



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado


---

## Engenharia Civil e Ambiental

**LUIZA REIS SIMIONATO**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLO  
ARENOSO UTILIZANDO CAL HIDRATADA E TIRAS DE  
POLIETILENO TEREFTALATO**

Bauru  
2023



**LUIZA REIS SIMIONATO**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLO  
ARENOSO UTILIZANDO CAL HIDRATADA E TIRAS DE  
POLIETILENO TEREFALATO**

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



Bauru  
2023

S589a Simionato, Luiza Reis  
Avaliação da resistência ao cisalhamento de solo arenoso utilizando cal hidratada e tiras de polietileno tereftalato / Luiza Reis Simionato. -- Bauru, 2023  
102 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru  
Orientador: Paulo César Lodi

1. Solo reforçado. 2. Solo-cal-tiras. 3. Tiras poliméricas. 4. Resistência ao cisalhamento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUIZA REIS SIMIONATO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 02 dias do mês de agosto do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LUIZA REIS SIMIONATO, intitulada **AValiação da Resistência ao Cisalhamento de Solo Arenoso Utilizando Cal Hidratada e Tiras de Polietileno Tereftalato**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO CESAR LODI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FERNANDO LUIZ LAVOIE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Geotecnia / Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, Prof. Dr. ALEXSANDRO DOS SANTOS FELIPE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final:           **APROVADA**          . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO CESAR LODI



## **DEDICATÓRIA**

*Em memória aos meu avós Antônio e  
Iracema; aos meus avós Joaquim e  
Maria José; aos meus pais Luiz Carlos  
e Simone; aos meus irmãos Abrom,  
Astor e André e ao meu namorado  
Fábio.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Paulo César Lodi, pela orientação e confiança durante todo mestrado.

A todos os professores da pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, com ênfase em Geotecnia, pelos conhecimentos transmitidos durante o mestrado.

Aos técnicos Gustavo Pinheiro e Sérgio Gimenez Júnior, do Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) e ao meu amigo Jhaber Dahsan Yacoub, pela grande ajuda durante a realização dos ensaios.

Aos meus pais Luiz Carlos Simionato e Simone Reis Simionato, aos meus irmãos Abrom Reis Simionato, Astor Reis Simionato e André Reis Simionato e ao meu namorado Fábio Augusto Frontera, por todo amor, incentivo e por proporcionar todo o apoio necessário para chegar até aqui.

Aos meus colegas de trabalho e amigos da Secretaria de Planejamento Urbano e Obras da Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Rio Pardo, Adriane Chrystina Costa Rios, Carla Akemi Umezu Molitor, Ellis de Souza e Silva, Géron Vanderlei Pontes, Juliana Franciscon, Leandro Ferreira de Paula, Paulo Affonso Barbosa Azanha, Rodrigo Rossi Teixeira, Silzimar José Silva, Suelen Cristina Rodrigues Hermeni, Susilei Maitan e Willias Cavalcante Bilac, por toda compreensão durante a realização deste mestrado. Em especial aos meus amigos Mário Sérgio Rosso e Aristides Machado que partiram deste mundo, deixando todos que estavam ao seu redor com uma imensa saudade no coração.

À minha amiga Amanda Bastos Coelho Lopes que me inspirou e incentivou a iniciar este mestrado.

A Deus, por colocar essas pessoas maravilhosas em minha caminhada e pelos inúmeros milagres já realizados em minha vida.

*“Para Deus nada é impossível.”*

*(Lucas 1:37)*

## RESUMO

SIMIONATO, Luiza Reis. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de solo arenoso utilizando cal hidratada e tiras de polietileno tereftalato**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 102 p., 2023.

Esse trabalho avaliou os efeitos provocados nos parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) bem como no comportamento das curvas tensão-deslocamento, em um solo arenoso, pela inclusão de diferentes percentuais de cal hidratada e diferentes tamanhos e percentuais de tiras de polietileno tereftalato. Foi utilizado um solo arenoso típico da região de Bauru (SP). A cal foi adicionada ao solo em percentuais pré-determinados de 2, 4, 6, 8 e 10% em relação à massa seca do solo. As tiras foram oriundas de garrafas descartáveis com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e largura de 1,5 mm. Estas foram adicionadas aleatoriamente ao solo-cal (com 2 e 4% de cal) em percentuais pré-determinados de 0,75, 1, 1,5 e 2% em relação à massa seca. Os resultados mostraram que a adição da cal ao solo arenoso aumentou a resistência ao cisalhamento, com aumento do intercepto coesivo e pouco efeito sobre o ângulo de atrito. No entanto, adição de cal acima de 4%, ocasionou ruptura frágil ao solo. Em relação a adição de tiras ao compósito solo-cal, em alguns casos, houve modificação do comportamento da curva tensão-deslocamento, conferindo uma ruptura plástica, principalmente com a inclusão de tiras de maior comprimento. Concluiu-se que a inclusão de tiras recicladas em solo-cal pôde fornecer um material com alta resistência, boa ductilidade e uma alternativa altamente sustentável.

**Palavras-chave:** Solo reforçado, solo-cal-tiras, tiras poliméricas, resistência ao cisalhamento.

## ABSTRACT

SIMIONATO, Luiza Reis. **Evaluation of the shear strength of sandy soil using hydrated lime and polyethylene terephthalate strips**. Dissertation (Master Degree). Faculty of Engineering of Bauru, University State Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 102 p., 2023.

This work evaluated the effects caused on the shear strength parameters (cohesion and friction angle) as well as on the behavior of the stress-displacement curves, in a sandy soil, by the inclusion of different percentages of hydrated lime and different sizes and percentages of polyethylene terephthalate strips. A typical sandy soil from the region of Bauru (SP) was used. Lime was added to the soil in predetermined percentages of 2, 4, 6, 8 and 10% in relation to the dry mass of the soil. The strips were obtained from disposable bottles with lengths of 10, 15, 20 and 30 mm and width of 1.5 mm. These were randomly added to the soil-lime (with 2 and 4% lime) in predetermined percentages of 0.75, 1, 1.5 and 2% in relation to the dry mass. The results showed that the addition of lime to the sandy soil increased the shear strength, with an increase in the cohesive intercept and little effect on the friction angle. However, additions of lime above 4% caused fragile soil rupture. About to the addition of strips to the soil-lime composite, in some cases, there was a change in the behavior of the stress- displacement curve, resulting in a plastic rupture, mainly with the inclusion of strips of greater length. It was concluded that the inclusion of recycled strips in soil-lime can provide a material with high strength, good ductility and a highly sustainable alternative.

**Keywords:** Reinforced soil, soil-lime-strips, polymer strips, shear strength.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 3.1</b> - Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.....	37
<b>Figura 4.1</b> - Imagem via satélite da jazida de extração do solo arenoso utilizado em todos os ensaios. Coordenadas 22°21'6.03"S; 49°01'57.68"O. ....	39
<b>Figura 4.2</b> - Curvas granulométricas obtidas em ensaios com e sem o uso de defloculantes, referente ao solo de Bauru. ....	39
<b>Figura 4.3</b> - Curva de compactação na energia Proctor Normal, referente ao solo de Bauru.....	40
<b>Figura 4.4</b> - Fluxograma de ensaios realizados na primeira etapa. ....	43
<b>Figura 4.5</b> - Fluxograma de ensaios realizados na segunda etapa, para solo-cal-tiras com 2% de cal. ....	43
<b>Figura 4.6</b> - Fluxograma de ensaios realizados na segunda etapa, para solo-cal-tiras com 4% de cal. ....	44
<b>Figura 4.7</b> - Sequência de procedimentos para moldagem e ruptura dos corpos de prova. ....	46
<b>Figura 5.1</b> - Curvas de compactação na energia Proctor Normal, para o solo-cal com 2% e 10% de cal.....	49
<b>Figura 5.2</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal. ....	52
<b>Figura 5.3</b> - Envoltórias de resistência: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal. ....	56
<b>Figura 5.4</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.....	58
<b>Figura 5.5</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.....	59
<b>Figura 5.6</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais. ....	61
<b>Figura 5.7</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.....	62
<b>Figura 5.8</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais. ....	64
<b>Figura 5.9</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.....	65

<b>Figura 5.10</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.....	67
<b>Figura 5.11</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.....	68
<b>Figura 5.12</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.....	70
<b>Figura 5.13</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.....	71
<b>Figura 5.14</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.....	73
<b>Figura 5.15</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.....	74
<b>Figura 5.16</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.....	76
<b>Figura 5.17</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.....	77
<b>Figura 5.18</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.....	79
<b>Figura 5.19</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.....	80
<b>Figura 5.20</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal com 6% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 2% cal. ....	82
<b>Figura 5.21</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, compósito solo-cal com 6% e 8% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 2% cal. ....	83
<b>Figura 5.22</b> - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal com 8% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 4% cal. ....	84
<b>Figura 5.23</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, compósito solo-cal com 8% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 4% cal. ....	85
<b>Figura 5.24</b> - Envoltórias de resistência: solo natural, melhor compósito solo-cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 2% e 4% de cal.....	86

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> - Composição das cales brasileiras.....	17
<b>Tabela 3.2</b> - Teor de cal indicado para cada tipo de solo. ....	26
<b>Tabela 4.1</b> - Caracterização e compactação do solo de Bauru.....	40
<b>Tabela 4.2</b> - Índices físicos das amostras do solo de Bauru. ....	40
<b>Tabela 4.3</b> - Propriedades típicas do PET. ....	41
<b>Tabela 4.4</b> - Resistência do PET a determinados agentes agressivos. ....	41
<b>Tabela 4.5</b> - Síntese dos ensaios.....	45
<b>Tabela 5.1</b> - Parâmetros ótimos do solo natural e do solo com os teores de 2% e 10% de cal.....	49
<b>Tabela 5.2</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal.....	54
<b>Tabela 5.3</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal.....	55
<b>Tabela 5.4</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais. ....	58
<b>Tabela 5.5</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais. ....	59
<b>Tabela 5.6</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais. ....	62
<b>Tabela 5.7</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais. ....	62
<b>Tabela 5.8</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais. ....	64
<b>Tabela 5.9</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais. ....	65

<b>Tabela 5.10</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais. ....	67
<b>Tabela 5.11</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais. ....	68
<b>Tabela 5.12</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais. ....	70
<b>Tabela 5.13</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais. ....	71
<b>Tabela 5.14</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais. ....	73
<b>Tabela 5.15</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais. ....	74
<b>Tabela 5.16</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais. ....	76
<b>Tabela 5.17</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais. ....	77
<b>Tabela 5.18</b> - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais. ....	79
<b>Tabela 5.19</b> - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais. ....	80

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>V</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
3.1 SOLO COM ADIÇÃO DE CAL.....	14
3.1.1 <i>A cal</i> .....	15
3.1.2 <i>Reações solo-cal</i> .....	17
3.1.3 <i>Alterações nas propriedades do solo estabilizado com cal</i> .....	20
3.1.4 <i>Método de dosagem de misturas solo-cal</i> .....	25
3.2 SOLO COM ADIÇÃO DE TIRAS POLIMÉRICAS.....	26
3.2.1 <i>Tiras poliméricas</i> .....	27
3.2.2 <i>Mecanismos de interação entre solo e tiras poliméricas</i> .....	29
3.3 SOLO REFORÇADO COM CAL E TIRAS POLIMÉRICAS.....	34
3.4 MEIO AMBIENTE E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA ONU.....	36
<b>4 MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>38</b>
4.1 MATERIAIS.....	38
4.1.1 <i>Solo</i> .....	38
4.1.2 <i>Cal hidratada</i> .....	41
4.1.3 <i>Tiras de polietileno tereftalato</i> .....	41
4.2 MÉTODO.....	42
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>49</b>
5.1 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: SOLO-CAL.....	50
5.2 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: SOLO-CAL-TIRAS COM 2% E 4% DE CAL E DIFERENTES COMPRIMENTOS E PERCENTUAIS DE TIRAS.....	57
5.2.1 <i>Solo-cal-tiras: 2% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras</i> .....	57
5.2.2 <i>Solo-cal-tiras: 4% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras</i> .....	69
5.3 COMPARAÇÕES ENTRE OS MELHORES RESULTADOS.....	81
5.3.1 <i>Melhores resultados: solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras</i> .....	81

5.3.2	<i>Melhores resultados: solo-cal-tiras com 4% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras</i> .....	84
5.3.3	<i>Melhores resultados: solo-cal-tiras com 2% e 4% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras</i> .....	86
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O reforço de solos consiste na utilização de processos físicos e/ou químicos para melhorar suas propriedades mecânicas. Procura-se, com isso, o aumento da resistência do solo tratado bem como a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. Exemplos de processos químicos são a adição de cimento ou cal ao solo (CASAGRANDE, 2005; BENTO, 2006). Nesse contexto, o material passa a ser denominado de material compósito. Budinski (1996) classifica materiais compósitos como misturas de dois ou mais materiais diferentes com características inferiores ao do material resultante. São formados pela matriz e pelo elemento de reforço.

A utilização de materiais compósitos (solo-cimento, solo-cal, solo-tiras, dentre outros) surgiu em função do aumento do custo dos materiais de construção bem como da redução da disponibilidade de materiais naturais. Dessa forma, vislumbrou-se a utilização de materiais compósitos que substituíssem os materiais já utilizados e tivessem igual ou maior eficiência que esses.

Dessa maneira, diversas pesquisas têm abordado a utilização do solo com cimento, solo com cal ou ainda solo com tiras (BUDINSKI, 1996; MONTARDO, 1999; CONSOLI et al., 2002; VENDRUSCOLO, 2003; YETIMOGLU e SALBAS, 2003; CASAGRANDE, 2005; TRINDADE et al., 2006; DIAMBRA et al., 2010; LOVISA, SHUKLA e SIVAKUGAN, 2010; TANG, SHI, e ZHAO, 2010; FATAHI, KHABBAZ, e FATAHÍ, 2012; FATAHI, LE e KHABBAZ, 2013; LI e ZORNBERG, 2013).

A prática de aplicação de tiras para reforço do solo em aplicações geotécnicas existe há séculos. Essa utilização era, no entanto, de fibras naturais, as quais possuem uma fácil deterioração no tempo. Com o grande avanço da indústria química, materiais sintéticos puderam ser utilizados, os quais são vantajosos devido à grande facilidade de produção em larga escala e à resistência aos agentes externos. Os principais polímeros utilizados são o polipropileno (PP), polietileno (PE), poliéster ou polietileno tereftalato (PET) e poliamida (PA). No entanto, a utilização mais frequente

é da tira de polipropileno. O polietileno tereftalato tem sido pouco utilizado nos estudos de reforço de solo.

Ao serem incluídas em solos arenosos ou argilosos, as tiras alteram os valores do intercepto de coesão bem como do ângulo de atrito. Essa alteração (aumento ou diminuição) irá depender de diversos fatores (tipo de solo, tipo de tira etc.). Além disso, as tiras não impedem a formação de fissuras no material. No entanto, são capazes de aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação das fissuras (TAYLOR, 1994). Segundo Hannant (1994), as tiras mantêm as fissuras juntas, o que aumenta a ductilidade (melhora no estado pós-fissuração). As tiras que “atravessam” as fissuras contribuem para o aumento da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

Além da utilização de cimento, cal e tiras nos solos, muitos trabalhos buscam também a avaliação do efeito solo-cimento e solo-cal em conjunto com as tiras (GRAY e OHASHI, 1983; MAHER e HO, 1994; MICHALOWSKI e CERMAK, 2003; HAMIDI e HOORESFAND, 2013; FATAHI, LE e KHABBAZ, 2013; CRISTELO et al., 2015; FESTUGATO et al., 2018; WEI et al., 2018).

É notável a importância do conhecimento do mecanismo de interação solo-tira a fim de se entender a resposta da mistura em relação ao comportamento mecânico. Tal mecanismo depende de diversos fatores relacionados à matriz (solo, solo-cimento ou solo-cal), como, por exemplo, granulometria, índice de vazios, grau de cimentação, composição mineralógica etc., e às tiras, como, por exemplo, comprimento, espessura, rugosidade, módulo de elasticidade, capacidade de alongamento etc. Nesse sentido, Hejazia et al. (2012) apresentam uma revisão sobre a utilização de fibras naturais e tiras sintéticas para reforço de solos.

Apesar de todas as pesquisas supracitadas, nota-se que no contexto internacional e nacional (vide os trabalhos de LIMA, BUENO e THOMASI, 1996; BUENO, 1996; BUENO et al., 1996; TEODORO, 1999; CONSOLI, ULBRICH, e PRIETTO, 1997; CONSOLI, PRIETTO e ULBRICH, 1998; CONSOLI, VENDRUSCOLO e PRIETTO, 2003; CONSOLI et al., 2004; SANTOS, 2004; CASAGRANDE, 2005; BENTO, 2006; AMANN et al., 2022; ANATER et al., 2022; ARAGÃO et al., 2022; BRAUS e CASTRO, 2022; CORREA, TEBECHRANI NETO e NASCIMENTO, 2022; FERREIRA et al., 2022; FERREIRA, CASAGRANDE e TEIXEIRA, 2022; GENTIL et al., 2022; GONÇALVES et al., 2022; LOCH et al., 2022; MENDES et al., 2022; MEURER et al., 2022; MILANI et al., 2022; PRADO et al., 2022;

REGALIN JÚNIOR et al., 2022; SANTOS JÚNIOR e SILVA, 2022; SILVA et al., 2022; SOMENSI et al., 2022; TENÓRIO et al., 2022; VENSON, SOUSA e MOTA, 2022; XAVIER, SOUZA NETO e BANDEIRA, 2022; ZAMPIERI et al., 2022.) a grande maioria das pesquisas está voltada para o estudo de compósitos solo-cimento e solo-cimento-tiras e, apesar do uso de solo-cal para aplicações rodoviárias ser bastante comum no Brasil, existem ainda poucos estudos enfocando a utilização de solo-cal com tiras.

Bento (2006) apresenta um histórico da utilização da cal na engenharia bem como de sua utilização para a estabilização de solos. Enfatiza ainda que a adição de cal para pavimentos representa um aumento na resistência do solo (compressão não confinada, resistência à tração, resistência à flexão e CBR), redução do fraturamento e fadiga e aumento da durabilidade.

Trabalhos recentes utilizando a cal como estabilizante tem estudado a influência desta nas diversas propriedades do solo. Nas últimas edições do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, diversos trabalhos avaliaram a utilização do solo-cal em aplicações de engenharia (vide os trabalhos de BENETTI et al., 2018; JOHANN et al., 2018; IZZO et al., 2018; NETO, HEIDEMANN, e NIERWINSKI, 2018; ROCHA et al., 2018; ANDRADE JÚNIOR, JOHANN e MENEGAZZO, 2022; CORRÊA et al., 2022; GARCÍA et al., 2022; LOPES et al., 2022; SILVA, BARBOSA e SOUZA FILHO, 2022; TSUGAWA, PEREIRA e BOSCOV, 2022; UCHÔA e GONDIM, 2022). Esses trabalhos enfatizam principalmente o efeito que a adição de cal produz no comportamento tensão-deformação do solo (diminuição da deformabilidade com consequente aumento de tensão). Rocha et al. (2018), por exemplo, relatam que o material estudado mudou o comportamento de dúctil para frágil após a adição da cal.

No entanto, apesar do solo-cal induzir a melhorias na resistência mecânica, sua resistência à tração ainda não apresenta ganho significativo bem como o processo de fissuramento pode continuar sendo determinante no desempenho do compósito (AL-SWAIDANI, HAMMOUD e MEZIAB, 2016; EMARAH e SELEEM, 2016; LÓPEZ-LARA et al., 2017). Assim, as tiras surgem como um processo de melhoria nas propriedades do compósito solo-cal a fim de aumentar as propriedades mecânicas e reduzir as deformações (KALKAN, 2013; ANGGRAINI et al., 2015; AYELDEEN e KITAZUME, 2017; WEI et al., 2018).

No trabalho de Wei et al. (2018), por exemplo, os autores estudaram as propriedades mecânicas de um solo com adição de cal com quatro diferentes tipos de tiras (polipropileno, palha de arroz, palha de trigo e juta) por meio de ensaios triaxiais.

Os autores concluíram que todas as tiras aumentam o intercepto coesivo, diminuem a deformação e causam pouco efeito na parcela atritiva. A adição da tira de polipropileno (tira sintética) com cal apresentou um melhor resultado comparativamente às outras tiras.

Conforme relatado por Bento (2006) e Rocha et al. (2018), a estabilização de solo com cal é comumente empregada na construção de estradas, sendo este compósito geralmente utilizado como base ou sub-base de pavimentos. Rocha et al. (2018) enfocam ainda que as características das curvas de tensão-deformação são essenciais para a análise do comportamento de uma estrutura de pavimento ou de fundações superficiais assentes sobre uma camada de solo-cal.

Como exposto, a literatura apresenta poucos dados referentes a pesquisas utilizando solo-cal com tiras, principalmente no contexto nacional. Esse trabalho procurou, portanto, ampliar os resultados referentes aos efeitos que a inclusão de tiras causa nos solos com cal. Além disso, esse trabalho pôde contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos materiais geotécnicos reforçados com tiras buscando estabelecer uma relação entre as propriedades individuais das matrizes (solo tratado com cal) e das tiras e o comportamento mecânico dos compósitos.

Nesse sentido, este trabalho buscou avaliar a resistência ao cisalhamento do compósito solo-cal-tiras em termos dos parâmetros de resistência (coesão e atrito) bem como o comportamento das curvas tensão-deslocamento resultantes dos ensaios.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar a resistência ao cisalhamento do compósito solo-cal-tiras, em termos dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo atrito), bem como o comportamento das curvas tensão-deslocamento horizontal resultantes dos ensaios, pela inclusão de diferentes porcentagens de cal hidratada e de diferentes tamanhos e porcentagens de tiras de polietileno tereftalato (PET).

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 SOLO COM ADIÇÃO DE CAL**

Um solo estabilizado é um solo cujas propriedades são parcialmente ou completamente modificadas por meio da adição de um material distinto antes da compactação (USBR, 1998).

A estabilização de solos com cal (solo-cal) é um processo físico-químico resultante da adição da quantidade mínima de cal que promove o aumento permanente das propriedades mecânicas dos solos (DNIT, 2019).

O compósito solo-cal é uma mistura de solo, cal e água, posteriormente compactada para formar uma massa densa. Experiências têm mostrado que a maioria de solos finos misturados com cal virgem ou hidratada e água formam produtos cimentícios em um curto período (USBR, 1998).

A estabilização de solos com cal é recomendada para melhorar as propriedades de solos argilosos ou siltosos, a fim de corrigir problemas oriundos de alta plasticidade e expansão, além de baixa capacidade de suporte (HENRRIN et al., 1968 apud BRITO e PARANHOS, 2017).

Existem registros da utilização de cal como estabilizante de solos desde o Império Romano, há mais de dois mil anos, na execução da Via Ápia, mas só a partir do século XX seu uso começou a ser difundido, e sua consolidação se deu apenas após a Segunda Guerra Mundial (HENRRIN et al., 1968 apud BRITO e PARANHOS, 2017).

Segundo Guimarães (1971), o uso expressivo do compósito solo-cal em rodovias iniciou-se na década de 50. O autor relatou algumas experiências de sucesso em pistas experimentais no Brasil, entre elas pode-se citar:

- Aeroporto de Congonhas (São Paulo): foi construído um trecho de 10.000 m<sup>2</sup> com base de solo-cal-agregado, com 6% de cal hidratada;
- Rodovia Curitiba/Porto Alegre (Paraná): foi utilizado um solo siltoso, com 3 e 7% de cal;
- Rodovia Brasília/Fortaleza (Distrito Federal): foram construídos dois trechos de 150 metros cada, com bases de 1 e 3% de cal;
- Avenida Sernambetiba/Guanabara (Rio de Janeiro): foi construído um trecho de 18 km, com base de 3 a 4% de cal;
- Rodovia Cruz Alta/Carazinho (BR-377/RS): foram construídos dois trechos experimentais em solo argiloso com 4% de cal.

Para Rosa (2009), a cal é um dos estabilizantes de maior utilização e abundância, bem como o mais econômico usado para estabilização de solos, com aplicação em pavimentação e aterros. A sua eficiência foi comprovada através de vários estudos sobre a utilização da cal no melhoramento de solo para pavimentação, apresentando bons resultados em relação a sua capacidade de suporte e na redução de recalques.

Atualmente, a cal é utilizada na engenharia geotécnica como estabilizante químico a fim de melhorar as propriedades do solo, principalmente para fins de pavimentação e impermeabilização de fundos de lagoas e aterros. Dessa maneira, diversas pesquisas têm abordado a utilização do solo com cal (vide os trabalhos de TANG, SHI, e ZHAO, 2010; FATAHI, LE e KHABBAZ, 2013; BALDOVINO, 2018; BENETTI et al., 2018).

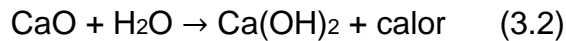
### **3.1.1 A cal**

A cal é um aglomerante resultante da calcinação de rochas carbonatadas constituídas predominantemente por carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e/ou carbonato de cálcio-magnésio. O resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e carbonatos de cálcio-magnésio é, respectivamente, o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de cálcio-magnésio (CaO-MgO), denominados genericamente de cal virgem ou cal viva (GUIMARÃES, 2002).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 6471 (ABNT, 1998), define a cal como um produto resultante de processos de calcinação, da qual

o constituinte principal é o óxido de cálcio em associação natural com o óxido de magnésio, capaz de reagir com a água. A cal hidratada, por sua vez, é definida como um pó seco, obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

As reações de formação da cal virgem e da cal hidratada estão representadas nas Equações 3.1 e 3.2, respectivamente.



A reação de hidratação, Equação 3.2, dá origem ao produto chamado de cal cálcica. A partir da calcinação do calcário dolomítico, obtém-se a cal dolomítica, que é uma mistura de óxido de cálcio e óxido de magnésio ( $\text{CaO} + \text{MgO}$ ) (LOVATO, 2004). Assim, têm-se os seguintes tipos de cal:

$\text{CaO} \rightarrow$  cal cálcica virgem

$\text{CaO} . \text{MgO} \rightarrow$  cal dolomítica virgem

$\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow$  cal cálcica hidratada

$\text{Ca}(\text{OH})_2 . \text{MgO} \rightarrow$  cal dolomítica mono-hidratada

$\text{Ca}(\text{OH})_2 . \text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow$  cal dolomítica bi-hidratada

As cales comercializadas no mercado brasileiro possuem as propriedades apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Composição das cales brasileiras.

Tipo de cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO + MgO Base de não-volátil (%)	MgO Não hidratado (%)
Cal virgem cálcica	90-98	0,1-0,8	0,5-3,5	0,2-1,0	0,5-5,0	0,2-3,8	0,1-0,6	96,0-98,5	-
Cal hidratada cálcica	70-74	0,1-1,4	0,5-2,5	0,2-0,8	23-27	1,5-3,5	0,1-0,0	96,0-98,5	0,5-1,8
Cal hidratada dolomítica ou magnesiana	39-61	15-30	0,5-18,2	0,2-1,5	19-27	3,0-6,0	0,02-0,2	76-99	5-25
Cal virgem dolomítica ou magnesiana	51-61	30-37	0,5-4,5	0,2-1,0	0,5-4,8	0,5-4,5	0,05-0,1	76-99	-

Fonte: Adaptado de Guimarães (2002).

