht (2000), que estudou o comportamento da mistura solo-cimento-fibra visando à pavimentação, afirma que a adição de cimento Portland, independente do tempo de cura, confere uma grande estabilidade volumétrica ao compósito. Além disso, as propriedades do compósito formado pelo solo-cimento ficam dependentes de fatores como o teor aditivo de cimento, quantidade de água adicionada, tipo e grau de compactação, além do tipo e do tempo de cura utilizado. De acordo com o autor, a negligência da cura nas primeiras idades do compósito pode resultar em fissuras e trincas.

Segundo a NBR 12024:2012 (Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos) para o caso da utilização de corpos-de-prova cilíndricos, a cura deve ser feita da

seguinte forma: “Assim que moldado, colocar o corpo-de-prova na câmara úmida, à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar não inferior a 95%. Para fins exclusivos de dosagem de solo-cimento, o período de cura deve ser, obrigatoriamente, de sete dias; outras idades de cura podem ser consideradas para controle de obra, pesquisas, ensaios especiais e outros.”

Em se tratando de tijolos de solo-cimento, Silva (2005) reuniu em seu trabalho processos de cura utilizados na prática, além do tempo destinado para a hidratação do cimento em cada um dos trabalhos desenvolvidos, conforme mostrado a seguir (tabela 3.2).

Com base nos dados compilados na tabela 3.2, conclui-se que o período mínimo de cura requerido para completar a interação solo-cimento variou de 3 a 7 dias, podendo alcançar 15 dias em solos de plasticidade elevada.

**Tabela 3.2** – Processos de cura utilizados na prática, além do tempo destinado para a hidratação do cimento em cada um dos trabalhos desenvolvidos (SILVA, 2005).

<b>Processo de cura adotado</b>	<b>Fonte</b>
Molhagens diárias por período de 15 dias.	CEBRACE, 1981
Molhagens sucessivas para manter tijolos de solo-cimento úmidos durante 7 dias.	ABCP, 1985
A cura foi iniciada 12 horas após a execução das peças, molhando-se bem, três vezes ao dia, durante 8 dias.	CEPED, 1985
Execução de 2 a 4 molhagens diárias durante um mínimo de 15 dias após a conclusão do serviço de compactação.	TAVEIRA, 1987
Umedecimento constante nos três primeiros dias e nos sete dias subsequentes com três seções diárias de umedecimento.	SEGANTINI e CARVALHO, 1994
Armazenamento e cura em ambientes com temperatura e umidade controlada (23 +/- 2° C e 90 +/- 5%, respectivamente) por período de 7 dias.	PRIETTO, SCHNAID e CONSOLI, 1997
Cura por imersão em água, durante 7 dias e ao ar (ambiente de laboratório) até a data dos ensaios.	SAVASTANO e AGOPYAN, 1998
Cura norma (corpos de prova em câmara úmida durante 7 dias, seguida de cura ao ar livre durante a idade do ensaio) e cura a vapor (submeteu-se os copos de prova após a moldagem a um aquecimento de até 60°C em ambiente com umidade relativa de 95% por período de 8 horas. Os corpos de prova foram desmoldados e após uma hora de resfriamento, os mesmos foram colocados em câmara úmida até completarem 7 dias e após esse período, permaneceram ao ar livre até a realização do ensaio).	BERALDO e PIMENTEL 1999
A cura foi feita em uma câmara com temperatura e umidade controlada durante 3 dias.	MONTARDO, CONSOLI e PRIETTO, 2001
Para os corpos de prova foram utilizados 7 dias de cura e 7 dias de secagem em laboratório à temperatura ambiente. Para fabricação de telhas usou-se somente a cura úmida.	PRIMENTEL E BERALDO, 2001

### 3.2.7 Interação Solo-cimento

As características finais do material compósito de solo-cimento são influenciadas por diversos fatores, como as características do solo utilizado, o teor de cimento da mistura, o grau de homogeneização da mistura e o grau de finura do cimento utilizado. Quanto maior o grau de finura do cimento, maior o desempenho da mistura, de modo que a adição de um teor de 10% de cimento normal é equivalente a adição de 7% de um cimento com maior grau de finura. Além disso, outros fatores como a compactação da mistura, o tempo e condições de cura e os aditivos utilizados apresentam grande importância nas características finais obtidas (SILVA, 2005).

Em relação aos parâmetros de compactação da mistura, em seus estudos Kézdi (1979) observou que a umidade ótima e a densidade aparente seca máxima não são muito afetadas pela adição de cimento. Os resultados obtidos foram que o peso específico aumenta em caso de solos arenosos e de argilas com alta plasticidade, enquanto que para argilas de média e baixa plasticidade não se modifica e sofre uma pequena redução para solos siltosos. Núñez (1991) observou uma falta de padrão nas curvas de compactação com adição de cimento e Ulbrich (1997) apresentou resultados em que a adição de cimento ou fibra não parece ter influência significativa sobre os parâmetros de compactação do solo estudado (SPECHT, 2000).

Em se tratando da retração, este é um fenômeno natural no solo-cimento. Em projetos de pavimentação a questão deve receber atenção especial devido à possível formação de fissuras por retração volumétrica, as quais têm como causas principais as condições climáticas adversas, características da mistura e deficiências no processo de construção e cura.

Bittencourt et al. (2014) avaliaram um solo classificado como argila arenosa com pedregulhos, da região de Porto Nacional-TO, com adição de cimento nas proporções de 1:10 e 1:15. Em seus estudos os pesquisadores comprovaram um aumento significativo na capacidade de carga do solo com a adição de cimento, especialmente na proporção 1:10.

Motta et al. (2014) analisaram características físicas de tijolos de solo-cimento, além da viabilidade de técnicas construtivas sustentáveis. Os autores concluíram que a qualidade do tijolo depende de fatores como o tipo de solo utilizado, umidade de moldagem, tipo de prensa, proporção de solo e de cimento, tipo de estabilizantes e do processo de cura. Além disso, o tijolo de solo-cimento se mostrou mais resistente que o tijolo cerâmico convencional, além de



apresentar uma absorção 15,3% menor. Assim, o uso do solo-cimento mostrou-se uma alternativa técnica e economicamente viável na construção civil, devido às reduções com gasto de mão de obra e de material, menor tempo de construção e facilidade de execução.

### ***3.3 Reforço de solos com o uso de polímeros e cimento***

No contexto hodierno da escassez de recursos naturais o solo-cimento mostrou-se uma excelente alternativa para melhoria da capacidade resistente do solo em obras geotécnicas. Assim, diversos autores estudaram o desempenho do compósito quando utilizado em conjunto com polímeros de diferentes tipos.

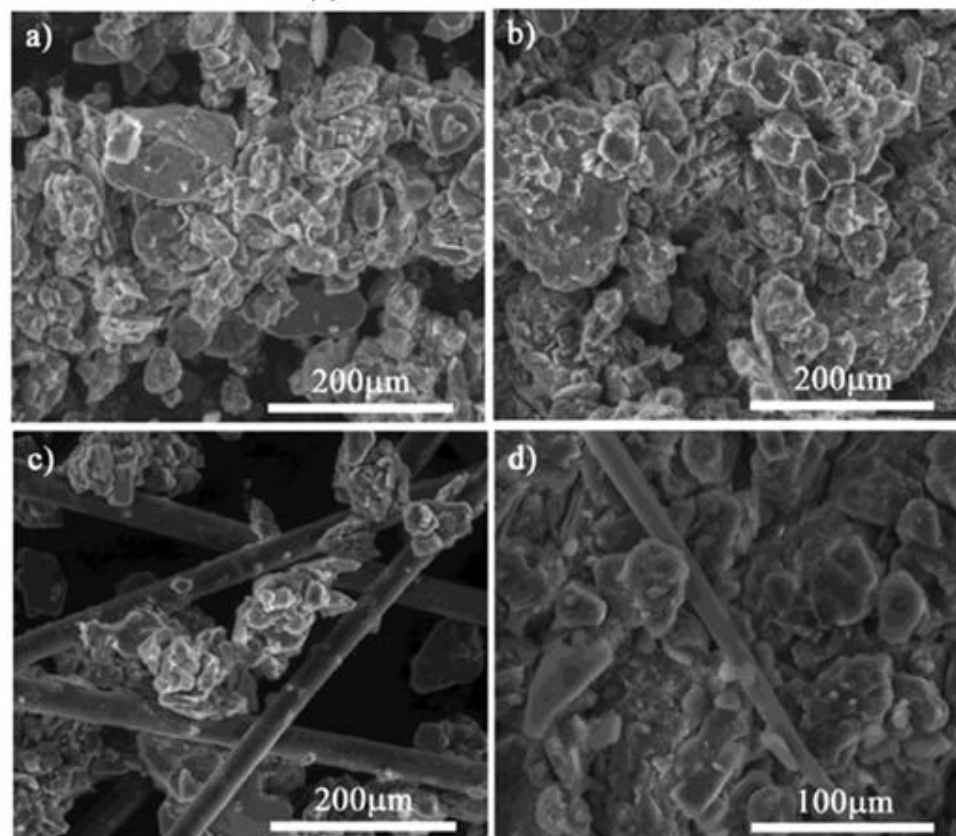
Specht (2000) estudou o comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando à pavimentação. Em suas conclusões o autor afirma que a influência da inclusão de fibras de polipropileno sobre as propriedades do compósito dependerá essencialmente da fibra e da matriz: fibras mais flexíveis mostraram efeito mais pronunciado no comportamento pós-pico aumentando a ductibilidade, tenacidade e resistência à fadiga, enquanto que fibras que apresentam maior rigidez têm seu efeito pronunciado no aumento da resistência de pico. Além disso, fibras de maior comprimento se mostraram mais eficazes.

Guedes (2013) analisou o desempenho mecânico de um solo-cimento micro reforçado com fibras sintéticas de polipropileno para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas. O autor incorporou ao solo-cimento fibras de comprimentos de 6 e 24 mm em proporções de 0,25%, 0,50% e 0,75%. A incorporação das fibras ao compósito mostrou-se satisfatória, aumentando a resistência de pico e a queda de resistência após o pico. Outros fatores significativamente afetados pela inclusão foram as deformações de ruptura, que apresentara aumento, a diminuição da rigidez, aumento das deformações elásticas e plásticas, redução dos módulos de deformabilidade e resistência à compactação. A fibra de 24 mm incorporada ao solo em teor de 0,75% mostrou-se a combinação mais influente.

Girardello (2014) pesquisou o comportamento de ensaios de arrancamento de placas embutidas em camadas de solo-cimento-fibra, utilizando fibras poliméricas de polipropileno. Seus resultados indicaram aumento de força necessário para o arrancamento das placas embutidas em areia-cimento, areia-cimento-fibra e em areia-fibra, quando comparadas ao

arrancamento das placas embutidas em areia. Houve também mudanças na forma de ruptura do solo quando reforçado com fibras e, ou, cimento.

Cristelo et al. (2015) analisaram imagens microscópicas do solo em seu estado puro, com adição de fibras, com adição de cimento e com a adição de cimento e fibras. Os autores puderam observar a estrutura do solo (figura 3.3) e concluíram que ocorre um aumento do índice de vazios com a adição de fibras, os quais são responsáveis por uma perda de resistência mecânica, oriunda do atrito entre as partículas. A adição de cimento, ao contrário do que ocorre com a adição de fibras, é responsável por diminuir o índice de vazios do compósito, uma vez que este atua como aglomerante. No caso da mistura de solo, cimento e fibras, o cimento atua reduzindo os vazios e aumentando a força de ligação na interface solo-fibra, proporcionando ganho nas condições de resistência mecânica da mistura.



**Figura 3.3** – Imagens microscópicas de: (a) solo; (b) solo com adição de 10% de cimento; (c) solo e 0,25% de fibras; (d) solo, 10% de cimento e 0,25% de fibras. (CRISTELO et al., 2015).

Specht (2000) analisando os estudos de diversos autores (CROCKFORD et al. (1993); MAHER & HO (1993); LI & MITCHELL (1997); LIANG (1992); OMINE et al. (1996); MONTARDO (1999); ULBRICH (1997); CONSOLI et al. (1998 e 1999); LIMA et al. (1996); CAVEY et al. (1995)) concluiu que, em geral, as fibras apresentaram diminuição da amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito, aumentando sua tenacidade. Além disso, fibras com maior capacidade de alongação, principalmente fibras poliméricas, apresentam resultados mais satisfatórios que fibras com módulo de rigidez muito elevado, como por exemplo, fibras metálicas. O sucesso desse tipo de inclusão foi associado ao maior intertravamento entre as partículas da matriz.

Em relação à inclusão de tiras, Olutaiwo & Ezegbunem (2017) avaliaram o efeito da inclusão de cimento e tiras de garrafa PET em um solo laterítico, por meio de ensaios de Proctor Modificado e CBR. A quantidade de cimento adicionada variou entre 0%, 1%, 3%, 5% e 7% e quantidade de tiras (com 5 mm de largura e 10 mm de comprimento) em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os autores verificaram uma diminuição da umidade ótima e aumento da massa específica seca máxima, que se mostraram maiores na inclusão de 10% de tiras para todas as quantidades de cimento analisadas. Quanto aos ensaios CBR, todas as combinações tira-cimento avaliadas aumentaram a capacidade de suporte do solo. Em todas as inclusões de cimento a inclusão de 10% de tiras gerou o maior aumento de resistência. A inclusão mais efetiva foi de 7% de cimento em conjunto com 10% de tiras gerando um aumento de 326,8% da capacidade de suporte do solo. De modo geral, a adição das tiras ao solo-cimento apresentou-se uma alternativa benéfica ao meio ambiente, além de econômica quando comparada à adição única de cimento.

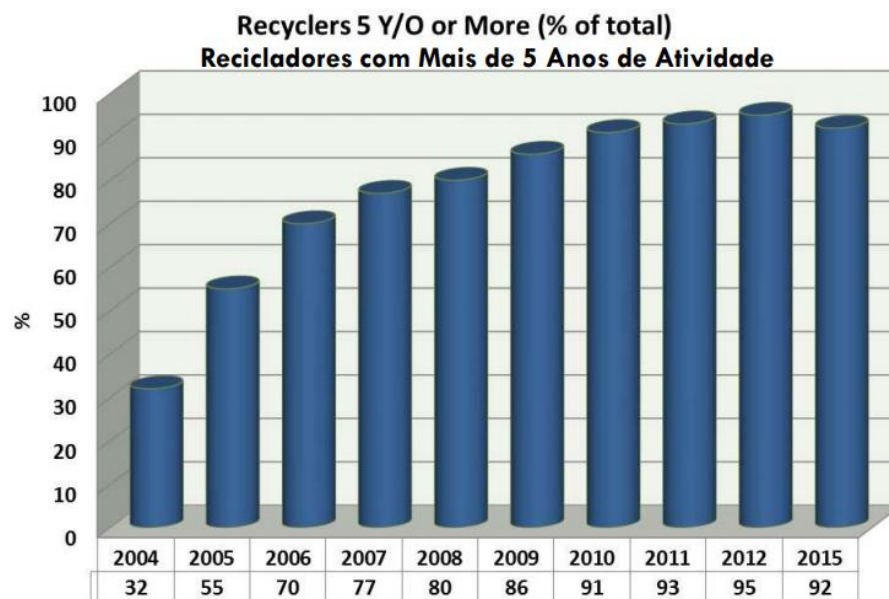
### ***3.4 Importância do uso de materiais alternativos na construção***

Hodiernamente, as visíveis consequências da degradação ambiental e a previsão de futuros cenários ambientalmente catastróficos exigem soluções drásticas para conservação do meio ambiente, entre elas, uma grande dedicação por partes dos governantes das sociedades modernas em propor técnicas para o seu enfrentamento e criação de programas de educação ambiental nas escolas brasileiras. A compreensão da necessidade do gerenciamento integrado dos resíduos sólidos propiciou a formulação da chamada Política dos 3R's, em que é proposto um conjunto de medidas que visa promover a sustentabilidade e a preservação dos recursos

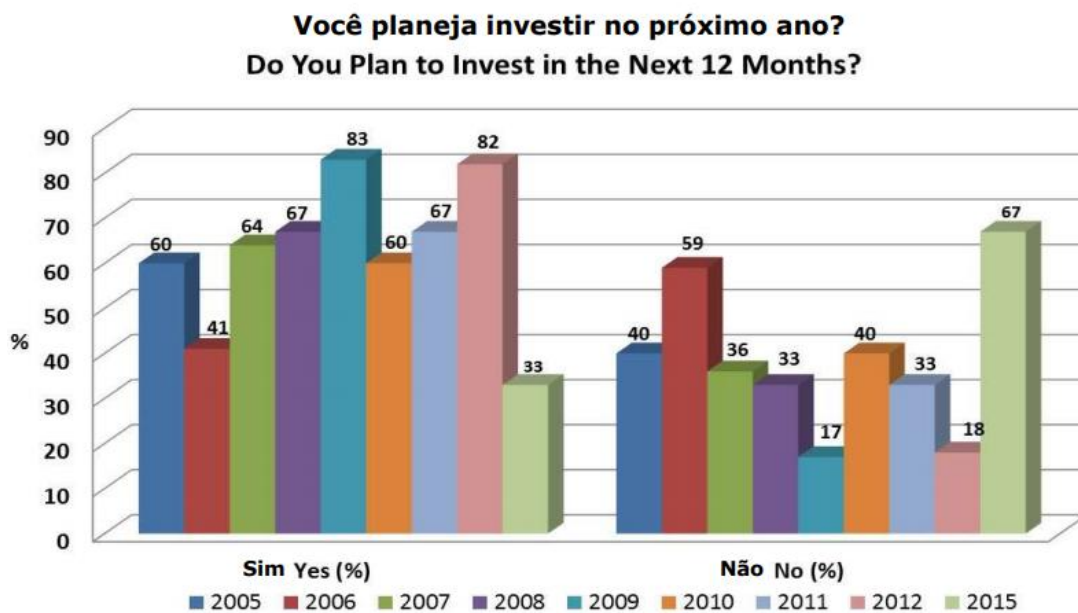
naturais através de três principais ações: reduzir o consumo, reutilizar os materiais consumidos e reciclar o lixo gerado.

Assim, a proposição de usos de materiais alternativos na construção civil que busquem reduzir a produção de resíduos ou utilizar resíduos anteriormente gerados mostra-se necessária, como é o caso do solo-cimento, em que a adição de quantidades moderadas de cimento altera em grandes proporções as propriedades mecânicas dos solos. Outra alternativa é a adição de polímeros, utilizando-se resíduos anteriormente gerados para aumentar a resistência dos solos.

De acordo com a 10ª edição do Censo de Reciclagem do PET no Brasil, as indústrias brasileiras de reciclagem deste material se mostram cada vez mais maduras (figura 3.4), não obstante, apresentam menores perspectivas de investimentos em relação aos anos anteriores (figura 3.5), o que se deve a uma queda da atividade econômica que, reduzindo a demanda em todos os níveis, diminui a quantidade de material reciclado (figura 3.6). O uso de tiras de PET em obras da construção civil apresenta a grande vantagem de não necessidade da reciclagem do material, mas do seu reuso, cortando garrafas PET em tiras de tamanhos adequados.



**Figura 3.4** – Quantidade (em porcentagem) de indústrias brasileiras recicladoras de PET com mais de 5 anos de atividade (ABIPET, 2015).



**Figura 3.5** – Quantidade (em porcentagem) de indústrias brasileiras recicladoras de PET que pretendiam investir na ampliação de sua produção (ABIPET, 2015).



**Figura 3.6** – Quantidade (em Ktons) de PET reciclado no Brasil (ABIPET, 2015).

Em se tratando da utilização do cimento, material que revolucionou a engenharia e a maneira como as comunidades passaram a se desenvolver, as suas principais matérias primas

são a argila (utilizado em aproximadamente 4% do produto) e o calcário (94%), ambos os materiais sendo amplamente encontrados na natureza.

Entretanto, o processo de fabricação do cimento exige um alto consumo de energia, seja na forma de energia térmica (calor), seja na forma de energia elétrica. A maior parte desse consumo, porém, é referente ao gasto de energia térmica durante a queima dos combustíveis. Os combustíveis que alimentam os fornos são, na maior parte das vezes, de fontes não renováveis, como o petróleo e o carvão, o que torna as cimenteiras responsáveis por cerca de 5% da emissão global de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Não obstante, visando tornar a produção do material cada vez mais sustentável, sob a orientação do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) a Cement Sustainable Initiative (CSI) encomendou um vasto programa de pesquisa sobre o impacto da indústria do cimento em nível mundial e trabalhou para desenvolver um plano de ação, o qual elenca opções como a alteração de plantas fabris, de modo a haver captura do carbono emitido; utilização unicamente da via seca no processo de produção, exigindo menor alimentação do forno; reaproveitamento de resíduos industriais e agrícolas para alimentação do forno, em vez de usar combustíveis fósseis e alteração da formulação do cimento para que sua produção libere menor quantidade de CO<sub>2</sub>.

Embora o cimento não esteja entre os materiais mais ecológicos, sua utilização em conjunto com o solo, composto denominado solo-cimento, mostra-se cada vez mais sustentável, uma vez que configura um material de alta resistência capaz de, dentro de casos exaustivamente estudados e com todas as limitações delimitadas, substituir opções mais complexas e menos sustentáveis em casos de obras destinadas a estabilidade de taludes; no caso de obras em estradas pode formar camadas extremamente resistentes, vindo a reduzir espessuras de concreto ou asfalto; em se tratando de utilizações em obras de edificações, pode ser empregado em duas formas principais: paredes monolíticas e tijolos ou blocos prensados, o que é responsável por grande redução de custos, do consumo de água, da energia, além de incentivar o desenvolvimento de novos produtos que contribuam para o mercado e para a diminuição da poluição.

Esta técnica pode ainda ser aplicada ainda em muros, contenções, fundações, passeios, contra pisos, coberturas abobadadas e em lajes mistas (SILVA, 2005).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais utilizados

#### 4.1.1 Solo

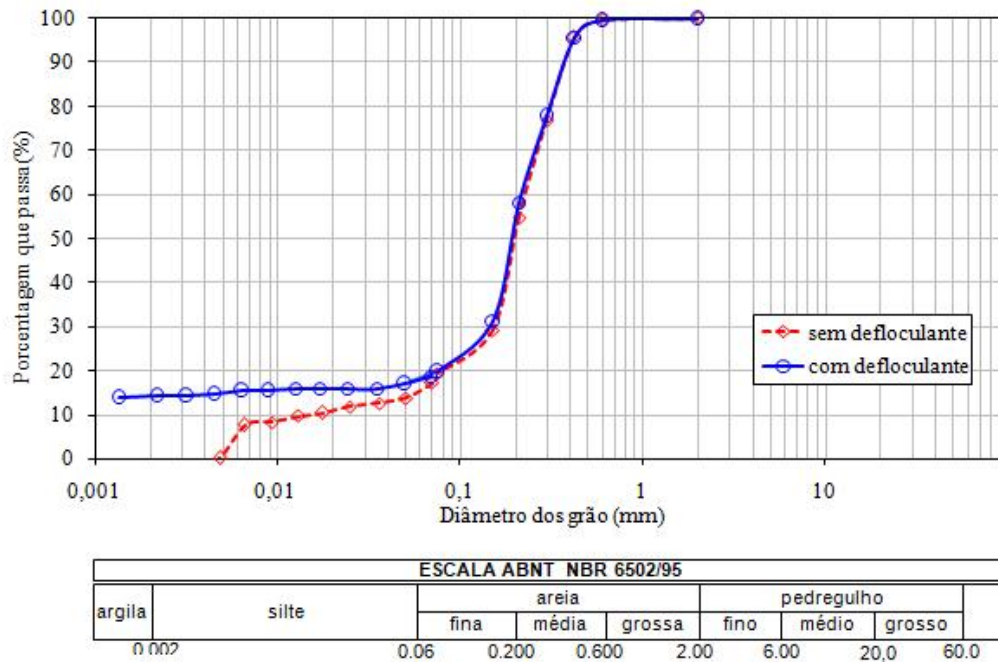
Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o solo arenoso, com presença expressiva de finos, da região de Bauru (SP). A figura 4.1 a seguir representa, através de imagem de satélites, os pontos de coleta das amostras em Bauru (SP).