### 3.1.2 Reações solo-cal

Quando a cal é adicionada a uma suspensão aquosa de um solo, uma série de reações químicas imediatas começam a ocorrer: (i) reações de troca catiônica, (ii) reações de neutralização ácido-base e (iii) adsorção pelas superfícies dos argilominerais. A adição de cal leva o solo a uma nova condição de equilíbrio químico e termodinâmico. A acidez do solo é neutralizada, os cátions trocáveis são substituídos pelo íon cálcio (DNIT, 2019).

A técnica de estabilização de solos com adição de cal é fundamentada em reações físicas e químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, podendo ocorrer por modificação ou estabilização, dependendo do teor do estabilizante empregado na mistura (LITTLE, 1999; PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999).

Castro (1995) complementa que a estabilização química de um solo com cal é caracterizada por duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida (que dura de horas a dias) e uma etapa mais lenta (que pode levar de meses a anos).

Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo de interação da cal com um solo fino são: trocas catiônicas, floculação e aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção da cal e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes, e pela carbonatação (LOVATO, 2004).

Em geral, o processo de estabilização do solo envolve quatro reações distintas que são: as trocas catiônicas, a floculação e aglomeração, as reações pozolânicas e a carbonatação (BENTO, 2006).

#### **a) Processo de modificação**

O processo de modificação tem o objetivo apenas de alterar as propriedades do solo. Neste caso, o teor de cal adicionado ao solo é pequeno, suficiente apenas para que ocorra a fase rápida das reações, sem a formação de produtos cimentantes (LOVATO, 2004).

A modificação acontece devido à troca de cátions de cálcio, fornecidos pelo hidróxido de cálcio, por cátions presentes no solo argilomineral, incitadas por um ambiente de pH elevado e promovida pelo sistema cal-água. Esse processo também é conhecido como troca catiônica e é parcialmente responsável pela mudança da textura do solo, causada pela floculação de partículas de argila (LITTLE, 1999).

#### **b) Processo de estabilização**

O processo de estabilização, por sua vez, tem o objetivo de atingir as reações pozolânicas, através da adição de maiores teores de cal, desenvolvendo produtos cimentantes e proporcionando, com o tempo de cura, um ganho de resistência ao material estabilizado (LOVATO, 2004).

A estabilização é um processo de longo prazo, decorrente da formação de silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados, produzidos a partir das reações pozolânicas entre o cálcio da cal e os aluminatos e silicatos solubilizados no solo argilomineral. Estas reações dependem de ambientes com pH elevado e da reatividade do solo, podendo proporcionar melhoria da capacidade de suporte e resistência mecânica do solo (LITTLE, 1999).

#### **c) Troca catiônica**

As trocas catiônicas iniciam-se rapidamente após a mistura do solo com a cal, sendo seguida pela floculação e aglomeração e completa-se em poucos dias. Este fenômeno se dá devido à troca de base que ocorre com os cátions fortes da cal,

carregados com carga positiva, substituindo os íons metálicos fracos, tais como: sódio, magnésio e hidrogênio, situados na superfície da partícula de argila. A ligação entre duas partículas de argila depende da carga e tamanho dos íons e havendo troca de cátions cálcio pelos íons metálicos, haverá predominância dos cátions cálcio na superfície das partículas de argila, ocorrendo atração e junção dessas partículas, tornando o solo mais friável, ou seja, promovendo a diminuição da plasticidade (BAPTISTA, 1976 apud BENTO, 2006).

#### **d) Floculação e aglomeração**

A floculação e aglomeração produzem uma aparente troca na textura dos materiais argilosos, passando de um material plástico finamente graduado, para um solo de granulometria mais grossa, devido à alteração na sua estrutura que passa de plana e paralela para uma orientação aleatória de partículas (BENTO, 2006).

Os fenômenos de floculação e aglomeração proporcionam determinadas modificações nos solos, tais como: redução e estabilização da camada de água adsorvida, maior trabalhabilidade devido à mudança de textura plástica para friável, aumento da resistência ao cisalhamento devido à redução da dupla camada difusa e do aumento do contato das partículas de argila, em função da floculação (NLA, 2004).

#### **e) Reação pozolânica**

A reação pozolânica se processa em longo prazo, de maneira lenta, podendo durar meses ou anos, sendo baseada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. Um determinado material é considerado pozolânico quando, em presença de água e na temperatura ambiente, reage com o hidróxido de cálcio produzindo compostos com características cimentantes. Apesar dos solos não possuírem características pozolânicas, podem apresentar na sua fração argila esta propriedade, dependendo de sua natureza mineralógica e textural (BENTO, 2006).

As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica das misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes (CAMPELLO et al., 2000).

## **f) Carbonatação**

A carbonatação é a combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar, adsorvidas ou retiradas no momento da mistura ou pela penetração de ar nos poros após a execução. A reação tende a refazer o carbonato de cálcio e/ou magnésio, surgindo um novo corpo sólido que se entrelaça com os demais constituintes do solo (GUIMARÃES, 1971).

Segundo a NLA (2004) a carbonatação é uma reação indesejável que ocorre nas misturas solo-cal, pois a cal reage com o dióxido de carbono para formar o carbonato de cálcio, ao invés de promover a formação dos componentes cimentantes silicatos e aluminatos hidratados.

Para Queiroz de Carvalho (1979), o carbonato de cálcio e/ou magnésio formado é um composto cimentante fraco que é prejudicial em termos de ganhos de resistência.

### **3.1.3 Alterações nas propriedades do solo estabilizado com cal**

Segundo Lovato (2004) quando se adiciona cal a um solo argiloso suas propriedades físicas são alteradas, apresentando, geralmente, melhoria na plasticidade, trabalhabilidade, resistência, tensão-deformação e fadiga. Essas alterações dependem de diversos fatores, como tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação e período e condições de cura. No entanto, Ingles e Metcalf (1972), expõe que a cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila.

Fazzani (1993) explica que a fração mais fina do solo é a responsável pelo seu comportamento mecânico, incluindo características como plasticidade, expansão e contração. Herrier et al. (2012) complementam que o tratamento do solo com cal é eficaz para resolver problemas de erosão em solos expansivos ou muito plásticos, prevenindo o fenômeno de retração e inchamento e, conseqüentemente, promovendo a estabilização de taludes.

De acordo com Howard e Bara (1976) ao se adicionar cal hidratada ao solo, obtêm-se os seguintes efeitos: aumento da trabalhabilidade e fragilidade, aumento da

resistência ao cisalhamento, sutil mudança do limite de liquidez, aumento do limite de plasticidade e conseqüente redução do índice de plasticidade. Além disso, a porção fina de argila (colóides) se aglomera e forma partículas maiores, enquanto isso, as partículas mais largas (torrões) se desintegram e formam partículas menores. Também ocorre uma redução da umidade higroscópica do solo, devido ao efeito de secagem causado pela absorção de água da hidratação da cal.

Semelhantemente Brito e Paranhos (2017) mencionam alguns efeitos esperados pela adição de cal ao solo, como a modificação da granulometria do solo (devido à ocorrência de floculação), aumento da resistência à compressão simples, diminuição do limite de liquidez, aumento do limite de plasticidade, redução das variações de volume dos solos expansivos, redução da densidade e elevação do teor de umidade.

#### **a) Efeitos na compactação de misturas solo-cal**

O compósito solo-cal apresenta menor peso específico aparente máximo que o solo natural. O peso específico aparente máximo diminui à medida que o teor de cal aumenta, ao passo que a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cal (TRB, 1987).

Sobre o efeito citado anteriormente, Sivapullaiah, Prashanth e Sridharan (1998) explicam que as partículas de solo se tornam mais floculadas com a adição de cal. Essa floculação aumenta a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios do solo, reduzindo assim o peso específico aparente máximo do solo. A estrutura floculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto. No entanto, quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los, o que resulta em uma umidade maior e uma curva de compactação mais achatada.

#### **b) Efeitos no retardamento da compactação de misturas solo-cal**

Sivapullaiah, Prashanth e Sridharan (1998) constataram a diminuição na resistência à compressão simples de compósitos solo-cal não compactados imediatamente após a mistura. Um solo estabilizado com 2% de cal, na umidade ótima, houve uma diminuição na resistência de 241 kPa para 117 kPa ao deixar o

material solto durante 24 horas antes da compactação. Ao retardar a compactação por 7 dias, a resistência caiu para 83 kPa. De acordo com os autores, essa diminuição na resistência é devida ao fato de que os compostos cimentantes que se formam nesse período não contribuem para o ganho de resistência.

Osinubi (1998) observou que a resistência à compressão simples diminui com o aumento do tempo de cura entre a mistura e a compactação do compósito solo-cal, e que esse efeito é mais pronunciado quanto maior for o teor de cal. Para um teor de 8% de cal e um retardamento de 3 horas na compactação, houve uma redução de 29% na resistência à compressão simples.

Núñez (1991), ao estabilizar um solo areno-siltoso com cal, notou que o retardamento na compactação reduziu em até 50% a resistência à compressão simples do compósito solo-cal. Com apenas uma hora de retardamento a resistência foi reduzida em 42%. Para o teor de 7% de cal, toda redução na resistência ocorreu na primeira hora, mantendo-se constantes para maiores tempos de retardamento.

De acordo com as pesquisas de Holt, Freer-Hewish e Ghataora (2000) um solo estabilizado com cal apresentou resistência à compressão simples máxima com tempo de 12 a 24 horas entre mistura e compactação. Enquanto, os períodos de cura solta maiores que um dia foram prejudiciais, reduzindo sensivelmente sua resistência.

### **c) Efeitos na resistência à compressão simples e à tração indireta de misturas solo-cal**

Queiroz de Carvalho (1979) avaliou a resistência à compressão simples de um solo laterítico com adição de cal cálcica. Para o solo natural a resistência à compressão simples variou de 80 a 1920 kPa. Para solos estabilizados com teores entre 3 e 6%, a resistência à compressão simples, após 28 dias, variou de 210 a 5390 kPa. Na grande maioria dos casos 4,5 a 6% de cal foi suficiente para se atingir o máximo de aumento de resistência.

Osinubi (1998) avaliou a resistência à compressão simples de um solo laterítico com adição de 8% de cal, onde a resistência do solo natural aumentou de 310 kPa para 875 e 1075 kPa, com 7 e 14 dias de cura, respectivamente.

Baldovino et al. (2018) estudaram os fatores que influenciam na resistência à compressão simples e à tração indireta de um solo siltoso cimentado artificialmente com cal hidratada. Foram definidos 5 teores de cal a usar (0, 3, 5, 7 e 9%). A adição

de cal ao solo aumentou em mais de 4 vezes a resistência à compressão simples e de 6 vezes a resistência à tração do solo analisado. Os autores observaram uma relação direta e proporcional entre o teor de cal, o tempo de cura e a resistência à compressão simples e à tração indireta. A resistência à compressão simples e à tração tiveram um aumento linear com o aumento do teor da cal e com o aumento do tempo de cura. Notaram que existe uma relação constante entre tração e compressão simples para o compósito solo-cal, em 30 dias de cura, igual a 0,16.

Izzo et al. (2018) objetivaram em seu estudo determinar a relação entre a resistência à tração indireta e a resistência à compressão simples de solos silto-arenosos estabilizados com cal. As amostras foram estabilizadas nos teores de 3, 5, 7 e 9% de cal e curados por um período de 30 dias, em câmara úmida apropriada. A adição de cal fez aumentar a resistência à tração indireta e à compressão simples do solo, sendo possível estabelecer uma relação única de tração/compressão para este tipo de solo que variou entre 0,10 e 0,16.

#### **d) Efeitos na resistência ao cisalhamento de misturas solo-cal**

Herrier et al. (2012) realizaram ensaios triaxiais não drenados com objetivo de obter a resistência ao cisalhamento e quantificar o melhoramento da estabilidade mecânica em taludes, após tratamento com cal. Foram utilizados solos siltosos. O solo não tratado, possuía os seguintes parâmetros: intercepto de coesão efetivo igual a 5,8 kPa e ângulo de atrito interno efetivo igual a 37,4°. Após a estabilização, o valor do ângulo de atrito interno se manteve estável com o tempo de cura. Entretanto, o intercepto de coesão aumentou significativamente. Ademais, depois de 2 anos o valor do intercepto coesivo foi 25 vezes maior.

#### **e) Efeitos na resistência à erosão e sensibilidade à água de misturas solo-cal**

Chevalier et al. (2012) avaliaram solos siltosos e argilosos, estabilizados com 2 e 5% de cal, perante processos erosivos e efeitos da água, em curas de 7 e 90 dias. Os ensaios realizados foram o de erodibilidade por infiltração (simulando erosão interna), erodibilidade por jato (jato de água perpendicular à superfície de solo, análogo à erosão superficial) e erodibilidade por imersão em água (quantificando o potencial de desintegração da amostra). Os resultados mostraram aumento

significativo em todos os aspectos de resistência à erosão nos solos tratados. O aumento de resistência foi mantido com o tempo (confirmado nos testes de cura de 90 dias). A resistência crítica de cisalhamento (medida por erodibilidade por infiltração) em ambos os solos tratados foi 4 vezes maior que o solo natural. A massa de superfície erodida (medida por erodibilidade à jato) foi 80 vezes menor. Ambos os solos estabilizados com cal se tornaram praticamente insensíveis à água.

#### **f) Efeitos na deformabilidade de misturas solo-cal**

Rocha et al. (2018) buscaram caracterizar o efeito da deformabilidade das misturas solo-cal através da avaliação do teor de cal e período de cura. Os autores realizaram ensaios de compressão não confinada em corpos de prova confeccionados na energia de compactação Proctor Normal para o solo natural e para misturas solo-cal nos teores de cal de 2, 4 e 6% em relação à massa de solo seco. Os autores verificaram que o aumento da quantidade de cal, para um mesmo período de cura, provocou aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico foi atingido.

Paiva et al. (2016) analisaram o efeito da interação da cal com um solo expansivo, quando adicionado cal nas proporções de 1 a 11% em relação à massa seca do solo. A adição de cal ao solo causou uma agregação ou floculação das partículas originais e a redução no índice de plasticidade. O percentual de 11% de cal hidratada reduziu a expansão livre e a tensão de expansão a valores nulos. Isto é atribuído à capacidade de cimentação do solo tratado com a cal que reduz a tendência de absorção de água das argilas saturadas com cálcio.

Silva (2016) estudou o comportamento de um solo laterítico e um solo não laterítico estabilizados com cal. Foi observado que adição de cal resultou em um decréscimo nos valores de deformação para os dois solos, embora as misturas de solo laterítico tenham apresentado maiores reduções em relação ao solo natural que as misturas com solo não laterítico.

#### **g) Efeitos no ISC de misturas solo-cal**

Lucena e Brugnara (1970) avaliaram o comportamento de um solo argilo-arenoso estabilizado com cal e observaram que as misturas solo-cal apresentaram,

para o teor de 4% de cal, o maior ISC. Os teores de cal maiores que 4% causaram uma queda contínua da resistência.

O ensaio CBR (California Bearing Ratio) ou ensaio ISC (Índice de Suporte Califórnia) consiste em um método para avaliar a resistência do solo à penetração de um cilindro padronizado com relação à penetração em uma brita padrão, ou seja, compara as propriedades mecânicas deste solo a uma brita padrão.

#### **h) Efeito do tempo de cura de misturas solo-cal**

Akoto (1986) observou que a resistência à compressão simples de amostras aos 7 dias foi 83% da resistência aos 28 dias.

Quanto ao tempo de cura, Silva (2016) identificou que um mínimo de 28 dias é adequado para observar alterações nos solos.

#### **3.1.4 Método de dosagem de misturas solo-cal**

A Norma n.º 419/2019 do DNIT especifica o método de ensaio para determinar o teor mínimo de cal para a estabilização físico-química de um solo. Ela baseia-se no método proposto por Eades e Grim que mensura o pH do solo com vários teores de cal, com o objetivo de atingir o pH de 12,4. Este método é uma estimativa que facilita a determinação do teor mínimo de cal para a realização dos ensaios mecânicos.

Após todas as reações químicas de superfície terem ocorrido, o pH tende a estacionar no valor de 12,4 - que é o valor do pH de uma solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Com pH igual a 10, a argila já começa reagir quimicamente devido a alcalinidade e uma vez que o valor do pH na saturação seja atingido, as reações pozolânicas entre o solo e a cal, se estabelecem em definitivo (DNIT, 2019).

Quando a mistura de solo-cal atinge um pH de 12,4, pode-se dizer que uma quantidade suficiente de cal foi adicionada para reagir com todo o solo. O procedimento de dosagem de cal através desse método de pH permite alcançar o maior benefício da estabilização do solo. Este método de dosagem é chamado de ponto de fixação da cal, de modo que se quantidades de cal acima desse ponto forem adicionadas, a estabilização por meio de reações pozolânicas cessam (TEIXEIRA, 2019).

Ingles e Metcalf (1972), apresentam um indicativo da quantidade de cal a ser adicionada para a estabilização, de acordo com o tipo de solo.

**Tabela 3.2** - Teor de cal indicado para cada tipo de solo.

<b>Tipo de solo</b>	<b>Teor de cal para modificação (%)</b>	<b>Teor de cal para estabilização (%)</b>
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥ 3
Areia	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argila	1 a 3	3 a 8
Solo orgânico	Não recomendado	Não recomendado

Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972).

### **3.2 SOLO COM ADIÇÃO DE TIRAS POLIMÉRICAS**

Solo reforçado é 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 resistência, deformabilidade, compressibilidade, porosidade etc., além de criar um material cujas propriedades divergem das propriedades dos materiais que lhe deram origem (SIVELIRA, 2019).

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 (CASAGRANDE, 2005).

Em geral, as fibras ou tiras podem ser classificadas em naturais, minerais, metálicas ou poliméricas. Para a escolha dos materiais 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.

Diversos trabalhos abordam a utilização de tiras poliméricas para a melhoria de pavimentos, solos de fundação, solos de reaterro de estruturas de contenção e estabilização de solos, evidenciando situações em que o solo reforçado se mostra extremamente competitivo com outras soluções tradicionais. Entre os campos de aplicação que se mostram promissores para as misturas de solos com tiras está o seu emprego como reforço de terraplenos de estradas e em camadas estruturais de estradas não pavimentadas (SIVELIRA, 2019).

A inclusão de tiras oriundas de materiais reciclados é uma técnica efetiva e econômica para aumentar a resistência dos solos arenosos e argilosos. Estudos mostraram que diversas variáveis influenciam no comportamento mecânico do compósito solo-tiras, tais como o tipo de solo e o teor, o comprimento e a orientação das tiras (MARÇAL, 2019).

### **3.2.1 Tiras poliméricas**

Devido às suas características, facilidade de aquisição dos polímeros e grande diversidade, as tiras poliméricas apresentam grande potencial de utilização no reforço de solos. Considerando o elevado tempo de degradação dos plásticos, o uso destas tiras evidencia-se relativamente seguro, em função da vida útil das obras geotécnicas.

Os principais polímeros utilizados em reforço de solos são o polipropileno (PP), polietileno (PE), poliéster ou polietileno tereftalato (PET) e poliamida (PA).

#### **a) Tiras de polipropileno (PP)**

As tiras de polipropileno são constituídas de material termoplástico, isto significa que elas adquirem consistência plástica com o aumento da temperatura. Em função de sua constituição molecular essas tiras possuem alta tenacidade e flexibilidade. Seu módulo de elasticidade é considerado baixo e gira em torno de 8 GPa e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Possuem alta resistência a ataques de várias substâncias químicas e aos álcalis. Quando adicionadas a um material, lhe conferem um aumento na resistência e na durabilidade. (TAYLOR, 1994; CASAGRANDE, 2001).

**b) Tiras de polietileno (PE)**

As tiras de polietileno possuem alta durabilidade e são resistentes aos álcalis, o que favorece sua aplicação em obras permanentes. No entanto, seu módulo de elasticidade é baixo e apresentam maiores deformações de fluência, sendo contraindicadas para suportar altas tensões permanente em um compósito fissurado, pois podem ocorrer consideráveis deflexões ao longo do tempo. Quando adicionadas a uma matriz cimentada apresentam problemas de adesão. Com o objetivo de resolver o problema de adesão à matriz cimentada e o baixo módulo de elasticidade desenvolveu-se o polietileno de alta densidade (HANNANT, 1994).

**c) Tiras de poliéster ou polietileno tereftalato (PET)**

As tiras de poliéster, também chamadas de polietileno tereftalato (PET), apresentam alta rigidez e resistência, além de elevada densidade, conferindo estas características aos materiais a que forem adicionadas. Possuem propriedades muito similares às tiras de polipropileno e costumam ser usadas para aplicações semelhantes (CASAGRANDE, 2001).

**d) Tiras de poliamida**

As tiras de poliamida são formadas por polímeros de longas cadeias de moléculas, configurando baixa resistência e rigidez, pois suas moléculas são espiraladas e dobradas. Entretanto, as tiras de poliamida aromática, conhecidas comercialmente como Kevlar, apresentam altos índices de rigidez e resistência. Isso ocorre porque durante o processo de manufatura, estas moléculas foram espichadas e reforçadas. O Kevlar pode ser dividido em 2 tipos, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3000 MPa e o módulo de elasticidade é cerca de 64 GPa, e o Kevlar 49, com a mesma resistência do Kevlar 29, mas seu módulo de elasticidade é da ordem de 300 GPa (CASAGRANDE, 2001).

### **3.2.2 Mecanismos de interação entre solo e tiras poliméricas**

#### **a) Ensaio de compactação**

O início da influência das tiras sobre o solo se dá no momento da compactação da mistura, em que a adição de tiras aumenta o índice de vazios da matriz, resultando em aumento da porosidade. Este aumento se dá de forma linear em relação à quantidade de tiras adicionadas (FEUERHARMEL, 2000).

Al Wahab e Al Qurna (1995) avaliaram os efeitos da adição de tiras nas quantidades de 0,5, 1 e 2% em relação à massa seca do solo, nas curvas de compactação de uma argila. As tiras foram responsáveis por um decréscimo de 4% da densidade máxima e, para adições de 2% de tiras, obteve-se um pequeno acréscimo na umidade ótima.

Bueno et al. (1996) analisaram a influência da adição de tiras em solos arenosos e argilosos. No caso dos solos arenosos, com a inclusão de 2% de tiras, verificou-se um pequeno acréscimo na umidade ótima e não foram verificadas mudanças na densidade máxima. No caso dos solos argilosos, não se observou alteração na umidade ótima nem na densidade máxima.

Maher e Ho (1994) e Nataraj, Addula e McManis (1996) avaliaram a influência da adição de tiras em solos argilosos e Consoli et al. (1999) avaliaram a influência da adição de tiras em solos granulares. Não encontraram nenhuma alteração significativa para a umidade ótima nem para a densidade máxima com a inclusão de tiras.

#### **b) Resistência ao cisalhamento**

Nataraj, Addula e McManis (1996) avaliaram, por meio de ensaios de cisalhamento direto, solos argilosos misturados com tiras, onde tal adição ocasionou um aumento do ângulo de atrito do material.

Teodoro (1999) pesquisou o comportamento de uma areia siltosa enquanto aumentava o comprimento das tiras de polipropileno, obtendo aumento de resistência com o aumento do comprimento das tiras.

Casagrande (2001) estudou o comportamento de um solo residual areno-siltoso com inclusão de tiras de polipropileno em percentuais de 0,25, 0,5 e 0,75%. A adição

de tiras provocou grande aumento na coesão do material, mantendo seu ângulo de atrito praticamente inalterado. O aumento de teor de tiras no solo aumentou sua resistência.

Feurharmel (2000) avaliou a inclusão de 0,5% de tiras 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 tiras de polipropileno aos solos não cimentados se mostraram mais expressivos para os solos mais granulares. Em relação aos solos cimentados, o aumento do comprimento das tiras causou uma diminuição da resistência de pico.

Além da resistência pós-pico, outra característica do solo reforçado com tiras é, no caso de solos argilosos, a coesão que, conforme estudado por diversos autores sofre um acréscimo (BUENO et al., 1996; NATARAJ, ADDULA e MCMANIS, 1996; TEODORO, 1999; HEINECK, 2002). Teodoro (1999) e Heineck (2002) avaliaram em ensaios triaxiais que também ocorre um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este crescente com o aumento da quantidade de tiras.

Shukla (2017) explica que 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 cal ou cimento e tamanho das partículas. Como resultado de aplicação de uma carga em um solo reforçado com tiras poliméricas, as partículas de solo presentes na interface solo-tira podem rotacionar, de modo que as tiras 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-tiras é restrita devido ao aumento da força de ligação oriunda do processo de cimentação, apresentando maior eficiência.

Com relação à resistência ao cisalhamento dos compósitos solo-tiras, Shukla (2017) afirma que tiras com baixo módulo de elasticidade (naturais ou sintéticas) não se rompem durante os ensaios de cisalhamento direto, sendo sua principal função aumentar o pico de resistência e limitar a magnitude da redução de resistência pós-pico. As tiras tendem a apresentar efeitos maiores sobre os parâmetros de coesão dos solos arenoso, com pequenas influências sobre o ângulo de atrito da matriz.

Em se tratando de solos arenosos, a inclusão de tiras faz surgir um intercepto de coesão bem como um aumento do ângulo de atrito (VENDRUSCOLO, 2003).

Botero et al. (2015) realizaram ensaios laboratoriais triaxiais em amostras de solo com teores de tiras de 0,1, 0,3, 0,6 e 1% em relação à massa seca do solo. Os resultados dos ensaios indicaram um incremento de resistência ao cisalhamento associado com as quantidades crescentes de tiras de PET.

Os estudos de Botero et al. (2015) apontaram também que a presença de tiras influenciou no ângulo de atrito interno e na coesão do solo reforçado. Solos com maior teor de tiras apresentaram menor ângulo de atrito e maior coesão. As mudanças no ângulo de atrito podem ser atribuídas a uma redução no número de pontos de contato entre as partículas do solo devido à presença de tiras.

Estudos baseados em dados de laboratório destacaram a influência de tiras de PET nas propriedades de resistência, ângulo de atrito e coesão de solos arenosos. Além disso, simulações numéricas realizadas com softwares específicos de modelagem de taludes revelaram que o uso de tiras poliméricas no solo arenoso aumentou o fator de segurança e melhorou a estabilidade devido à alta resistência à tração das tiras poliméricas (SALIMI e GHAZAVI, 2019).

Testes laboratoriais realizados por Salimi e Ghazavi (2019) mostraram que tiras poliméricas aumentaram o intertravamento entre os grãos, encurtando o comprimento da fissura e reduzindo a deformação lateral, além de melhorar drasticamente o ângulo de atrito e a coesão de solos arenosos.