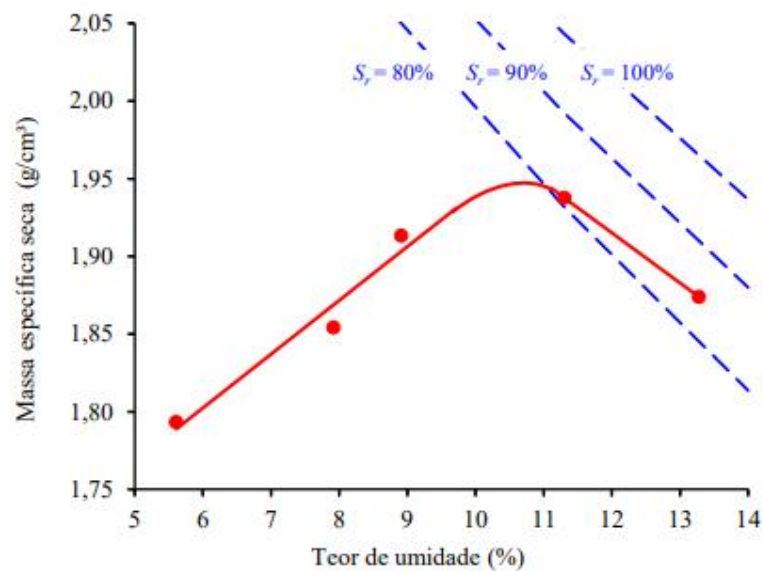
**Figura 4.1** – Imagem de satélites do ponto de coleta das amostras em Bauru- SP. Coordenadas 22°21'6.03"S;  
49°01'57.68"O.

O solo foi escolhido principalmente devido à existência de trabalhos prévios de caracterização (VIVIANI & GIACHETTI, 2006; ALVES, 2009; FAGUNDES, 2014). Fagundes (2014) classificou o solo quanto à sua textura como uma areia média a fina pouco argilosa marrom avermelhada, de acordo com a classificação adotada pela ABNT NBR 6502/1995, a figura 4.2 ilustra as curva granulométricas obtida pelo autor em ensaios com e sem a adição de defloculante. Em função das diferenças obtidas entre as curvas é possível notar que o solo estudado possui finos em estado agregado. A figura 4.3 exhibe a curva de compactação e as curvas correspondentes aos graus de saturação de 80%, 90% e 100%, obtidas em ensaio de compactação na energia Proctor normal, realizado com cinco amostras

por Fagundes (2014). A tabela 4.1 ilustra alguns dados obtidos pelo autor em seus ensaios para caracterização deste solo.



**Figura 4.2** – Curvas granulométricas obtidas em ensaios com e sem o uso de defloculantes. (FAGUNDES, 2014).



**Figura 4.3** – Curva de compactação na energia Proctor normal, referente ao solo de Bauru (SP). (FAGUNDES, 2014).



Tabela 4.1 - Caracterização e compactação do solo. (FAGUNDES, 2014).

<b>Escala ABNT (NBR 6502)</b>	<b>Unidade</b>	<b>Composição (%)</b>
Areia grossa	%	0,3
Areia média	%	41,7
Areia fina	%	38,2
Silte	%	5,8
Argila	%	14,0
Limite de liquidez	%	15,5
Limite de plasticidade	%	NP
Massa específica seca máxima	g/cm <sup>3</sup>	1,950
Teor de umidade ótimo	%	10,6
Massa específica dos sólidos	g/cm <sup>3</sup>	2,649

NP = Não plástico

De acordo com Alves (2009), 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 & Giachetti (2006), em estudos de classificação do solo realizados com 46 amostras retiradas em 300 km de estradas não-pavimentadas de Bauru, 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).

#### 4.1.2 Tiras poliméricas

Neste trabalho foram utilizadas tiras poliméricas de garrafas PET, provenientes de garrafas de dois litros da marca Coca-Cola®. As garrafas de PET foram higienizadas em água corrente e secas. Após esse processo, a parte da garrafa em que ficava o rótulo foi cortada e separada do resto da embalagem para a formação das tiras, enquanto que as tampas, fundos e rótulos dos materiais foram descartados.

Separada a parte em que se posicionava o rótulo da embalagem, este foi cortado em faixas de 10, 15, 20 e 30 mm, de acordo com o tamanho das tiras que se desejava obter. A partir das faixas foram cortadas tiras de 1,5 mm de largura. Este o processo é mostrado na figura 4.4.

As tabelas 4.2 e 4.3, a seguir, exibem as propriedades típicas do PET e a resistência deste polímero a determinados agentes agressivos

**Tabela 4.2** – Propriedades típicas do PET. Adaptado de Shukla (2017).

<b>Polímero</b>	<b>Densidade</b>	<b>Temperatura de fusão (°C)</b>	<b>Resistência à tração a 20°C (Mpa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (Gpa)</b>	<b>Deformação na ruptura (%)</b>
PET	1,22-1,38	260	800-1200	12 -18	8 - 15

**Tabela 4.3** – Resistência do PET a determinados agentes agressivos. Adaptado de Shukla (2017).

<b>Fatores de Influência</b>	<b>Resistência do polímero</b>
Luz Ultravioleta não estabilizada	Alta
Luz Ultravioleta estabilizada	Alta
Álcalis	Baixa
Ácidos	Baixa
Sais	Alta
Detergentes	Alta
Calor (clima seco e temperaturas maiores que 100°C)	Alta
Vapor (temperaturas maiores que 100°C)	Baixa
Hidrólise (reação com a água)	Alta
Microorganismos	Alta
Deformação	Alta



**Figura 4.4** – Etapas da preparação das fibras PET de 20 mm, a partir da reutilização de garrafas de Coca-Cola.

### 4.1.3 Cimento

Para a realização dos ensaios com solo-cimento e solo-cimento-tira, foi utilizado o cimento Portland CP II - F - 32, da fabricante CSN, conforme indicações do Guia Básico de Utilização do Cimento Portland da ABCP, e em função de ser um produto amplamente disponível em território nacional. A tabela 4.4 exibe as propriedades físicas e químicas do material, fornecidas pelo fabricante conforme certificação do material colocada nos anexos deste trabalho.

Tabela 4.4 – Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado.

ENSAIOS FÍSICOS DE CIMENTO PORTLAND COMPOSTO					ABNT NBR 16697:2018	
Determinações	Unidade	Referência Normativa	Limites de Especificação	Desvio Padrão	Resultados	
Finura na peneira 75 µm (n° #200)	%	NBR - 11579	≤ 12	0,12	0,37	
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	NBR NM- 23	...	-	3,00	
Área Específica	cm <sup>2</sup> /g	NBR NM- 76	≥ 2600	151,00	4601	
Água de Consistência Normal	%	NBR NM- 43	...	0,23	25,53	
Tempo de Início de Pega	min	NBR NM - 65	≥ 60	28,50	236	
Tempo de Fim de Pega	min		≤ 600	32,10	305	
Expansibilidade à Quente (mm)	min	NBR NM- 3435	≤ 5,0	0,00	0,0	
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO						
Determinações	Unidade	Referência Normativa	Limites de Especificação	Desvio Padrão	Resultados	
Resistência de 1 dia			-	1,65	13,0	
Resistência de 3 dias	MPa	NBR 7215	≥ 10	1,59	24,7	
Resistência de 7 dias			≥ 20	1,53	30,8	
Resistência de 28 dias			≥ 32	1,40	36,9	
ENSAIOS QUÍMICOS DE CIMENTO PORTLAND COMPOSTO					ABNT NBR 16697:2018	
Determinações	Unidade	Referência Normativa	Limites de Especificação	Desvio Padrão	Resultados	
Óxido de Magnésio (MgO)	%	NBR NM - 11	-	0,40	4,44	
Resíduo Insolúvel (R.I)	%	NBR NM - 15	≤ 7,5	0,07	0,99	
Perda ao fogo (P.F)	%	NBR NM - 18	≤ 12,5	0,82	11,29	
Anidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	%	NBR NM - 16	≤ 4,5	0,18	2,20	
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	%	NBR NM - 20	≤ 11,5	0,93	9,47	
Óxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	%	-	-	0,56	15,42	
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	-	-	0,13	4,09	
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	-	-	0,08	2,33	
Óxido de Cálcio (CaO)	%	-	-	1,03	58,64	
Óxido de Cálcio Livre (CaOlivre)	%	-	-	0,48	1,34	

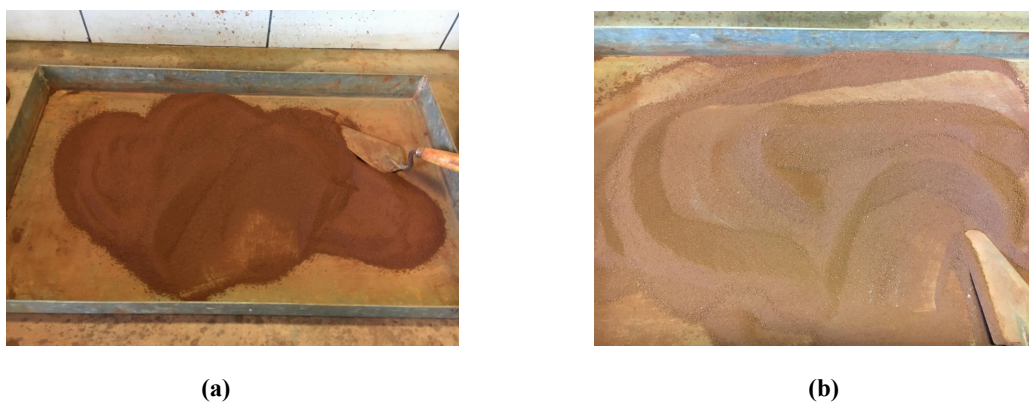
## 4.2 Métodos aplicados

### 4.2.1 Ensaio de compactação

A fim de se avaliar a influência da adição de cimento aos parâmetros de compactação do solo estudado, foram realizados ensaios com adição de 2% e 10% de cimento. A ABCP indica que no solo-cimento deve ser feita a adição de cimento em quantidades entre 5 e 10%. Nesta pesquisa os limites foram estabelecidos em 2% e 10% de cimento de modo a se avaliar também menores adições de cimento, dado o alto impacto ambiental deste material, analisando-se assim o efeito da inclusão de quantidades extremas deste material. Para se avaliar a influência das tiras na compactação do solo, foram realizados também ensaios com adição de tiras de PET em comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e 1,5 mm de largura, em porcentagens de inclusão de 0,25%; 0,50%; 0,75%; 1,00%; 1,50% e 2,00%, em relação à massa seca do solo.

Para os ensaios sem a adição de cimento em solo arenoso foi seguida a NBR 7182/2016, a qual trata sobre a realização de ensaios de compactação em solos. Inicialmente a amostra foi previamente seca ao ar e destorroada. Adicionou-se então a água em quantidade previamente calculada. No caso dos ensaios com a adição de cimento, estes foram executados conforme determinado pela NBR 12023/2012, a qual trata sobre ensaios de compactação em solo-cimento. Neste caso, após a secagem ao ar foi adicionada a quantidade especificada de cimento, e, depois de misturado o cimento ao solo, foi adicionado água em quantidade previamente calculada, conforme mostrado a seguir (figuras 4.5 e 4.6).

Realizada a adição da água e de cimento ou tiras, foi feita a compactação do corpo de prova, utilizando-se um molde cilíndrico acoplado à base (figura 4.7 (a)). Foi então determinada a massa do conjunto molde e corpo de prova, de modo a se obter a massa da amostra compactada úmida. Após a extração do corpo de prova do molde (figura 4.7 (b)) foi determinada a umidade da amostra. Os ensaios em solo-cimento foram realizados sem reuso de material e, portanto, foi utilizada uma amostra virgem para cada ponto da curva.



**Figura 4.5** – Solo utilizado em ensaio de compactação (a) após a secagem ao ar (b) após adição de cimento em porcentagem de 10% em relação à massa seca do solo.



**Figura 4.6** – Solo homogeneizado após adição de cimento e água em quantidades previamente calculadas no ensaio de compactação.



**Figura 4.7** – Procedimentos executados em ensaio de compactação, evidenciando (a) molde cilíndrico acoplado à base utilizado para compactação do corpo de prova (b) corpo de prova após ser feita sua extração do molde.

#### 4.2.2 Ensaio de resistência uniaxial

Para realização dos ensaios de resistência não confinada as tiras utilizadas foram de polietileno tereftalato (PET) com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e largura de 1,5 mm. Estas foram adicionadas aleatoriamente ao solo em percentuais pré-determinados de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5 e 2,0%, em relação à massa seca do solo (figura 4.8).

Conhecidas as curvas de compactação do solo e dos compósitos de solo-tira para a energia Proctor Normal, em função das pequenas variações obtidas com a inclusão de tiras, foi adotada a curva de compactação do solo puro para a moldagem dos corpos de prova. Assim os corpos de prova foram moldados na umidade ótima do solo, obtida no ensaio Proctor com energia normal, sendo utilizado um grau de compactação (GC) de 100% para todos os ensaios realizados.

Após o processo de mistura das fibras, os corpos de prova foram moldados, com e sem tiras, em um cilindro com dimensões médias de 5,1 cm de diâmetro e 10,35 cm de altura e compactados dinamicamente em 3 camadas, com desvio aceitável da umidade ótima de 1% para mais ou para menos, condizente com os desvios que podem ocorrer em campo.



**Figura 4.8**– Detalhe da adição de tiras ao solo em ensaio de resistência uniaxial.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados com 3 corpos de prova para cada comprimento e respectivo teor de tiras, ou seja, totalizando 24 ensaios com 2 repetições cada, que resultaram em 24 valores médios de resistência não confinada.

A figura 4.9 apresenta (a) o equipamento utilizado processo de compactação dos solos para posterior ensaio de compressão uniaxial, e (b) o processo de ruptura dos corpos de prova.



Com os valores médios dos ensaios de resistência não confinada, buscou-se o parâmetro ótimo de solo com teor de tira. Para tanto, traçou-se um gráfico com os valores médios de resistência não confinada versus valores dos teores de tira em porcentagem. Assim, foi possível obter qual o comprimento e teor de tira conduz ao maior valor de resistência não confinada, além de avaliar a variabilidade presente em cada ensaio.

Com esse parâmetro, foram moldados os corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto utilizando-se solo-tira. Além disso, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com solo-cimento e solo-cimento-tira, conforme procedimento descrito a seguir.



(a)



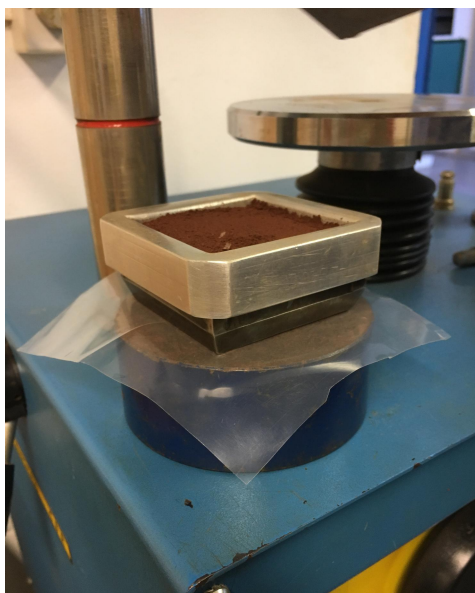
(b)

**Figura 4.9** – Ensaio de resistência não confinada (a) detalhe do equipamento utilizado para compactação dos corpos de prova (b) processo de ruptura dos corpos de prova.



#### 4.2.3 Ensaio de cisalhamento direto

Em função da pequena variação obtida com as curvas de compactação para o solo puro, solo-tira e solo-cimento com a adição de 2% e 10% (vide item 5 - Resultados obtidos e análises), foi adotada a curva de compactação do solo puro para a moldagem dos corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-tira. Os ensaios de cisalhamento direto tiveram início com a moldagem dos corpos de prova na umidade ótima do solo, colocando-se uma massa previamente calculada de solo ou solo-cimento, de acordo com o volume de cada molde e da densidade máxima do compósito, buscando-se o grau de compactação de 95% para os ensaios com solo-cimento e solo-cimento-tira, em função da procura por um material cuja replicação das propriedades em campo apresentasse maior facilidade. Para os ensaios com solo-tira adotou-se o grau de compactação de 100% visando a comparação com os ensaios de resistência uniaxial, em que este grau de compactação foi adotado para evitar maior fragilidade dos corpos de prova. Adotou-se o procedimento de compactação estática, na qual um êmbolo metálico é acoplado ao mesmo equipamento de compressão simples e pressiona a parte superior do molde metálico do ensaio de cisalhamento direto a uma velocidade constante, compactando a quantidade previamente calculada de solo, água, cimento e tiras (figuras 4.10 e 4.11).



(a)



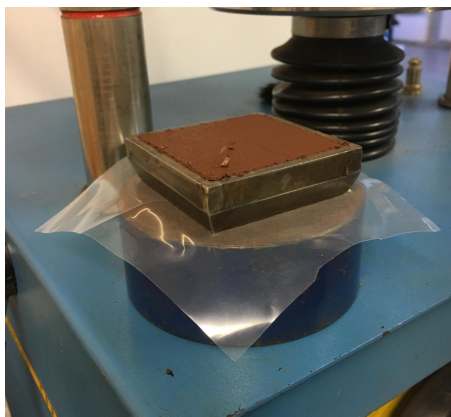
(b)

**Figura 4.10** – Moldagem dos cps para o ensaio de cisalhamento direto (a) colocação do solo sobre o molde (b) compactação do solo com o uso da prensa.

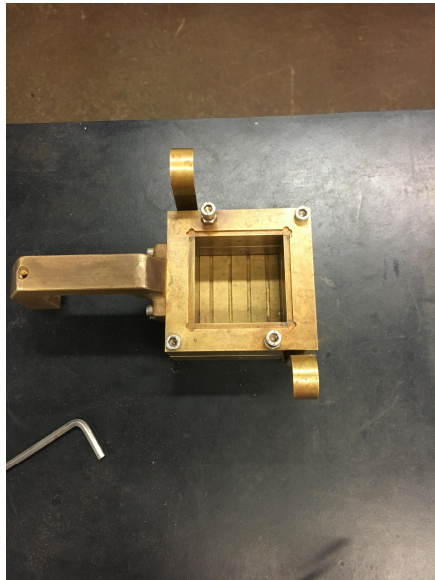
Os corpos de prova (cps) foram então colocados no interior de uma cápsula que foi ajustada na máquina de cisalhamento direto para iniciar a ruptura. Antes do processo de ruptura, os cps foram adensados com o uso de cargas de 1, 2 ou 4 kg, que resultaram em tensões normais de 30,56; 61,11 e 122,22 kPa, respectivamente. A junção dos 3 resultados referentes à tensão cisalhante máxima obtida (tensão de pico) foi usada para formar uma envoltória. As figuras 4.12 e 4.13 ilustram a montagem do ensaio de cisalhamento direto.

No total foram obtidas vinte e três envoltórias: uma de solo arenoso puro; uma de solo-tira em que foi utilizado o parâmetro ótimo solo-tira encontrado nos ensaios de resistência não confinada; cinco de solo-cimento, com adição de cimento em porcentagens de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%; e dezesseis envoltórias de solo-cimento-tiras, incluindo-se tiras de PET em comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e 1,5 mm de largura, em porcentagens de 0,75%; 1,00%, 1,50% e 2,00%.

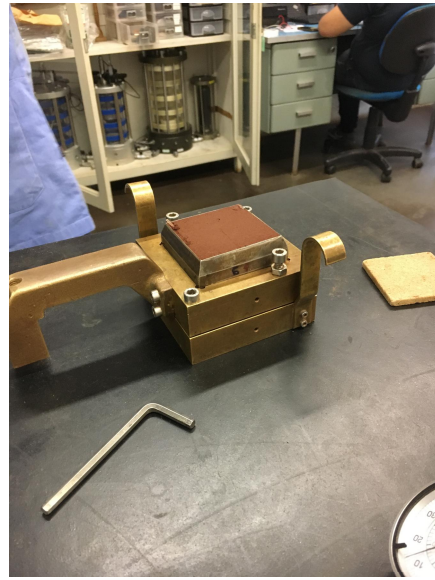
Na execução dos ensaios com utilização dos compósitos de solo-cimento e solo-cimento-tira, a cura foi realizada com a colocação dos corpos de prova em câmara úmida, com umedecimento constante por um período de 7 dias. Em função da semelhança dos resultados obtidos com a utilização de períodos de 7, 14 de 28 dias de cura em trabalhos anteriores, optou-se pela utilização dos 7 dias visando avaliar a utilização do compósito em menores idades e evitar a extensão desta pesquisa por maiores períodos de tempo.



**Figura 4.11** – Corpo de prova do ensaio de cisalhamento direto já moldado.

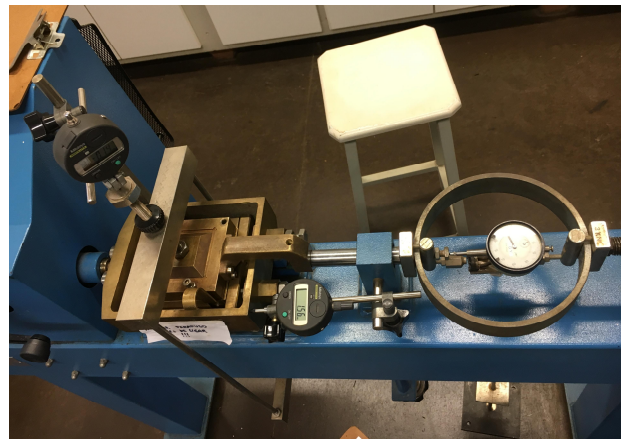


(a)



(b)

**Figura 4.12** – Montagem do ensaio de cisalhamento direto (a) cápsula em que ocorrerá o cisalhamento (b) processo de colocação do corpo de prova no interior da cápsula.

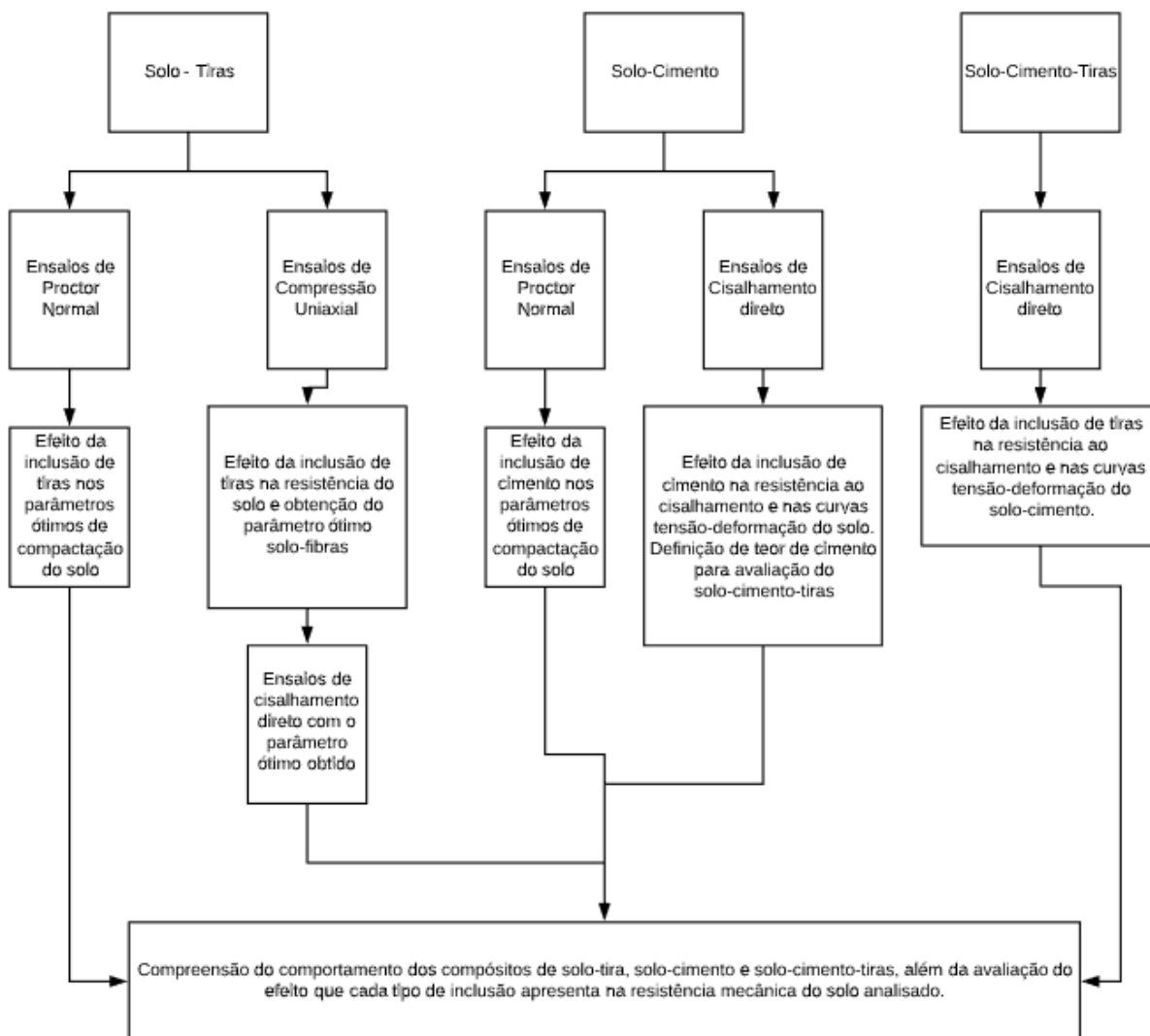


**Figura 4.13** – Processo de cisalhamento do corpo de prova no ensaio de cisalhamento direto.

Todos os ensaios foram realizados de acordo com as normas da ABNT e da ASTM.