Silveira et al. (2020) avaliaram o efeito de tiras de polietileno tereftalato (PET) nas propriedades mecânicas de um solo arenoso laterítico tratado com cimento. Os autores adicionaram teores de cimento de 2, 4, 6, 8 e 10% ao solo e tiras de comprimentos e teores variados. As tiras foram cortadas com 1,5 mm de largura por 10, 15, 20 e 30 mm de comprimento. Os percentuais de tiras adicionados ao compósito solo-cimento foram 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,5 e 2%. A adição de tiras ao compósito solo-cimento apresentou aumento no parâmetro de coesão do solo, muitas vezes apresentando uma diminuição no ângulo de atrito.

Marçal et al. (2020) avaliaram as propriedades de resistência de solos reforçados com tiras de polipropileno (PP) cortadas de embalagens plásticas recicladas com o objetivo de promover sustentabilidade através do uso de materiais locais para trabalhos de engenharia e reutilização de resíduos como reforços de baixo custo. As tiras foram cortadas com 1,5 mm de largura e 0,5 mm de espessura com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e foram adicionadas ao solo em diferentes porcentagens em relação ao peso de solo seco de 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,5 e 2%. Os

resultados dos testes de cisalhamento direto indicaram que o solo arenoso apresentou aumento em ambos, coesão e ângulo de atrito, enquanto o solo argiloso apresentou maior ângulo de atrito e nenhuma alteração aparente na coesão.

Em relação aos parâmetros de resistência obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto, Marçal (2019) notou aumentos de 126,49% na coesão e 14,01% no ângulo de atrito para o solo arenoso após a adição de tiras. O solo argiloso apresentou um pequeno decréscimo no valor da coesão, 17,90%. O solo arenoso teve um aumento de cerca de 117% no valor do CBR, ao passo que o solo argiloso sofreu ligeira redução no valor deste parâmetro.

Silveira et al. (2021) investigaram o efeito de tiras de polipropileno recicladas, adicionadas aleatoriamente em uma matriz arenosa e uma matriz argilosa em percentuais de 0,1 e 0,25% em relação ao peso seco do solo. O autor percebeu que: 1) A inclusão de tiras de PP melhorou a resistência ao cisalhamento dos compósitos em ambos os solos, enquanto a rigidez inicial dos solos praticamente não foi afetada; 2) A contribuição das tiras para o aumento da resistência do solo foi superior no solo argiloso e para o maior teor (0,25%), observado por um aumento substancial no ângulo de atrito; 3) A variação volumétrica no solo argiloso foi alterada pela presença de tiras, que limitaram consideravelmente a tendência à contração. Para o solo arenoso, notou-se uma tendência de queda na variação de volume para maiores tensões normais; e 4) A influência na curva tensão-deformação foi superior para o maior teor de tiras no solo arenoso. No solo argiloso, as fases pré-pico e pós-pico de cisalhamento apresentaram comportamentos diferentes ao comparar amostras naturais e reforçadas com tiras. Em geral os resultados indicaram que a curva tensão-deformação é afetada por inclusões em a mistura do solo.

### **c) Resistência à compressão e à tração**

Maher e Ho (1994) realizaram ensaios de compressão não confinada e diametral em solos argilosos com adição de tiras poliméricas. Os resultados obtidos indicaram um aumento do pico da resistência à compressão e à tração, além de aumento da ductibilidade do material.

Teodoro (1999) através da realização de ensaios de compressão uniaxial observou um aumento da resistência de uma areia siltosa reforçada com tiras de polipropileno com o aumento do comprimento das tiras, 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.

Marçal (2019) realizou ensaios de compressão não confinada, onde seus resultados revelaram uma combinação ideal de conteúdo e comprimento de tiras: solo arenoso com e 2% de tiras de PP e 30 mm de comprimento e solo argiloso com 1,5% de tiras de PP e 30 mm de comprimento. Nesse sentido, notaram-se aumentos de 52,27% e 48,12%, respectivamente, para os solos arenoso e argiloso nos valores de resistência à compressão uniaxial em relação ao solo sem a adição de tiras.

#### **d) Modo de ruptura**

Shukla (2017) explica que o maior potencial do uso das tiras no compósito fibroso está no estado pós-fissuração, onde as tiras 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 tiras, propriedades da matriz e pela aderência entre as duas fases.

Casagrande (2001) também menciona que o material compósito será influenciado pelo teor de tiras 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. As propriedades do material compósito, tais qual a resistência, deformação e padrões de ruptura dependem da aderência entre a tira e a matriz. A dimensão das fissuras, assim como sua distribuição, melhora com uma maior aderência. Assumindo que haja aderência entre a tira e a matriz, uma maior resistência da tira resulta em um compósito mais dúctil e quanto maior o comprimento da tira, menor a possibilidade de arrancamento, devido à melhor distribuição das tensões.

Botero et al. (2015) relataram que em todos os ensaios de compressão triaxial com solos não reforçados foi observada uma ruptura frágil. Já os solos reforçados com tiras poliméricas apresentaram um comportamento dúctil. Além disso, os ensaios laboratoriais indicaram que o solo reforçado teve maior capacidade de deformação. Esse comportamento melhora a resistência à fissuração do solo.

Silveira et al. (2020) chegaram a resultados semelhantes, onde a inclusão de tiras também proporcionou um comportamento mais dúctil ao solo, apresentando maiores deformações com menores tensões de picos.

Marçal et al. (2020) em sua pesquisa, baseada no uso de tiras de PP como reforço em de dois solos lateríticos, classificados como areia argilosa e argila, concluíram que a adição de tiras aos solos levou a um aumento da resistência à compressão não confinada, bem como uma clara influência do comprimento das tiras de PP na rigidez do compósito. O uso de tiras de PP contribuiu para a mudança na ruptura do solo de um modo frágil para dúctil.

### **3.3 SOLO REFORÇADO COM CAL E TIRAS POLIMÉRICAS**

Bento (2006) adicionou tiras de PET em solo arenoso nos comprimentos de 0,5 e 1,0 cm e nos percentuais de 0,25, 0,5 e 1%. Melhorias foram encontradas na perda de massa por imersão, onde a tira atuou inibindo a expansão. Para a compressão simples, conferiu comportamento mais dúctil, fornecendo maior tenacidade à mistura. Nos ensaios de capacidade suporte, destacou-se a influência da cal, sendo que as tiras pouco contribuíram nesse aspecto. Em relação à resistência à tração, a mistura solo-cal não apresentou ganhos significativos em relação ao solo natural, e a incorporação das tiras tendeu a piorar o comportamento do solo. Porém, com relação à resistência a deformações, observou-se que as tiras apresentaram melhores resultados se comparado ao solo natural.

Silva (2007) estudou o reforço de solos siltosos com tiras e aditivos orgânicos e químicos. O reforço foi realizado com tiras de PET, dois tipos de tiras de polipropileno (Polycrét MF e Concrefil), sisal, raspas de pneu e nove aditivos classificados em duas categorias: orgânicos (EMC<sup>2</sup>, Terrazyme) e químicos (Dynacal, DS-328, Homy Solo, Ecolopavi, cal, cimento e o Lignosulfonato VIXIL I). As misturas obedeceram a um período de cura de 30 dias. Foram realizados ensaios de compressão simples e cisalhamento direto. Os resultados mostraram que as tiras de PET e de polipropileno fino proporcionaram melhores rendimentos no que diz respeito à resistência em relação ao solo puro. Sobre os aditivos, houve uma grande variação de resultados de acordo com a dosagem adotada, mas, de um modo geral a cal (2 e

4%) e o DS-328 (0,17%) apresentaram os melhores desempenhos no que se refere à resistência proporcionada ao solo em questão.

Silva (2007) observou, ainda, que nas envoltórias de resistência do solo reforçado com tiras, houve redução do parâmetro coesivo e aumento do ângulo de atrito. No caso dos aditivos químicos, observou-se o efeito oposto ao ocorrido no solo com adição de tiras, que implicou no aumento da coesão e redução do ângulo de atrito dos solos tratados.

Quariguasi et al. (2017) estudaram a utilização de tiras de polipropileno e cal em solo argiloso, para aplicação em pavimentos rodoviários. Foram utilizados dois teores de tiras, 1 e 2%, e analisada sua influência quando adicionado 1% de cal à mistura. Os principais resultados mostram que, a depender dos percentuais de cal e tiras adicionados ao solo, há um aumento significativo no ISC se comparado ao solo *in natura*. No entanto, ao se comparar o ISC do solo-tiras com a mistura solo-cal-tiras percebe-se que o ISC tanto pode aumentar quanto diminuir, dependendo das porcentagens usadas. O autor relatou que a mistura solo-cal-tiras com maior teor de tiras apresentou um aumento considerável na capacidade de suporte.

Diante de seus resultados, Quariguasi et al. (2017) concluíram que a combinação de tiras e cal pode ser adicionada ao solo quando o objetivo desejado for a diminuição da expansão volumétrica e o aumento da capacidade de suporte.

Quariguasi et al. (2018) avaliaram a utilização de tiras de polipropileno, cal hidratada e cimento Portland, misturados a um solo de caráter areno-argiloso, em obras rodoviárias. Foram realizados ensaios de compactação e ISC. As misturas analisadas trouxeram benefícios ao solo estudado, principalmente quanto ao aumento da capacidade de suporte proporcionado pelo cimento Portland e pelas tiras. Contudo, apesar da cal hidratada e as tiras não melhorarem a resistência tanto quanto as misturas com cimento, elas propiciaram uma resistência superior ao solo *in natura*, assim como, também, estabilizaram a expansão volumétrica.

Os resultados de Quariguasi et al. (2018) apresentaram a seguinte ordem de melhores resultados quanto à resistência: solo-cimento-tiras (2% de cimento e 1% de tiras), solo-cimento-tiras (2% de cimento e 0,5% de tiras), solo-cimento (2% de cimento), solo-cal-tiras (1% de cal e 2% de tiras), solo-tiras (2% de tiras), solo-tiras (1% de tiras), solo-cal-tiras (1% de cal e 1% de tiras) e solo *in natura*.

### **3.4 MEIO AMBIENTE E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA ONU**

O mundo está produzindo uma quantidade recorde de resíduos plásticos descartáveis. No entanto, a reciclagem não está aumentando rápido o suficiente para lidar com a quantidade de plástico produzida, o que significa que os produtos usados têm mais probabilidade de serem despejados em aterros, praias, rios e oceanos do que irem para reciclagem.

O PET é utilizado na produção de garrafas plásticas usadas no armazenamento de refrigerantes, água e óleos. No 12º Censo de Reciclagem do PET no Brasil, realizado em 2022 e publicado pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), apenas 56% do total produzido é reciclado.

Além disso, a relação volume/peso do PET é maior do que a maioria dos resíduos sólidos em aterros sanitários, o que resulta em um aumento da taxa de preenchimento e gera a necessidade de construção de mais aterros sanitários. Além disso, a falta de disponibilidade de espaço para aterros sanitários já é um problema (BOTERO et al., 2015).

Devido ao baixo custo de produção, grande disponibilidade e às propriedades que podem conferir a um determinado compósito, este material apresenta grande potencial de utilização nas obras de construção civil, como reforço de solos, podendo se tornar uma alternativa promissora no que tange à questão econômica e geoambiental.

O solo reforçado com polímeros apresenta propriedades mecânicas interessantes e pode ser utilizado em estruturas que requerem alta capacidade de deformação, como aterros sanitários, depósitos de tratamento de esgoto, barragens etc., para evitar falhas por trincas e evitar possível vazamento de contaminantes ou água (BOTERO et al., 2015).

O reaproveitamento de determinados resíduos sólidos inorgânicos em obras civis está ganhando popularidade por melhorar mutuamente o meio ambiente, reduzindo os resíduos e desenvolvendo novos materiais geotécnicos com melhores comportamentos mecânicos (BOTERO et al., 2015).

Estudos recentes reforçam a influência dos polímeros como um produto eficaz para a estabilização de taludes. Salimi e Ghazavi (2019) realizaram análise numérica

por meio de software específico para avaliar a estabilidade de talude com geoestruturas, onde foi revelado que as tiras de PET no solo arenoso aumentaram o fator de segurança do talude devido à alta resistência à tração dos polímeros, melhorando assim, sua estabilidade. Esses resultados são potencialmente benéficos para os engenheiros geotécnicos, visto que utilização de tiras de PET para reforço de taludes é um método eficaz para reduzir os resíduos plásticos e promover o desenvolvimento sustentável.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade.

A ONU e seus parceiros no Brasil estão trabalhando para atingir os ODS. São 17 objetivos interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo, que estão apresentados na Figura 3.1.

Dentro desse contexto, este estudo vem apresentar uma alternativa de descarte adequado de resíduos plásticos. A pesquisa se baseia na utilização responsável de resíduos plásticos, sem, no entanto, comprometer a resistência da matriz arenosa.

O êxito desta pesquisa pode colaborar na obtenção de 5 objetivos: indústria, inovação e infraestrutura (09), cidades e comunidades sustentáveis (11), consumo e produção responsáveis (12), vida na água (14) e vida terrestre (15).

**Figura 3.1 - Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.**



Fonte: Site oficial das Nações Unidas Brasil (2023).

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

### 4.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado solo arenoso típico da região de Bauru (SP), cal hidratada e tiras de polietileno tereftalato (PET).

#### 4.1.1 Solo

O solo foi retirado de uma jazida, localizada no terreno de propriedade da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), sito à Avenida Engenheiro Luís Edmundo Carrijo Coube, n.º 14-01, Vargem Limpa, cidade de Bauru, Estado de São Paulo. A profundidade de escavação para a retirada do solo variou de 0,30 a 2,00 m.

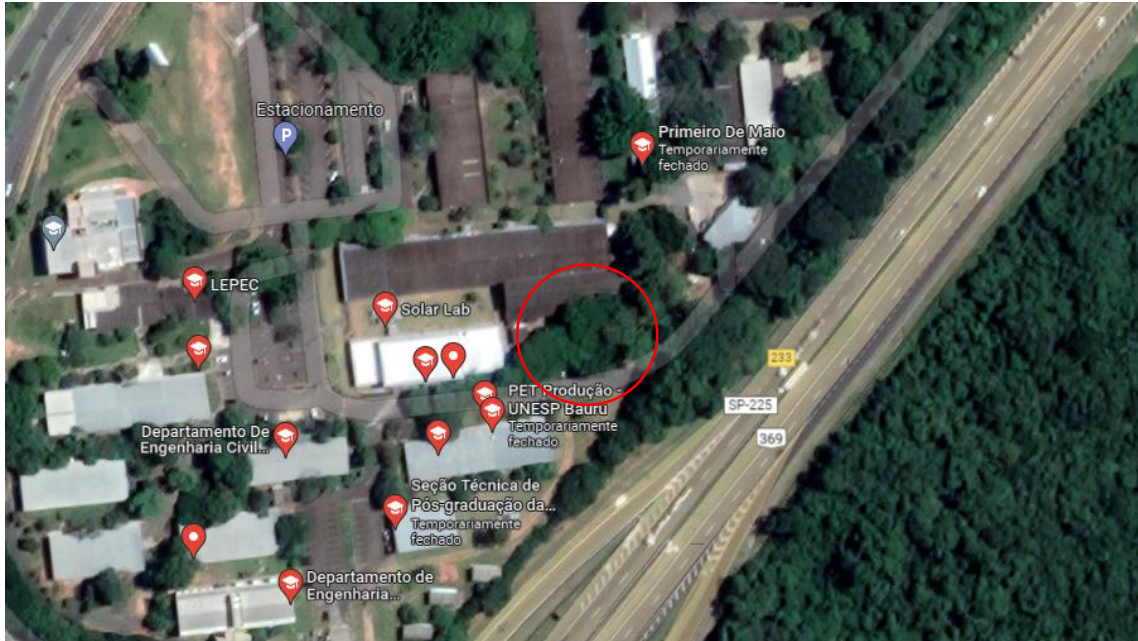
Um grupo de pesquisadores do Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) já havia realizado, previamente, os ensaios de caracterização do solo. Fagundes (2014) classificou o solo, quanto à sua textura, como uma areia média a fina pouco argilosa marrom avermelhada, de acordo com a classificação adotada pela ABNT NBR 6502 (ABNT, 2022).

A Figura 4.1 apresenta o local de extração do solo utilizado nos ensaios.

A Figura 4.2 ilustra as curvas granulométricas obtidas por Fagundes (2014) 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

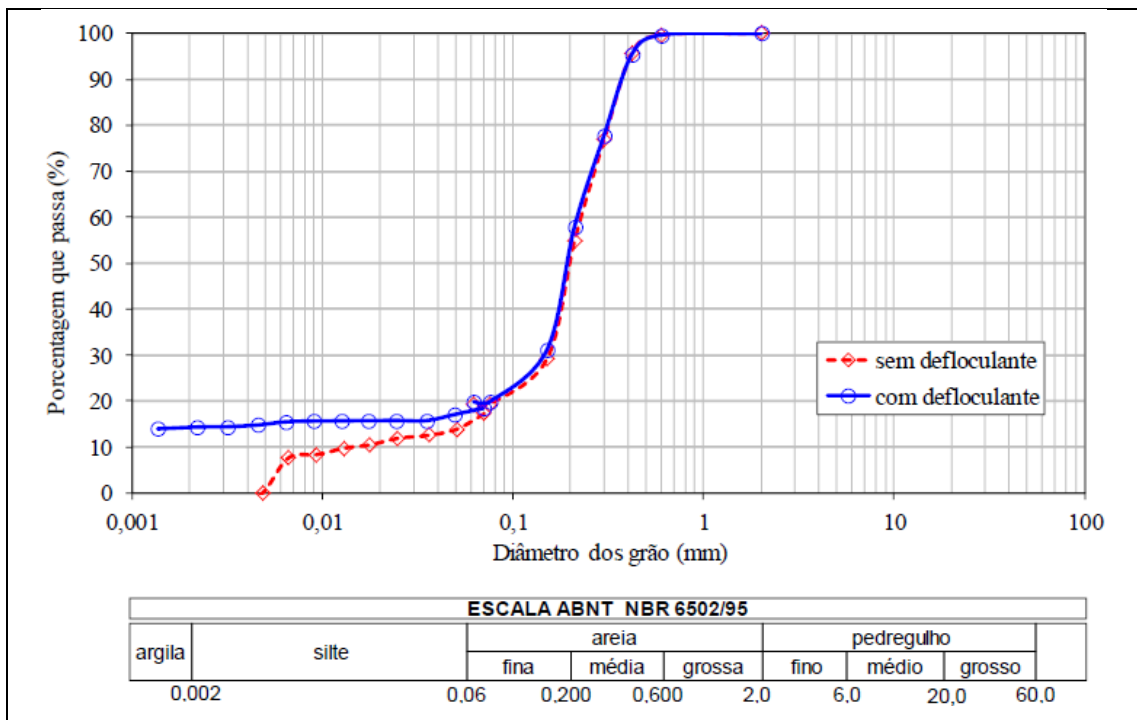
Proctor Normal, realizado por Fagundes (2014). As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram alguns dados obtidos pelo autor em seus ensaios para caracterização deste solo.

**Figura 4.1** - Imagem via satélite da jazida de extração do solo arenoso utilizado em todos os ensaios. Coordenadas 22°21'6.03"S; 49°01'57.68"O.



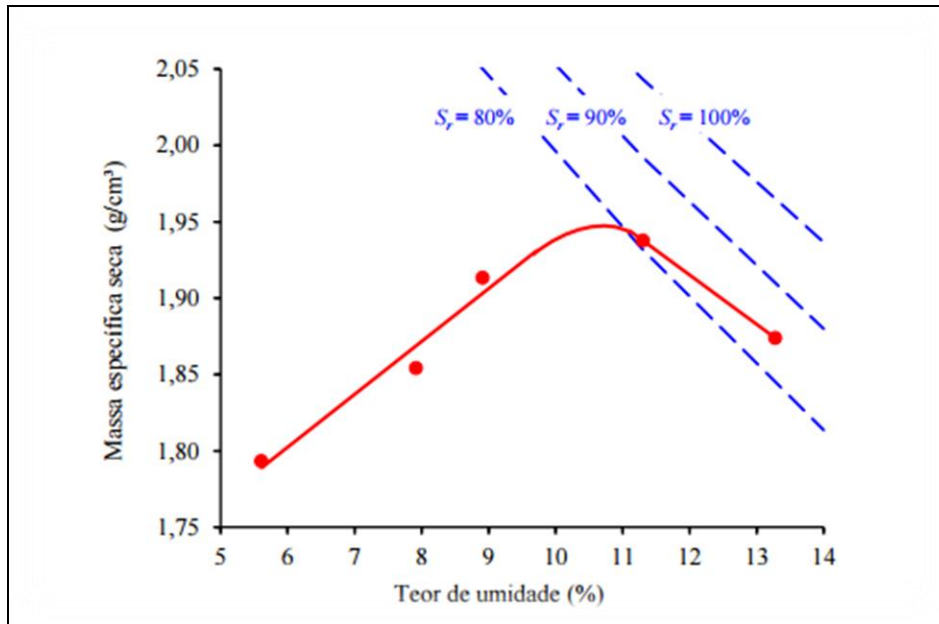
Fonte: Google Maps (Acesso: 29 jun. 2022).

**Figura 4.2** - Curvas granulométricas obtidas em ensaios com e sem o uso de defloculantes, referente ao solo de Bauru.



Fonte: Fagundes (2014).

**Figura 4.3** - Curva de compactação na energia Proctor Normal, referente ao solo de Bauru.



Fonte: Fagundes (2014).

**Tabela 4.1** - Caracterização e compactação do solo de Bauru.

Escala ABNT (NBR 6502)	Unidade	Composição (%)
Areia grossa	%	0,3
Areia média	%	41,7
Areia fina	%	38,2
Silte	%	5,8
Argila	%	14,0
Limite de liquidez	%	16,0
Limite de plasticidade	%	Não plástico
Massa específica seca máxima, $\rho_{dmax}$	g/cm <sup>3</sup>	1,950
Teor de umidade ótimo, $w_{ot}$	%	10,6

Fonte: Adaptado de Fagundes (2014).

**Tabela 4.2** - Índices físicos das amostras do solo de Bauru.

	Unidade	Indeformado (Coletado a 1,5 m de profundidade)	Compactado (GC=95% e $\Delta w=-3\%$ )
Massa específica, $\rho$	g/cm <sup>3</sup>	1,590	1,994
Massa específica seca, $\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	1,507	1,853
Teor de umidade, $w$	%	5,5	7,6
Índice de vazios, $e$	-	0,757	0,430
Porosidade, $n$	%	43,1	30,0
Grau de saturação, $S_r$	%	19,3	46,9
Massa específica dos sólidos, $\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2,649	2,649

Fonte: Adaptado de Fagundes (2014).

#### 4.1.2 Cal hidratada

A cal utilizada foi do tipo cal hidratada dolomítica, classe CH-III, da marca Itaú. Esta foi adicionada ao solo em percentuais pré-determinados, conforme orientações da ABNT NBR 7175 (ABNT, 2003).

#### 4.1.3 Tiras de polietileno tereftalato

As tiras de polietileno tereftalato foram oriundas de garrafas PET. A caracterização das tiras sintéticas foi realizada por meio de ensaios de tração e de densidade, conforme as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2008; ASTM, 2020). Tal caracterização foi realizada no laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da Universidade Federal de São Carlos (Ufscar) em São Carlos, Estado de São Paulo.

As Tabelas 4.3 e 4.4 exibem as propriedades típicas do PET e a resistência deste polímero a determinados agentes agressivos.

**Tabela 4.3** - Propriedades típicas do PET.

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

Fonte: Adaptado de Shukla (2017).

**Tabela 4.4** - Resistência do PET a determinados agentes agressivos.

Fatores de influência	Resistência do polímero
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
Microrganismos	Alta
Deformação	Alta

Fonte: Adaptado de Shukla (2017).

## 4.2 MÉTODO

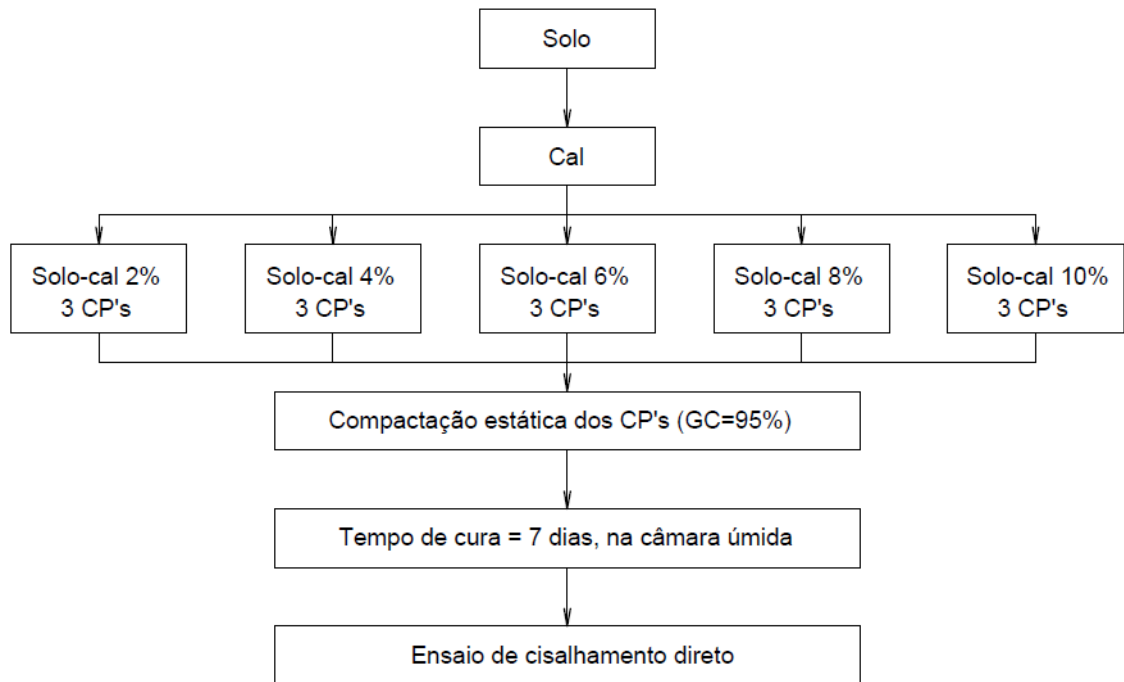
Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: determinação da umidade (DNER, 1994), granulometria (ABNT, 2018), massa específica dos sólidos (ABNT, 2017a), limite de liquidez (ABNT, 2017b), limite de plasticidade (ABNT, 2016) e ensaio de compactação tipo Proctor Normal (ABNT, 2020). Foram realizados ainda ensaios de Proctor Normal para o compósito solo-cal. A cal foi adicionada ao solo em porcentagens de 2 e 10% em relação à massa específica seca do solo. Os resultados obtidos mostraram que a inserção de cal pouco interferiu nos parâmetros ótimos do solo.

Dessa forma, partindo de tais resultados preliminares, os ensaios de cisalhamento direto drenado foram realizados utilizando os parâmetros ótimos do solo natural e grau de compactação (GC) de 95%. Para tanto, utilizou-se as especificações da norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2011) para determinação dos parâmetros de resistência mecânica (coesão e ângulo de atrito). Todos os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com cargas normais de 1, 2 e 4 kg.

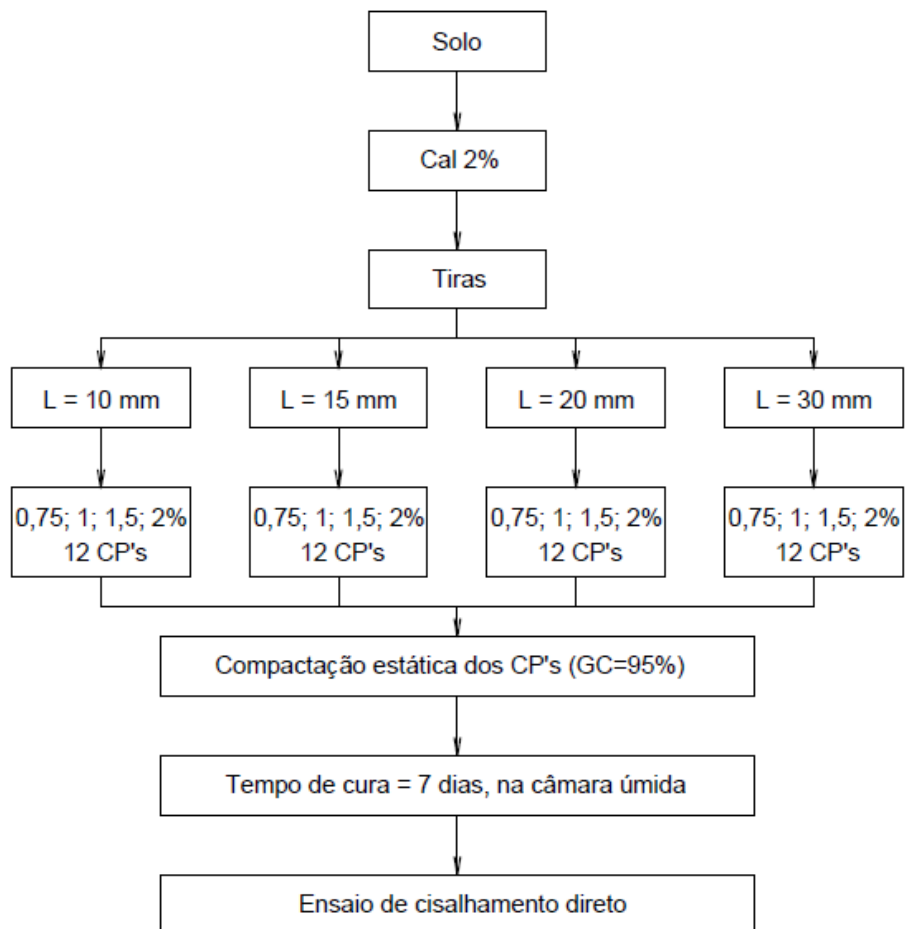
A pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu em adicionar cal ao solo nas porcentagens de 2, 4, 6, 8 e 10% em relação à massa seca do solo, gerando 5 envoltórias de ruptura. Os ensaios utilizaram 3 tensões normais padronizadas, na umidade ótima e GC igual a 95%, resultando em 15 ensaios de cisalhamento direto. A Figura 4.4 apresenta um fluxograma dos ensaios realizados na primeira etapa.

A segunda etapa consistiu em fixar o teor de cal em 2 e 4% e adicionar as tiras com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e percentuais de 0,75, 1, 1,5 e 2% em relação à massa seca do solo, gerando 16 envoltórias de ruptura para cada percentual de cal. Os ensaios também utilizaram 3 tensões normais padronizadas, umidade ótima e GC de 95%, resultando em 48 ensaios de cisalhamento direto para cada teor de cal avaliado. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os fluxogramas dos ensaios realizados na segunda etapa.

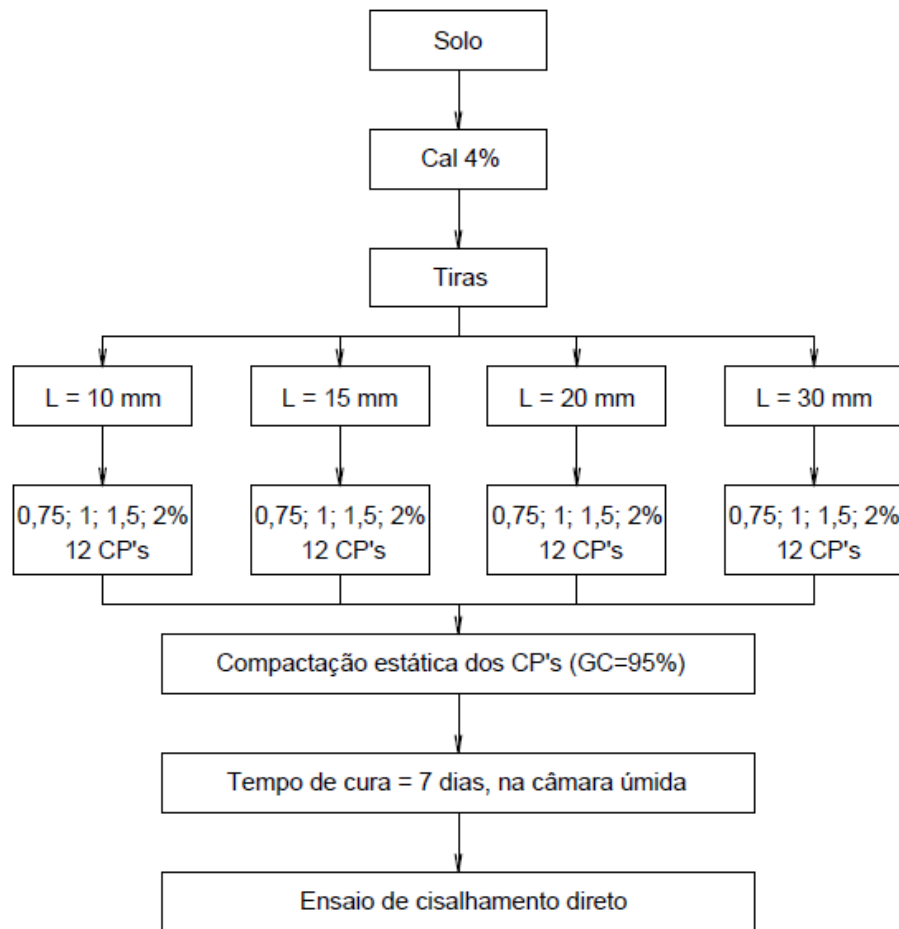
**Figura 4.4** - Fluxograma de ensaios realizados na primeira etapa.



**Figura 4.5** - Fluxograma de ensaios realizados na segunda etapa, para solo-cal-tiras com 2% de cal.



**Figura 4.6** - Fluxograma de ensaios realizados na segunda etapa, para solo-cal-tiras com 4% de cal.



No total foram moldados 111 corpos de prova. Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados na câmara úmida do Laboratório de Mecânica dos Solos da FEB até completar o período de cura do material compósito de 7 dias. A Tabela 4.5 apresenta uma síntese dos ensaios prévios e dos ensaios abrangidos na pesquisa.

Tabela 4.5 - Síntese dos ensaios.

Material	Tipo	Porcentagem em peso (%)	L (mm)	Ensaio	Especificação	Principais análises
Solo	Arenoso	-	-	Solo - Determinação do teor de umidade	DNER-ME 213 (1994)	Obtenção da umidade do solo
				Solo - Análise granulométrica	ABNT NBR 7181 (2018)	Obtenção da curva granulométrica
				Massa específica dos sólidos	ABNT NBR 6458 (2017)	Obtenção da massa específica dos sólidos
				Solo - Determinação do limite de liquidez	ABNT NBR 6459 (2017)	Obtenção do limite de liquidez do solo
				Solo - Determinação do limite de plasticidade	ABNT NBR 7180 (2016)	Obtenção do limite de plasticidade do solo
				Solo - Ensaio de compactação (Proctor Normal)	ABNT NBR 7182 (2020)	Obtenção dos parâmetros ótimos de compactação (massa específica seca máxima e umidade ótima)
				Cisalhamento Direto	ASTM D3080 (2011)	Avaliação das curvas tensão x deslocamento e obtenção dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito)
Tiras	PET	0,75; 1; 1,5 e 2	10; 15; 20 e 30	Densidade	ASTM D792 (2020)	Determinação da densidade
				Tração	ASTM D3039 (2008)	Determinação da resistência à tração, módulo de elasticidade e deformabilidade
Cal	Hidratada	2; 4; 6; 8 e 10	-	Cal hidratada para argamassas	ABNT NBR 7175 (2003)	Especificação dos requisitos exigíveis no recebimento da cal hidratada
Solo-cal	-	2 e 10	-	Solo - Ensaio de compactação (Proctor Normal)	ABNT NBR 7182 (2020)	Obtenção dos parâmetros ótimos de compactação (massa específica seca máxima e umidade ótima)
Solo-cal	-	2; 4; 6; 8 e 10	-	Cisalhamento Direto	ASTM D3080 (2011)	Avaliação das curvas tensão x deslocamento e obtenção dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito)
Solo-cal-tiras	-	Cal = 2 e 4	-	Cisalhamento Direto	ASTM D3080 (2011)	Avaliação das curvas tensão x deslocamento e obtenção dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito)
		Tiras = 0,75; 1; 1,5 e 2	10; 15; 20 e 30			

Os ensaios permitiram a análise das características de resistência do solo sem cal e sem tiras e os efeitos que essas adições causaram em termos de ganho de resistência (coesão e ângulo de atrito), deformabilidade e no comportamento da curva tensão-deslocamento do compósito.

Dessa forma, foi possível analisar o efeito da adição da cal ao solo bem como o efeito da adição das tiras ao compósito solo-cal. Além disso, os ensaios de cisalhamento direto forneceram os valores ótimos de teor de cal e comprimento e teor de tiras.

O estudo permitiu ainda realizar uma comparação das envoltórias de resistência e das curvas tensão-deslocamento levando-se em consideração o solo, o solo-cal e o solo-cal-tira.

A Figura 4.7 mostra a sequência de procedimentos para moldagem do corpo de prova e realização do ensaio de cisalhamento direto.

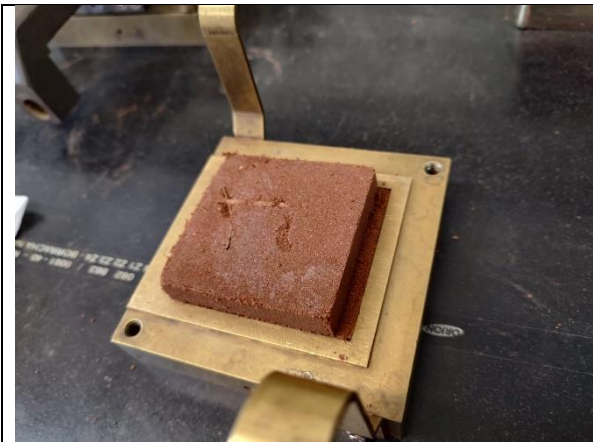
**Figura 4.7** - Sequência de procedimentos para moldagem e ruptura dos corpos de prova.



**Figura 4.7 - Sequência de procedimentos para moldagem e ruptura dos corpos de prova (continuação).**



**Figura 4.7** - Sequência de procedimentos para moldagem e ruptura dos corpos de prova (continuação).



k) Corpo de prova cisalhado dentro da caixa de cisalhamento.



l) Corpo de prova cisalhado.



m) Corpo de prova cisalhado.



n) Corpo de prova cisalhado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

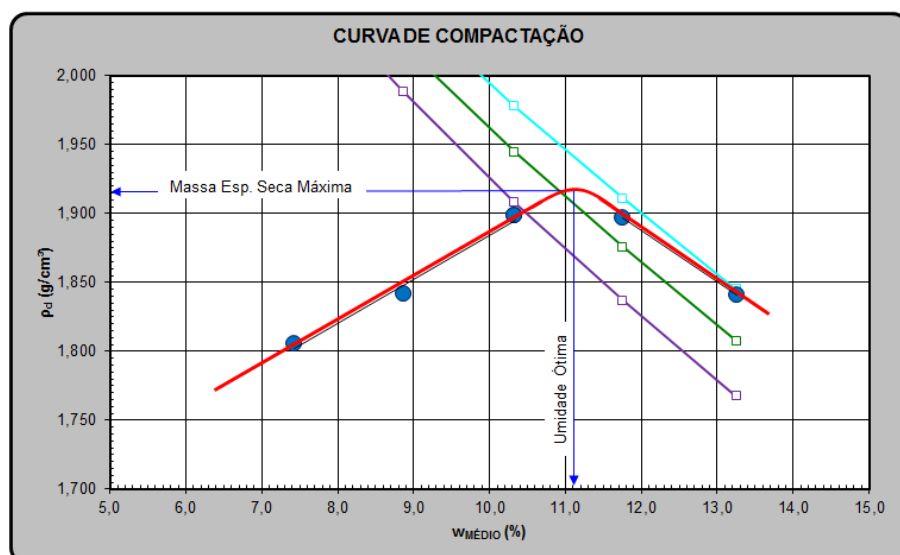
O ensaio de Proctor Normal determinou os parâmetros ótimos do solo natural e do solo com os teores extremos de cal, isto é 2 e 10%, a fim de se verificar a influência do aditivo nos parâmetros de compactação do solo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.1.

A Figura 5.1 mostra as curvas de compactação obtidas para o solo-cal nos teores supracitados. A curva de compactação do solo natural está apresentada na Figura 4.3.

**Tabela 5.1** - Parâmetros ótimos do solo natural e do solo com os teores de 2% e 10% de cal.

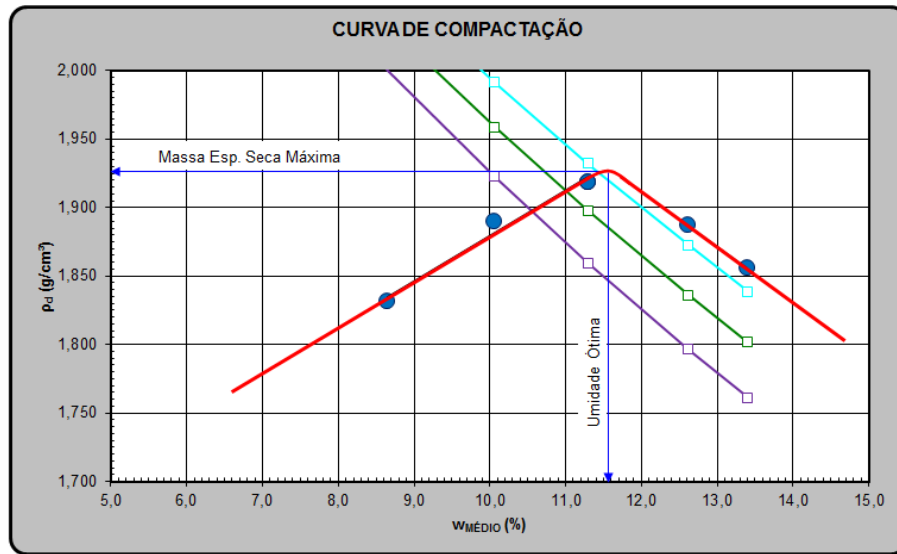
	Umidade ótima, $w_{ot}$ (%)	Massa específica seca máxima, $\rho_{d_{max}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Solo natural	10,60	1,950
Solo-cal (2,00%)	11,10	1,915
Solo-cal (10,00%)	11,60	1,925

**Figura 5.1** - Curvas de compactação na energia Proctor Normal, para o solo-cal com 2% e 10% de cal.



a) Solo-cal com 2% de cal.

**Figura 5.1** - Curvas de compactação na energia Proctor Normal, para o solo-cal com 2% e 10% de cal (continuação).



b) Solo-cal com 10% de cal.

Foi observado nos ensaios de compactação, realizados para o solo natural e para o solo-cal com teores de 2 e 10%, que os resultados se apresentaram muito semelhantes entre si, ou seja, a umidade ótima e a massa específica seca máxima não foram muito afetadas pela adição de cal.

Foi possível observar um sutil aumento da umidade ótima e uma redução da massa específica seca máxima, conforme relatado pela revisão bibliográfica. Não havendo diferença significativa nos resultados obtidos, foi estabelecido o mesmo valor de umidade ótima para o solo natural e para os compósitos solo-cal e solo-cal-tiras, correspondente a 10,6% de umidade, que se mostrou condizente com o desvio aceitável da umidade ótima de 1%.

## 5.1 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: SOLO-CAL

Pinto (2006) explica que o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia no critério de Mohr-Coulomb, onde é aplicada uma tensão normal num plano e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura.

A resistência ao cisalhamento nos solos depende de dois parâmetros importantes, a coesão e o ângulo de atrito interno (ORTIGÃO, 1995; AYALA et al.,

2019). Os parâmetros de resistência ao cisalhamento estão presentes na expressão de Mohr-Coulomb, descrita na Equação 3.3.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan (\phi) \quad (3.3)$$

Na Equação 3.3,  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento do material,  $c$  é a coesão ou intercepto de coesão,  $\sigma$  é a tensão normal e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno do solo.

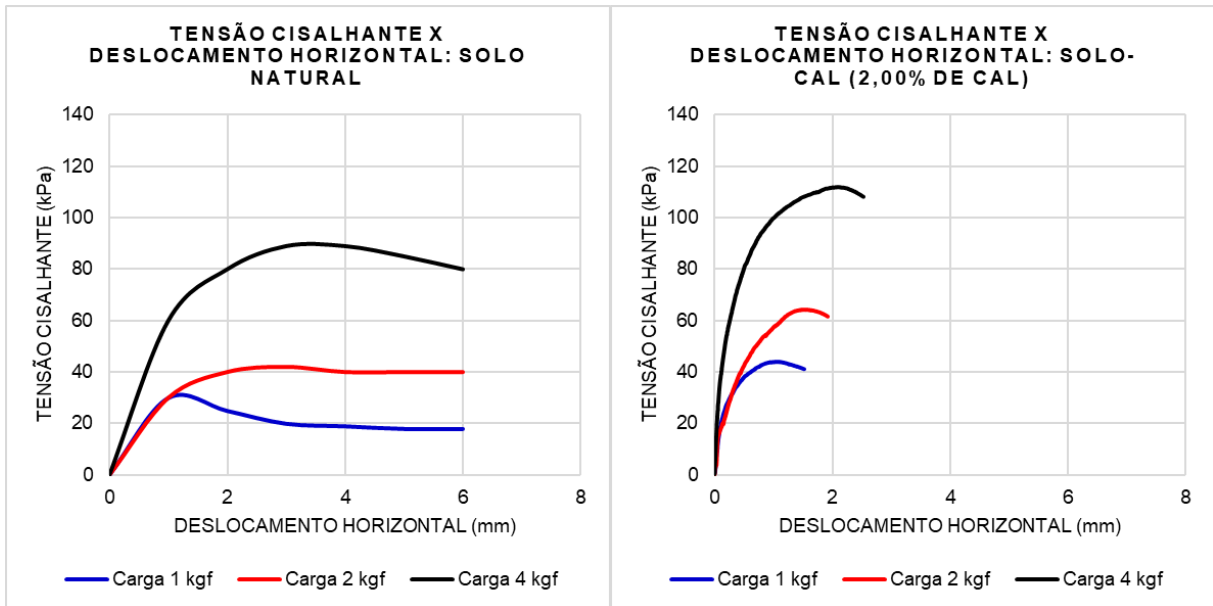
O ângulo de atrito pode ser entendido como o ângulo máximo que a força transmitida à superfície pode fazer com a superfície normal ao plano de contato, sem que ocorra deslizamento. Atingido este ângulo, a componente tangencial é maior do que a resistência ao deslizamento, causando o colapso da estrutura (PINTO, 2006; SILVEIRA, 2019).

Além da resistência causada pelo atrito entre as partículas, a atração química existente entre os grãos provoca a existência de uma coesão. A coesão é a principal parcela da resistência ao cisalhamento dos solos finos e coesivos, como as argilas, enquanto, para os solos granulares ou não coesivos, como as areias, a maior parcela da resistência ao cisalhamento é devida ao atrito (SILVEIRA, 2019).

A partir dos ensaios de cisalhamento direto realizados com as misturas solo-cal foram geradas cinco envoltórias de ruptura referentes a cada teor de cal adicionado ao solo arenoso (2, 4, 6, 8, e 10%). Sendo que cada envoltória foi obtida através do cisalhamento de 3 corpos de prova, após o adensamento com o uso de cargas de 1, 2 e 4 kgf.

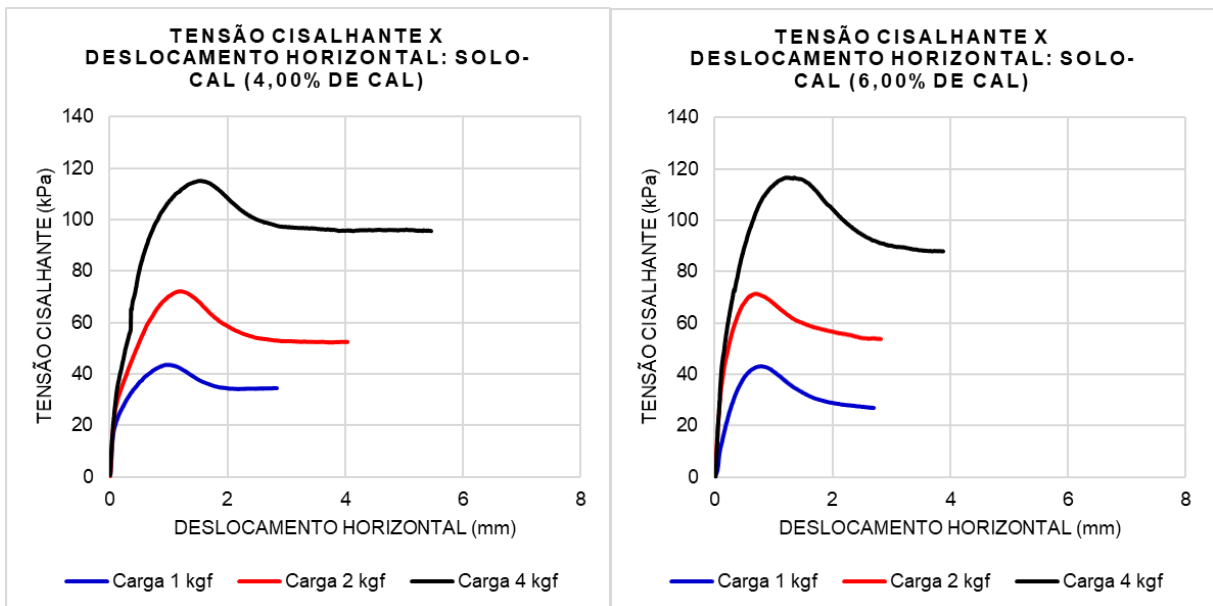
A Figura 5.2 mostra o comportamento das curvas tensão-deslocamento horizontal obtidas nos ensaios e o padrão de ruptura das amostras, para o solo natural e para os compósitos solo-cal.

**Figura 5.2** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal.



a) Solo natural.

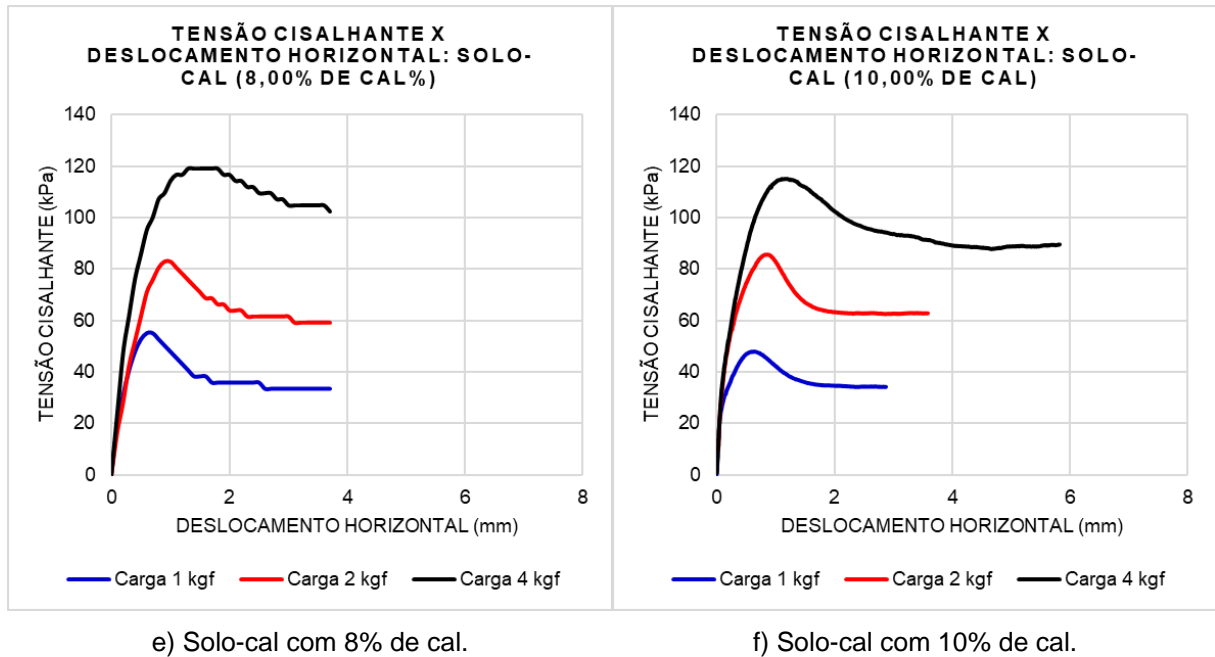
b) Solo-cal com 2% de cal.



c) Solo-cal com 4% de cal.

d) Solo-cal com 6% de cal.

**Figura 5.2** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal (continuação).



e) Solo-cal com 8% de cal.

f) Solo-cal com 10% de cal.

Para o solo natural, foi observado que as curvas tensão-deslocamento horizontal, para cada carga normal aplicada de 1, 2 e 4 kgf, apresentaram comportamentos diferentes, variando de uma formação de pico seguido de queda de tensão, tendência de comportamento de ruptura frágil, até um comportamento tendendo a ruptura plástica, da menor para a maior carga vertical, respectivamente.

No entanto, essas características se alteraram ao adicionar as quantidades de cal ao solo, superiores a 2%, como mostrado na Figura 5.2, correspondentes aos teores de 4 a 10%, onde foi possível observar que o comportamento predominante foi o de ruptura frágil, caracterizado pela queda acentuada de tensão após o pico. Resultados semelhantes aos vistos por Rocha et al. (2018).

Já para os ensaios com a mistura solo-cal com teor de 2%, as curvas apresentaram um comportamento de ruptura mais plástica, com uma menor definição de tensão de pico. Além disso, diferente dos ensaios com o solo natural, para o solo-cal, as três curvas, para as diferentes tensões normais aplicadas, apresentam comportamentos semelhantes entre si.