### 4.3 Sínteses da pesquisa

A figura 4.14 e tabela 4.5, a seguir, ilustram sínteses dos ensaios, procedimentos e análises desta pesquisa.



**Figura 4.14** – Fluxograma indicando todas as etapas de execução desta pesquisa.

Tabela 4.5 - Síntese da Pesquisa.

Material	Tipo	Porcentagem em Peso (%)	L (mm)	Ensaio	Especificação	Principais Análises
Solo-tiras	Solo arenoso e tiras PET	Adição de tiras em quantidades de: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00%	10, 15, 20 e 30 mm	Compressão uniaxial	ABNT NBR 12770 (1992)	Determinação do parâmetro ótimo solo-tira, ou seja, inclusão de tiras cujo tamanho e porcentagem resulta no maior aumento de resistência uniaxial do solo.
				Proctor Normal	ABNT NBR 7182 (2016)	Avaliação da influência da inclusão de tiras aos parâmetros de compactação do solo (massa específica seca máxima e umidade ótima).
Solo-Cimento	Solo arenoso e cimento Portland CP II-F-32	Adição de cimento em quantidades de 2% e 10%	-	Proctor Normal	ABNT NBR 12023 (2012)	Avaliação dos efeitos da inclusão de diferentes quantidades de cimento aos parâmetros de compactação do solo.
		Adição de cimento em quantidades de: 2; 4; 6; 8 e 10%	-	Cisalhamento Direto	ASTM D3080 (2011)	Avaliação das curvas tensão x deformação e obtenção dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito)
Solo-Cimento - Tiras	Solo arenoso, tiras de PET e cimento Portland CP II-F-32	Adição de 2% de cimento e tiras em quantidades de 0,75; 1,00; 1,50; 2,00%	Adição de tiras: 10, 15, 20 e 30 mm	Ensaio de cisalhamento direto	ASTM D3080 (2011)	Avaliação das curvas tensão x deformação e obtenção dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito)

L = comprimento; PET = polietileno tereftalato.

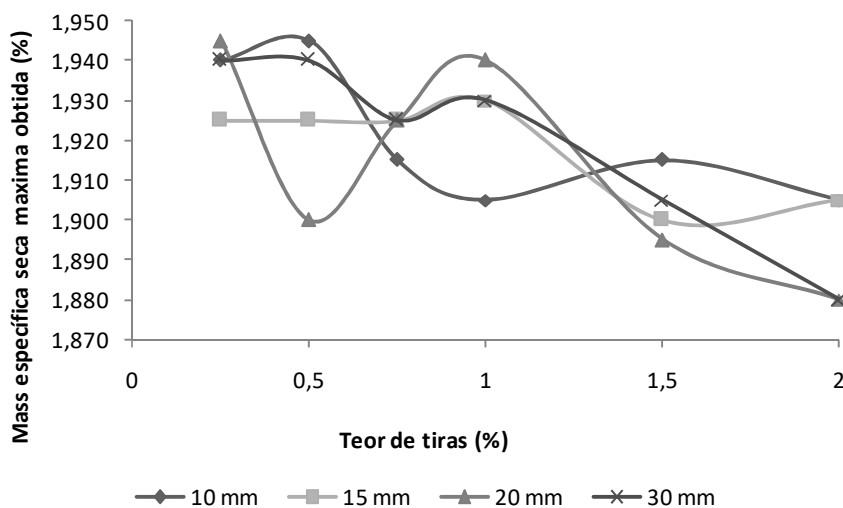
## 5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

### 5.1 Ensaio de compactação

A fim de se avaliar os efeitos da inclusão de fibras e de cimento nos parâmetros de compactação do solo, foram realizados ensaios de Proctor Normal para o solo estudado com a adição de tiras em diferentes comprimentos (10, 15, 20 e 30 mm) e percentagens (0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5 e 2,0% em relação à massa seca do solo), e com adições de cimento em percentagens de 2 e 10%.

#### 5.1.1 Ensaio de compactação em compósitos de solo-tira

A tabela 5.1 e as figuras 5.1, e 5.2, a seguir, ilustram os parâmetros ótimos de compactação obtidos para compósitos de solo-tira, com inclusões de tiras em diferentes tamanhos e percentagens.



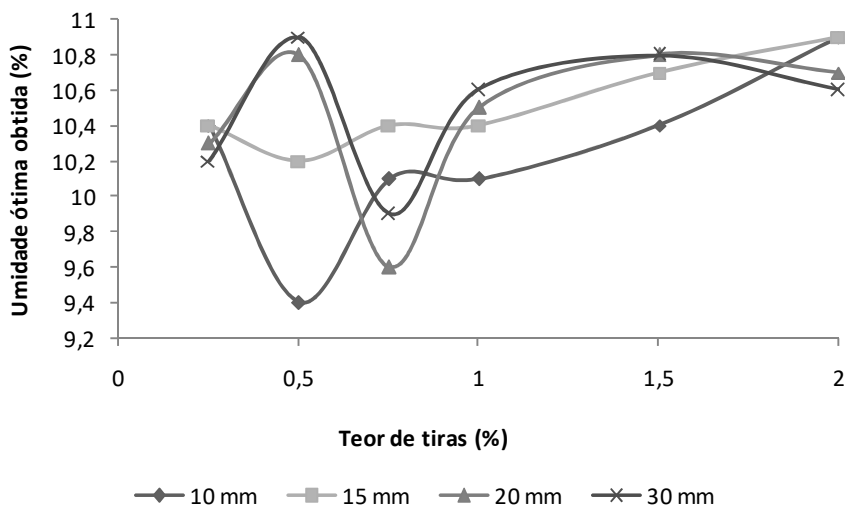
**Figura 5.1** – Valores de massa específica seca máxima, obtidos em ensaios de Proctor para diferentes inclusões de tiras do tipo PET (em tamanhos e percentagens).

**Tabela 5.1** – Parâmetros ótimos de compactação obtidos em ensaios de Proctor com energia normal, para solo arenoso com inclusão de diferentes tamanhos e porcentagens de tiras tipo PET.

Tamanho das tiras	Porcentagem de inclusão	Umidade ótima do compósito (%)	Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )
10 mm	0,25%	10,4	1,940
	0,50%	9,4	1,945
	0,75%	10,1	1,915
	1,00%	10,1	1,905
	1,50%	10,4	1,915
	2,00%	10,9	1,905
15 mm	0,25%	10,4	1,925
	0,50%	10,2	1,925
	0,75%	10,4	1,925
	1,00%	10,4	1,930
	1,50%	10,7	1,900
	2,00%	10,9	1,905
20 mm	0,25%	10,3	1,945
	0,50%	10,8	1,900
	0,75%	9,6	1,925
	1,00%	10,5	1,940
	1,50%	10,8	1,895
	2,00%	10,7	1,880
30 mm	0,25%	10,2	1,940
	0,50%	10,9	1,940
	0,75%	9,9	1,925
	1,00%	10,6	1,930
	1,50%	10,8	1,905
	2,00%	10,6	1,880

Comparando-se os resultados com os parâmetros ótimos obtidos na compactação do solo arenoso puro, em que a massa específica seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) encontrada foi de 1,950 g/cm<sup>3</sup> e a umidade ótima de 10,6%, em todos os casos analisados houve diminuição da massa específica seca máxima obtida devido à inclusão das tiras.

Essa diminuição variou entre 3,58% e 0,26%, de modo que a maior massa específica foi obtida para inclusões de tiras em menores porcentagens (valor de 1,945 g/cm<sup>3</sup> encontrado em inclusões de 0,5% de tiras de 10 mm de comprimento e de 0,25% de tiras de 20 mm de comprimento). Os menores valores foram obtidos para inclusões de tiras maiores e na máxima quantidade avaliada (valor de 1,880 g/cm<sup>3</sup> obtido para inclusões de tiras de 20 e 30 mm de comprimento em adições de 2,0% em relação à massa seca do solo).



**Figura 5.2** – Valores de umidade ótima, obtidos em ensaios de Proctor para diferentes inclusões de tiras do tipo PET (em tamanhos e porcentagens).

Em geral, é possível notar que as menores massas específicas foram encontradas para inclusões de tiras em quantidades maiores (1,5% e 2,0% em relação à massa seca do solo). Em relação ao tamanho das tiras, os resultados variaram, de modo que inclusões de tiras em quantidades de 2,0% resultaram em massas específicas especialmente menores para tiras de 20 e 30 mm de comprimento. As tiras de 20 mm de comprimento mostraram aplicação vantajosa em porcentagens de 0,25% e 1,0%, em que a diminuição da massa específica seca máxima obtida foi de 0,26% e 0,51%, respectivamente. Para inclusões de 0,25% e 0,50% as tiras de 10 mm apresentaram as maiores massas específicas, com diminuições de 0,51% e 0,26%, respectivamente, em relação aos parâmetros obtidos para o solo puro.

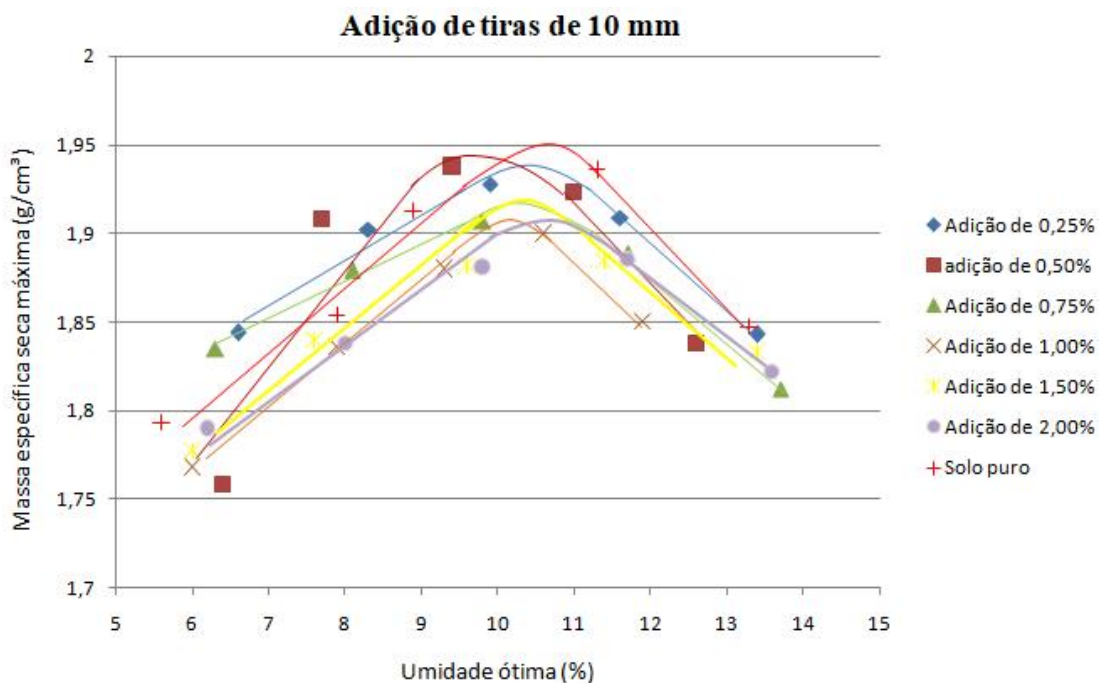
Em relação à umidade ótima obtida para cada compósito, essa se mostrou maior para inclusões de tiras em quantidades de 1,0%, 1,5% e 2,0%. O valor variou entre aumentos de 2,83% (para inclusões de 2% de tiras de 10 e 15 mm de comprimento e de 0,5% de tiras de 30 mm) e diminuições de 11,32% (para inclusões de 0,5% de tiras de 10 mm).

Uma vez que a massa específica do PET (1,22-1,38 g/cm<sup>3</sup>) é menor que a massa específica seca máxima do solo analisado (1,95 g/cm<sup>3</sup>) não é possível concluir se a adição de tiras de fato confere certa resistência à compactação aumentando a porosidade da mistura, conforme afirmado por Hoare (1979) e Feurharmel (2000) em relação à adição de fibras, ou se isso ocorre em função da adição de um material cuja massa específica é menor. Indica-se a

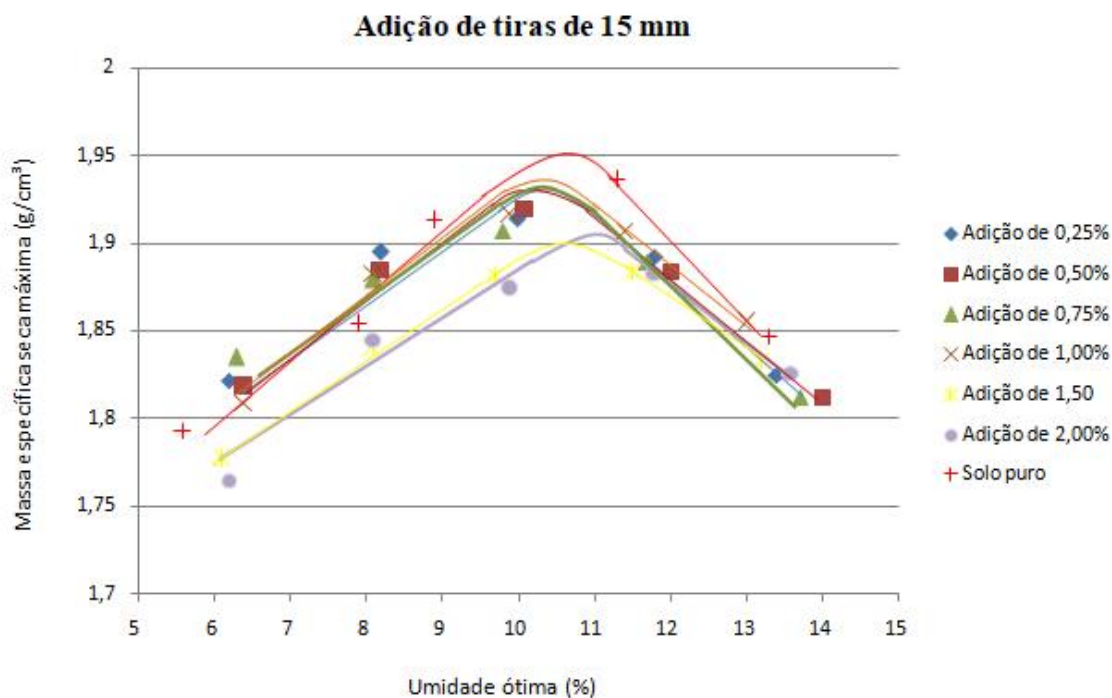


avaliação futura da permeabilidade do solo em função da inclusão de tiras para obtenção de resultados mais específicos.

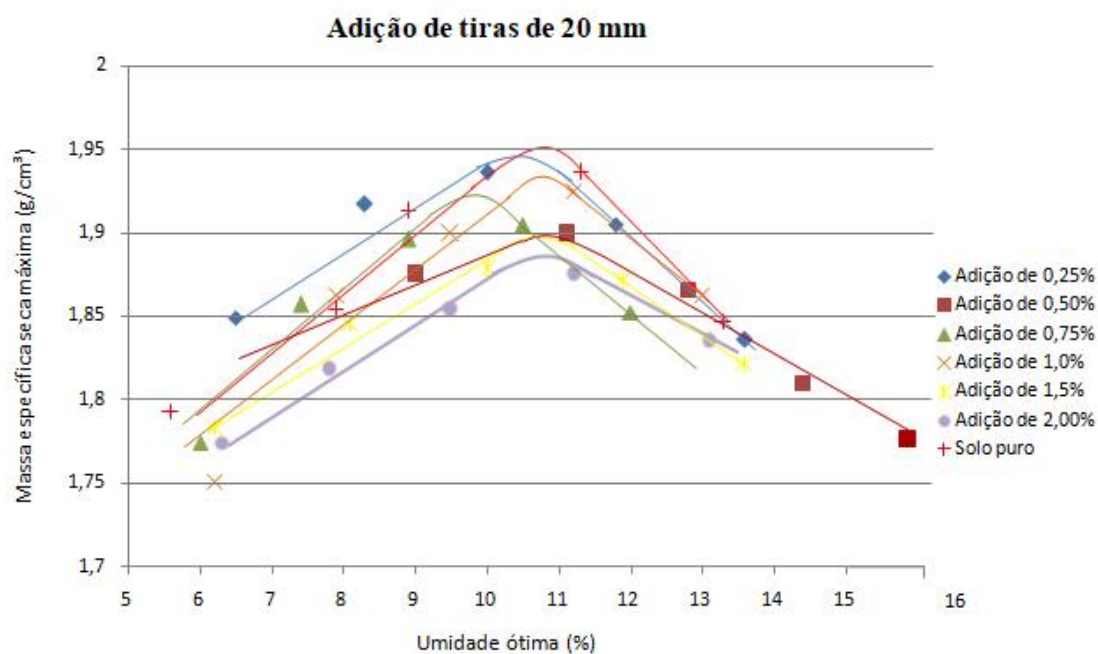
As figura 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, a seguir, exibem as curvas de compactação para o solo-tira e para o arenoso puro, tornando possível avaliar a tendência que o solo apresenta em função deste tipo de inclusão. É possível perceber claramente a diminuição da massa específica seca em todas as inclusões de tiras, independente do comprimento ou porcentagem. O posicionamento das curvas em relação à horizontal varia tanto à esquerda quanto à direita da curva do solo puro, representando a diminuição e aumento da umidade ótima, que se mostrou maior para inclusões de maiores quantidades de fibras.



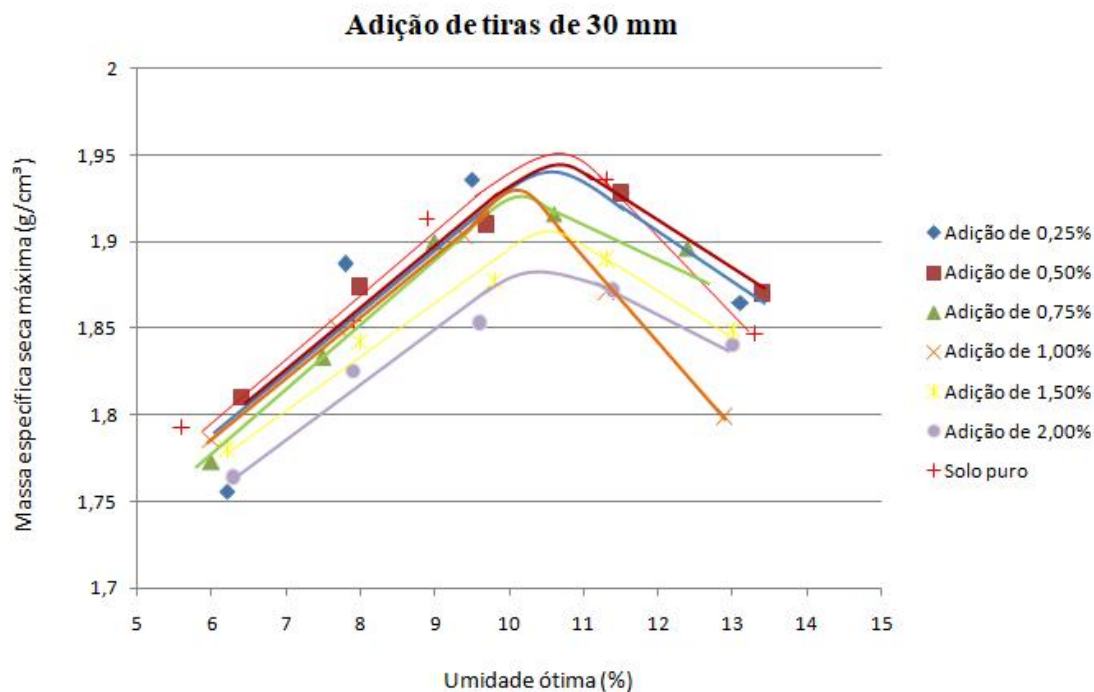
**Figura 5.3-** Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 10 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.



**Figura 5.4-** Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 15 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.



**Figura 5.5-** Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 20 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.



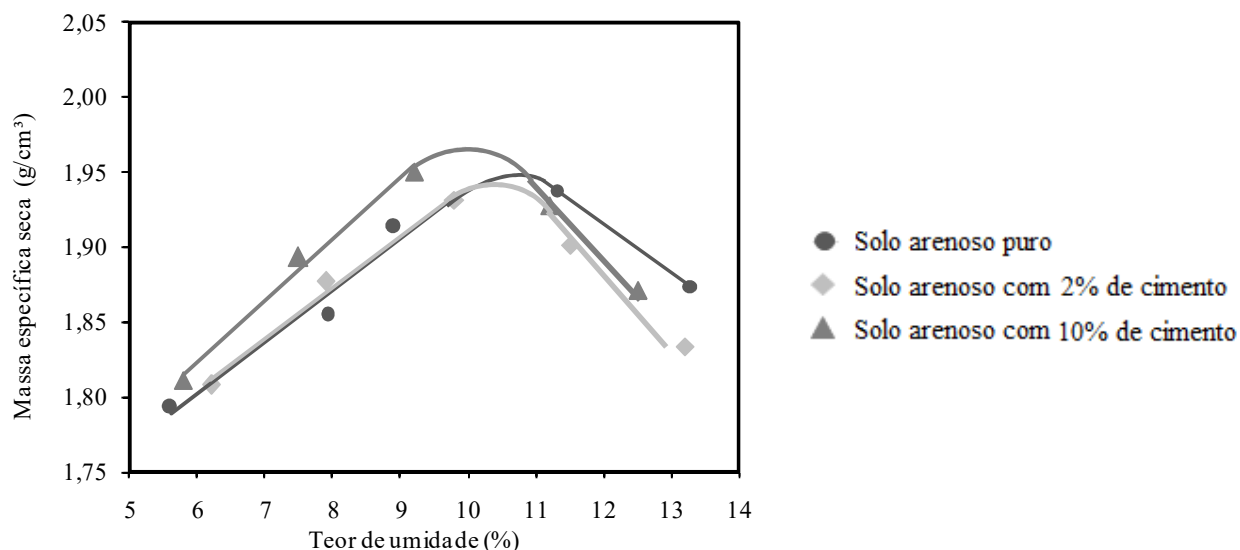
**Figura 5.6-** Curvas de compactação do solo-tira para inclusões de tiras de 30 mm e do solo arenoso puro para fins de comparação.

### 5.1.2 Ensaio de compactação em compósitos de solo-cimento

A figura 5.7 e tabela 5.2, a seguir, ilustram os parâmetros de compactação obtidos para o solo arenoso puro e com adição de cimento em porcentagens de 2% e 10%, possibilitando a análise do efeito deste tipo de inclusão na compactação do solo analisado.

**Tabela 5.2** – Parâmetros de compactação obtidos em ensaio de Proctor normal, em solo arenoso com e sem adição de cimento.

Amostra	$\rho_d$ máximo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Umidade ótima (%)
Solo com 2% de cimento	1,940	10,3
Solo com 10% de cimento	1,965	10,0
Solo sem cimento	1,950	10,6



**Figura 5.7** – Curvas de compactação referentes ao solo arenoso puro e com a adição de cimento em porcentagens de 2% e 10%.

Analisando-se os resultados obtidos pode-se concluir que houve variação dos parâmetros de compactação a depender da adição de cimento, de modo que, em acréscimo de 2% de cimento houve uma diminuição muito pequena de 0,51% da massa específica seca máxima ( $\rho_d$  máximo) e diminuição da umidade ótima em 2,8%. Para adição de 10% de cimento houve acréscimo de 0,77% da massa específica seca máxima e diminuição da umidade ótima em 5,7%. Dessa forma, a adição de cimento ao solo arenoso não apresentou variações relevantes nos parâmetros de compactação do solo, culminando em uma variação muito pequena na massa específica seca máxima e em diminuição da umidade ótima.

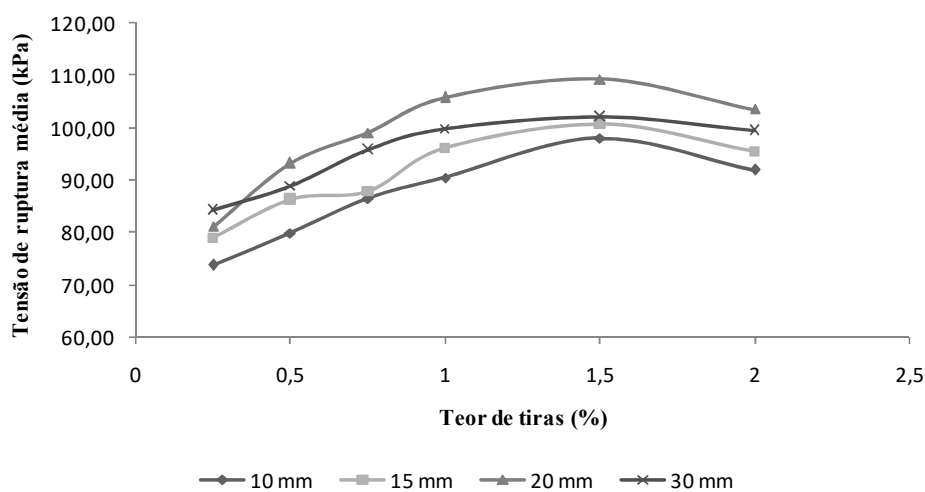
## 5.2 Ensaio de resistência não confinada

Os ensaios de resistência não confinada foram realizados com 3 corpos de prova para cada comprimento e respectivo teor de tiras, totalizando 24 ensaios com 2 repetições, que resultaram em 24 valores médios de resistência não confinada. Os valores médios foram obtidos através de uma média destes 3 valores máximos de resistência obtidos na ruptura de cada corpo de prova, sendo o critério de ruptura estabelecido pelo estado em que a máxima tensão axial é atingida.

Assim, foi possível realizar uma análise do efeito da inclusão de tiras no solo, em termos de ganho de resistência e da variabilidade que cada ensaio apresentou ao ser repetido

nas mesmas condições. Os valores médios de resistência obtidos em função dos comprimentos das tiras e das porcentagens de tiras adicionadas, assim como o coeficiente de variação obtido para cada amostra, estão apresentados na tabela 5.3 e figura 5.8, a seguir.

Para fins de comparação, em relação aos corpos de prova moldados sem a inclusão de tiras, obteve-se uma resistência média (a partir dos valores máximos de resistência de 3 diferentes corpos de prova) de 56,8 kPa para o solo arenoso puro.



**Figura 5.8**– Valores médios da resistência não confinada obtidos com a inclusão de tiras do tipo PET em solo arenoso.

**Tabela 5.3** – Valores médios de resistência (em kPa) obtidos em função da variação dos comprimentos das tiras e das porcentagens de tiras adicionadas, assim como o coeficiente de variação obtido para cada amostra, em se tratando do solo arenoso.

<b>SOLO ARENOSO COM INCLUSÃO DE TIRAS PET</b>					
<i>Tiras de 10 mm de comprimento</i>					
Porcentagem de tiras	Resistência 1	Resistência 2	Resistência 3	Média	CV
0,25%	76,0	78,4	66,7	73,7	8,39
0,50%	78,5	81,4	79,6	79,8	1,83
0,75%	83,0	90,4	85,8	86,4	4,32
1,00%	89,5	91,8	90,2	90,5	1,30
1,50%	95,7	100,7	97,7	98,0	2,57
2,00%	92,1	94,5	89,0	91,9	3,00
<i>Tiras de 15 mm de comprimento</i>					
Porcentagem de tiras	Resistência 1	Resistência 2	Resistência 3	Média	CV
0,25%	75,5	77,0	84,2	78,9	5,89
0,50%	85,4	84,4	89,0	86,3	2,80
0,75%	85,6	87,4	90,4	87,8	2,76
1,00%	95,7	94,5	97,7	96,0	2,36
1,50%	100,9	99,7	101,6	100,7	0,95
2,00%	100,7	93,5	91,8	95,3	4,96
<i>Tiras de 20 mm de comprimento</i>					
Porcentagem de tiras	Resistência 1	Resistência 2	Resistência 3	Média	CV
0,25%	84,2	79,4	79,6	81,1	3,35
0,50%	93,4	94,9	91,3	93,2	1,94
0,75%	99,1	101,9	96,3	99,1	2,83
1,00%	103,4	107,5	106,4	105,8	2,01
1,50%	105,2	111,3	111,5	109,3	4,74
2,00%	102,0	103,4	105,2	103,5	1,55
<i>Tiras de 30 mm de comprimento</i>					
Porcentagem de tiras	Resistência 1	Resistência 2	Resistência 3	Média	CV
0,25%	78,4	84,1	90,4	84,3	7,12
0,50%	87,2	83,7	95,5	88,8	6,82
0,75%	95,2	96,1	96,3	95,9	0,61
1,00%	99,7	96,1	103,4	99,7	3,66
1,50%	103,6	100,9	101,8	102,1	1,35
2,00%	98,1	98,3	102,2	99,5	2,32

CV= Coeficiente de Variação

Assim, nota-se que a resistência não confinada das amostras varia para todos os tamanhos e porcentagens de tiras adicionadas. Em todos os casos analisados ocorre o aumento da resistência devido à inclusão de tiras, independente do comprimento e porcentagens em que estas foram incluídas.

O parâmetro ótimo solo-tira, ou seja, a inclusão de tiras cujo tamanho e porcentagem gerou maior aumento de resistência foi encontrado para a inclusão de tiras de 20 mm de comprimento e teor de 1,5% em relação à massa seca do solo, a qual apresentou o valor médio de resistência de 109,3 kPa, que resultou em um aumento de 92,4% em relação à resistência do solo sem tiras.

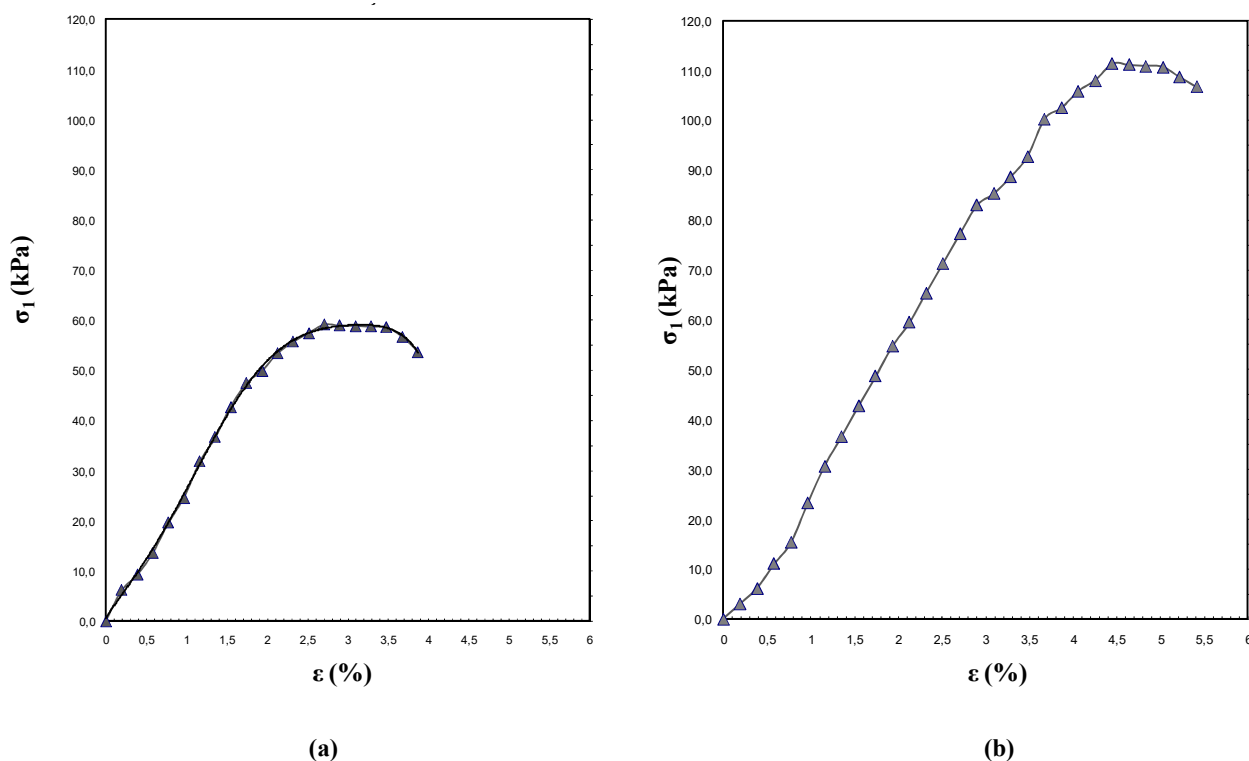
Observando-se o comportamento deste solo (figura 5.8) dados os diferentes tipos de inclusão de tiras (seja em tamanho ou quantidade), nota-se uma tendência de aumento de resistência do solo quanto maior o comprimento das tiras adicionadas, exceto para a inclusão de tiras de 30 mm de comprimento. Esse fator poderia ser explicado pelas reduzidas dimensões dos corpos de prova utilizados (5,1 cm de diâmetro e 10,35 cm de altura) que se mostram pequenas para tiras de 30 mm de comprimento o que, no caso de solos não coesivos, torna os corpos de prova perceptivelmente mais frágeis e menos unidos. Todavia, esta hipótese só poderia ser comprovada com a realização de novos ensaios utilizando corpos de prova de maiores dimensões.

Para todos os comprimentos de tira avaliados, a maior resistência para o compósito foi obtida para adições em porcentagens de 1,5% de tiras, apresentando queda de resistência para adições de 2,0%.

Em se tratando do coeficiente de variação obtido para cada amostra, este relaciona-se com a dispersão dos dados em relação à média. Assim, analisando-se os resultados obtidos referentes a cada amostra, pode-se notar que a variabilidade dos dados foi maior na inclusão de 0,25% de tiras, além de apresentar valores diversificados para cada comprimento de tira, a exemplo: para as tiras de 10 mm de comprimento houve maior variabilidade da resistência das amostras nas inclusões de 0,25% e de 0,75%. Em se tratando das tiras de 15 mm de comprimento, as maiores variabilidades foram encontradas para inclusões de 0,25% e 2%, enquanto que nas tiras de 20 mm de comprimento há maior desvio para a inclusão em quantidades de 1,5% e, por fim, para as tiras de 30 mm de comprimento houve maior desvio para adição das tiras em porcentagens de 0,25 e 0,50%. Em geral, os coeficientes de variação obtidos são pequenos, mostrando-se próximos do coeficiente de variação de 4,14% obtido para o solo puro e representando variações de 8,4% no maior valor obtido (na amostragem de tiras de 10 mm em inclusão de 0,25%). Entretanto, em função da variabilidade que a adição de tiras de maneira aleatória pode conferir ao compósito, indica-se a realização de análises

estatísticas mais aprofundadas, verificando se estes comportamentos se repetem a partir de um número maior de repetição dos ensaios.

A figura 5.9 exibe as curvas tensão-deformação obtidas em ensaio (a) para o solo arenoso puro e (b) para o solo arenoso com a inclusão do parâmetro ótimo solo-tira (tiras com 20 mm de comprimento e teor de 1,5% em relação à massa seca do solo).



**Figura 5.9**– Curvas tensão-deformação obtidas em ensaio (a) para o solo arenoso puro e (b) para o solo arenoso com a inclusão do parâmetro ótimo solo-tiras (tiras com 20 mm de comprimento e teor de 1,5% em relação à massa seca do solo).

Através da análise das curvas é possível verificar que a inclusão deste parâmetro 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.

Foram realizados também ensaios de resistência não confinada para o solo sem tiras e com a adição de tiras no parâmetro ótimo solo-fibra variando-se a umidade em que os corpos de prova foram moldados em +/- 2% em relação à umidade ótima. Para cada variação da umidade foram ensaiados 3 corpos de prova, de modo que a média da resistência foi obtida em função dos valores máximos de resistência obtidos na ruptura de cada corpo de prova. Os

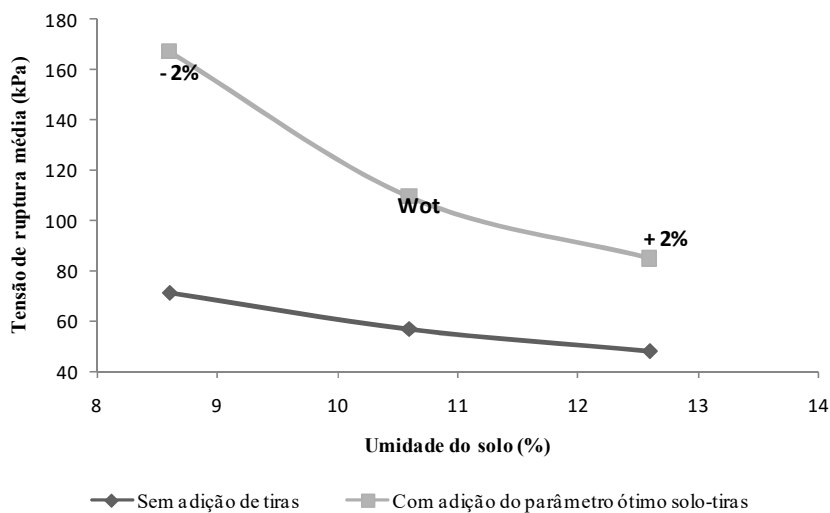


resultados obtidos são exibidos a seguir pela tabela 5.4, a seguir, e figura 5.10. A escolha dos parâmetros de variação da umidade em que os ensaios foram avaliados buscou verificar o efeito de pequenas variações para o solo puro e com inclusão de tiras. Estudos mais aprofundados devem ser feitos para avaliar o comportamento das tiras não apenas em função da umidade do solo, mas também avaliar a variação da resistência obtida com inclusão de fibras em função da saturação do solo.

**Tabela 5.4** – Valores médios de resistência obtidos para o solo sem inclusão de tiras e com inclusão do parâmetro ótimo solo-tiras encontrado, variando-se a umidade em que os corpos de prova foram moldados.

Umidade do solo	Média de resistência (kPa)	
	Solo arenoso puro	Solo arenoso com adição de fibras
Umidade ótima da matriz	56,8	109,3
Wot - 2%	71,3	167,1
Wot + 2%	48,3	84,7

Dessa forma, nas inclusões de tiras do tipo PET em solo arenoso notou-se que o parâmetro ótimo de inclusão de tiras, além de apresentar resistência maior quando analisado em um solo com umidade de 8,6% (2% menor que o teor de umidade ótima), apresentou melhor desempenho: houve um aumento de 134,4% da resistência, o qual foi 42 % maior do que quando se analisou a inclusão do parâmetro ótimo solo-tira na umidade ótima do solo. Entretanto, quando os corpos de prova foram moldados na umidade de 12,6% (2% maior que o teor de umidade ótima) houve um aumento de 75,4% da resistência não confinada do solo, o qual foi 17% menos efetivo que o valor obtido analisando-se o desempenho do compósito na umidade ótima do solo.



**Figura 5.10**– Valores de resistência obtidos para o solo arenoso sem inclusão de tiras e com inclusão do parâmetro ótimo solo-tira encontrado, variando-se a umidade em que os corpos de prova foram moldados

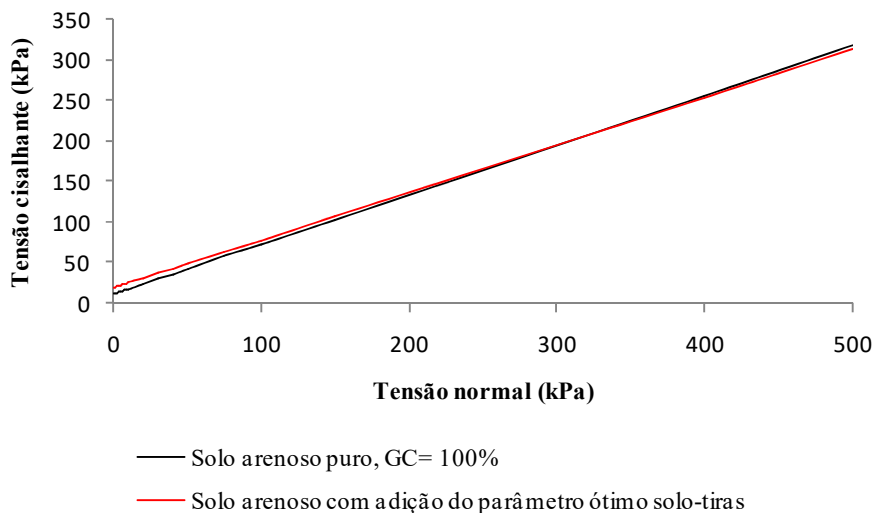
### 5.3 Ensaios de cisalhamento direto

#### 5.3.1 Ensaios de cisalhamento direto em compósitos de solo-tira

A partir do parâmetro ótimo solo-tira encontrado neste trabalho, Castilho (2017) realizou ensaios de cisalhamento direto verificando a resistência ao cisalhamento do solo arenoso puro (com grau de compactação de 100%) e do solo com inclusão do parâmetro ótimo-solo tiras. Os resultados são mostrados na tabela 5.5 e figura 5.11

**Tabela 5.5** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos em ensaio de cisalhamento direto, para solo arenoso com e sem a inclusão de tiras. (CASTILHO, 2017).

	Solo arenoso sem adição de tiras	Solo arenoso com adição de tiras no parâmetro ótimo
Coesão (kPa)	11,7	19,5
Ângulo de atrito (°)	31,4	30,3



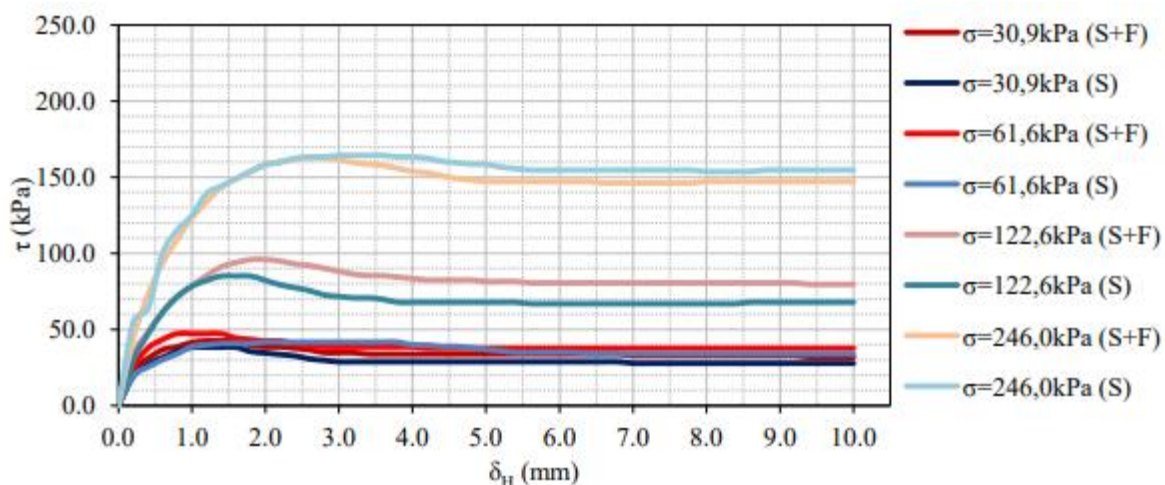
**Figura 5.11** – Valores de resistência obtidos para o solo arenoso com e sem tiras nos parâmetros ótimos solo-tira encontrados, variando-se a umidade em que os corpos de prova foram moldados.

Analisando-se os dados, é possível notar se a inclusão do parâmetro ótimo solo-tiras será, ou não, benéfica em relação ao aumento da tensão cisalhante do solo dependendo da tensão normal atuante. Foi adotado o critério de falha de Mohr- Coulomb, utilizado neste trabalho como forma de avaliar a resistência ao cisalhamento do solo de acordo com os parâmetros de resistência encontrados e com a tensão axial utilizada, representado por uma equação linear obtida através da plotagem da resistência ao cisalhamento de um material versus a tensão normal aplicada.

Dessa forma, em se tratando do solo arenoso, a inclusão de tiras no parâmetro avaliado se mostra efetiva no aumento da resistência ao cisalhamento para tensões normais atuantes menores que 300 kPa, apresentando, em relação aos parâmetros obtidos para o solo sem a inclusão de tiras, aumento de 66,7% na coesão e diminuição de 3,5% no ângulo de atrito, sendo esta última alteração condizente com a variabilidade que pode ocorrer na repetição de um mesmo ensaio.

As curvas Tensão x Deslocamento obtidas por Castilho (2017) referentes ao solo arenoso puro e com a inclusão do parâmetro ótimo solo-tira são mostradas na figura 5.12. É possível verificar que não ocorre grande alteração do comportamento do material em função da inclusão de tiras, embora para atuação de tensões normais menores seja possível notar um pequeno aumento da capacidade de carga do material. Em função das pequenas variações encontradas e da variabilidade que os resultados podem apresentar quando repetidos, indica-

se a necessidade de verificar, a partir de uma análise estatística, o comportamento do material em função de um número maior de repetição dos ensaios.



**Figura 5.12** – Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com o teor de 1,5% de tiras PET de 20 mm (S+F) e sem tiras (S) com GC = 100%. (CASTILHO, 2017).

### 5.3.2 Ensaios de cisalhamento direto em compósitos de solo-cimento

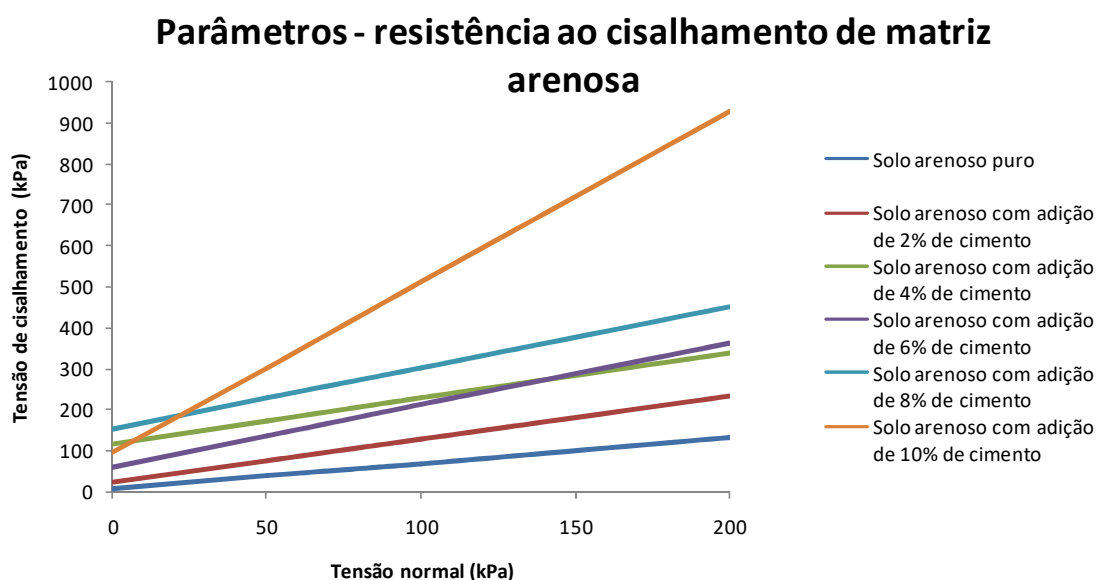
Os ensaios com solo-cimento e solo-cimento-tira foram realizados com um grau de compactação de 95%, diferentemente dos ensaios com solo-tira em que o grau de compactação adotado foi de 100%, uma vez que a elevada resistência do material possibilitou a avaliação dos corpos de prova em uma situação cuja aplicação em campo se mostra mais viável.