Os resultados obtidos nesses ensaios, ou seja, as tensões máximas de cisalhamento (tensão de pico) encontradas para cada tipo de amostra em relação às tensões normais aplicadas, estão apresentados na Tabela 5.2

**Tabela 5.2** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa)					
		Solo natural	Solo-cal (2,00%)	Solo-cal (4,00%)	Solo-cal (6,00%)	Solo-cal (8,00%)	Solo-cal (10,00%)
1	30,56	29,10	44,01	43,64	43,34	55,00	48,04
2	61,11	41,40	64,42	72,16	71,27	82,80	85,56
4	122,22	88,70	112,01	115,06	116,77	119,10	115,13

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.2 notou-se que com a adição da cal ao solo houve um aumento da tensão cisalhante máxima para todas as amostras. A melhora da resistência ao cisalhamento para a carga de 1 kgf foi em média 61%, para a carga de 2 kgf foi 82% e para a carga de 4 kgf foi 30%, em relação ao solo natural. O maior aumento foi de 107%, encontrado para o teor de cal de 10%, para a carga de 2 kgf.

Foi observado um aumento relevante de resistência ao comparar o solo em condição natural com o solo adicionado de qualquer teor de cal, porém, ao comparar os resultados obtidos entre os diferentes teores de cal, não se observou um aumento significativo. Observou-se uma tendência relacionando a melhora na resistência para os maiores teores de cal empregados.

Foram investigados também os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (coesão e ângulo de atrito) encontrados para os ensaios com solo natural e com a mistura solo-cal.

Também foram calculados os valores do coeficiente de determinação  $R^2$  referentes às expressões de Mohr-Coulomb obtidas. Esse coeficiente varia de 0 a 1, e quanto mais próximo a 1, mais confiável é a adaptação da reta de tendência linear aos valores da amostra.

A Tabela 5.3 mostra os parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito, juntamente com o coeficiente de determinação referente à regressão linear produzida.

**Tabela 5.3** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal.

	<b>Coesão</b>	<b>Ângulo de atrito</b>	<b>Coefficiente de determinação</b>
	<b>c (kPa)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (2,00%)	20,22	36,76	0,9987
Solo-cal (4,00%)	22,19	37,52	0,9945
Solo-cal (6,00%)	20,59	38,41	0,9972
Solo-cal (8,00%)	36,93	34,20	0,9900
Solo-cal (10,00%)	33,25	34,86	0,9347

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.3, notou-se que para todas as misturas solo-cal com diferentes teores do agente cimentante houve um aumento no parâmetro de coesão e do ângulo de atrito em relação a solo natural.

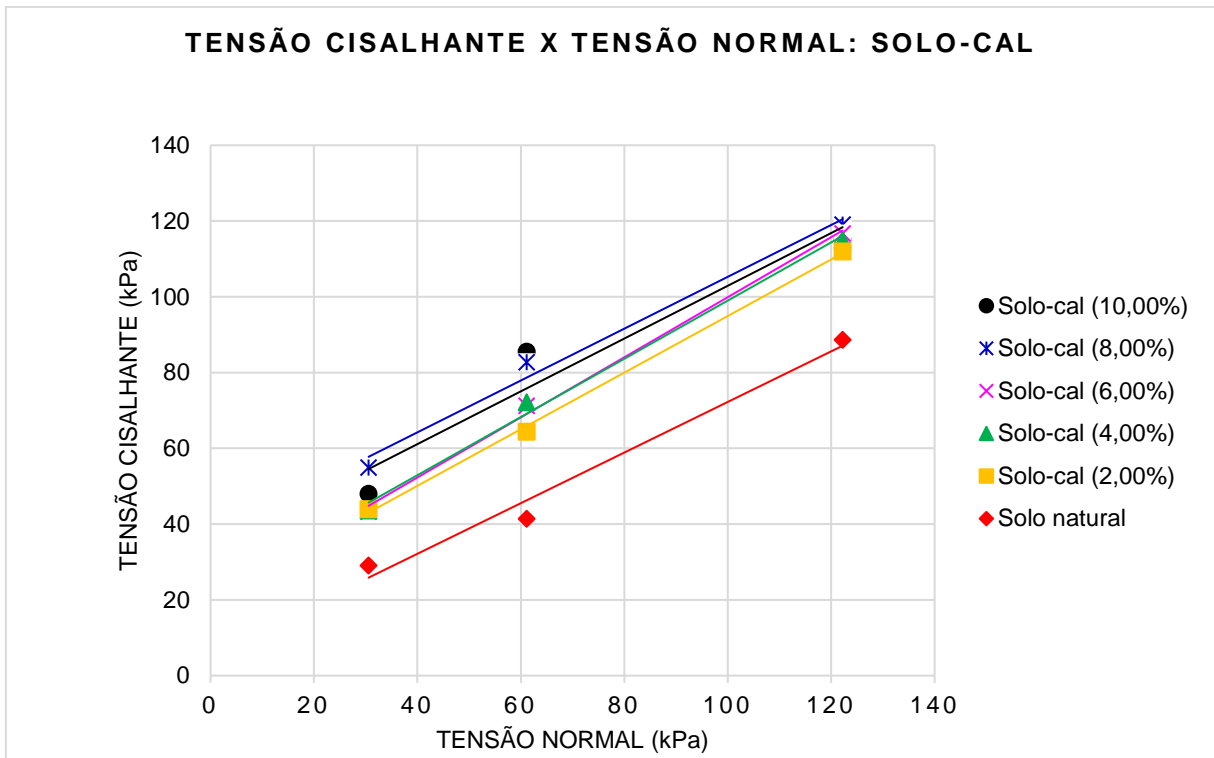
A coesão apresentou um aumento médio de 385% em relação ao solo natural, variando de 5,49 kPa para o solo natural a 36,93 kPa para o compósito. O maior valor de coesão encontrado se deu para a mistura solo-cal com teor de 8% de cal. Observou-se também uma tendência que relaciona o aumento do parâmetro de coesão para maiores teores de cal, que foram obtidos para as misturas solo-cal com 8 e 10% de cal.

Com relação aos valores de ângulo de atrito notou-se um aumento médio de 8%, variando de 33,53° para o solo natural a 38,41° para o compósito. O maior aumento no ângulo de atrito se deu com a mistura solo-cal com teor de 6%.

Por fim, os resultados obtidos nesta etapa revelaram que a variação no ângulo de atrito interno foi menos significativa, o que leva a indicação de paralelismo entre as envoltórias. Já a mudança no intercepto coesivo foi mais expressiva, independente da porcentagem de cal adicionada ao solo. Dessa forma, os resultados observados estão em concordância com os relatos da bibliografia (vide CASAGRANDE, 2005 e WEI et al., 2018).

A Figura 5.3 ilustra as envoltórias de ruptura do solo com e sem a inclusão de cal, proporcionando uma análise comparativa entre elas.

**Figura 5.3** - Envoltórias de resistência: solo natural e solo-cal com diferentes percentuais de cal.



Observando as envoltórias de ruptura verificou-se que a adição de cal como agente cimentante ao solo arenoso promoveu uma melhora nos parâmetros de resistência, discordando de relatos encontrados na bibliografia (Tabela 3.2), que mencionou que a utilização de cal para estabilização de solos arenosos não era indicada. Vale ressaltar que, de acordo com a caracterização do solo em estudo (Tabela 4.1), este apresenta porções de silte e argila, que foram capazes de reagir com a cal e aumentar a resistência ao cisalhamento do solo.

A análise da Figura 5.3 permitiu observar que a melhora dos parâmetros do solo se dá de forma semelhante para todos os teores de cal empregados, fazendo com que as envoltórias se encontrem “aglomeradas” entre si no gráfico apresentado. A mudança mais expressiva é vista ao comparar estas com a envoltória referente ao solo natural. A melhor envoltória foi obtida para o teor de 8% de cal.

Em concordância com as análises anteriores, a plotagem das envoltórias revela um claro paralelismo entre elas, estando os resultados em acordo com outros relatos da bibliografia, como já fora mencionado.

## **5.2 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: SOLO-CAL-TIRAS COM 2% E 4% DE CAL E DIFERENTES COMPRIMENTOS E PERCENTUAIS DE TIRAS**

Nesta etapa são apresentados os resultados referentes aos ensaios de cisalhamento direto com o compósito solo-cal com adição de 2 e 4% de cal e com a inclusão de tiras em percentuais de 0,75, 1, 1,5 e 2% e comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm.

### **5.2.1 Solo-cal-tiras: 2% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras**

Este tópico apresenta os resultados referentes aos ensaios de cisalhamento direto com os compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras com 4 percentuais diferentes e 4 comprimentos diferentes.

#### **5.2.1.1 Solo-cal-tiras: 2% de cal e tiras de 10 mm de comprimento**

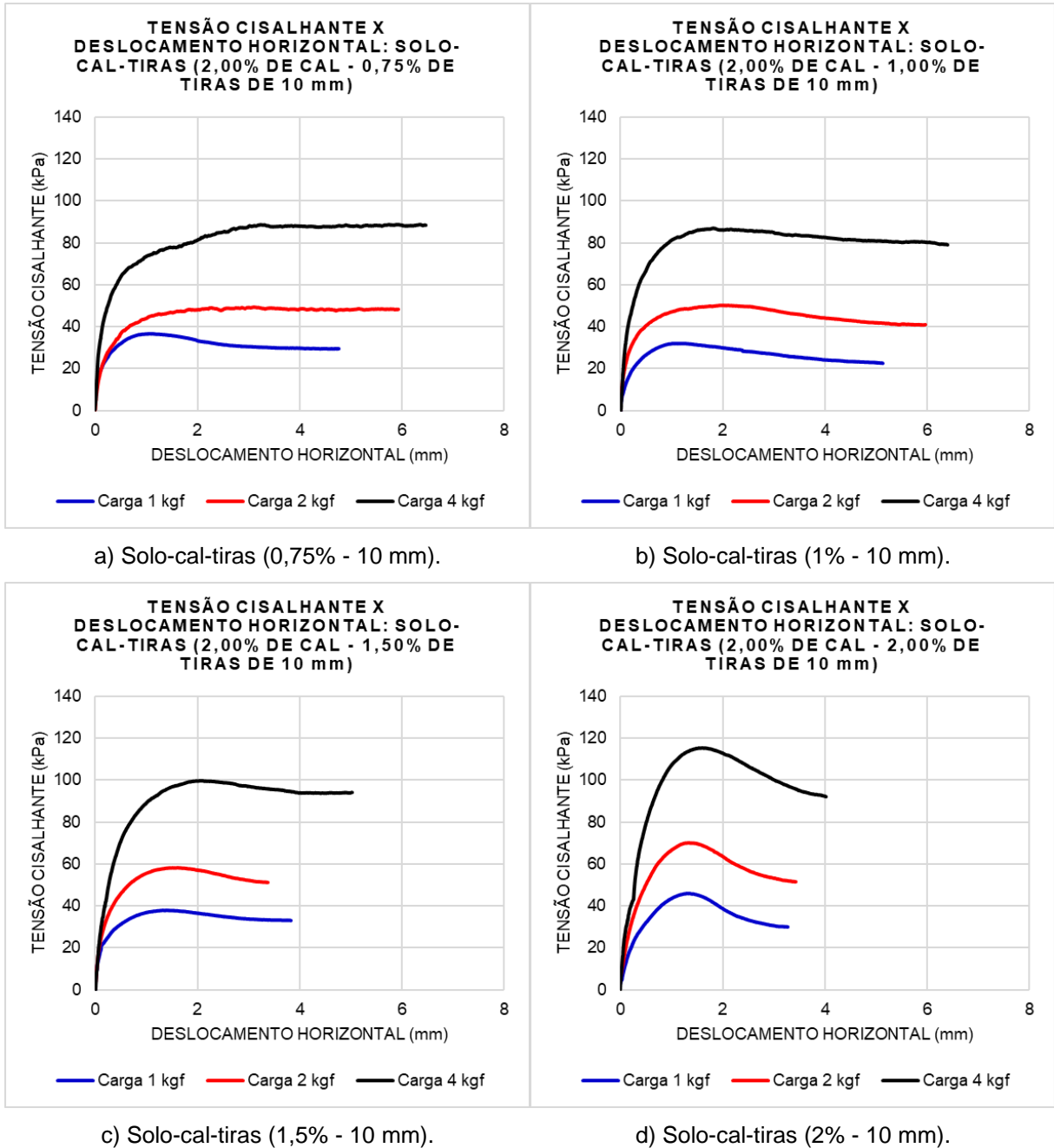
A Figura 5.4 mostra o comportamento das curvas tensão-deslocamento horizontal obtidas nos ensaios, com a utilização de 2% de cal e diferentes porcentagens tiras de 10 mm de comprimento.

Na Tabela 5.4 estão sintetizadas as tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo natural, para o compósito solo-cal com 2% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 10 mm de comprimento, em relação às tensões normais aplicadas de 1, 2 e 4 kgf.

Na Tabela 5.5 estão sintetizados os parâmetros de resistência do solo, isto é, coesão e ângulo de atrito, juntamente com o coeficiente de determinação.

Na Figura 5.5 estão apresentadas as envoltórias de resistência ao cisalhamento para o solo natural, para o compósito solo-cal com 2% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 10 mm de comprimento.

**Figura 5.4** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.



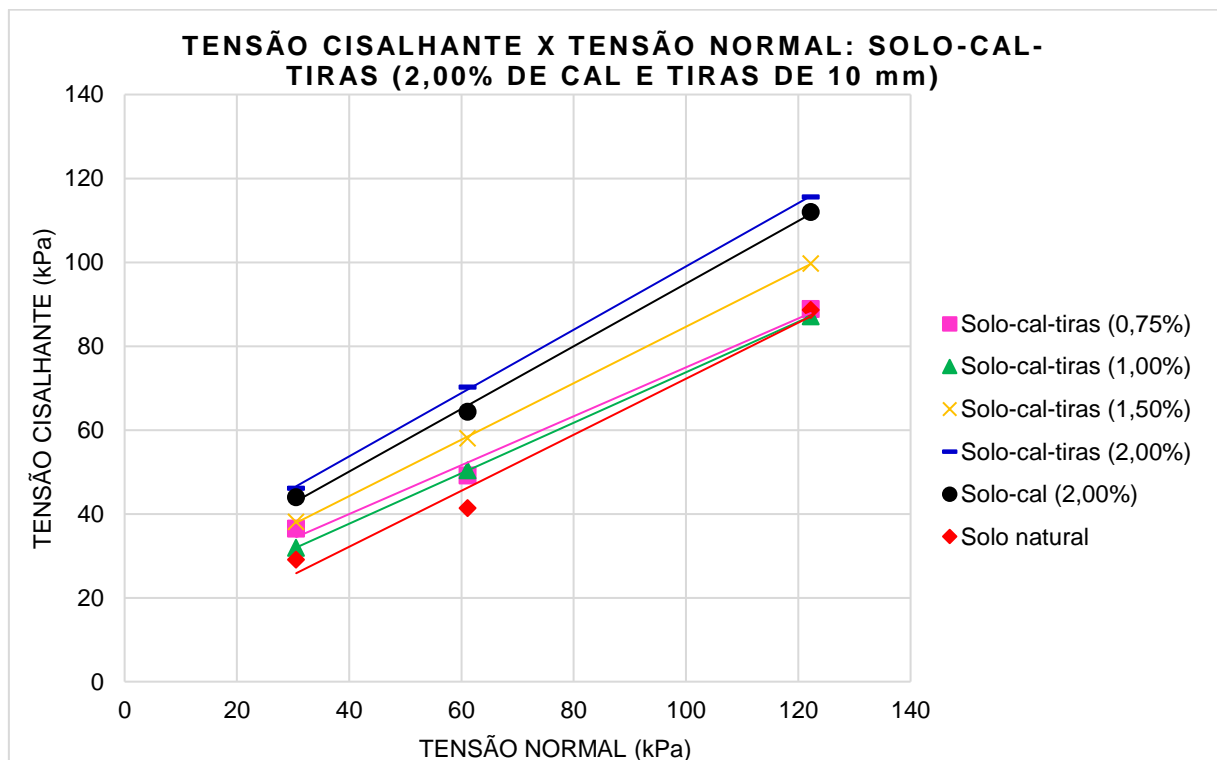
**Tabela 5.4** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) - Tiras de 10 mm					
		Solo natural	Solo-cal (2,00%)	Solo-cal- tiras (0,75%)	Solo-cal- tiras (1,00%)	Solo-cal- tiras (1,50%)	Solo-cal- tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	44,01	36,49	31,95	38,13	46,17
2	61,11	41,40	64,42	49,23	50,42	58,09	70,30
4	122,22	88,70	112,01	88,92	87,13	99,72	115,58

**Tabela 5.5** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.

	Tiras de 10 mm		
	Coesão	Ângulo de atrito	Coefficiente de determinação
	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (2,00%)	20,22	36,76	0,9987
Solo-cal-tiras (0,75%)	16,64	30,25	0,9903
Solo-cal-tiras (1,00%)	13,59	31,04	0,9999
Solo-cal-tiras (1,50%)	17,31	33,95	0,9999
Solo-cal-tiras (2,00%)	23,53	37,05	0,9814

**Figura 5.5** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.



Em comparação com a Figura 5.2, que mostra as curvas tensão-deslocamento horizontal das amostras de solo-cal sem tiras, a Figura 5.4 evidencia a diferença de comportamento causada pela inclusão das tiras de PET. A adição de tiras ao compósito resultou em curvas com comportamento plástico, onde a tensão pós-pico teve uma queda de resistência pequena ou até mesmo nenhuma queda.

Esse efeito observado indica uma melhora da tenacidade do solo, propriedade mecânica relacionada a área sob as curvas tensão-deslocamento, que representa a capacidade de absorção de energia do compósito. O aumento dessa área é atribuído ao fato das tiras inibirem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito (CASAGRANDE, 2005).

Analisando a Tabela 5.4, observou-se que os resultados obtidos para as amostras de solo-cal-tiras com teor de 2% de cal e tiras de 10 mm apresentaram-se melhores com a maior porcentagem de tiras, isto é, de 2%. Com esse teor obtiveram-se as maiores tensões cisalhantes de pico, para todas as tensões normais aplicadas, com aumentos de 59, 70, e 30% para as cargas verticais de 1, 2 e 4 kgf, respectivamente, em relação ao solo natural e aumentos de 5, 9 e 3%, para as mesmas cargas, em relação ao solo-cal.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.5, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49 kPa para o solo natural a 23,53 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se uma variação de  $33,53^\circ$  para o solo natural a  $37,05^\circ$  para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

A Figura 5.5, por sua vez, retratou o mesmo efeito observado antes, de paralelismo entre as envoltórias para todos os percentuais de tiras utilizados, comprovando que o parâmetro de ângulo de atrito sofreu uma alteração menos significativa ao se variar o teor de tiras, sendo que o intercepto coesivo correspondeu às maiores mudanças.

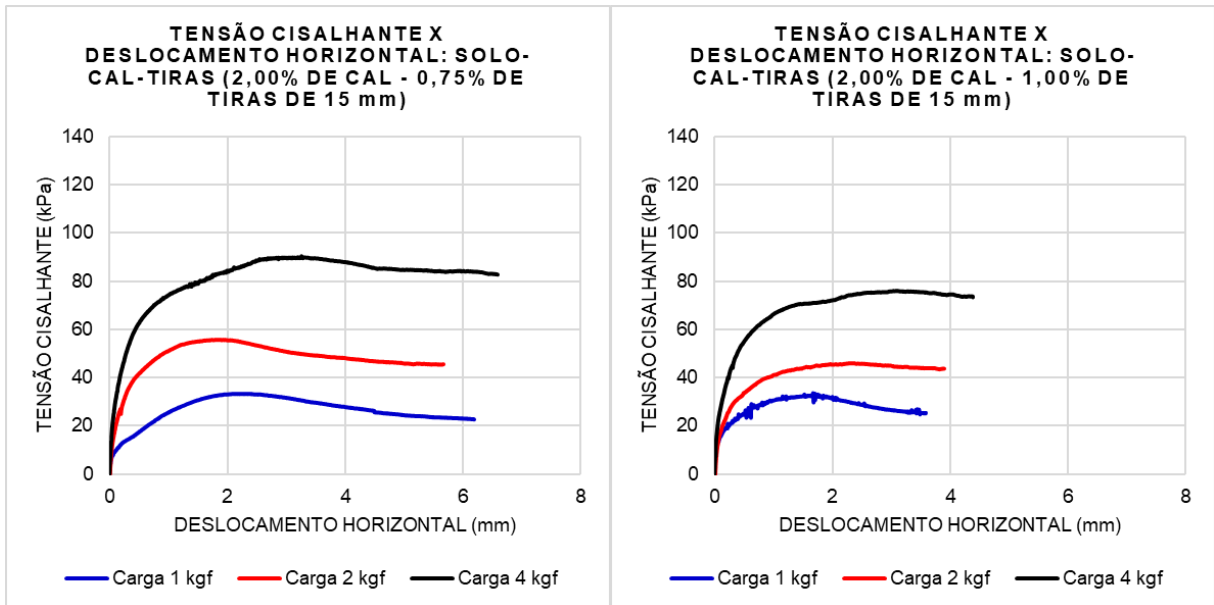
Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural. Na proporção adequada, ou seja, solo-cal-tiras com teor de 2% de tiras de 10 mm, tanto o solo natural quanto o compósito solo-cal foram melhorados com a adição das tiras.

#### *5.2.1.2 Solo-cal-tiras: 2% de cal e tiras de 15 mm de comprimento*

A Figura 5.6 apresenta as curvas tensão-deslocamento, a Tabela 5.6 apresenta as tensões cisalhantes máximas, a Tabela 5.7 apresenta os parâmetros de resistência

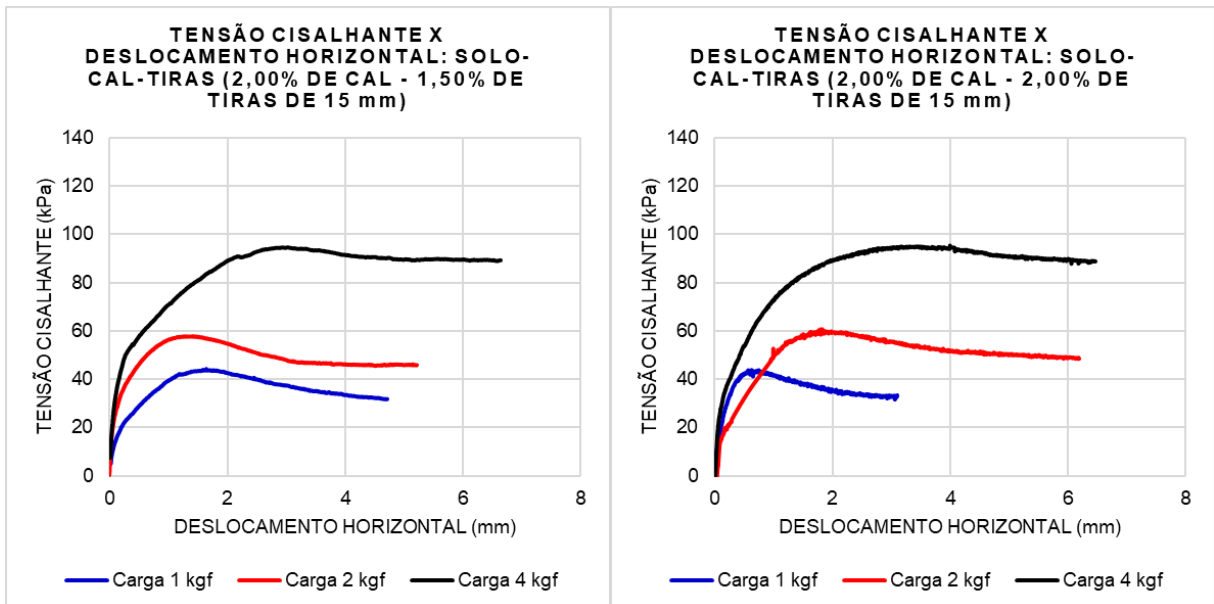
do solo (coesão e ângulo de atrito) e o coeficiente de determinação e a Figura 5.7 apresenta as envoltórias de ruptura, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para o solo natural, para o compósito solo-cal com 2% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 15 mm de comprimento.

**Figura 5.6** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.



a) Solo-cal-tiras (0,75% - 15 mm).

b) Solo-cal-tiras (1% - 15 mm).



c) Solo-cal-tiras (1,5% - 15 mm)

d) Solo-cal-tiras (2% - 15 mm).

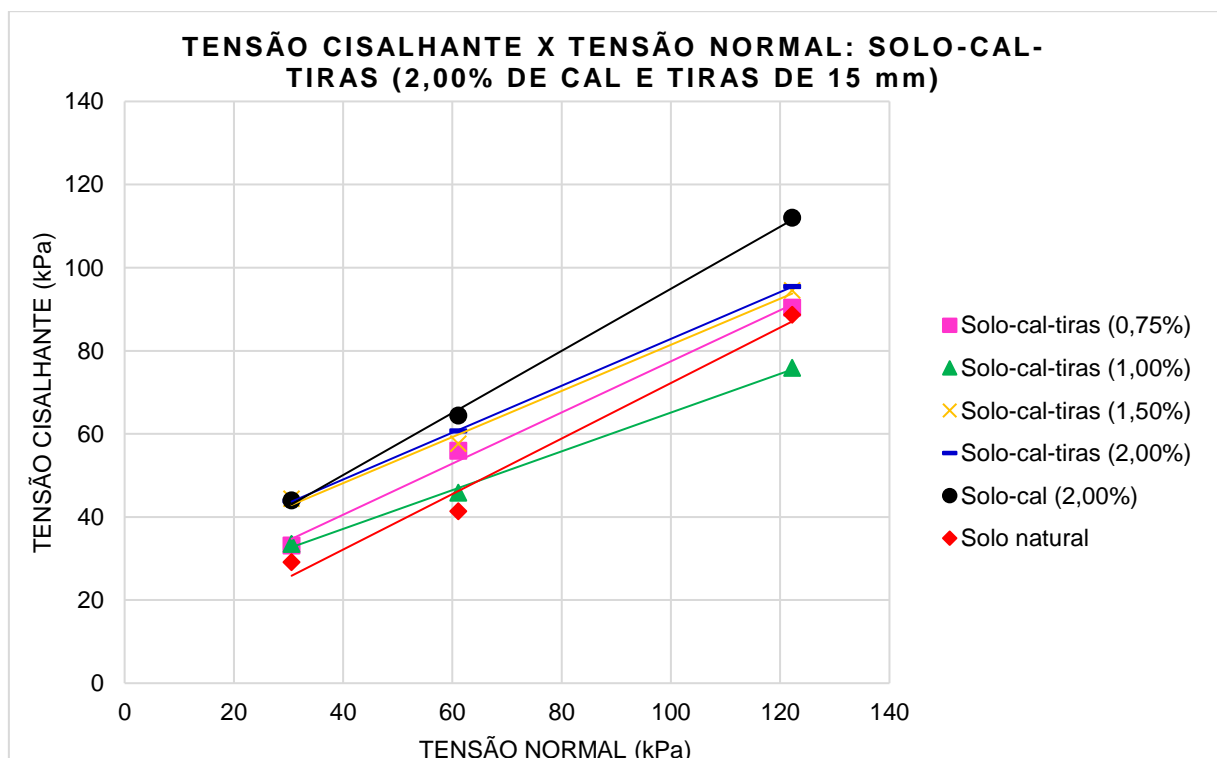
**Tabela 5.6** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) - Tiras de 15 mm					
		Solo natural	Solo-cal (2,00%)	Solo-cal-tiras (0,75%)	Solo-cal-tiras (1,00%)	Solo-cal-tiras (1,50%)	Solo-cal-tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	44,01	33,14	33,51	44,39	43,86
2	61,11	41,40	64,42	55,93	45,80	57,64	60,70
4	122,22	88,70	112,01	90,34	75,89	94,51	95,47

**Tabela 5.7** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.

	Tiras de 15 mm		
	Coesão $c$ (kPa)	Ângulo de atrito $\phi$ (°)	Coefficiente de determinação $R^2$
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (2,00%)	20,22	36,76	0,9987
Solo-cal-tiras (0,75%)	15,93	31,60	0,9946
Solo-cal-tiras (1,00%)	18,46	25,20	1,0000
Solo-cal-tiras (1,50%)	25,95	29,03	0,9943
Solo-cal-tiras (2,00%)	26,47	29,42	0,9999

**Figura 5.7** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.



A Figura 5.6 evidencia o efeito de aumento de ductilidade decorrente da adição de tiras ao compósito solo-cal.