A tabela 5.6, a seguir, mostra os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo arenoso encontrados para cada envoltória, e a figura 5.13 ilustra as envoltórias do solo arenoso com e sem a inclusão de cimento, visando à comparação entre elas.

**Tabela 5.6**– Parâmetros de resistência ao cisalhamento, obtidos para a matriz arenosa com e sem inclusões de cimento.

Solo analisado	c (kPa)	$\phi$ (°)
Solo arenoso puro	6,2	31,9
Solo arenoso com adição de 2% de cimento	23,7	46,5
Solo arenoso com adição de 4% de cimento	116,5	48,1
Solo arenoso com adição de 6% de cimento	60,2	56,5
Solo arenoso com adição de 8% de cimento	154,2	56,2
Solo arenoso com adição de 10% de cimento	95,2	76,5

c = coesão e  $\phi$  = ângulo de atrito interno



**Figura 5.13** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento de matriz arenosa com inclusão de cimento em quantidades de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%.

Na tabela 5.8,  $\phi$  representa o ângulo de atrito interno do compósito, valor que corresponde à resistência do solo que é devida ao atrito entre as partículas. Em se tratando de taludes, o ângulo de atrito pode ser entendido como o ângulo máximo que a força transmitida à superfície pode fazer com a superfície normal ao plano de contato, sem que ocorra deslizamento. Atingido este ângulo, a componente tangencial é maior do que a resistência ao deslizamento, causando o colapso da estrutura.

Além da resistência causada pelo atrito entre as partículas, a atração química existente entre os grãos provocam a existência de uma coesão. A coesão é a principal parcela da resistência ao cisalhamento dos solos finos e coesivos, como as argilas, enquanto que para os

solos granulares ou não coesivos, como as areias, a maior parcela da resistência é devida ao atrito.

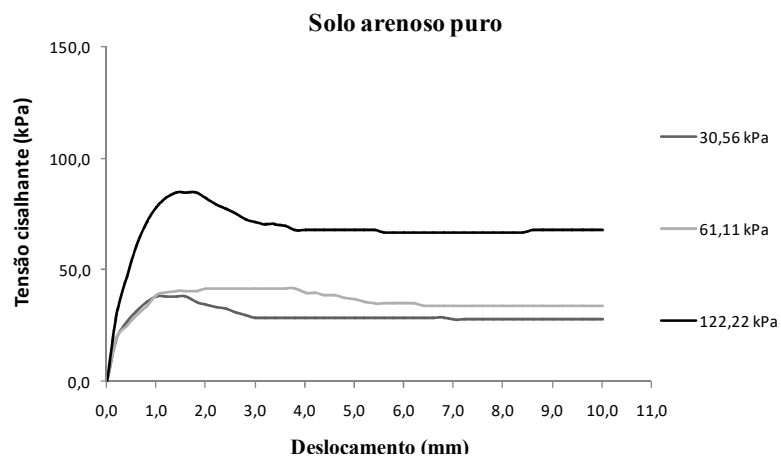
Assim, a inclusão de cimento ao solo arenoso estudado mostrou-se efetiva, uma vez que foi possível observar grandes aumentos da coesão e do ângulo de atrito do solo. Em relação à coesão, efeitos mais pronunciados foram notados para acréscimos de 8% e 4% de cimento, enquanto que o ângulo de atrito apresentou maiores modificações nas adições de 10% e 6% de cimento, respectivamente.

No caso em que se adicionou 2% de cimento em relação à massa seca do solo nota-se um aumento da coesão de 282,3 % e aumento de 45,8% do ângulo de atrito. Para adições de 4% de cimento, o aumento da coesão foi de 1779,0% e o aumento do ângulo de atrito de 50,8%. Na envoltória obtida com adição de 6% de cimento ao solo é possível notar que o aumento do ângulo de atrito de 77,1% foi superior ao aumento obtido com adições de 4%, embora o aumento da coesão tenha sido de 871,0%, 908,0% menor que o aumento de coesão obtido para as adições de 4% de cimento. A maior coesão foi obtida para inclusão de 8% de cimento, resultando em aumento de 2387,1% e ângulo de atrito de 56,2°, 76,2% maior que o obtido para o solo arenoso puro. Em relação ao ângulo de atrito, o maior valor obtido foi para as inclusões de 10% de cimento, representando um aumento de 139,8% em relação à matriz analisada, enquanto que o aumento da coesão obtido foi de 1435,5%. Comparativamente, em relação à resistência ao cisalhamento, as adições de 10% mostram-se vantajosas em relação às adições de 8% de cimento apenas em casos em que a tensão normal atuante for maior que 22,1 kPa. As adições de 6% de cimento indicam maior eficiência que as adições de 4% para tensões normais atuantes maiores que 142,2 kPa, além de se mostrarem mais eficientes que as adições de 8% em casos de tensões normais atuantes maiores que 5529,4 kPa.

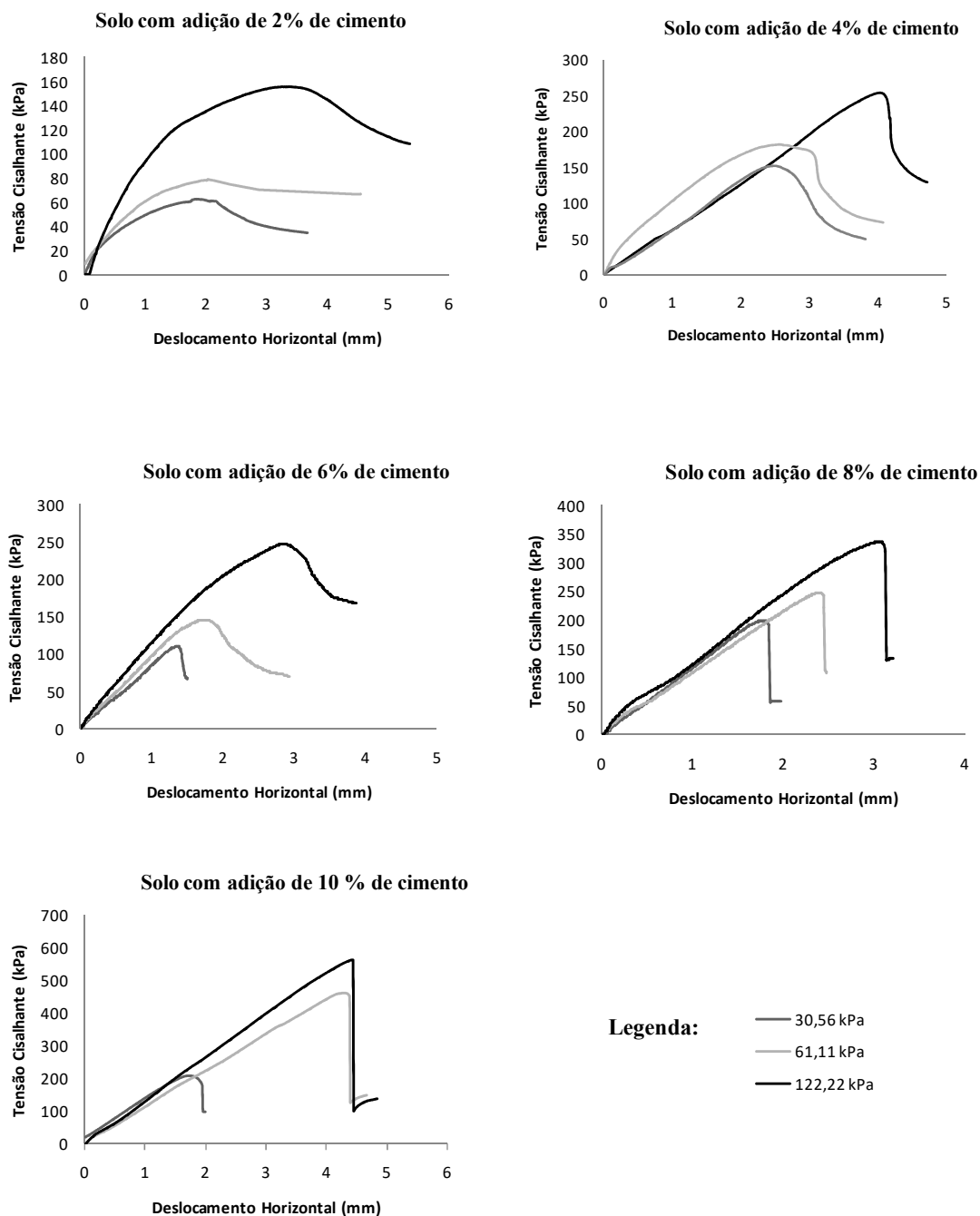
Em todos os casos a adição de cimento foi efetiva no aumento da resistência ao cisalhamento do solo, aumentando tanto o parâmetro de coesão, quanto o de ângulo de atrito em grandes proporções, até mesmo nos casos em que foram adicionadas pequenas quantidades do material. O reforço do solo com o uso de cimento teve efeito principal na criação de um intercepto coesivo na matriz analisada, o que torna sua aplicação interessante em solos granulares, como o estudado, em que a maior parcela da resistência deste tipo de matriz é devida ao atrito entre as partículas, o qual também sofreu aumentos consideráveis.

É possível notar também que em alguns casos o comportamento do material foi imprevisível em função da quantidade de cimento adicionada, não sendo possível verificar uma tendência em relação à variação encontrada em cada um dos parâmetros de resistência em função da quantidade de cimento adicionada. O aumento da coesão na adição de 4% de cimento, por exemplo, foi 908% maior que o aumento encontrado na adição de 6% de cimento e 343,5% maior que o aumento encontrado para adições de 10% de cimento. O mesmo ocorre para o ângulo de atrito, em que embora seja possível verificar uma tendência de aumento em função de maiores inclusões de cimento, o valor encontrado para adição de 8% de cimento ao solo foi menor que o valor encontrado nas adições de 6% de cimento.

A figura 5.14 a seguir, exibe a curva Tensão x Deslocamento obtida em ensaio de cisalhamento direto do solo arenoso puro e a figura 5.15 exibe as curvas tensão x deslocamento obtidas nos ensaios de cisalhamento direto do solo com adição de cimento. Na figura 5.15, em função da grande variação da tensão cisalhante obtida com a adição de diferentes quantidades de cimento, foram adotadas diferentes escalas em cada curva, visando à melhor verificação do comportamento do solo em cada um dos casos, entretanto, para fins de comparação, estas curvas com a aplicação de escalas iguais são exibidas nos apêndices deste trabalho.



**Figura 5.14** – Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso puro.



**Figura 5.15** – Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de cimento em quantidades de 2, 4, 6, 8 e 10%.

Analisando-se as curvas expostas nas figuras 5.14 e 5.15, é possível perceber que a ruptura dos corpos de prova com a adição de cimento ocorre após deslocamento maior que o do solo arenoso, entretanto, existe uma tendência de elevada perda de resistência após o pico, sendo este comportamento claramente perceptível para inclusões de 4% e 6% de cimento e



acentuado para inclusões de 8% e 10% de cimento. Dessa forma, é possível concluir que a adição de cimento altera a forma de ruptura do material, tornando a ruptura frágil, de modo que a resistência do material cai acentuadamente ao se aumentar a deformação. Nos materiais que apresentam este tipo de ruptura o processo de colapso pode ser muito veloz, gerando situações catastróficas, ou no caso de grandes estruturas, as chamadas rupturas catastróficas.

A fim de se avaliar a influência das tiras na resistência, ductibilidade e principalmente na resistência residual (pós-pico) dos compósitos de solo-cimento, foram realizados ensaios de solo-cimento-tira com inclusões de tiras de PET em diferentes tamanhos e porcentagens. Considerando-se o elevado custo do cimento e o potencial poluidor do material, as tiras foram adicionadas aos compósitos de matriz arenosa com 2% de cimento, buscando-se um material de baixo custo, com elevada resistência, ductibilidade e alto potencial sustentável. Esse expediente busca avaliar o quanto a resistência pode aumentar com a adição das tiras de forma a se maximizar o uso destas e minimizar o uso do cimento.

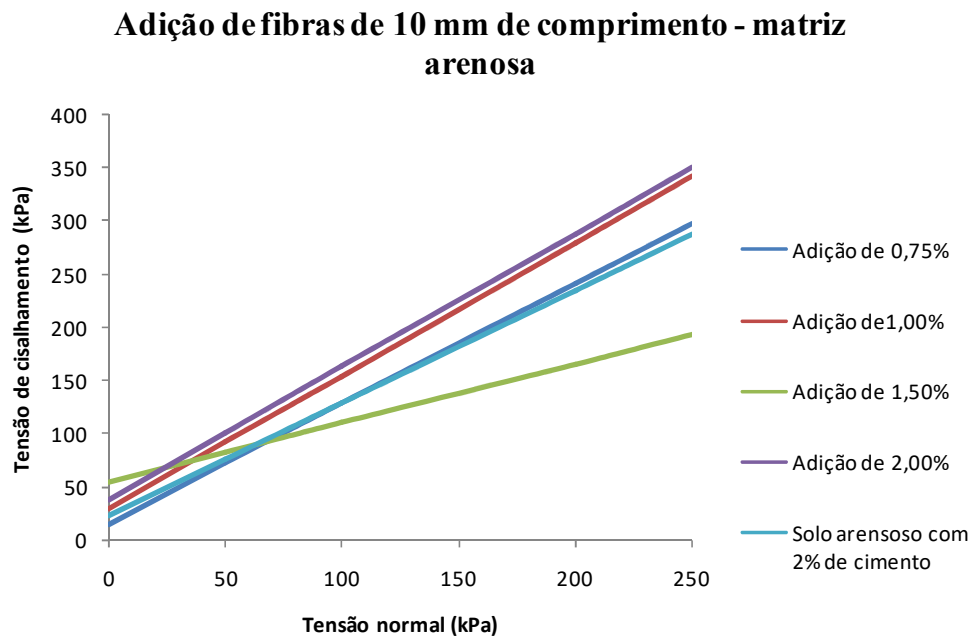
### 5.3.3 Ensaios de cisalhamento direto em compósitos de solo-cimento-tira

A seguir, as figuras 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 ilustram as envoltórias do solo-cimento-tira, para a adição de tiras de 10, 15, 20 e 30 mm, respectivamente, em porcentagens de 0,75%, 1,00%, 1,50% e 2,00% em relação à massa seca do solo.

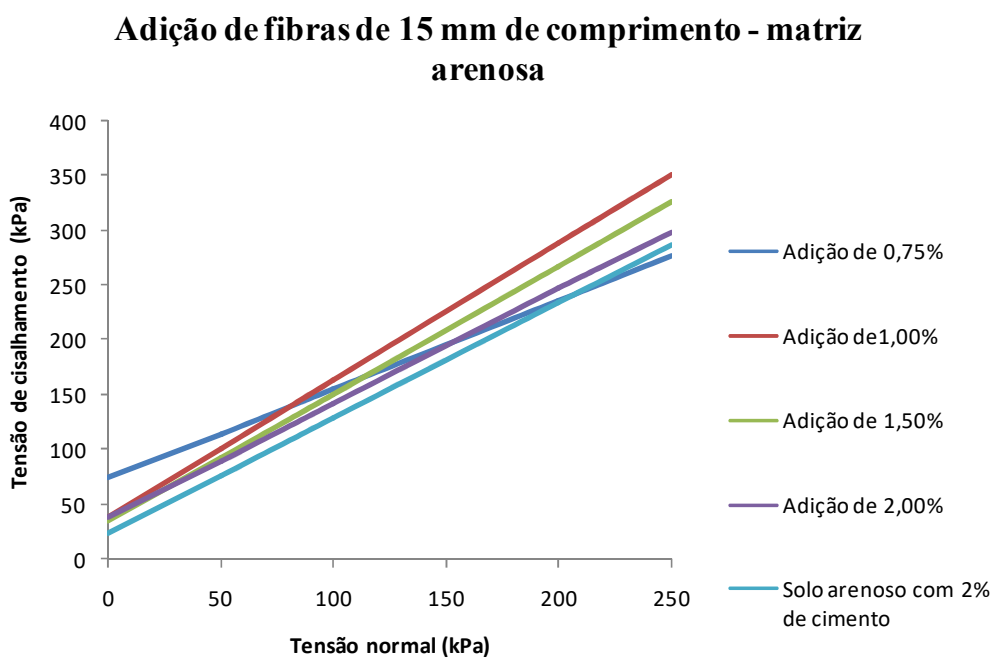
Além das envoltórias, a tabela 5.7 ilustra o resumo das tensões de cisalhamento na ruptura obtidas para cada corpo de prova, conforme as tensões normais aplicadas, de acordo com o comprimento e porcentagem em que as tiras foram adicionadas.

Por fim, a tabela 5.8, a seguir, ilustra os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, encontrados para cada envoltória de solo-cimento-tira, visando à comparação entre eles.

Comparando-se os valores obtidos na tabela 5.8 com os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo arenoso com adição de 2% de cimento (coesão de 23,7 kPa e ângulo de atrito 46,5°) é possível notar que todas as inclusões analisadas apresentam melhoras em um dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, seja na coesão ou o ângulo de atrito.



**Figura 5.16** – Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtidas com a adição de tiras de 10 mm de comprimento.



**Figura 5.17** – Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtidas com a adição de tiras de 15 mm de comprimento.

### Adição de fibras de 20 mm de comprimento - matriz arenosa

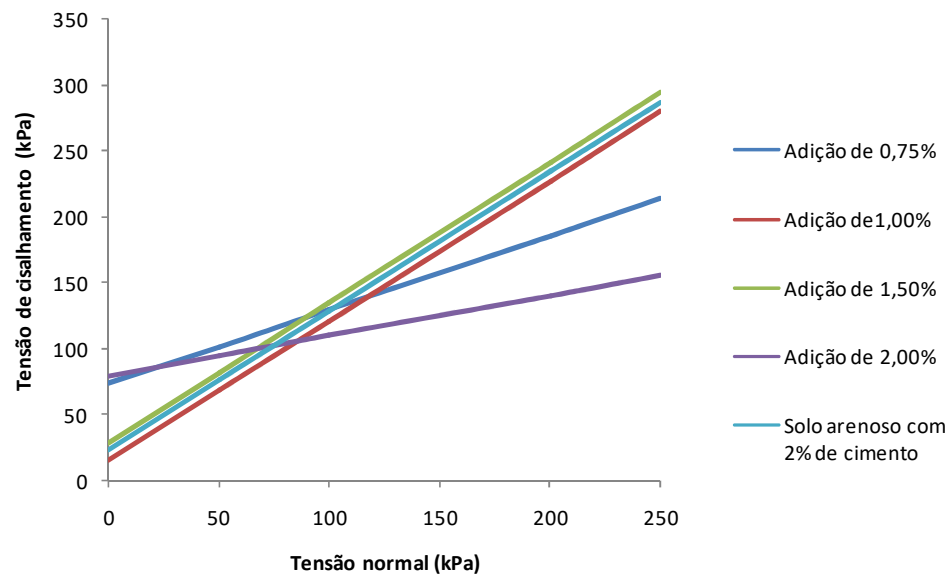


Figura 5.18– Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtidas com a adição de tiras de 20 mm de comprimento.

### Adição de fibras de 30 mm de comprimento - matriz arenosa

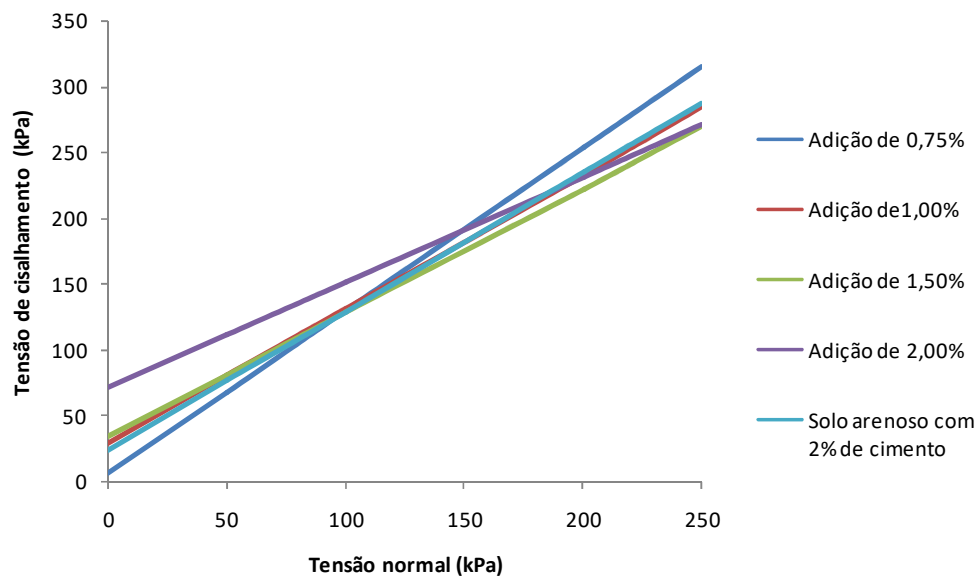


Figura 5.19 – Envoltórias de resistência do solo-cimento-tira, obtidas com a adição de tiras de 30 mm de comprimento.

**Tabela 5.7** – Resumo das tensões de rupturas obtidas para adição de 2% de cimento e de diferentes porcentagens e comprimentos de tiras à matriz arenosa.

<b>Resumo das tensões de ruptura</b>								
% / L (mm)	10		15		20		30	
	$\tau$ (kPa)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\sigma$ (kPa)
0,75%	60,0	30,6	98,9	30,6	93,8	30,6	44,2	30,6
	69,7	61,1	123,1	61,1	103,5	61,1	80,9	61,1
	158,3	122,2	173,1	122,2	143,5	122,2	157,1	122,2
1,00%	65,2	30,6	79,6	30,6	44,6	30,6	60,0	30,6
	109,2	61,1	110,2	61,1	84,6	61,1	92,3	61,1
	180,7	122,2	193,0	122,2	143,5	122,2	153,6	122,2
1,50%	79,6	30,6	67,0	30,6	71,0	30,6	64,0	30,6
	78,0	61,1	110,2	61,1	78,6	61,1	90,0	61,1
	126,6	122,2	175,5	122,2	163,4	122,2	149,6	122,2
2,00%	81,0	30,6	65,2	30,6	84,1	30,6	79,2	30,6
	107,9	61,1	109,2	61,1	104,0	61,1	95,7	61,1
	193,0	122,2	163,4	122,2	114,6	122,2	110,5	122,2

$\tau$  = tensão cisalhante;  $\sigma$  = tensão normal; L = comprimento das tiras

**Tabela 5.8** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento, encontrados para cada envoltória de solo-cimento-tira, com adição de 2% de cimento à matriz arenosa e de tiras em diferentes tamanhos e porcentagens.

<b>Comprimento</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>Ângulo de atrito (graus)</b>
10 mm	0,75%	15,7	48,4
	1,00%	29,5	51,3
	1,50%	55,3	28,9
	2,00%	38,4	51,3
15 mm	0,75%	73,9	39,0
	1,00%	38,2	51,4
	1,50%	34,4	49,4
	2,00%	38,1	46,2
20 mm	0,75%	73,8	29,2
	1,00%	15,2	46,7
	1,50%	28,6	46,7
	2,00%	78,8	17,2
30 mm	0,75%	6,1	51,0
	1,00%	29,4	45,5
	1,50%	34,2	43,2
	2,00%	71,8	38,6

Apenas três das inclusões analisadas apresentam redução dos parâmetros de coesão, no caso das inclusões de 0,75% de tiras de 10 e 30 mm, em relação à massa seca do solo, e das inclusões de 1,0% de tiras de 20 mm de comprimento, em que as reduções foram de 34,8%; 74,3% e 35,9%, respectivamente.

Em relação aos ângulos de atrito obtidos, oito das dezesseis inclusões analisadas apresentam diminuições neste parâmetro. Para as tiras de 10 mm de comprimento, isso ocorreu nas inclusões de 1,5%, apresentando 37,8% de redução. Para as tiras de 15 e 20 mm, ocorreu redução do ângulo de atrito nas inclusões de 0,75% e 2,0%, sendo de 16,1% e 0,7% no caso das tiras de 15 mm e de 37,2% e 63,0% no caso das tiras de 20 mm, respectivamente. No caso das tiras de 30 mm, as reduções ocorreram para inclusões de 1,0%, 1,5% e 2,0%, sendo de 2,2%, 7,1% e 17,0%, respectivamente.

As inclusões de 1,0% de tiras de 15 mm foram as que apresentam maior aumento do ângulo de atrito do compósito (em 10,5%), enquanto que as inclusões de 2,0% de tiras de 20 mm apresentaram maior aumento da coesão (em 232,5%).

De modo geral, as inclusões de 2,0% de tiras de 10 mm de comprimento e de 1,0% de tiras de 15 mm mostraram-se mais vantajosas, por apresentar aumentos significantivos tanto na coesão quanto no ângulo de atrito. As coesões obtidas foram de 38,4 kPa no primeiro caso e de 38,2 kPa no segundo caso, apresentando aumentos de 62% e 61,2% em relação ao compósito de solo-cimento e, ângulos de atrito de 51,3° e 51,4°, resultando em aumentos de 10,3% e 10,5%, respectivamente.

Além disso, analisando-se os resultados de maneira mais geral (a se excluir algumas exceções) pode-se verificar que a adição de tiras ao composto de solo-cimento tem efeito mais pronunciado no aumento do intercepto coesivo do solo, apresentando frequentemente diminuição do ângulo de atrito, de modo que sua adição ao compósito fica, então, condicionada ao parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo que se deseja alterar.

Os resultados obtidos também apontam características importantes do material solo-cimento-tira: o compósito pode tornar-se heterogêneo. Em alguns dos casos, a adição de tiras a uma matriz cimentada torna o comportamento do material imprevisível, o que pode ser notado na tabela 5.7 exibida anteriormente, a qual ilustra o resumo das tensões de cisalhamento atingidas para as tensões normais aplicadas, de acordo com o comprimento e porcentagem em que as tiras foram adicionadas.

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb, utilizado nesta pesquisa como forma de avaliar a resistência ao cisalhamento do solo de acordo com a tensão cisalhante máxima suportada e com a tensão axial utilizada, representa uma equação linear através da plotagem da tensão cisalhante resistida por determinado material versus a tensão normal aplicada. Em uma envoltória típica de Mohr-Coulomb, em que conforme se aumenta a tensão normal (ou seja, a tensão que atua como confinante do solo) ocorre um aumento da tensão de cisalhamento que o solo suporta.

Assim, conforme o resumo de tensões apresentado, a envoltória de alguns dos corpos de prova moldados com o solo arenoso, acrescido de cimento e tiras, não se mostrou condizente com o aumento da resistência ao cisalhamento esperado, dado determinado aumento da tensão confinante, conforme se pode verificar nas envoltórias dos compósitos de solo-cimento-tira para inclusões de tiras de 10 mm em quantidades de 0,75% e 1,5% e para tiras de 20 mm de comprimento em quantidades de 1,5% e 2,0%. No caso da inclusão de tiras com 1,5% de 10 mm, a tensão cisalhante obtida para aplicação de tensão normal de 61,1 kPa foi menor que a obtida para aplicação de tensão normal de 30,6 kPa. No caso das inclusões de 0,75% de tiras de 10 mm e de 1,5% de tiras de 20 mm, as tensões cisalhantes obtidas para aplicação de tensões normais de 30,6 kPa e 60,1 kPa foram muito parecidas, assim como ocorreu para aplicações de tensões normais de 60,1 kPa e 112,2 kPa no caso da inclusão de 2,0% de tiras de 20 mm, em que a distância entre os 3 pontos obtidos em relação à reta plotada no gráfico Tensão Cisalhante x Tensão Normal indica uma reação similar, conforme as envoltórias exibidas nos apêndices deste trabalho.

É possível notar através da figura 5.20, mostrada a seguir, que o plano de ruptura dos corpos de prova com adição de cimento mostra-se linear e se encontra no meio do corpo de prova, conforme ocorre na maioria dos casos nos ensaios de cisalhamento direto, em que o plano de ruptura é pré-determinado.



**Figura 5.20** – Plano de ruptura obtido com o rompimento de corpo de prova com adição de 2% de cimento.

Já nos corpos de prova com matriz cimentada e adição de tiras de forma aleatória, os planos de ruptura não se dão de forma linear, não havendo um comportamento previsível para eles (figura 5.21).



**Figura 5.21** – Plano de ruptura obtido com o rompimento de corpo de prova com adição de 2% de cimento e tiras de maneira aleatória.

Assim, no momento da ruptura dos corpos de prova, a matriz cimentada agrega as tiras de modo a criar um material heterogêneo, cuja tensão resistida e o plano de ruptura irão

depende da distribuição das tiras, em especial da quantidade de tiras que serão solicitadas durante a ruptura e da forma com que os esforços se distribuirão.

A figura 5.22, a seguir, exibe o plano de ruptura obtido com o rompimento do corpo de prova com adição de 2% de cimento e tiras de maneira aleatória, além do posicionamento das tiras em relação a este plano.

Em uma análise mais detalhada dos parâmetros de resistência obtidos neste trabalho, pode-se perceber que os ângulos de atrito e coesões alcançados não são condizentes com os valores esperados de um solo, de modo que o cimento adicionado aos compósitos analisados faz com que estes apresentem características de matrizes cimentadas, motivo pelo qual os parâmetros obtidos mostram-se tão elevados. Esses fatores manifestam-se de maneira mais evidente para adições maiores de cimento, ou em casos em que ocorre a adição de tiras, uma vez que estas acabam agregando-se à matriz cimentada, de modo a formar um material heterogêneo.

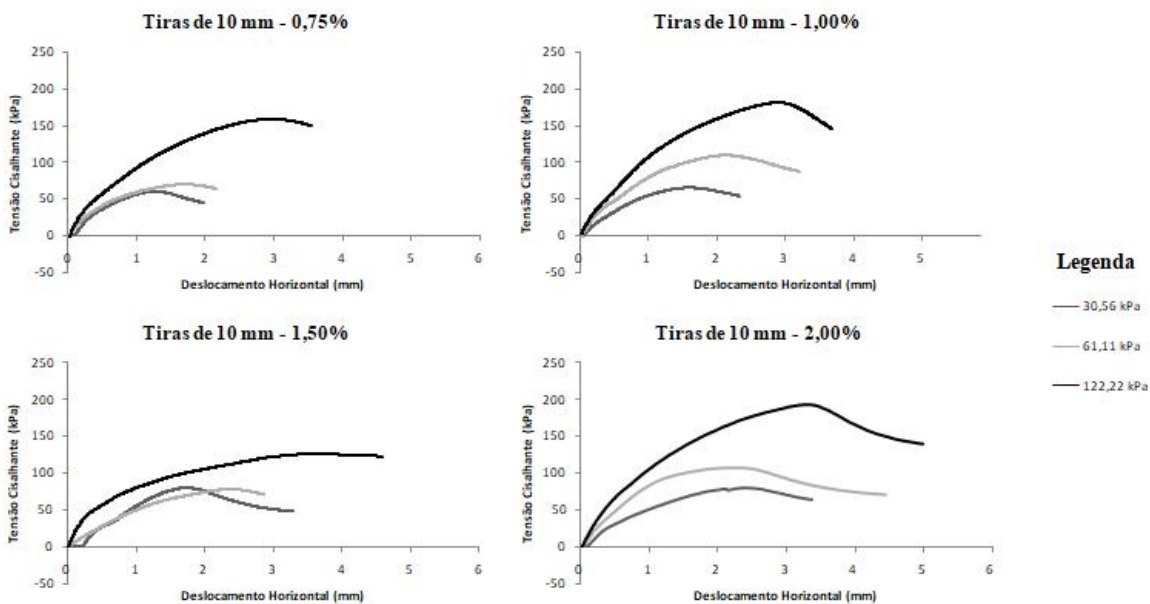
Em relação aos ensaios utilizando os compósitos de solo-cimento-tira, a análise das amostras após a ruptura indicou que apenas uma pequena porcentagem das tiras inclusas deformou-se de maneira definitiva (apresentando dobras), o que ocorreu em função dos esforços aplicados durante o carregamento ou durante a compactação dos corpos de prova.



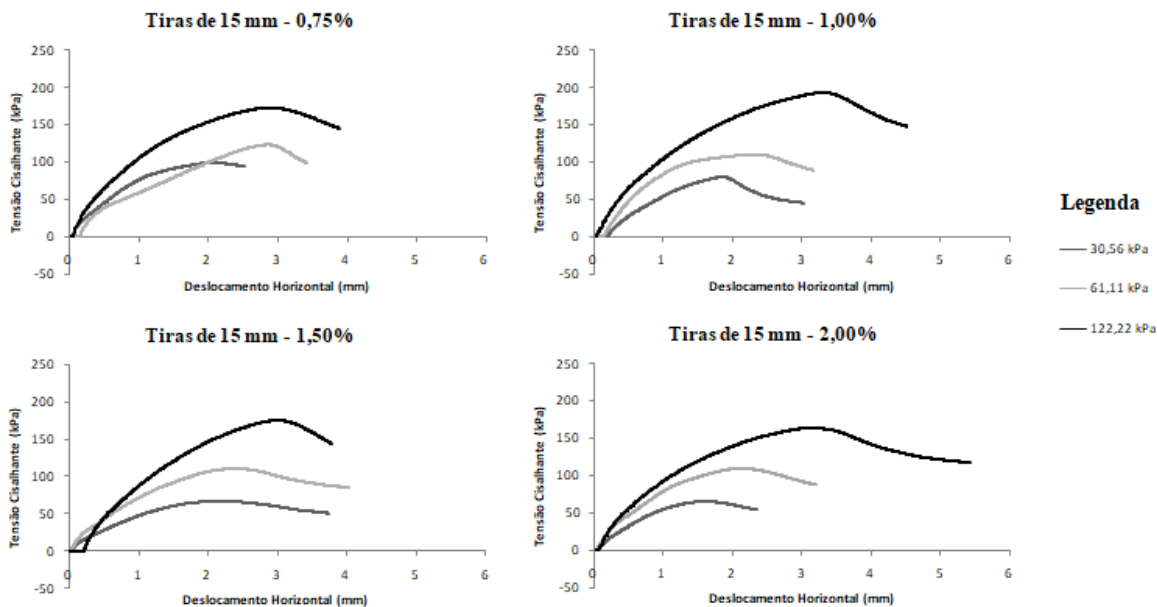


**Figura 5.22** – Plano de ruptura obtido com o rompimento de corpo de prova com adição de 2% de cimento e tiras de maneira aleatória e posicionamento das tiras em relação a este plano.

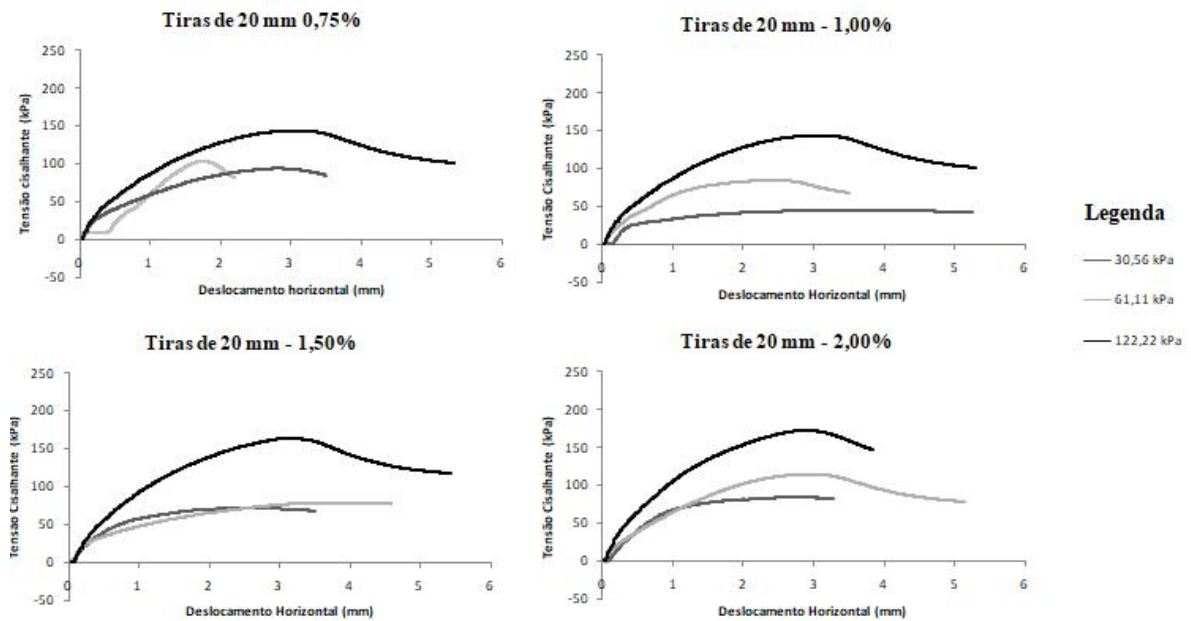
O comportamento Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal do material é exibido nas figuras 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26.



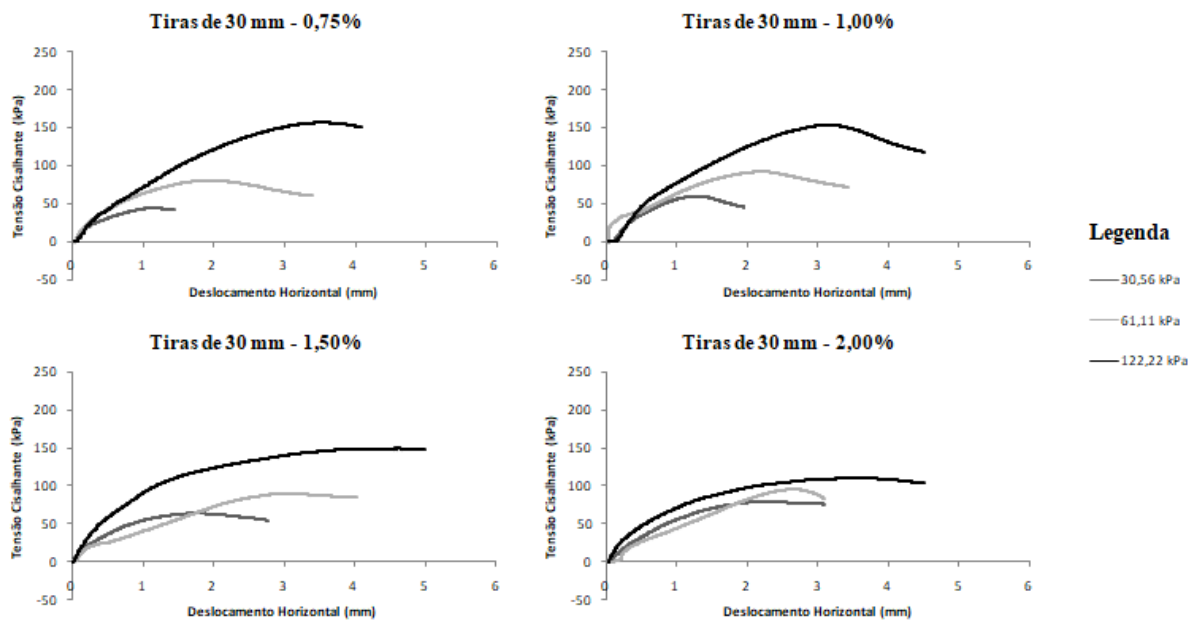
**Figura 5.23** – Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 10 mm de comprimento em diferentes porcentagens.



**Figura 5.24** – Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 15 mm de comprimento em diferentes porcentagens.



**Figura 5.25** – Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 20 mm de comprimento em diferentes percentagens.



**Figura 5.26** – Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal dos ensaios de cisalhamento direto do solo arenoso com adição de 2% de cimento e tiras de 30 mm de comprimento em diferentes percentagens.

É possível notar que a inclusão de tiras proporciona, de modo geral, um comportamento dúctil ao material, apresentando deformações maiores e menores picos de tensão, em comparação com os dados obtidos em ensaios realizados com adição de 2% de cimento ao solo arenoso. Este comportamento é mais acentuado para inclusões de tiras maiores, de 30 mm de comprimento, e em maiores quantidades.

A inclusão de tiras de 10 mm teve maior efeito na diminuição da queda de resistência pós-pico do material, apresentando deformações na ruptura pouco menores que as obtidas para o solo-cimento com adição de 2% de cimento. A inclusão de tiras de 15 e 20 mm gerou maiores deformações do material, entretanto, as quedas de resistência após o pico se mostraram mais acentuadas nestes tipos de inclusão. Por fim, em relação ao comportamento tensão x deslocamento do material, a inclusão de tiras de 30 mm em quantidades de 1,5 e 2,0% mostrou-se mais efetiva, apresentando tanto deformações maiores, quanto menores quedas de resistência pós-pico em comparação aos dados obtidos nos ensaios com adição de 2% de cimento ao solo.

#### 5.4 Comparações com a literatura

Em geral, os resultados obtidos neste trabalho foram semelhantes aos resultados encontrados na literatura para inclusão de fibras ao solo, indicando que a inclusão de tiras apresenta comportamento semelhante à inclusão de fibras, com as vantagens de apresentar também menor custo e facilidade de produção, uma vez que as tiras são cortadas a partir garrafas PET não mais utilizadas, sem necessidade de reciclagem do material.

Em relação à influência da inclusão deste tipo de polímeros sobre os parâmetros de compactação de um solo, os resultados obtidos para inclusão de tiras foram similares aos encontrados por outros autores com a inclusão de fibras, que relataram não ter encontrado nenhuma alteração significativa aos parâmetros de compactação dos solos em função da inclusão das fibras, sendo relatado apenas leve decréscimo da máxima específica seca máxima (MAHER & HO, 1994 apud SILVA, 2007; NATARAJ et al., 1996; ULBRICH, 1997; CONSOLI et al., 1999; RESCHETTI JUNIOR, 2008).

Quanto às alterações dos parâmetros de compactação devido às adições de cimento, os resultados obtidos na literatura foram muito semelhantes aos resultados encontrados neste

trabalho, em que a adição de cimento ao solo arenoso não apresentou variações relevantes nos parâmetros de compactação do solo, culminando em uma variação muito pequena na massa específica seca máxima e em diminuição da umidade ótima. Em seus estudos, Kézdi (1979) observou que a umidade ótima e a densidade aparente seca máxima não são muito afetadas pela adição de cimento. Núñez (1991) observou uma falta de padrão nas curvas de compactação com adição de cimento. Ulbrich (1997) apresentou resultados em que a adição de cimento ou fibra não parece ter influência significativa sobre os parâmetros de compactação do solo estudado (SPECHT, 2000).

Teodoro (1999) avaliou o comportamento de dois solos (uma argila siltosa e uma areia siltosa), reforçados com fibras de polipropileno. Os resultados dos ensaios de compressão simples mostraram que a resistência do solo arenoso cresceu com o aumento do teor e comprimento das fibras, tendo sido avaliadas fibras de 5, 10, 20 e 30 mm de comprimento. Embora os resultados da autora tenham sido um pouco diferente dos obtidos neste trabalho, em que a adição de quantidades maiores das tiras de 30 mm de comprimento gerou resistências menores ao compósito, a semelhança dos resultados obtidos com as inclusões de tiras de 10 e 20 mm reforça a semelhança encontrada no comportamento das tiras e fibras, além de corroborar com a hipótese de que os valores de resistência mais baixos encontrados para as inclusões de tiras de 30 mm se devem às reduzidas dimensões dos corpos de prova utilizados (5,1 cm de diâmetro e 10,35 cm de altura) que se mostram pequenas para tiras deste comprimento, uma vez que a autora utilizou corpos de prova de 50 mm de diâmetro para análise das fibras de 5, 10 e 20 mm e 70 mm de diâmetro para análise das fibras de 30 mm.

Trindade et al. (2006) analisaram o comportamento mecânico da mistura de um solo residual jovem de textura predominantemente arenosa reforçado com fibras de polipropileno com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e em quantidades de 0,25; 0,50; e 0,75%, em relação ao peso de solo seco. Os resultados de ensaios de compressão não-confinada, realizados em corpos-de-prova compactados na energia do ensaio Proctor Normal, indicaram que o quantitativo de 0,75% de fibras com 20 mm de comprimento foi a combinação responsável pelo maior ganho de resistência, condizente com os resultados obtidos nesta pesquisa para a inclusão de tiras, se considerarmos apenas as quantidades avaliadas pelos autores. Além disso, no que diz respeito à resistência ao cisalhamento do solo e da mistura solo-fibra, os autores verificaram que a adição do parâmetro ótimo solo-fibra encontrado promoveu ganho significativo no parâmetro de coesão da ordem de 560% (o valor obtido para o solo sem fibras foi de 15 kPa e de 99 kPa para adição do parâmetro ótimo solo-fibra) e,

praticamente, não causou alterações no parâmetro ângulo de atrito interno. Neste trabalho, a variação do ângulo de atrito interno devido à adição do parâmetro ótimo solo-tira encontrado foi pequena (3,5%), conforme o encontrado pelos autores, mas o aumento da coesão foi de apenas 66,7 % (o valor obtido para o solo sem tiras foi de 11,7 kPa e de 19,5 kPa para adição do parâmetro ótimo solo-tira), o que poderia ser explicado por diferenças existentes entre os solos analisados, diferenças entre os tipos de polímero avaliados (de polipropileno no caso dos autores e de polietileno tereftalato no caso deste trabalho), diferenças entre o comportamento das fibras e tiras, ou do próprio parâmetro ótimo adotado, que foi diferente em função da maior quantidade de percentagens de inclusão de tiras avaliada neste trabalho.

Em se tratando dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto utilizando compósitos de solo-cimento, em todos os casos analisados a adição de cimento foi efetiva no aumento da resistência ao cisalhamento do solo, até mesmo nos casos em que foram adicionadas pequenas quantidades do material. Estes resultados estão de acordo com as conclusões de Sanbonsuge (2013) cuja utilização de porcentagens de cimento maiores que 5%, em relação ao peso seco do solo, conferiram um enrijecimento mais significativo ao compósito, enquanto que a adição de porcentagens da ordem de 3% apresentou melhoria parcial das propriedades da matriz, principalmente em se tratando da trabalhabilidade, com certo aumento da capacidade de suporte.

Poucos autores avaliaram os efeitos da inclusão de tiras nos solos, motivo pelo qual os dados disponíveis para comparação são escassos, especialmente se tratando da avaliação do compósito formado por solo, cimento e tiras. Os trabalhos que estudaram a inclusão de tiras o fizeram utilizando diferentes comprimentos e larguras dos adotados neste trabalho. Assim, apesar das limitações, as devidas considerações são feitas a seguir.

Peddaiah, Burman & Sreedeeep (2018) avaliaram o efeito da inclusão de tiras de PET em uma areia siltosa, através da realização de ensaios de compactação, cisalhamento direto e CBR. Foram incluídas tiras de 15 mm de largura e comprimentos de 15, 25 e 35 mm. Os autores encontram um aumento da densidade seca máxima em função da inclusão de tiras, que foi maior para inclusão de 0,4% de tiras de 15 mm de comprimento, apresentando a tendência de diminuir em função do acréscimo de maiores quantidades e comprimentos. Os resultados encontrados pelos autores divergiram dos encontrados neste trabalho, em que a inclusão de tiras gerou uma diminuição da densidade seca máxima do solo, independente do tamanho de tiras avaliados ou da porcentagem de inclusão. A divergência poderia ser explicada em função

da grande diferença de largura das tiras, diferença nas características dos solos ou dos polímeros avaliados. Em relação aos ensaios de cisalhamento direto, a inclusão de 0,4% de tiras resultou em melhor desempenho em relação ao aumento da coesão e ângulo de atrito do solo. As fibras de 25 mm de comprimento apresentaram em todos os casos aumento do ângulo de atrito do solo, e diminuição da coesão apenas nas inclusões de 0,6 e 0,8%, resultados que também divergiram do aumento da coesão e diminuição do ângulo de atrito em função da adição do parâmetro ótimo solo-tira ao solo arenoso avaliado neste trabalho.