Ao analisar a Tabela 5.6 observou-se que o melhor desempenho foi realizado pelo compósito solo-cal, sem adição de tiras. Com esse teor obtiveram-se as maiores tensões cisalhantes de pico, para todas as tensões normais aplicadas.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.7, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49 kPa para o solo natural a 26,47 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se uma variação de  $33,53^\circ$  para o solo natural a  $36,76^\circ$  para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para a mistura solo-cal.

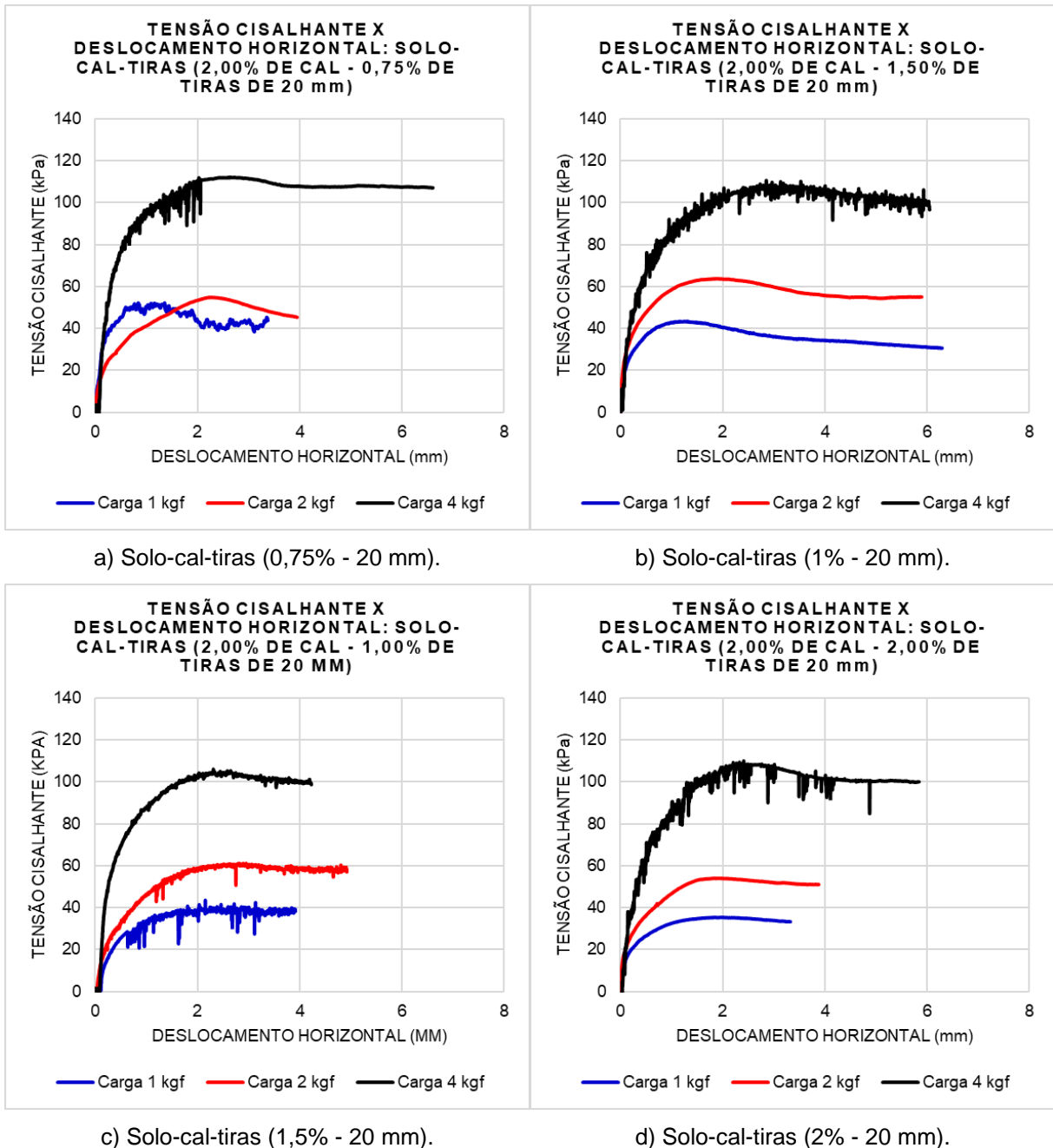
A Figura 5.7, por sua vez, retratou o efeito de paralelismo entre as envoltórias devido à variação menos significativa do ângulo de atrito.

Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural.

#### *5.2.1.3 Solo-cal-tiras: 2% de cal e tiras de 20 mm de comprimento*

A Figura 5.8 apresenta as curvas tensão-deslocamento, a Tabela 5.8 apresenta as tensões cisalhantes máximas, a Tabela 5.9 apresenta os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) e o coeficiente de determinação e a Figura 5.9 apresenta as envoltórias de ruptura, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para o solo natural, para o compósito solo-cal com 2% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 20 mm de comprimento.

**Figura 5.8** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.



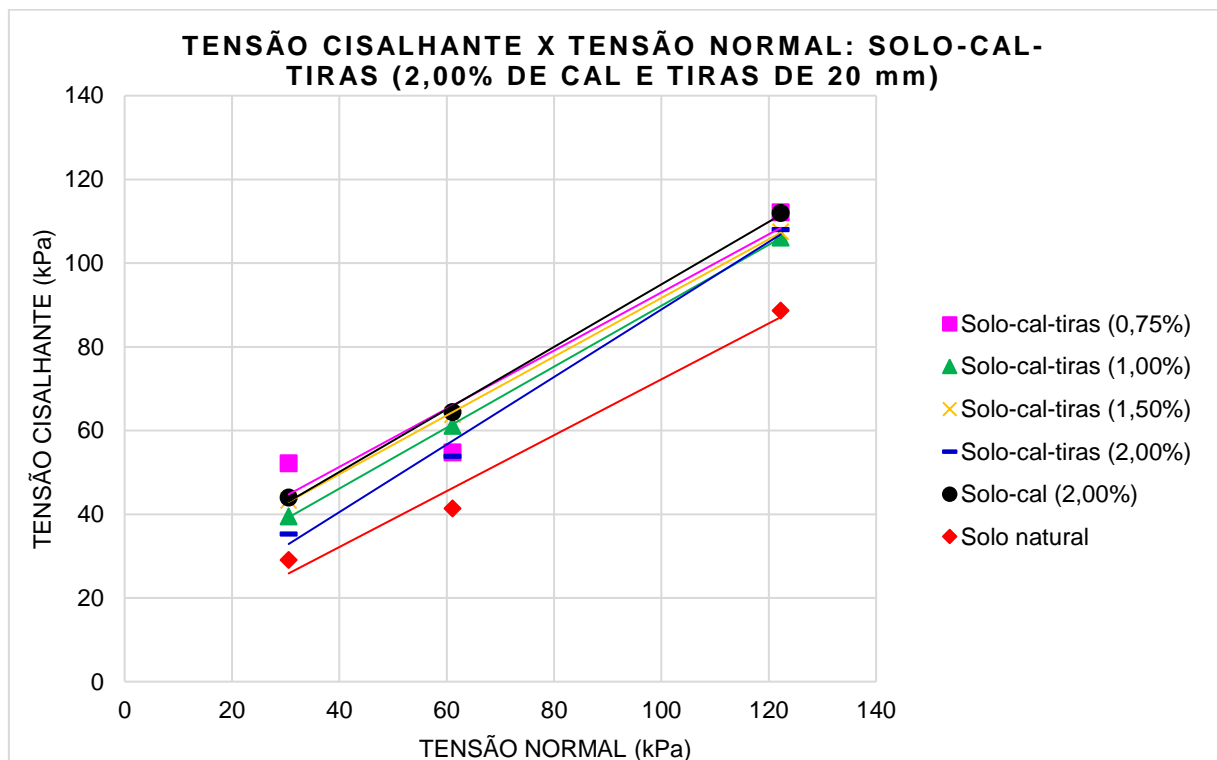
**Tabela 5.8** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) - Tiras de 20 mm					
		Solo natural	Solo-cal (2,00%)	Solo-cal- tiras (0,75%)	Solo-cal- tiras (1,00%)	Solo-cal- tiras (1,50%)	Solo-cal- tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	44,01	52,19	39,50	43,34	35,30
2	61,11	41,40	64,42	54,81	61,14	63,82	53,92
4	122,22	88,70	112,01	112,16	106,12	107,46	108,06

**Tabela 5.9** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.

	Tiras de 20 mm		
	Coesão	Ângulo de atrito	Coefficiente de determinação
	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (2,00%)	20,22	36,76	0,9987
Solo-cal-tiras (0,75%)	23,51	34,79	0,9156
Solo-cal-tiras (1,00%)	17,01	36,06	0,9999
Solo-cal-tiras (1,50%)	21,52	35,05	0,9998
Solo-cal-tiras (2,00%)	8,22	38,90	0,9929

**Figura 5.9** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.



A Figura 5.8 evidencia o efeito de aumento de ductilidade decorrente da adição de tiras ao compósito solo-cal.

Ao analisar a Tabela 5.8 observou-se que o melhor desempenho foi realizado pelo compósito solo-cal, sem adição de tiras. Com esse teor obtiveram-se as maiores tensões cisalhantes de pico, para todas as tensões normais aplicadas.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.9, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49 kPa para o solo natural a 23,51 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal-tiras com 0,75% de tiras.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se uma variação de 33,53° para o solo natural a 38,90° para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

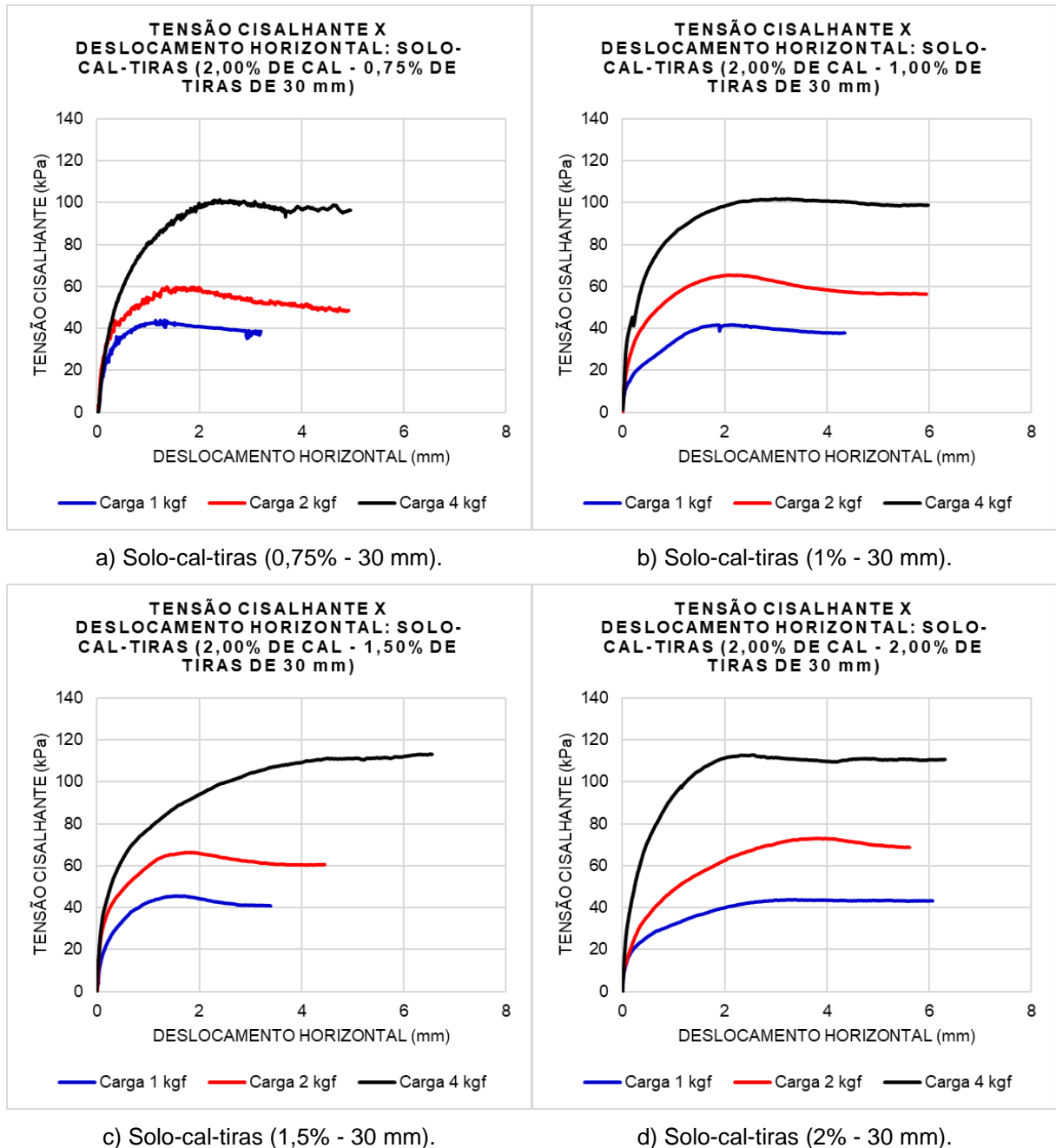
A Figura 5.9, por sua vez, retratou a proximidade das envoltórias de resistência, que configura a obtenção de resultados semelhantes entre as diferentes amostras. O efeito de paralelismo entre as envoltórias ficou bastante evidente devido à variação menos significativa do ângulo de atrito.

Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural.

#### *5.2.1.4 Solo-cal-tiras: 2% de cal e tiras de 30 mm de comprimento*

A Figura 5.10 apresenta as curvas tensão-deslocamento, a Tabela 5.10 apresenta as tensões cisalhantes máximas, a Tabela 5.11 apresenta os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) e o coeficiente de determinação e a Figura 5.11 apresenta as envoltórias de ruptura, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para o solo natural, para o compósito solo-cal com 2% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 30 mm de comprimento.

**Figura 5.10** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.



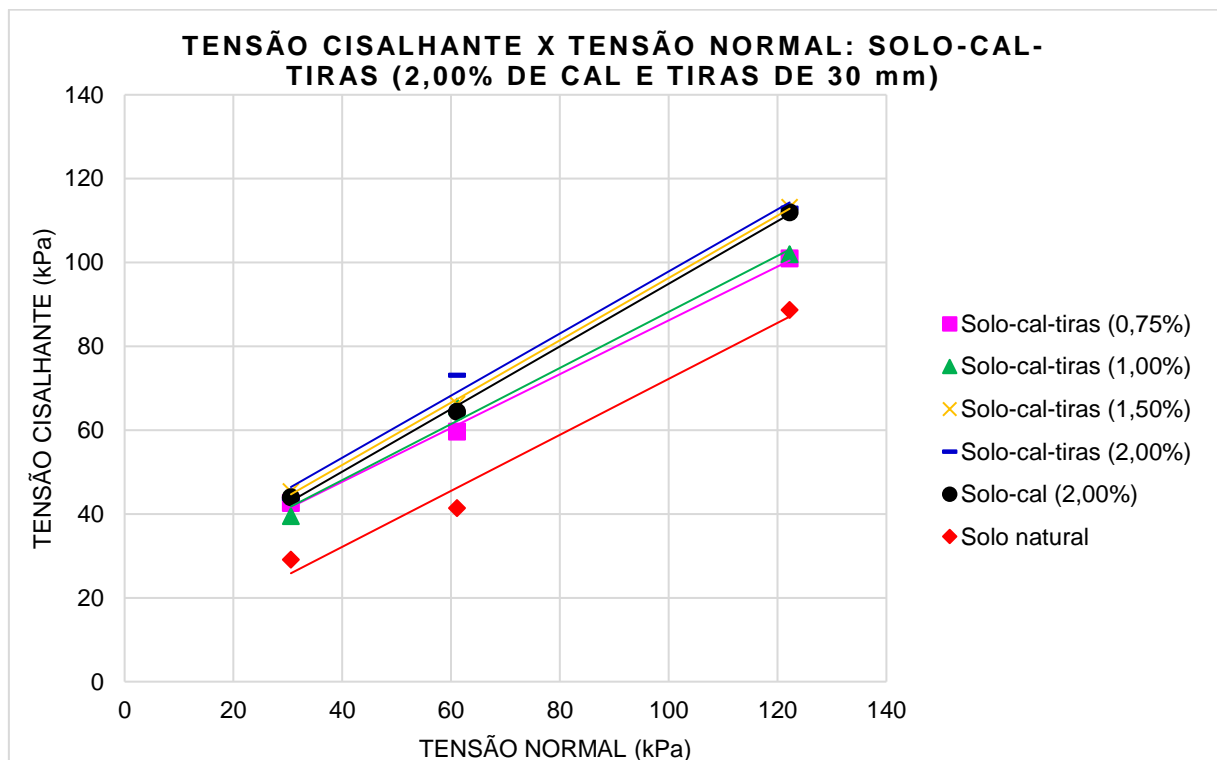
**Tabela 5.10** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) -Tiras de 30 mm					
		Solo natural	Solo-cal (2,00%)	Solo-cal- tiras (0,75%)	Solo-cal- tiras (1,00%)	Solo-cal- tiras (1,50%)	Solo-cal- tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	44,01	42,67	39,50	45,43	43,72
2	61,11	41,40	64,42	59,65	65,61	66,28	73,13
4	122,22	88,70	112,01	100,98	101,95	113,20	112,97

**Tabela 5.11** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.

Tiras de 30 mm			
	Coesão	Ângulo de atrito	Coefficiente de determinação
	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (2%)	20,22	36,76	0,9987
Solo-cal-fibras (0,75%)	22,00	32,70	0,9978
Solo-cal-fibras (1,00%)	21,33	33,78	0,9908
Solo-cal-fibras (1,50%)	21,97	36,63	0,9992
Solo-cal-fibras (2,00%)	23,79	36,53	0,9893

**Figura 5.11** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 2% de cal e solo-cal-tiras com 2% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.



A Figura 5.10 evidencia o efeito de aumento de ductilidade decorrente da adição de tiras ao compósito solo-cal.

Ao analisar a Tabela 5.10 observou-se que o melhor desempenho foi realizado pelo compósito solo-cal-tiras com 2% de tiras.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.11, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49

kPa para o solo natural a 23,79 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se que este parâmetro sofreu pouca alteração, variando de 33,53° para o solo natural a 36,76° para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para a mistura solo-cal.

A Figura 5.11, por sua vez, retratou a proximidade das envoltórias de resistência, que configura a obtenção de resultados semelhantes entre as diferentes amostras. O efeito de paralelismo entre as envoltórias ficou bastante evidente devido à variação menos significativa do ângulo de atrito.

Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural.

Na proporção adequada, ou seja, solo-cal-tiras com teor de 2% de tiras de 30 mm, tanto o solo natural quanto o compósito solo-cal foram melhorados com a adição das tiras.

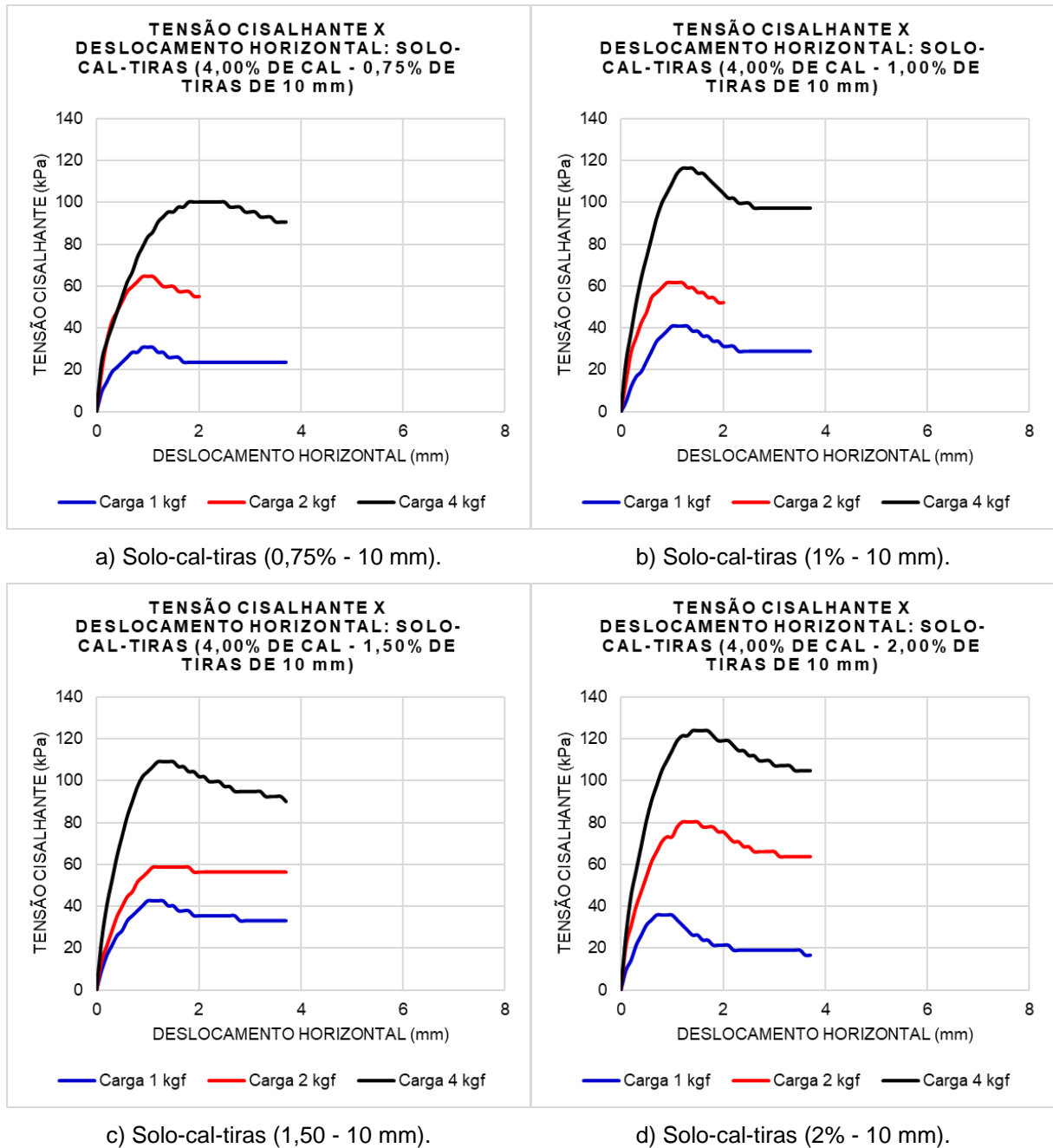
### **5.2.2 Solo-cal-tiras: 4% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras**

Este tópico apresenta os resultados referentes aos ensaios de cisalhamento direto com os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras com 4 percentuais diferentes e 4 comprimentos diferentes.

#### **5.2.2.1 Solo-cal-tiras: 4% de cal e tiras de 10 mm de comprimento**

A Figura 5.12 apresenta as curvas tensão-deslocamento, a Tabela 5.12 apresenta as tensões cisalhantes máximas, a Tabela 5.13 apresenta os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) e o coeficiente de determinação e a Figura 5.13 apresenta as envoltórias de ruptura, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para o solo natural, para o compósito solo-cal com 4% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 10 mm de comprimento.

**Figura 5.12** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.



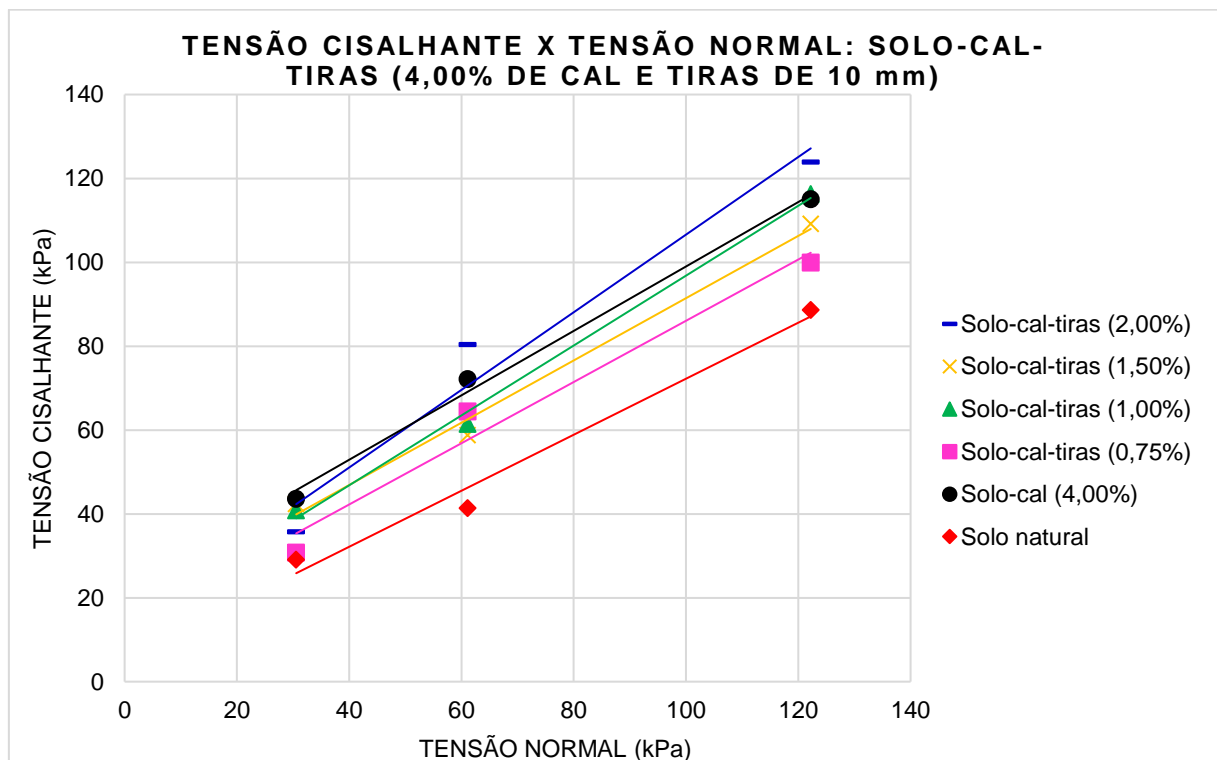
**Tabela 5.12** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) - Tiras de 10 mm					
		Solo natural	Solo-cal (4,00%)	Solo-cal- tiras (0,75%)	Solo-cal- tiras (1,00%)	Solo-cal- tiras (1,50%)	Solo-cal- tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	43,64	30,80	40,90	42,40	35,80
2	61,11	41,40	72,16	64,50	61,50	58,80	80,40
4	122,22	88,70	115,06	100,00	116,30	109,20	123,90

**Tabela 5.13** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.

	Tiras de 10 mm		
	Coesão	Ângulo de atrito	Coefficiente de determinação
	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (4,00%)	22,19	37,52	0,9945
Solo-cal-tiras (0,75%)	13,00	36,10	0,9700
Solo-cal-tiras (1,00%)	13,20	40,00	1,0000
Solo-cal-tiras (1,50%)	17,60	36,50	0,9900
Solo-cal-tiras (2,00%)	14,30	42,60	0,9600

**Figura 5.13** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 10 mm em diferentes percentuais.



A Figura 5.12 evidencia um pequeno aumento de ductilidade decorrente da adição de tiras ao compósito solo-cal com 4% de cal.