Sivakumar Babu & Chouksey (2011) avaliaram o efeito da inclusão de tiras de 12 mm de comprimento e 4 mm de largura, em quantidades de 0,50%, 0,75% e 1,0%, em um solo arenoso através de ensaios de resistência uniaxial e ensaios triaxiais do tipo CU (consolidado e não drenado). Em relação aos ensaios de resistência não confinada, os resultados indicaram um aumento da ductibilidade proporcional à inclusão de tiras, condizentes com os encontrados nesta pesquisa. Em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, houve aumentos tanto na coesão quanto no ângulo de atrito interno do solo, que se mostraram maiores para maiores quantidades de tiras adicionadas, condizentes com os resultados encontrados por Karmachrya & Acharya (2017), que investigaram o efeito da inclusão aleatoriamente distribuída de tiras de PET de 3 mm de largura e 30 mm de comprimento em porcentagens de 0,5; 1,0 e 1,5%, em três diferentes tipos de solo, a partir da realização de ensaios triaxiais do tipo UU. Em todos os três solos a inclusão de tiras gerou aumento na resistência ao cisalhamento dos solos, que variaram entre 24 e 129%, de modo que os efeitos mais pronunciados foram verificados em inclusões de quantidades maiores de tiras e se deveu a um aumento na fricção entre as partículas do solo e ao desenvolvimento de tensões nas tiras plásticas. Nesta pesquisa os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram avaliados apenas para o parâmetro ótimo solo-tira, por meio de ensaios de cisalhamento direto, entretanto, os resultados indicaram um aumento da coesão e pequena diminuição do ângulo de atrito.

### 5.5 Síntese dos Resultados Obtidos

- Em relação aos ensaios de compactação realizados nos compósitos formados pela matriz arenosa com inclusão de tiras poliméricas, nota-se que em todos os casos analisados houve uma pequena diminuição da massa específica seca máxima

obtida devido à inclusão das tiras. Os maiores valores foram obtidos para inclusões de tiras em menores porcentagens. Em relação aos compósitos de solo-cimento notou-se que os resultados apresentaram-se muito semelhantes aos resultados obtidos por meio do ensaio de compactação do solo sem adição de cimento, de modo que a adição de cimento ao solo arenoso não apresentou variações relevantes nos parâmetros de compactação do solo, culminando em uma variação muito pequena na massa específica seca máxima e em diminuição da umidade ótima;

- Nos ensaios de resistência uniaxial com a inclusão de tiras em matriz arenosa notou-se que em todos os casos analisados ocorreu o aumento da resistência devido à inclusão de tiras, independente do tamanho e porcentagens em que estas foram incluídas. O parâmetro ótimo solo-tira, ou seja, a inclusão de tiras cujo tamanho e porcentagem gerou maior aumento de resistência, foi encontrado para a inclusão de tiras de 20 mm de comprimento em quantidades de 1,5% em relação à massa seca do solo. Em questão da variabilidade das amostras estudadas nos ensaios de compressão uniaxial, os coeficientes de variação obtidos são pequenos, mostrando-se próximos do coeficiente de variação de 4,14% obtido para o solo puro e representando variações de 8,4% no maior dos casos. Além disso, através da análise das curvas Tensão x Deformação é possível verificar que a inclusão de tiras não aumenta apenas a capacidade de carga do solo, como também a ductibilidade do compósito.
- Em se tratando dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados em compósitos de solo-tira, com base no parâmetro ótimo encontrado nos ensaios de resistência uniaxial, foi possível notar que esta inclusão mostrou-se efetiva para tensões normais atuantes menores que 300 kPa, uma vez que ocorreu aumento na coesão e diminuição no ângulo de atrito em relação aos parâmetros obtidos para o solo sem a inclusão de tiras.
- Quanto aos ensaios de cisalhamento direto utilizando compósitos de solo-cimento, pôde-se concluir que em todos os casos analisados a adição de cimento foi efetiva no aumento da resistência ao cisalhamento do solo, aumentando tanto o parâmetro de coesão, quanto o de ângulo de atrito em grandes proporções, até mesmo nos casos em que foram adicionadas pequenas quantidades do material. Em relação à coesão, efeitos mais pronunciados foram notados para acréscimos de 8% e 4% de cimento, respectivamente, enquanto que o ângulo de atrito variou, apresentando modificações maiores nas adições de 10% de cimento. A adição de cimento alterou



também a forma de ruptura dos corpos de prova, que passou a ocorrer após deslocamento maior que o do solo arenoso, embora exista uma tendência de elevada perda de resistência após o pico, sendo este comportamento claramente perceptível para inclusões de 4% e 6% de cimento e acentuado para inclusões de 8% e 10% de cimento. Dessa forma, a adição de cimento alterou a forma de ruptura do material, tornando a ruptura frágil.

- Em relação aos ensaios de solo-cimento-tira executados, é possível notar que todas as inclusões de tiras analisadas apresentam melhoras em um dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, seja na coesão ou no ângulo de atrito, em relação ao compósito de solo-cimento avaliado. Pôde-se verificar que a adição de tiras ao composto de solo-cimento tem efeito mais pronunciado no aumento da coesão do solo, apresentando frequentemente diminuição do ângulo de atrito, de modo que sua adição ao compósito fica, então, condicionada ao parâmetro de resistência ao cisalhamento que se deseja alterar. Os resultados obtidos também apontam características importantes do material solo-cimento-tira: o compósito pode tornar-se heterogêneo, uma vez que, no momento da ruptura dos corpos de prova, a matriz cimentada agrega as tiras de modo a criar um material cuja tensão resistida e o plano de ruptura irão depender da distribuição das tiras, em especial da quantidade de tiras que serão solicitadas durante a ruptura e da forma com que os esforços se distribuirão. É possível notar que a inclusão de tiras proporcionou também um comportamento mais dúctil ao material, apresentando deformações maiores na ruptura e menores picos de tensão, em comparação com os dados obtidos em ensaios realizados com adição de 2% de cimento ao solo arenoso. Este comportamento foi mais acentuado para inclusões de fibras maiores, de 30 mm de comprimento, e em maiores quantidades.

## 6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e analisados, as principais conclusões estão elencadas a seguir.

- Em relação à resistência uniaxial avaliada notou-se que em todos os casos analisados ocorreu o aumento da resistência da matriz arenosa devido à inclusão de tiras, independente do tamanho e percentagens em que estas foram incluídas;
- Quanto aos ensaios de cisalhamento direto em compósitos de solo-cimento, pôde-se concluir que em todos os casos analisados a adição de cimento foi efetiva no aumento da resistência ao cisalhamento do solo, aumentando tanto o parâmetro de coesão, quanto o de ângulo de atrito em grandes proporções, até mesmo nos casos em que foram adicionadas pequenas quantidades do material;
- Em relação à adição de tiras ao composto de solo-cimento, seu efeito mais pronunciado ocorreu no aumento da coesão do solo, apresentando frequentemente diminuição do ângulo de atrito e,
- De modo geral, a adição de tiras e cimento ao solo arenoso nesta pesquisa mostrou-se uma opção interessante para o aumento da resistência do solo analisado, apresentando alto potencial de aplicação destes materiais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS E CONSULTADAS

ALVES, M. A. N. Características Geotécnicas de Estradas Não-pavimentadas do Município de Bauru/SP. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 49 p., 2009.

AL-REFEAI, T. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes* v. 10, n. 4, p. 319-333. 1986.

AL-SWAIDANI, A., HAMMOUD, I., MEZIAB, A. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 8 (5) (2016) 714–725, 2016.

AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. In: *GEOSSYNTHETICS'95 CONFERENCE*. Nashville.Proceedings v.2, p.433-466, 1995.

AL WAHAB, R.M.; EL-KEDRAH, M. A.; Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. *GEOENVIRONMENT 2000:Characterization, Containment, Remediation and Performed in Environmental Geotechnics*, Louisiana, Geotechnical Special Publication, ASTM, 2v, v.1, n. 46, p. 791-805.1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-0380: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.9 p. 2011.

ANDERSLAND, O.B.; KATTAK, A.S. Shear strength of Kaolinite/fiber soil mixtures. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT*, 1979, Paris. Proceedings p.11-16, 1979.

ANGGRAINI, V., ASADI, A., HUAT, B. B. K., NAHAZANAN, H. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil, *Measurement* 59 (2015) 372–381, 2015.

AYELDEEN, M., KITAZUME, M. Using fiber and liquid polymer to improve the behavior of cement stabilized soft clay, *Geotext. Geomembr.* 45 (2017) 592– 602, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. 10ª Ed. Censo de reciclagem do PET no Brasil. 12 p.2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Guia básico de utilização do cimento Portland. , 28 p. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Requisitos. NBR 16697. 9 p. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica: NBR 6508. 8 p. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais para base de solo-cimento — Requisitos. NBR 11798. 2 p. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 12024. 6 p. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. Solo – Análise granulométrica: NBR 7181. 12 p. 2016 Versão Corrigida: 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: NBR 12025. 2 p. 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo- coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada- Método de ensaio: NBR 12770. 4 p. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459. 6 p. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180. 3 p. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Ensaio de compactação. NBR 7182. 9 p. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-cimento – Ensaio de compactação. NBR 12023. 7 p. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. Rochas e Solos: NBR 6502. 18 p. 1995.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros. 1ª Ed. Rio de Janeiro. PETROBRAS; ABEDA. 504p. 2006.

BITTENCOURT, E. C; SANTOS, I. G. S.; SILVA FILHO, T. N.; ASSIS, C. D. Adição de solo cimento para melhoria da resistência da camada para maior economia na fundação. COBRAMSEG, 6 p., 2014.

BOTERO, E., OSSA, A., SHERWELL, G., & OVANDO-SHELLEY, E. Stressstrain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). Geotext. Geomembr. 43 , p. 363-369. 2015.

BUDINSKI, K. Engineering Materials – Properties and Selection. New Jersey: Prentice Hall International, 5ed. 1996.

BUENO, B.S. Aspectos de estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias. Texto Sistematizado (Livre Docência em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 99 p.,1996.

BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO N.J. Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 1996, San Diego. Anais, v.1, p. 878-884, 1996.

CABALA, G. V. E., Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade federal do Rio Grande Do Norte, Natal, 113 p., 2007.

CARVALHO, C.A.B., BUENO, B.S., MACHADO, C.C. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v.30, n.2, p.215-222, 2006.

CASAGRANDE, M. D.T. Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 109 p. 2001.

CASAGRANDE, M. D.T. Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 219 p. 2005.

CASTILHO, T. W. L. Resistência ao cisalhamento de solos com fibras de politereftalato de etileno reciclado.. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 105 p., 2017.

CAVEY, J. K.; KRIZEK, R. J.; SOBHAN, K.; BAKER, W. H. Wasted fiber in cement stabilized recycled aggregate base material. *Transportation Research Record*. Washington D. C. n. 1486, p. 97-106. 1995.

CHAUHAN, M.S., MITTAL, S., MOHANTY, B. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotext. Geomembr.* 26, 429-435, 2008.

CHEBET, F. C.; KALUMBA, D. Laboratory investigation on re-using Polyethylene (plastic) bags waste material for soil reinforcement in geotechnical Engineering. *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ)* Vol.1, No.1, p. 67-82.June, 2014.

CONSOLI, N. C.; MOTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. Effect of material properties on the behavior of sand-cement-fibre composites. *Ground Improvement, ISSMGE*, v.8 n.2, p.77-90, 2004.

CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.124, n 12, p. 1211-1214. 1998-a.

CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. *Ground Improvement, ISSMGE*, v.3, n 3, p.21-30. 1999.

CONSOLI, N. C.; THOMÉ, A.; GIRARDELLO, V.; RUVIER, C. A. Uplift behavior of plates embedded in fiber-reinforced cement stabilized backfill. *Geotext. Geomem.*, vol. 35, p. 107–111,2012.

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, p. 113, 2015.

- CROCKFORD, W. W.; GROGAN, W. P.; CHILL, D. S. Strength and life of stabilized pavement layers containing fibrillated polypropylene. *Transportation Research Record*. Washington D. C. n. 1418, p. 60-66. 1993.
- DIAMBRA A., IBRAIM E, MUIR WOOD D, RUSSELL A. R. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and geomembranes*, v. 28, p. 238 – 250. 2010.
- DONATO, M. Comportamento Mecânico de Concreto Compactado com Rolo Reforçado com Fibras de Polipropileno. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 82p. 2003.
- DONATO, M. Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 162 p. 2007.
- DONATO, M.; FOPPA, D.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS/ABGE, v.27, n.2, p. 161-179, 2004.
- EMARAH, D. A., SELEEM, S. A., Swelling soils treatment using lime and sea water for roads construction, *Alexandria Eng. J.* 8 (5) (2016) 714–725, 2016.
- FAGUNDES, L. S. Avaliação da resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia. 99 p. 2014.
- FATAHI, B., KHABBAZ, H. FATAHÍ, B. Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynth. Int.* 19, p. 252-262, 2012.
- FATAHI, B., LE, T.M., KHABBAZ, H., 2013. Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynth. Int.* 20, p. 286-300, 2013.
- FESTUGATO, L. Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 146p., 2008.
- FEUERHARMEL, M.R. Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 131p., 2000.
- FIGUEIREDO, A.D., TANESI, J.; NINCE,A.A. Concreto com fibras de polipropileno. *Téchne*, São Paulo, v.10, n.66, p.48-51, 2002.
- GARCEZ, E.O., Investigação do comportamento de engineered cementitious composites reforçados com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 194 p. 2009.
- GRAY, D., & OHASHI, H. Mechanics of fibers reinforced in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 109, n. 3., p. 335-353. 1983.

- GIRARDELLO, V., Comportamento de ensaios de arrancamento de placas embutidas em camadas de solo-cimento-fibra. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 195 p. 2014.
- GIRARDELLO, V., Ensaios de placa em areia não saturada reforçada com fibras. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 141 p. 2010
- GUEDES, S. B., Estudo do desempenho mecânico de um solo-cimento microreforçado com fibras sintéticas para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 515 p. 2013.
- HAMIDI, A., HOORES FAND, M. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and geomembranes*, v. 36, p. 1-9, 2013.
- HANNANT, L. Polymers and polymers composities. In: J. ILLSTON, *Construction materials: their nature and behavior*. 2ed. (pp. 359- 403). London: J.M. Illston/E & FN Spon. 1994.
- HIGGINS, R. A. *Properties of engineering materials*. London: E. Arnold, 2ed., 495 p., 1994.
- HEINECK, K.S. Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 251 p. 2002.
- HOARE, D.J. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT*, 1979, Paris. *Proceedings v.1*, p.47-52, 1979.
- HOMEM, T.R. Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 109 p. 2002.
- ILLSTON, J. *Construction materials; their nature and behavior*. 2ed. London: E & FN Spon, 518p. 1994.
- KARMACHARYA, R. ACHARYA, I. P. Reinforcement of soil using recycled polyethylene terephthalate (PET) bottle strips. *Proceeding of IOE Graduate Conference*, Vol. 5. p. 153-156. 2017.
- KÉZDI, A. *Stabilized earth roads*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, 1979. 327p.
- KUHLMAN, R. H. Cracking in soil cement- cause, effect, control. *Concrete Internacional*, v.16, n.8, p. 56-59. 1994.
- LI, L. MITCHELL, R. Effects of reinforcing on behavior of weakly cemented sands. *Canadian Geotechnical Journal*, v.25, n.2m p. 389-395, 1997.

LIANG, R. Experimental and theoretical study of flexural behavior of polymer fiber reinforcement, cement-treated soils. Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. ASCE. 2v, v.2, p. 1080-1091, 1992.

LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; THOMASI, L. The mechanical response of soil-lime mixtures reinforced with short synthetic fiber. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., San Diego, 1996. Proceedings. v.1, p.868-877, 1996.

LIMA, R. D. C. D. O. Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 109 p., 2010.

LLAJARUNA, M. A. V., Estudo do solo-cimento auto adensável para a fabricação de tijolos de pó de mármore e resíduo de construção. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira- UNESP, Ilha Solteira, 75 p., 2016.

LOVISA, J., SHUKLA, S.K., SIVAKUGAN, N. Shear strength of randomly distributed moist fibre-reinforced sand. Geosynth. Int. v 17, p. 100-106, 2010.

LOUZADA, N. S. L.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T. Behavior of clayey soil reinforced with polyethylene terephthalate. Journal Of Materials In Civil Engineering, v. 31, n. 10, 2019.

LUWALAGA, J. G. Analysing the behaviour of soil reinforced polyethylene terephthalate (PET) plastic waste. Master's thesis, Stellenbosch University, South-Africa. 122 p. 2016.

MACHADO, A. F.; MIRANDA, D. E. O.; BOMFIM, M. I.; SEGANTINI, A. A. S. Estudo das características de resistência e deformabilidade ao longo do tempo do solo-cimento plástico obtido através de resíduos sólidos de construção, visando a sua aplicação em fundações de obras de pequeno porte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MACÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., Anais, Curitiba, v.1, p. 573-577. 2006.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. Mechanical properties of Kaolinite/fiber soil composite. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.120, n.8, p. 1381-1393, 1994.

MILLER, C.J., RIFAI, S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. J. Environ. Eng. v 130, p. 891-895, 2004.

MONTARDO, J. P. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 130 p., 1999.

MOTTA, J. C. S. S.; MORAIS, P. W. P.; ROCHA, G. N.; TAVARES, J. C.; GONÇALVES, G. C.; CHAGAS, M. A.; MAGESTE, J. S.; LUCAS, T. P. B. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e variabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. E-xacta. Belo Horizonte. V.7, n.1, p. 13-26, 2014.

NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., San Diego, 1996. Proceedings Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, p.826-835, 1996.



NÚÑEZ, W. P. Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação. . Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 150 p., 1991.

OMINE, K.; OCHIAI, H.; YASUFUKU, N.; KATO, T. Effect of plastic wastes in improving cement-treated soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTCHNOLOGY. Proceedings...Rotterdam: Balkema, p. 875-880, 1996.

OLIVEIRA, R. F. V. D., Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 186 p., 2011.

OLUTAIWO, A. O.; EZEGBUNEM, I. I. Effect of waste PET bottle strips (WPBS) on the CBR of cement- modified lateritic soil. International Journey of Science and Research, Vol. 6, I. 9, p. 1098-1102, 2017.

PAGANI, B.R., Estudo de misturas solo-cimento-betonita-fibra para uso em barreiras verticais de contenção de contaminantes. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Sul, Porto Alegre, 117 p., 2007.

PEDDAIAH, S.; BURMAN, A.; SREEDEEP, S. Experimental study on effect of waste plastic bottle strips in soil improvement. Geotech Geol Eng, vol. 36 (5), p. 2907–2920. 2018.

RESCHETTI JUNIOR, Paulo Roberto. Avaliação do Comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentação. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos- SP, 125 p., 2008.

SANBONSUGE, K., Comportamento mecânico e desempenho em campo de base de solo-cimento. Tese de Mestrado em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 137 p., 2013.

SANTOS, A.P.S. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 125p., 2004.

SCHAFFER, V. R.; SHARP, K. D.; DRUMHELLER, C.; ABRAMSON, L. W. Ground improvement, Ground reinforcement and ground treatment: Developments 1987-1997. Geotechnical Special Publication. ASCE, 1997. N.69. Cap.2,11: Fiber reinforced soils, p. 273-291. 1997.

SHUKLA, S., K. Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering. Springer, Singapore. 181 p., 2017.

SHUKLA, S. K.; SIVAKUGAN, N.; DAS, B. M. Fundamental concepts of soil reinforcement: an overview. International Journal of Geotechnical Engineering, 3, p. 329–342. 2009.

SIEIRA, A.C.C.F. SAYÃO, A.S.F.J. Ensaios triaxiais em solo reforçado com geogrelhas. Revista Geotecnia, no. 118, p. 43-64, 2010.

SILVA, B. A. D., Estudo de misturas solo cimento agregado reciclado de telhas cerâmicas para fabricação de blocos par alvenaria. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 279 p., 2015.

SILVA, C.C., Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 170p., 2007.

SILVA, M.A.; BUENO, B.S.; LIMA, D.C. Estabilização de solos com inclusões curtas aleatórias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995. , p.327-335, 1995.

SILVA, R. D. S., Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 219 p., 2005.

SIVAKUMAR BABU, G. L. , CHOUKSEY, S. K. Stress–strain response of plastic waste mixed soil. Waste Management Journal, vol. 31, p. 481–488, 2011.

SOLTANI- JIGHEH, H. Undrained behavior of clay–plastic waste mixtures. Internacional Congress on Advances In Civil Engineering, 11, Proceedings, Istanbul – Turkey, p. 21-25, 2014.

SPECHT, L.P., Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando à pavimentação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 151 p., 2000.

TANG, C.-S., SHI, B., ZHAO, L.-Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. Geotext. Geomembr. v 28, p. 54-62, 2010.

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

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

TEODORO, J.M. Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas. São Paulo, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos/ USP, 108p., 1999. .

TRINDADE, T.P., IASBIK, I., LIMA, D.C., MINETTE, E., CARVALHO SILVA, C.H. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.30, n.2, p.215-222, 2006.

ULBRICH, L.A. Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 122p., 1997.

VENDRUSCOLO, M.A. Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno. Tese (Doutorado em Engenharia) -

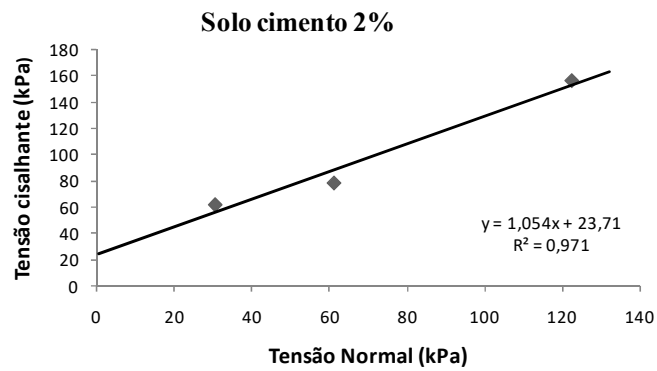
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 224 p., 2003.

VIVIANI, E. ; GIACHETTI, H. L. Caracterização dos solos do município de bauru a partir de sistemas de classificação para solos tropicais. In XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 8., 2006, Curitiba. Anais Cobramseg 2006, v. 1, p. 47-52.

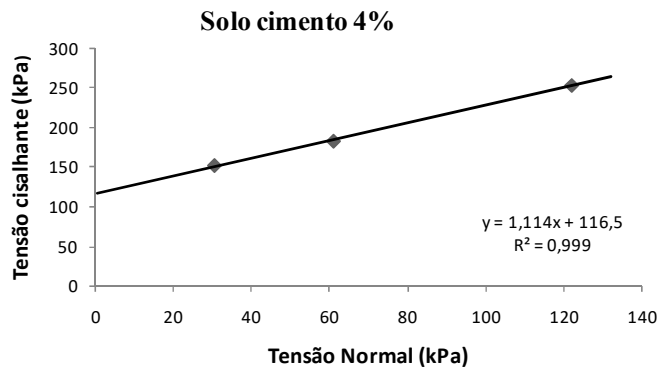
WEI, L., CHAI, S. X., ZHANG, H. Y., SHI, Q. Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber, Construction and Building Materials 172 (2018) 300–308, 2018.

YETIMOGLU, T., SALBAS, O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly discrete fibers. Geotext. Geomembr. v 21, p. 103-110, 2003.

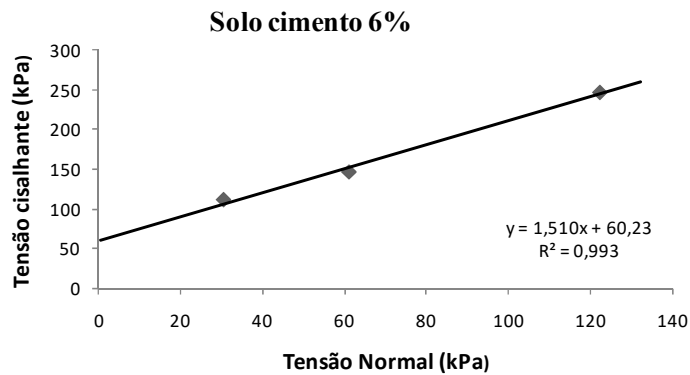
# APÊNDICES



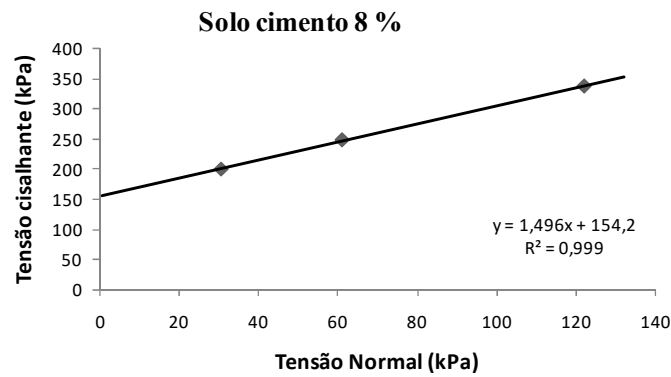
**Figura A1** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento.



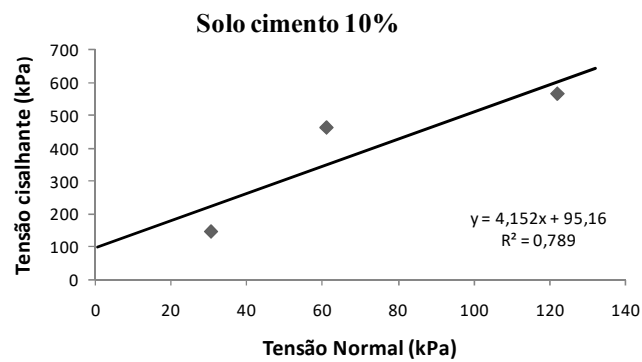
**Figura A2** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 4% de cimento.



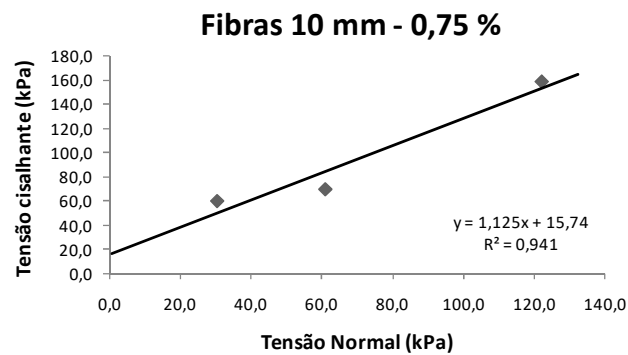
**Figura A3** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 6% de cimento.



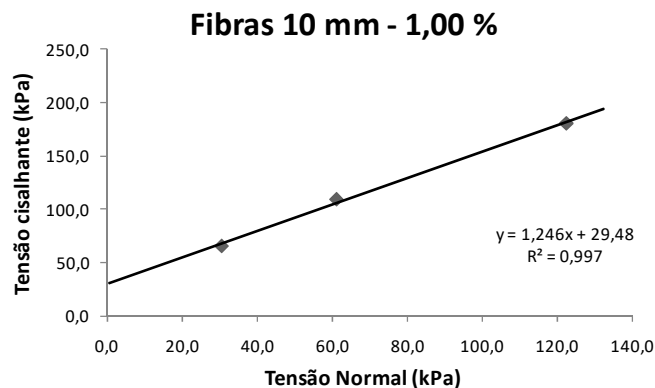
**Figura A4** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 8% de cimento.



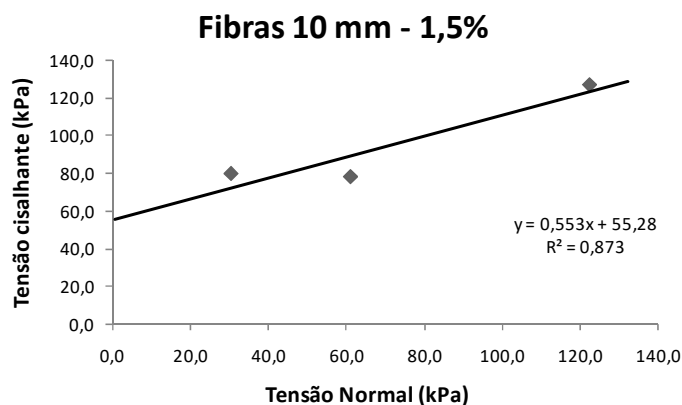
**Figura A5** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento de matriz arenosa, com inclusões 10% de cimento.



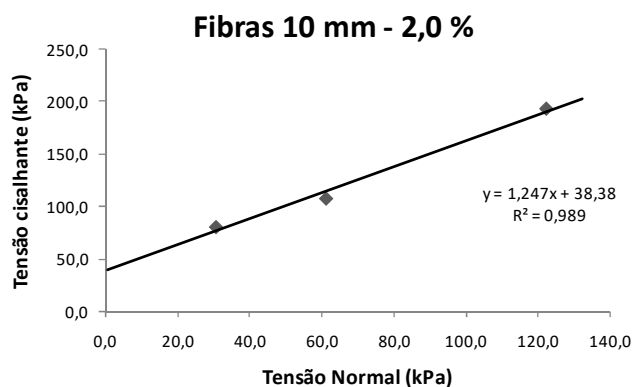
**Figura A6** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-fibra, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e fibras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.



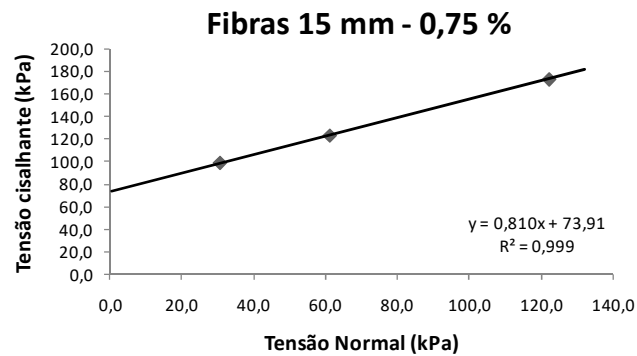
**Figura A7** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.



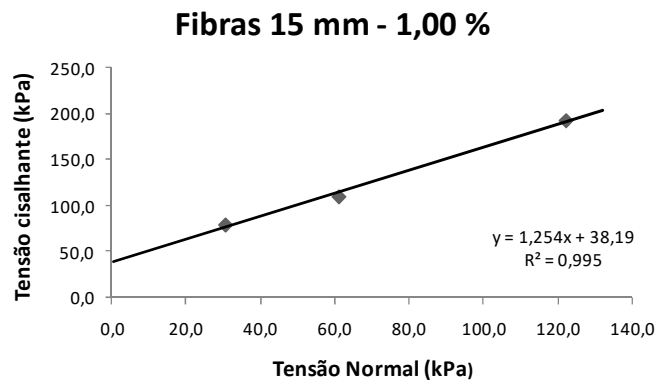
**Figura A8** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 1,5%.



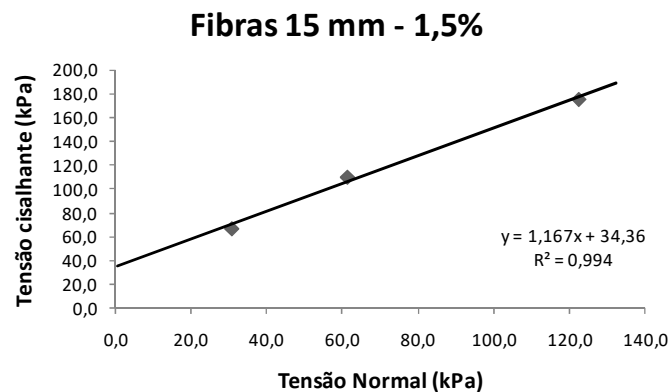
**Figura A9** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 10 mm de comprimento em porcentagem de 2,0%.



**Figura A10** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.

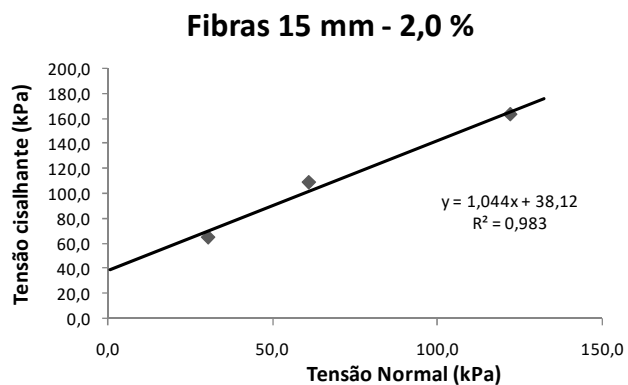


**Figura A11** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.

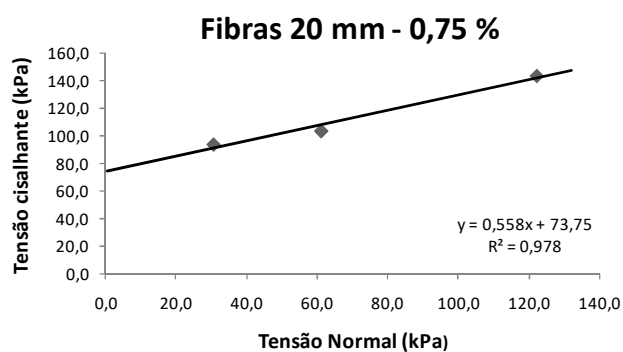


**Figura A12** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 1,50%.

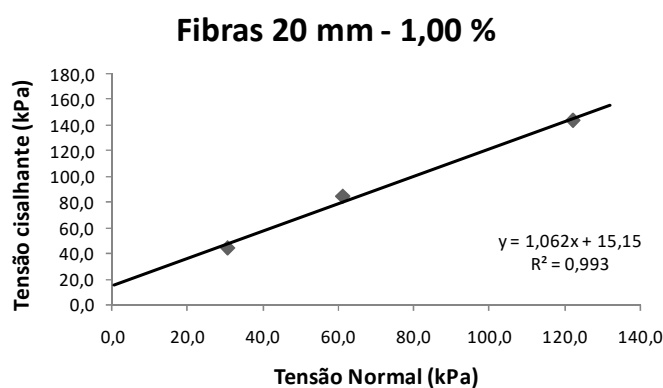




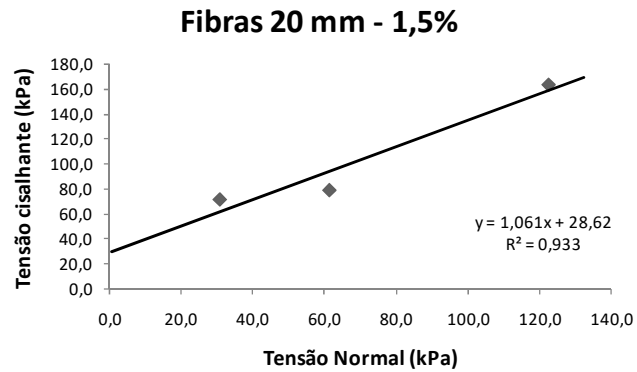
**Figura A13** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 15 mm de comprimento em porcentagem de 2,00%.



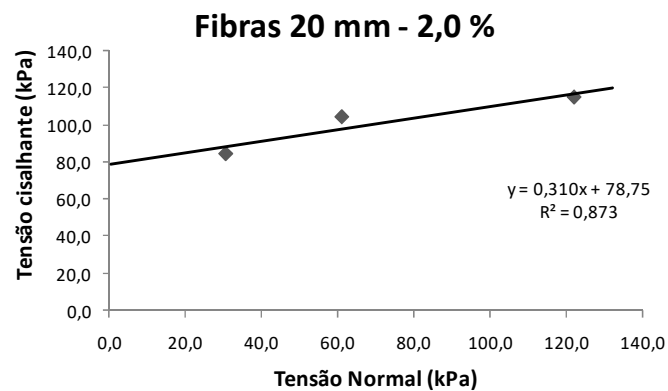
**Figura A14** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.



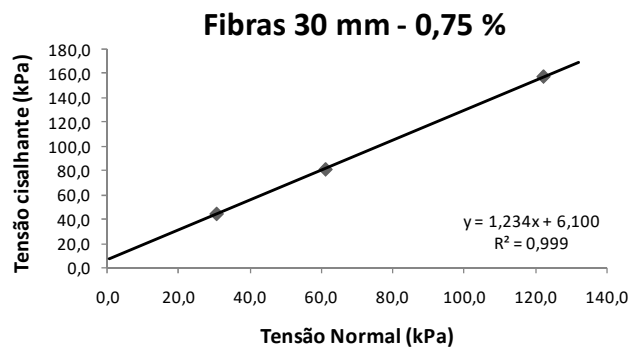
**Figura A15** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.



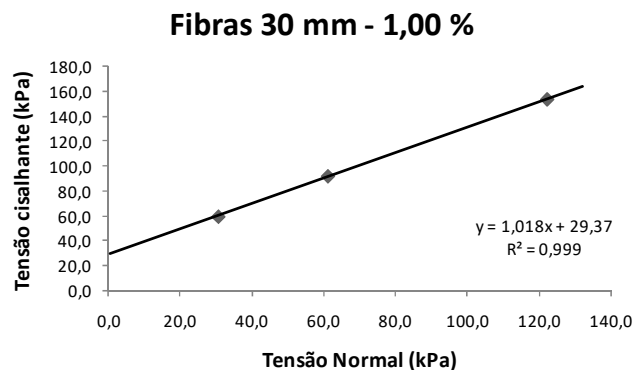
**Figura A16** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 1,50%.



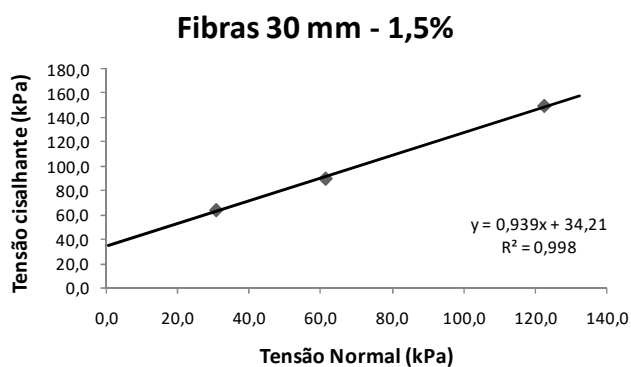
**Figura A17** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 20 mm de comprimento em porcentagem de 2,00%.



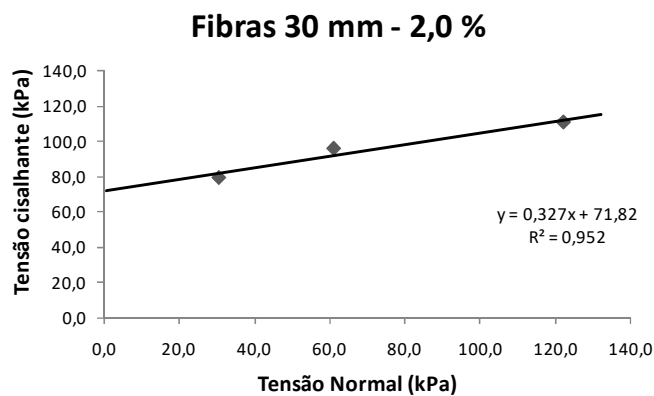
**Figura A18** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 0,75%.



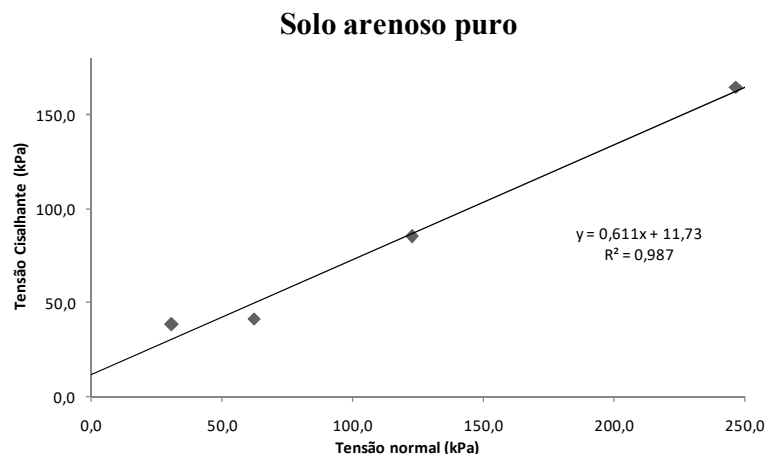
**Figura A19** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 1,00%.



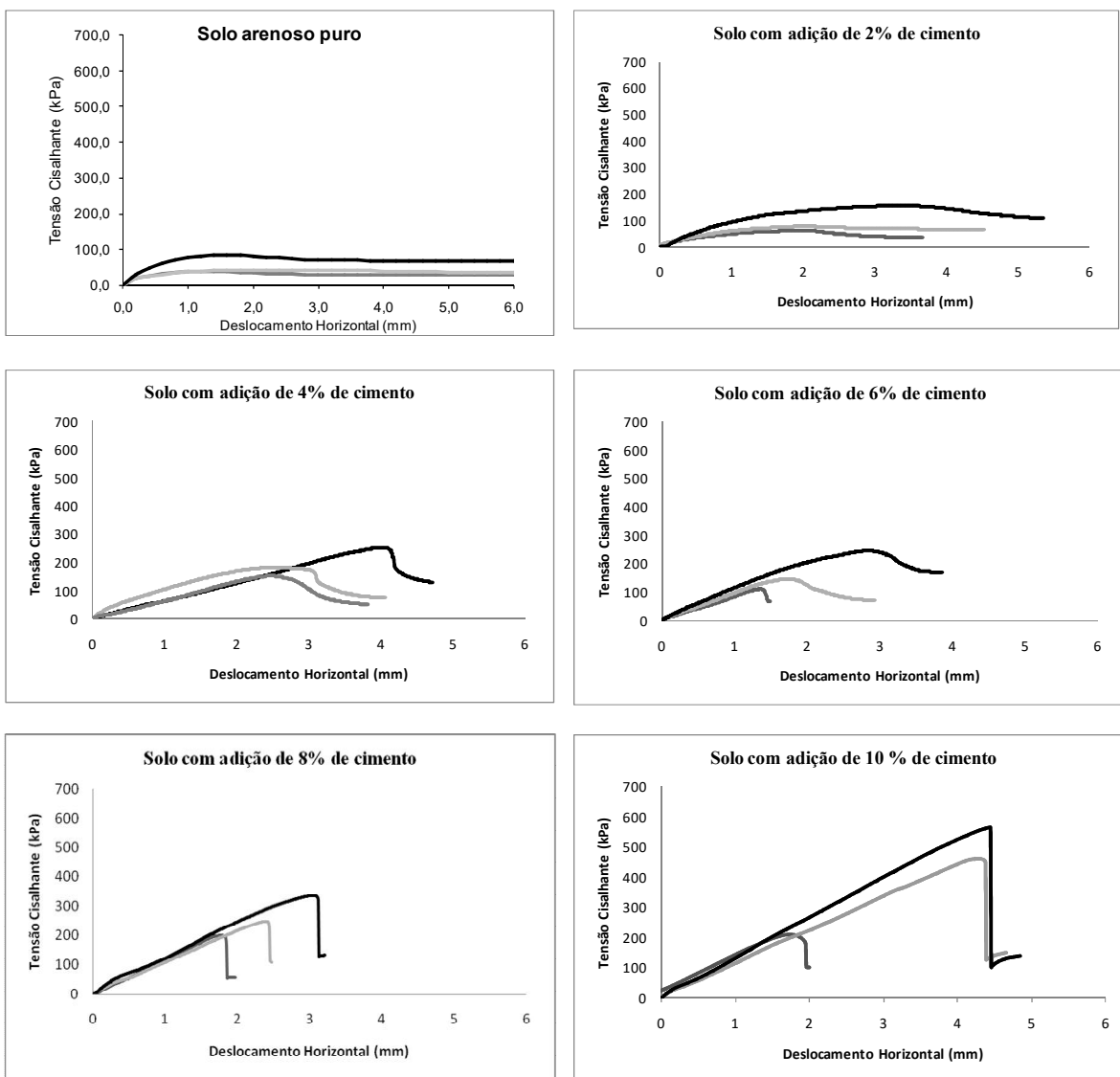
**Figura A20** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 1,50%.



**Figura A21** – Envoltória de resistência obtida em ensaio de compósito solo-cimento-tira, de matriz arenosa, com inclusões 2% de cimento e tiras de 30 mm de comprimento em porcentagem de 2,00%.





**Figura A22** – Envoltória de resistência obtida em ensaio com o solo arenoso puro.



**Figura A23-** Curvas Tensão x Deslocamento horizontal obtidas em ensaios de cisalhamento direto para o solo arenoso puro e com a inclusão de diferentes quantidades de cimento.

# **ANEXOS**

Figura AN1 – Certificado de ensaios físicos e químicos do cimento CP II- F-32 fornecido pela CSN.

		CERTIFICADO DE ENSAIOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE CIMENTO			
<b>INTERESSADO:</b>					
EMPRESA: CSN - COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL - LABORATÓRIO DE CONTROLE DE QUALIDADE					
LOCALIZAÇÃO: Rod MG 170, km 69, s/n, zona rural, Arcos, MG					
PRODUTO: CII-F-32		DATA DA EMISSÃO DO CERTIFICADO: 07/10/2019		REFERENTE AOS ÚLTIMOS TRINTA DIAS	
ENSAIOS FÍSICOS DE CIMENTO PORTLAND COMPOSTO				ABNT NBR 16697:2018	
Determinações	Unidade	Referência Normativa	Limites de Especificação	Desvio Padrão	Resultados
Finura na Peneira 75 µm (n° #200)	(%)	NBR-11579	≤12	0,12	0,37
Massa Específica	(g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM-23	---	-	3,00
Área Específica	(cm <sup>2</sup> /g)	NBR NM-76	≥2600	151	4.601
Água de Consistência Normal	(%)	NBR NM-43	---	0,23	25,53
Tempo de Início de Pega	(min)	NBR NM-65	≥ 60	28,5	236
Tempo de Fim de Pega	(min)		< 600	32,1	305
Expansibilidade à Quente (mm)	(mm)	NBR NM-3435	≤ 5,0	0	0,0
<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</b>					
Determinações	Unidade	Referência Normativa	Limites de Especificação	Desvio Padrão	Resultados
Resistência 1 dia (MPa)	MPa	NBR-7215	**	1,65	13,0
Resistência 3 dias (MPa)			≥10	1,59	24,7
Resistência 7 dias (MPa)			≥20	1,53	30,8
Resistência 28 dias (MPa)			≥32	1,40	36,9
OBSERVAÇÃO: Resistência à compressão - últimos 30 resultados					
ENSAIOS QUÍMICOS DE CIMENTO PORTLAND COMPOSTO				ABNT NBR 16697:2018	
Determinações	Unidade	Referência Normativa	Limites de Especificação	Desvio Padrão	Resultados
Óxido de Magnésio (MgO)	(%)	NBR NM-11	**	0,40	4,44
Resíduo Insolúvel (RI)	(%)	NBR NM-15	≤7,5	0,07	0,99
Perda ao Fogo (P.F)	(%)	NBR NM-18	≤12,5	0,82	11,29
Anidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	(%)	NBR NM-16	≤4,5	0,18	2,20
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	(%)	NBR NM-20	≤11,5	0,93	9,47
Óxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	(%)			0,56	15,42
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(%)			0,13	4,09
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(%)			0,08	2,33
Óxido de Cálcio (CaO)	(%)			1,03	58,64
Óxido de Cálcio Livre (CaOlivre)	(%)			0,48	1,34
Arcos, 07/10/2019					
 Janira Ferreira de Oliveira Coordenadora de Qualidade (37) 3358-7119 CSN - COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL			JANIRA FERREIRA DE OLIVEIRA Coordenadora de Qualidade CSN - Companhia Siderúrgica Nacional		