Ao analisar a Tabela 5.12 observou-se que o melhor desempenho foi realizado pelo compósito solo-cal-tiras com 2% de tiras.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.13, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49

kPa para o solo natural a 22,19 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se uma variação de de  $33,53^\circ$  para o solo natural a  $42,60^\circ$  para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

A Figura 5.13, por sua vez, retratou o efeito de paralelismo entre as envoltórias devido à variação menos significativa do ângulo de atrito.

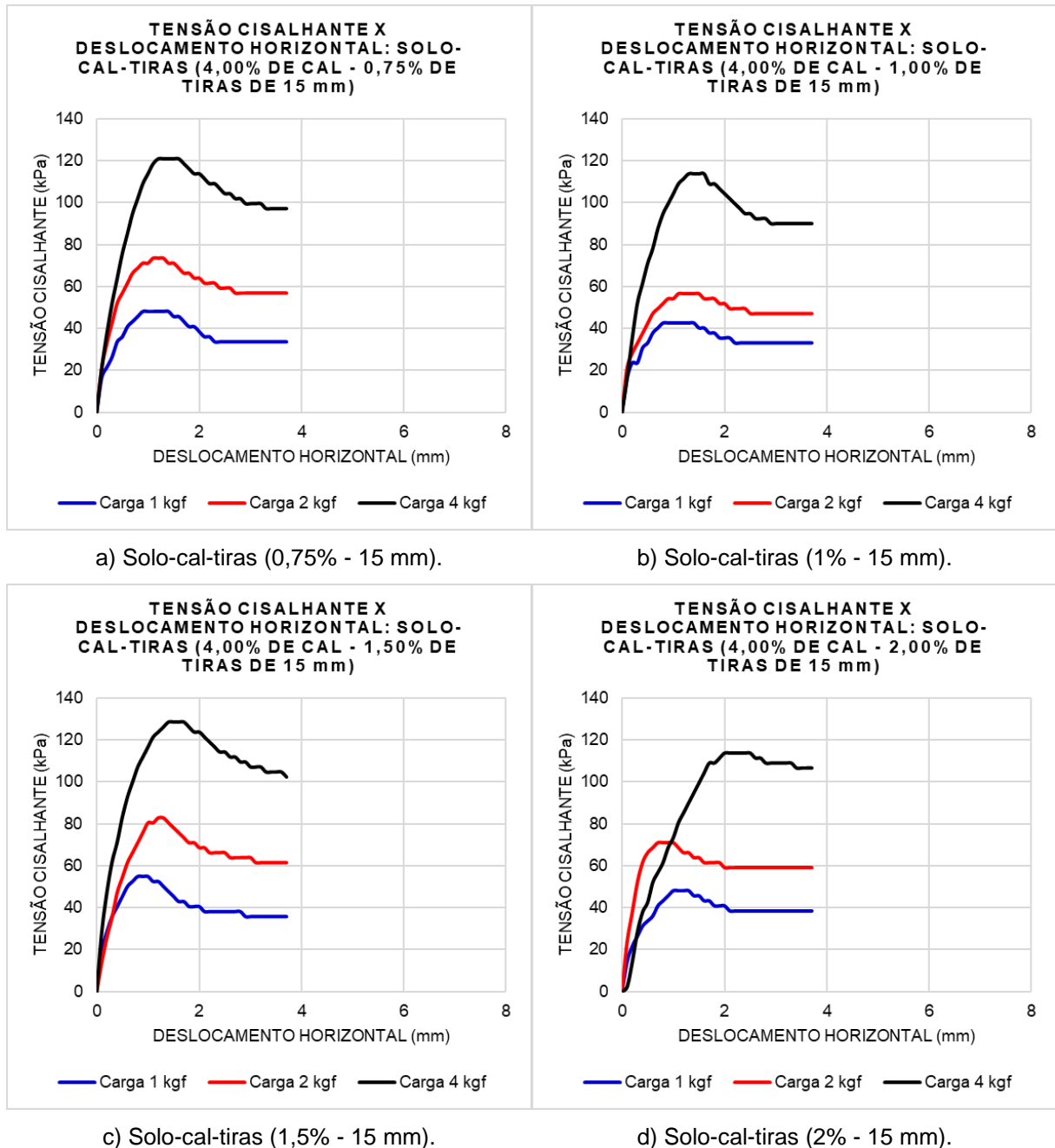
Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural.

Na proporção adequada, ou seja, solo-cal-tiras com teor de 2% de tiras de 10 mm, tanto o solo natural quanto o compósito solo-cal foram melhorados com a adição das tiras.

#### *5.2.2.2 Solo-cal-tiras: 4% de cal e tiras de 15 mm de comprimento*

A Figura 5.14 apresenta as curvas tensão-deslocamento, a Tabela 5.14 apresenta as tensões cisalhantes máximas, a Tabela 5.15 apresenta os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) e o coeficiente de determinação e a Figura 5.15 apresenta as envoltórias de ruptura, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para o solo natural, para o compósito solo-cal com 4% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 15 mm de comprimento.

**Figura 5.14** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.



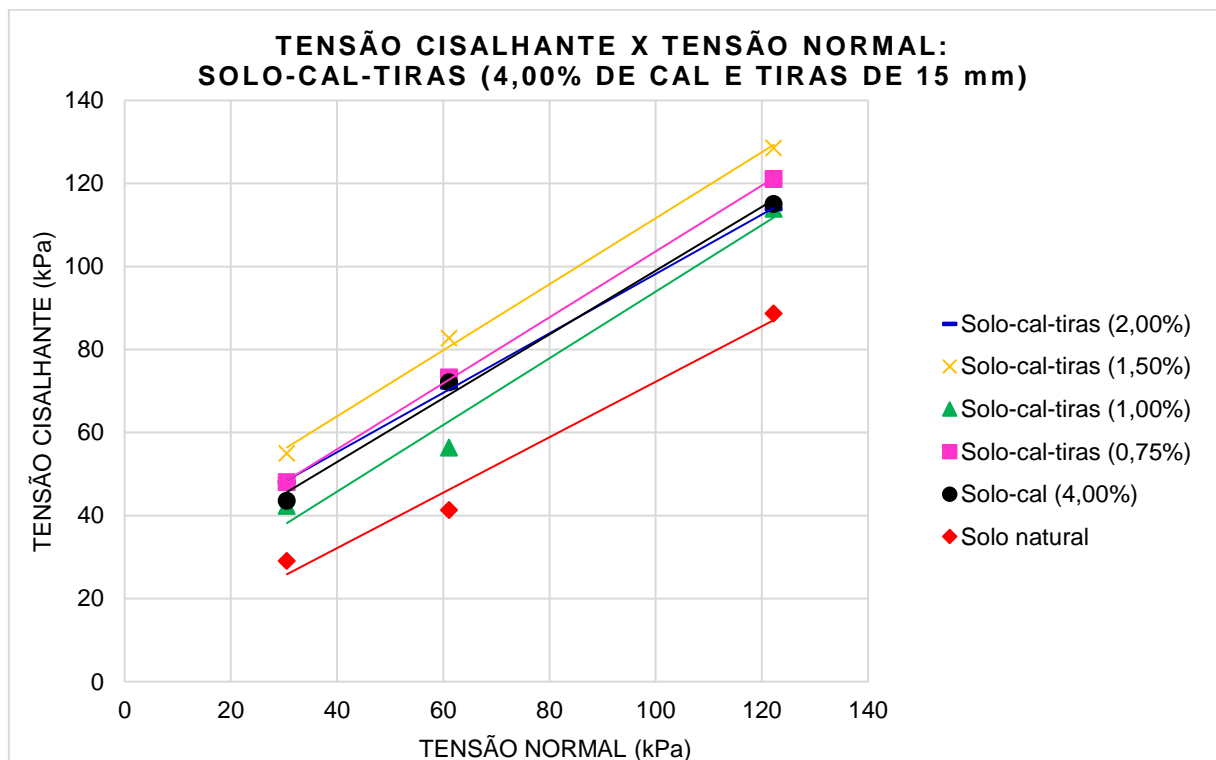
**Tabela 5.14** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) - Tiras de 15 mm					
		Solo natural	Solo-cal (4,00%)	Solo-cal- tiras (0,75%)	Solo-cal- tiras (1,00%)	Solo-cal- tiras (1,50%)	Solo-cal- tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	43,64	48,10	42,40	55,00	48,10
2	61,11	41,40	72,16	73,30	56,40	82,80	71,00
4	122,22	88,70	115,06	121,10	113,90	128,60	113,90

**Tabela 5.15** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.

Tiras de 15 mm			
	Coesão	Ângulo de atrito	Coefficiente de determinação
	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (4,00%)	22,19	37,52	0,9945
Solo-cal-tiras (0,75%)	24,00	38,70	1,0000
Solo-cal-tiras (1,00%)	14,00	38,70	0,9800
Solo-cal-tiras (1,50%)	32,20	38,70	1,0000
Solo-cal-tiras (2,00%)	26,40	35,80	1,0000

**Figura 5.15** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 15 mm em diferentes percentuais.



A Figura 5.14 evidencia um pequeno aumento de ductilidade decorrente da adição de tiras ao compósito solo-cal com 4% de cal.

Ao analisar a Tabela 5.14 observou-se que o melhor desempenho foi realizado pelo compósito solo-cal-tiras com 1,5% de tiras.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.15, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49

kPa para o solo natural a 32,20 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal-tiras com 1,5% de tiras.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se uma variação de 33,53° para o solo natural a 38,70° para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para as misturas solo-cal-tiras com 0,75, 1 e 1,5% de tiras.

A Figura 5.15, por sua vez, retratou a proximidade das envoltórias de resistência, que configura a obtenção de resultados semelhantes entre as diferentes amostras. O efeito de paralelismo entre as envoltórias ficou bastante evidente devido à variação menos significativa do ângulo de atrito.

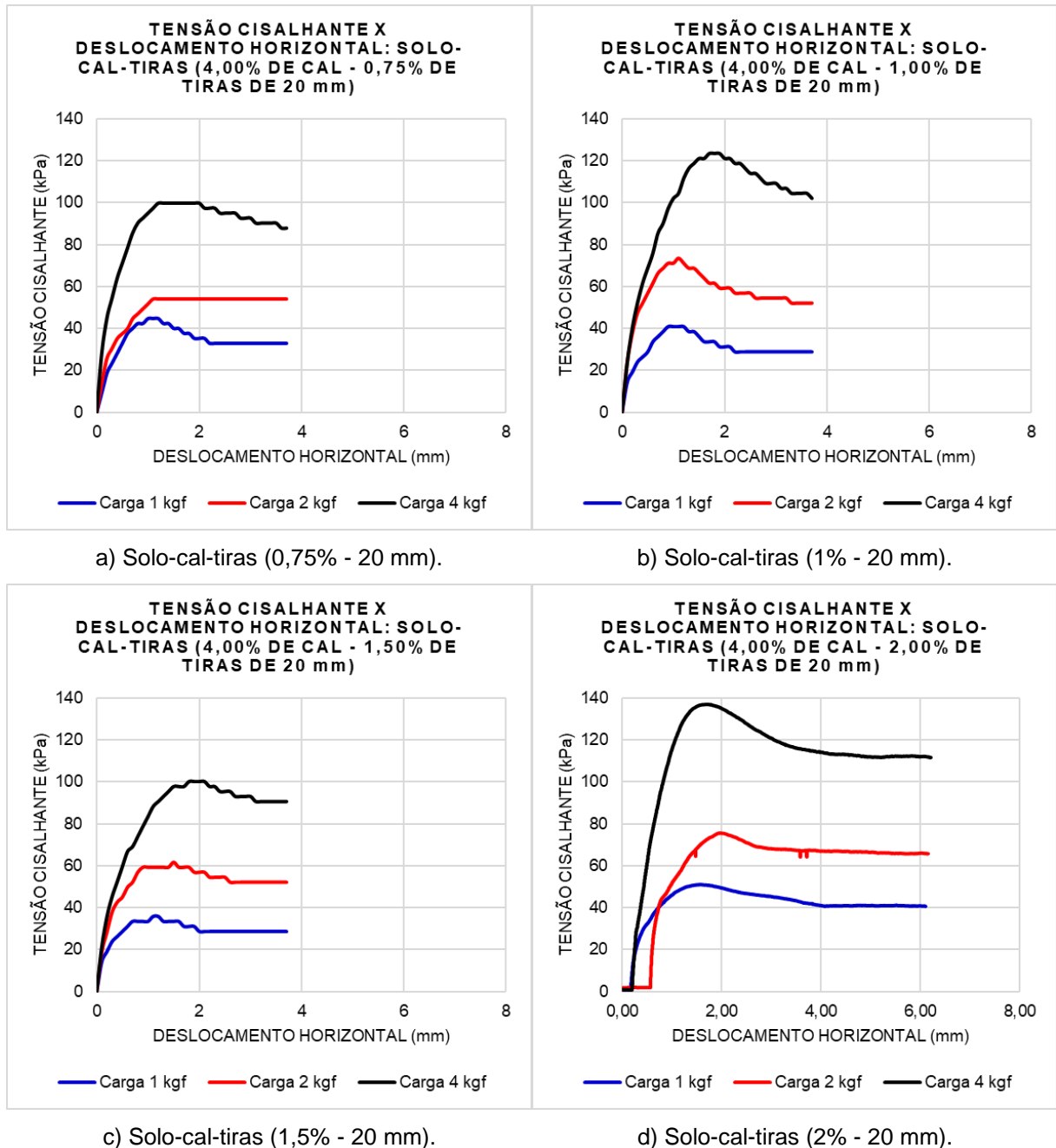
Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural.

Na proporção adequada, ou seja, solo-cal-tiras com teor de 1,5% de tiras de 15 mm, tanto o solo natural quanto o compósito solo-cal foram melhorados com a adição das tiras.

#### *5.2.2.3 Solo-cal-tiras: 4% de cal e tiras de 20 mm de comprimento*

A Figura 5.16 apresenta as curvas tensão-deslocamento, a Tabela 5.16 apresenta as tensões cisalhantes máximas, a Tabela 5.17 apresenta os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) e o coeficiente de determinação e a Figura 5.17 apresenta as envoltórias de ruptura, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para o solo natural, para o compósito solo-cal com 4% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 20 mm de comprimento.

**Figura 5.16** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.



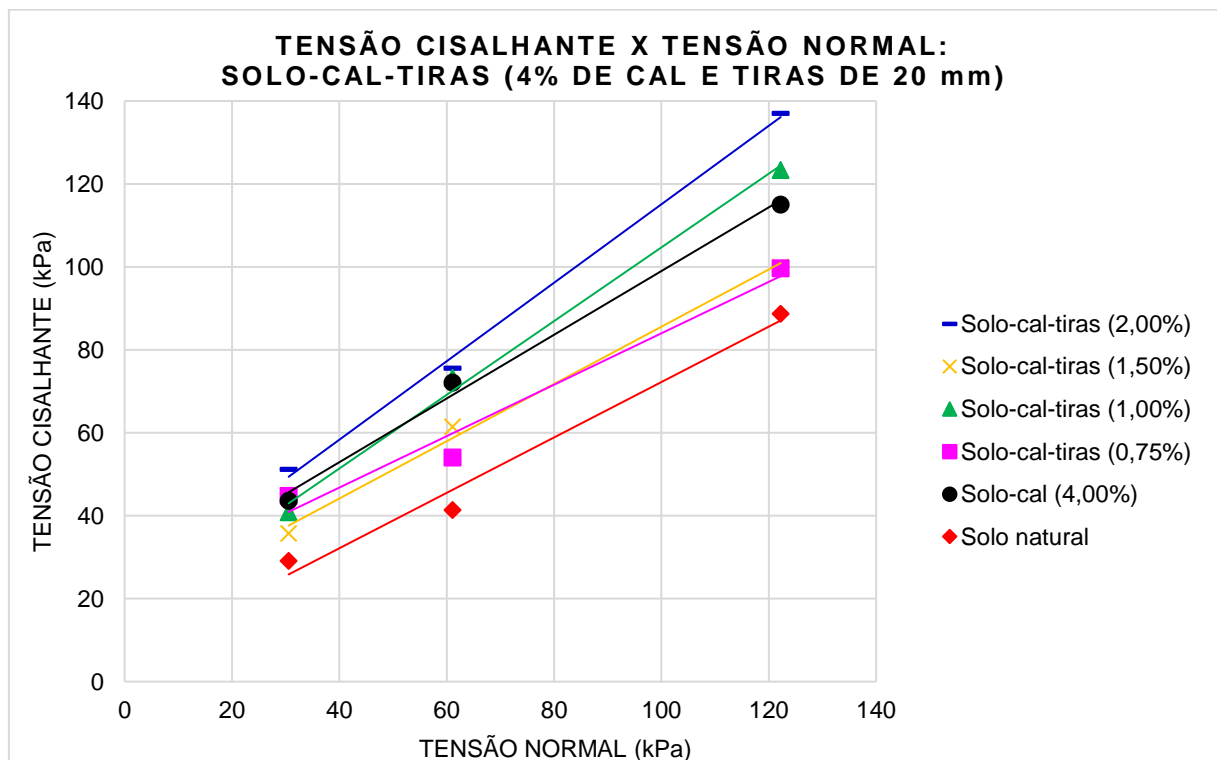
**Tabela 5.16** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) - Tiras de 20 mm					
		Solo natural	Solo-cal (4,00%)	Solo-cal- tiras (0,75%)	Solo-cal- tiras (1,00%)	Solo-cal- tiras (1,50%)	Solo-cal- tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	43,64	44,80	40,90	35,80	51,21
2	61,11	41,40	72,16	54,10	73,30	61,50	75,60
4	122,22	88,70	115,06	99,70	123,40	100,00	137,03

**Tabela 5.17** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.

Tiras de 20 mm			
	Coesão	Ângulo de atrito	Coefficiente de determinação
	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (4,00%)	22,19	37,52	0,9945
Solo-cal-tiras (0,75%)	22,30	31,80	0,9700
Solo-cal-tiras (1,00%)	15,60	41,70	0,9900
Solo-cal-tiras (1,50%)	16,70	34,60	0,9900
Solo-cal-tiras (2,00%)	20,57	43,50	1,0000

**Figura 5.17** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 20 mm em diferentes percentuais.



A Figura 5.16 evidencia aumento de ductilidade decorrente da adição de tiras ao compósito solo-cal com 4% de cal.

Ao analisar a Tabela 5.16 observou-se que o melhor desempenho foi realizado pelo compósito solo-cal-tiras com 2% de tiras. Com esse teor obtiveram-se as maiores tensões cisalhantes de pico, para todas as tensões normais aplicadas.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.17, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49 kPa para o solo natural a 22,30 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal-tiras com 0,75% de tiras.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se uma variação de 33,53° para o solo natural a 43,50° para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

A Figura 5.17, por sua vez, apresentou as curvas um pouco mais separadas entre si e o efeito do paralelismo não foi tão evidenciado.

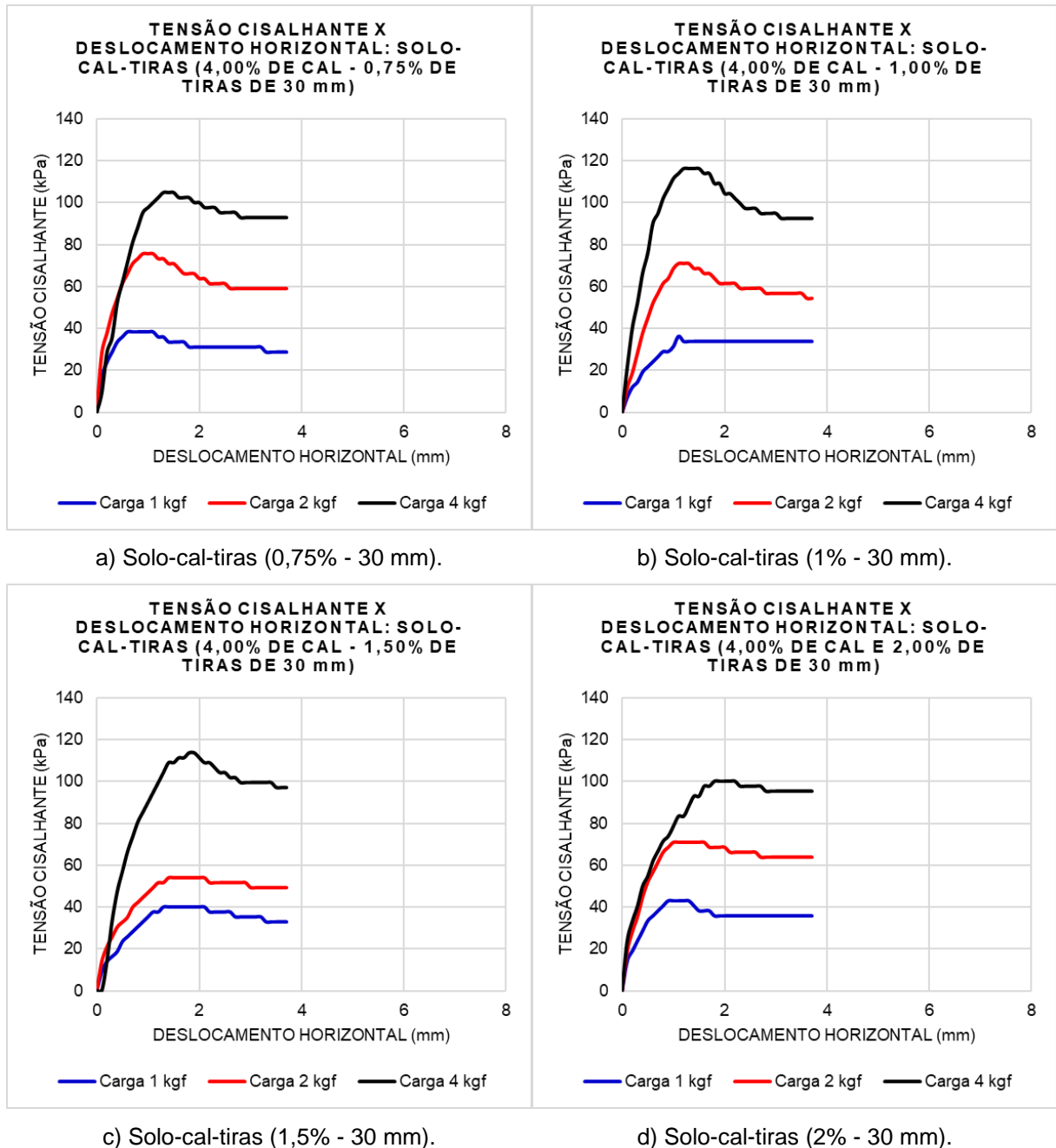
Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural.

Na proporção adequada, ou seja, solo-cal-tiras com teor de 2% de tiras de 20 mm, tanto o solo natural quanto o compósito solo-cal foram melhorados com a adição das tiras.

#### *5.2.2.4 Solo-cal-tiras: 4% de cal e tiras de 30 mm de comprimento*

A Figura 5.18 apresenta as curvas tensão-deslocamento, a Tabela 5.18 apresenta as tensões cisalhantes máximas, a Tabela 5.19 apresenta os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito) e o coeficiente de determinação e a Figura 5.19 apresenta as envoltórias de ruptura, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para o solo natural, para o compósito solo-cal com 4% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal e diferentes porcentagens de tiras de 30 mm de comprimento.

**Figura 5.18** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.



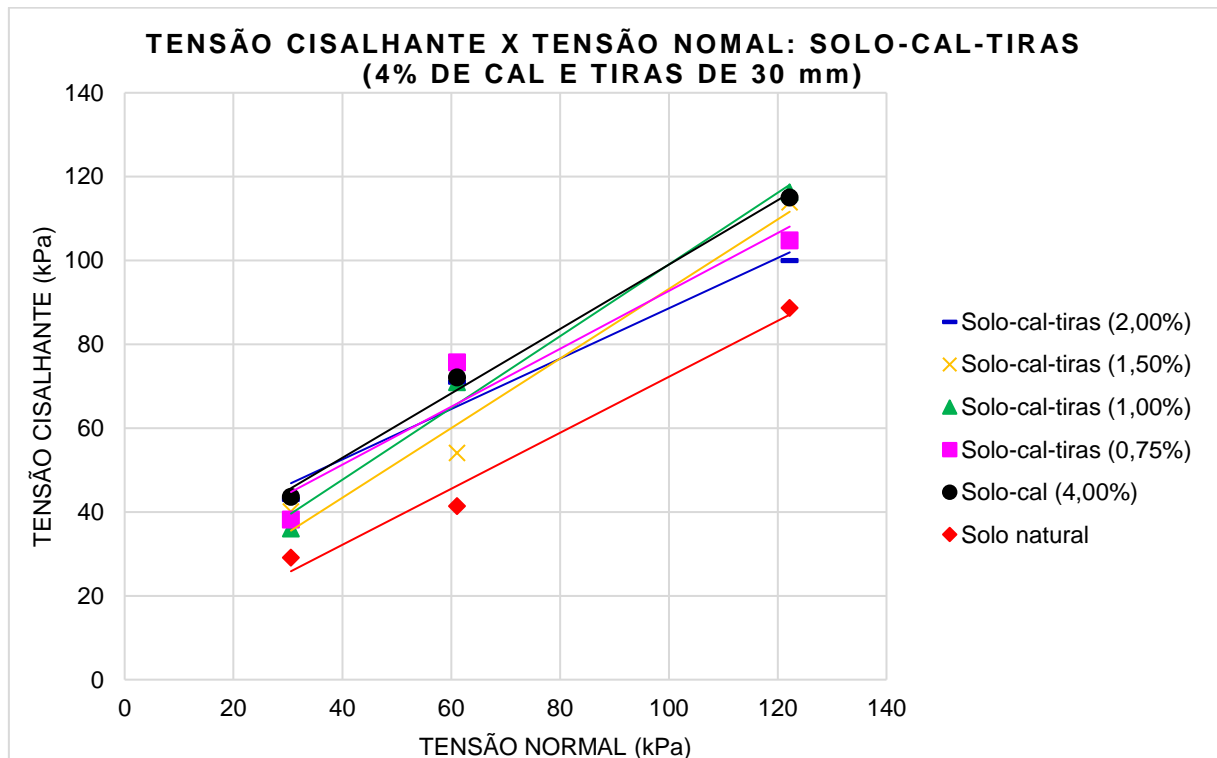
**Tabela 5.18** - Máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal aplicada: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.

Carga (kgf)	Tensão normal $\sigma$ (kPa)	Tensão cisalhante - $\tau$ (kPa) - Tiras de 30 mm					
		Solo natural	Solo-cal (4,00%)	Solo-cal- tiras (0,75%)	Solo-cal- tiras (1,00%)	Solo-cal- tiras (1,50%)	Solo-cal- tiras (2,00%)
1	30,56	29,10	43,64	38,20	36,10	40,10	43,00
2	61,11	41,40	72,16	75,70	71,00	54,10	71,00
4	122,22	88,70	115,06	104,80	116,30	113,90	100,00

**Tabela 5.19** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos para cada envoltória: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.

Tiras de 30 mm			
	Coesão	Ângulo de atrito	Coefficiente de determinação
	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Solo natural	5,49	33,53	0,9814
Solo-cal (4,00%)	22,19	37,52	0,9945
Solo-cal-tiras (0,75%)	23,80	34,60	0,9300
Solo-cal-tiras (1,00%)	13,20	40,70	0,9900
Solo-cal-tiras (1,50%)	10,50	39,70	0,9800
Solo-cal-tiras (2,00%)	28,60	31,00	0,9700

**Figura 5.19** - Envoltórias de resistência: solo natural, solo-cal com 4% de cal e solo-cal-tiras com 4% de cal e tiras de 30 mm em diferentes percentuais.



A Figura 5.18 evidencia aumento de ductilidade decorrente da adição de tiras ao compósito solo-cal com 4% de cal.

Ao analisar a Tabela 5.18 observou-se que o melhor desempenho foi realizado pelo compósito solo-cal.

Com relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, expostos na Tabela 5.19, observou-se que a coesão apresentou os maiores aumentos, variando de 5,49

kPa para o solo natural a 28,60 kPa para o compósito. O maior valor de coesão se deu para a mistura solo-cal-tiras com 2% de tiras.

Ao analisar o ângulo de atrito notou-se uma variação de 33,53° para o solo natural a 40,70° para o compósito. O maior valor de ângulo de atrito se deu para a mistura solo-cal-tiras com 1% de tiras.

A Figura 5.19 retrata a proximidade das envoltórias de resistência, que configura a obtenção de resultados semelhantes entre as diferentes amostras. O efeito de paralelismo também foi notado.

Num aspecto geral, todas as amostras com adição de tiras apresentaram tensões máximas de resistência ao cisalhamento superiores às apresentadas pelo solo natural.

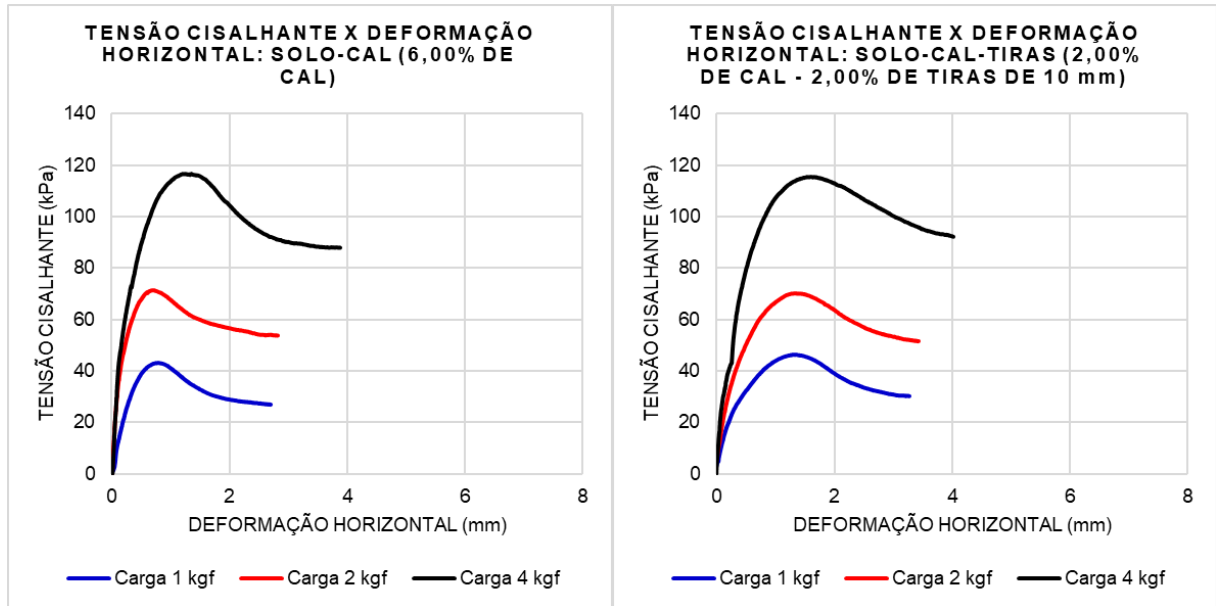
### **5.3 COMPARAÇÕES ENTRE OS MELHORES RESULTADOS**

#### ***5.3.1 Melhores resultados: solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras***

A Figura 5.20 apresenta as curvas tensão-deslocamento horizontal para o compósito solo cal com 6% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal que apresentaram os melhores resultados.

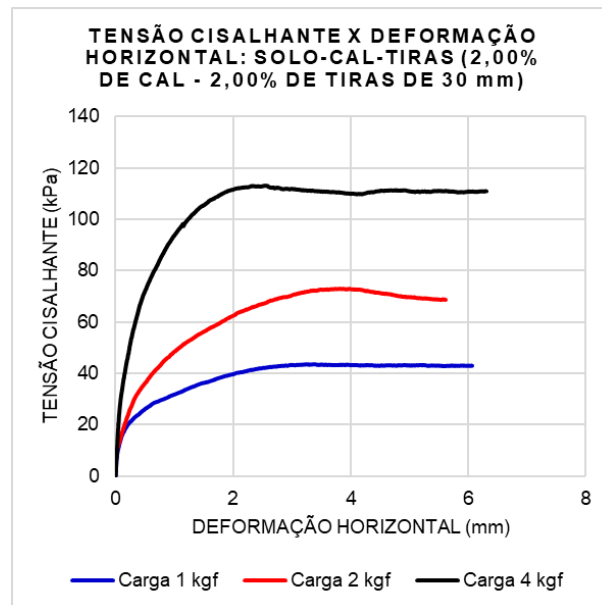
A Figura 5.21 mostra as envoltórias de resistência ao cisalhamento desenvolvidas pelo solo natural, pelo compósito solo-cal com 6 e 8% de cal e pelos compósitos solo-cal-tiras com 2% de cal e diferentes porcentagens e tamanhos de tiras que apresentaram os melhores resultados.

**Figura 5.20** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal com 6% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 2% cal.



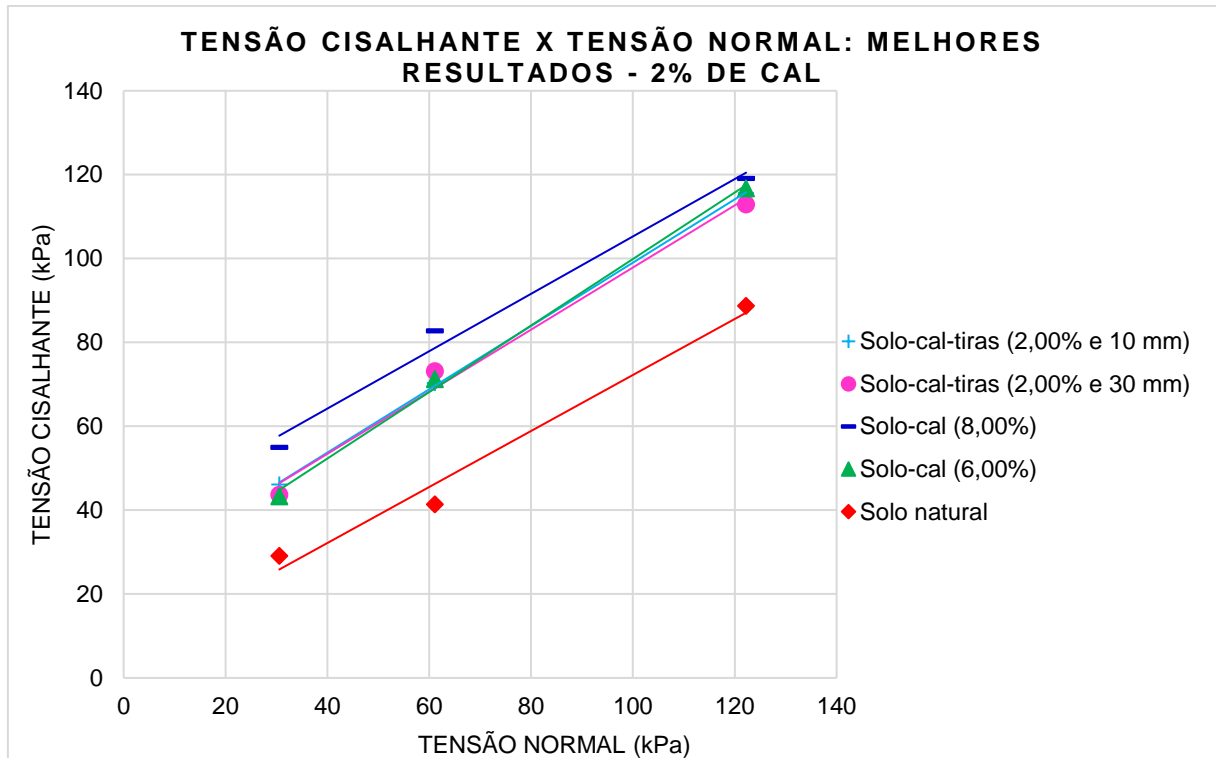
a) Solo-cal com 6% de cal.

b) Solo-cal-tiras (2% - 10 mm)



c) Solo-cal-tiras (2% - 30 mm).

**Figura 5.21** - Envoltórias de resistência: solo natural, compósito solo-cal com 6% e 8% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 2% cal.



De acordo com os dados apresentados anteriormente, e evidenciado na Figura 5.21, o compósito solo-cal-tiras com 2% de tiras de 10 mm apresentou um desempenho superior ao compósito solo-cal com teor de 6% de cal, sem inclusão de tiras. Isso comprova que a adição de tiras ao solo faz com que este apresente o mesmo desempenho de um compósito com maior teor de cal, garantindo dessa forma benefícios como ganho de resistência e economicidade, além do ganho de ductilidade promovido pela adição de tiras, como pode ser observado na Figura 5.20.

Em termos de resistência ao cisalhamento pode-se dizer que o compósito solo-cal-tiras com 2% de tiras de 10 mm apresentou o melhor resultado. No entanto, ao analisar a Figura 5.20, percebe-se que o compósito solo-cal-tiras com 2% de tiras de 30 mm apresentou maior ductilidade, sem comprometer sua resistência. A amostra solo-cal-tiras com 2% de tiras de 30 mm também apresentou resistência ao cisalhamento muito similar ao compósito solo-cal com 6% de cal, mas com a vantagem de apresentar uma ruptura plástica.

Dessa forma, verificou-se que a adição de tiras de PET promoveu um ganho de resistência, sem alterar o comportamento característico do solo de ruptura plástica,

garantindo, assim, maiores tensões de resistência ao cisalhamento após as tensões de pico.

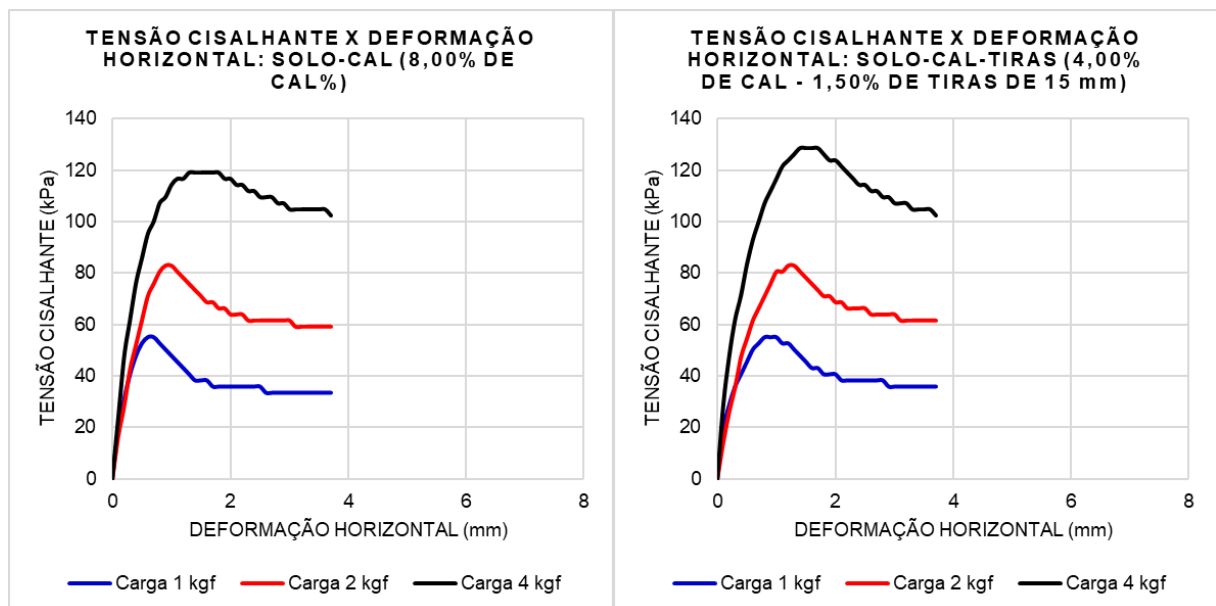
A Figura 5.21 demonstra que o solo estabilizado com cal em teor de 8% continuou apresentando a maior resistência mecânica, contudo, é visível que a adição das tiras à mistura de solo com cal em menor teor elevou sua resistência, superando até outras amostras de solo-cal em valores intermediários.

### 5.3.2 Melhores resultados: solo-cal-tiras com 4% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras

A Figura 5.22 apresenta as curvas tensão-deslocamento horizontal para o compósito solo cal com 8% de cal e para os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal que apresentaram os melhores resultados.

A Figura 5.23 mostra as envoltórias de resistência ao cisalhamento desenvolvidas pelo solo natural, pelo compósito solo-cal com 8% de cal e pelos compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal e diferentes porcentagens e tamanhos de tiras que apresentaram os melhores resultados.

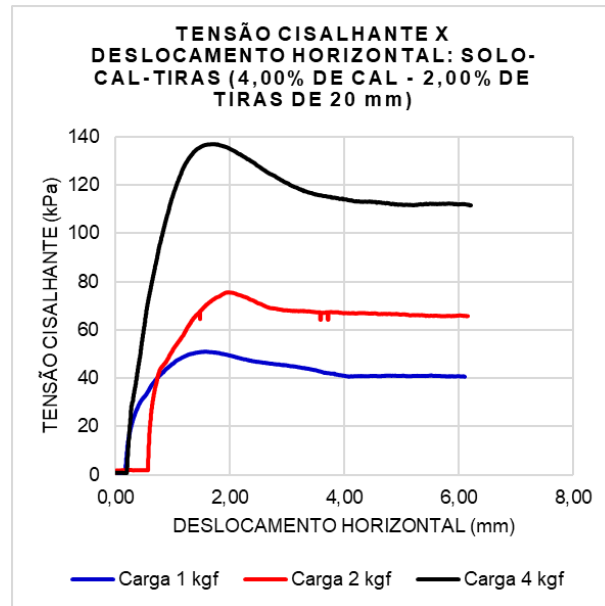
**Figura 5.22** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal com 8% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 4% cal.



a) Solo-cal com 8% de cal.

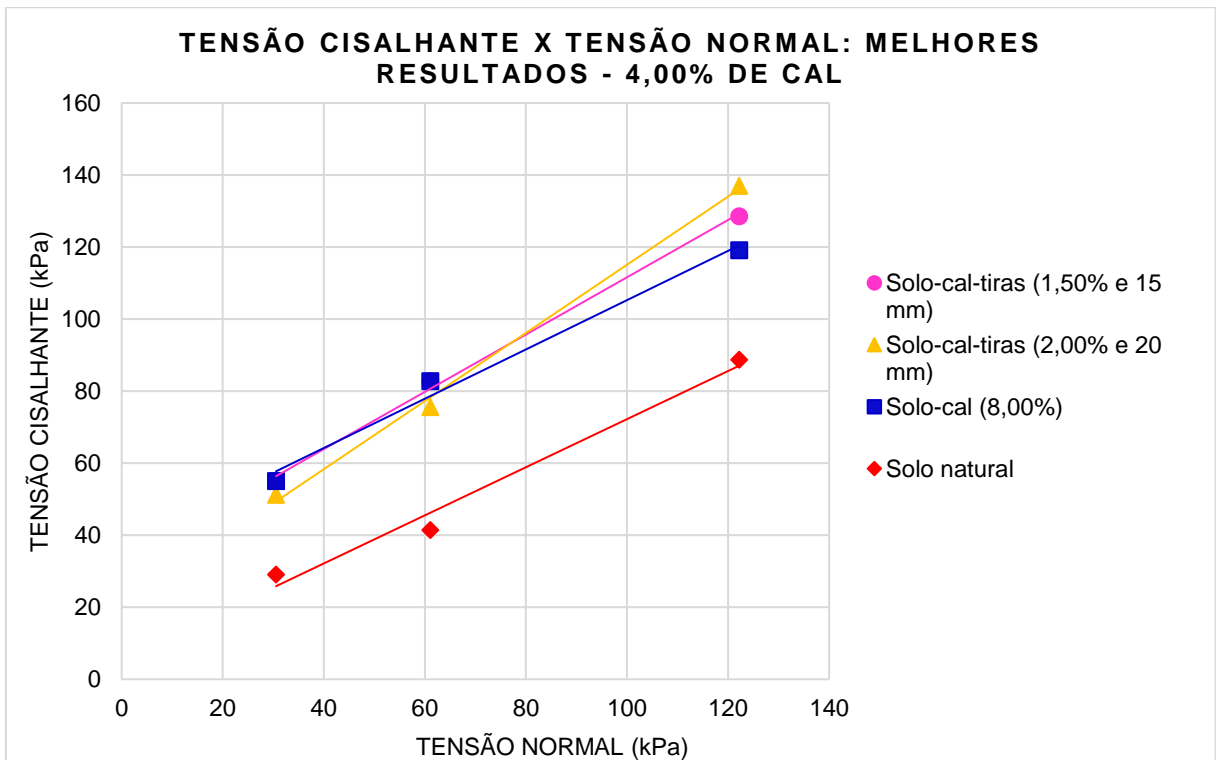
b) Solo-cal-tiras (1,5% - 15 mm).

**Figura 5.22** - Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal: solo-cal com 8% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 4% cal (continuação).



c) Solo-cal-tiras (2% - 20 mm).

**Figura 5.23** - Envoltórias de resistência: solo natural, compósito solo-cal com 8% de cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 4% cal.



Entre os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal, o melhor desempenho foi apresentado pela mistura solo-cal-tiras com 1,5% de tiras de 15 mm, sendo este o

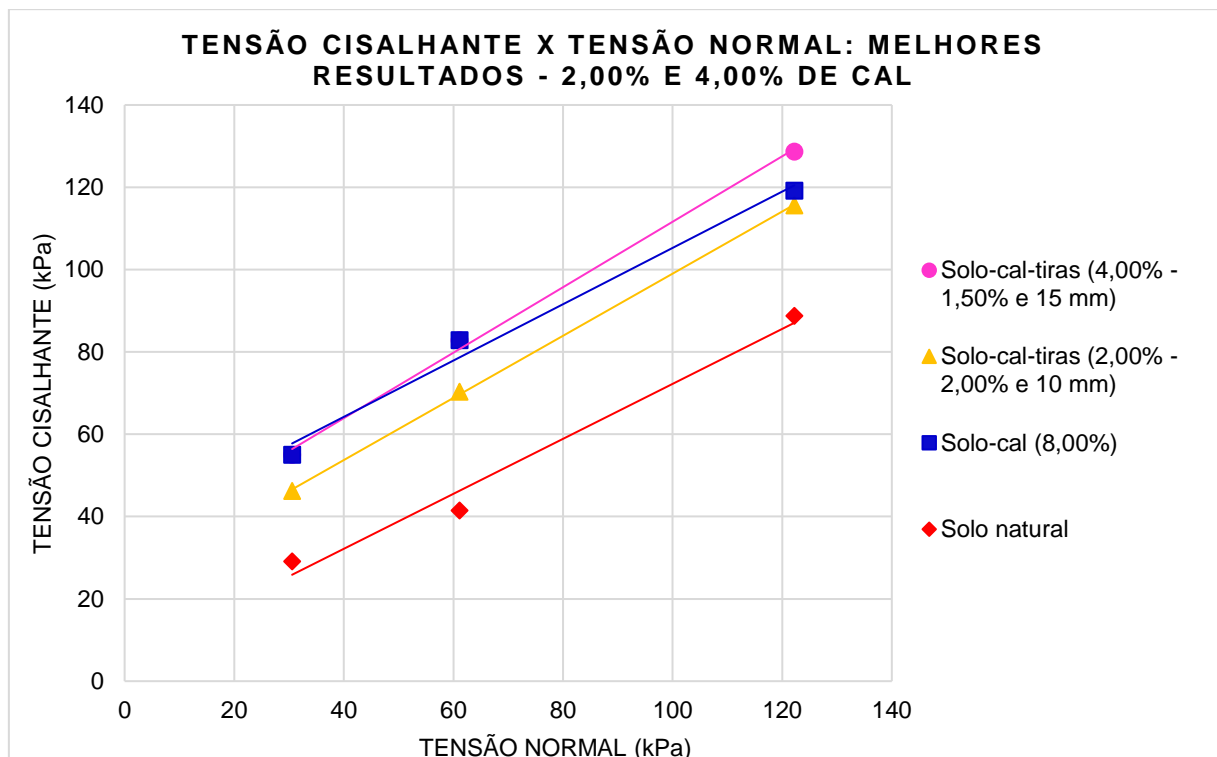
parâmetro ótimo, quando se utiliza 4% de cal. Esse compósito conseguiu, inclusive, apresentar resistência ao cisalhamento superior ao melhor compósito solo-cal, sendo este, o solo-cal com teor de 8% de cal, como evidenciado na Figura 23.

Atentando-se para a Figura 22, ao comparar o compósito solo-cal com 8% de cal com os compósitos solo-cal-tiras com 4% de cal, nota-se que a ductilidade do compósito solo-cal não foi tão afetada com o incremento das tiras. Como mencionado anteriormente, compósitos com teor de cal superior a 4% apresentaram ruptura frágil.

### 5.3.3 Melhores resultados: solo-cal-tiras com 2% e 4% de cal e diferentes comprimentos e percentuais de tiras

A Figura 5.24 mostra as envoltórias de resistência ao cisalhamento desenvolvidas pelo solo natural, pelo compósito solo-cal com 8% de cal e pelos compósitos solo-cal-tiras que apresentaram os melhores resultados.

**Figura 5.24** - Envoltórias de resistência: solo natural, melhor compósito solo-cal e melhores compósitos solo-cal-tiras com 2% e 4% de cal.



Na Figura 5.24 estão apresentados os melhores resultados obtidos para os compósitos solo-cal-tiras com 2 e 4% de cal, sendo eles: Solo-cal-tiras com 4% de cal e 1,5% de tiras de 15 mm e solo-cal-tiras com 2% de cal e 2% de tiras de 10 mm, sendo estes os parâmetros ótimos estabelecidos.

Ainda, atentando-se para a Figura 5.24, ao comparar com o solo natural é possível ver o significativo ganho de resistência com a adição de cal e tiras ao solo.

Além dos inúmeros benefícios adquiridos pela destinação adequada de um resíduo, a utilização das tiras de PET junto ao solo, possibilitou reduzir a quantidade do agente cimentante (cal) e produzir um compósito de maior resistência e maior ductilidade.

## 6 CONCLUSÕES

Baseado na análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, foram elencadas as principais conclusões obtidas nesta pesquisa:

- A adição da cal ao solo arenoso apresentou resultados positivos ao melhorar sua resistência ao cisalhamento. De modo geral, os melhores resultados foram obtidos com os maiores teores de aditivo, destacando-se os compósitos solo-cal com 8% e 10% de cal. No entanto, para teores de cal acima de 8%, começou a ocorrer uma queda na resistência. A inclusão de cal ao solo promoveu um aumento significativo no intercepto coesivo, indicando uma tendência de melhora do parâmetro com o aumento da quantidade de aditivo. O ângulo de atrito interno foi menos afetado com a adição e variação do teor de cal. Com a adição de teores de cal de 4% ou mais, o comportamento do solo se modificou e tendeu a apresentar ruptura frágil.
- A adição de tiras de PET ao compósito solo-cal apresentou resultados superiores em relação ao solo natural. Em relação ao solo-cal, sem tiras, os resultados foram variados, onde houve algumas melhoras e outras piores na resistência, conforme se variou os comprimentos e teores de tiras. O parâmetro ótimo de solo-cal-tiras, com 2% de cal, foi obtido para as tiras com comprimento de 10 mm em teor de 2%, o qual apresentou resultados semelhantes aos compósitos sem tiras e com maiores teores de cal, mais especificamente, o solo-cal com 6% de cal. O parâmetro ótimo de solo-cal-tiras, com 4% de cal, foi obtido para as tiras com comprimento de 15 mm e teor de 1,5%, o qual apresentou resultados superiores aos compósitos sem tiras e com maiores teores de cal, mais especificamente, o solo-cal com 8% de cal. Em alguns casos, a inclusão de tiras ao solo-cal modificou o comportamento da curva tensão-

deformação, conferindo uma ruptura plástica, principalmente com a inclusão de tiras de maior comprimento, com diminuição significativa da queda de tensão após o pico de resistência, indicando que estes elementos de reforço podem promover um controle da amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito.

- De modo geral, a inclusão de tiras no comprimento e porcentagem ótimos ao solo-cal se mostrou uma alternativa interessante para melhorar as propriedades mecânicas do solo analisado, sem necessidade do uso de maiores quantidades de aditivo cimentante. A adição de cal e tiras ao solo arenoso mostrou-se uma excelente opção para aumentar a resistência e deformabilidade do solo natural, apresentando alto potencial de aplicação desses materiais na construção civil ao fornecer um material compósito com alta resistência, boa ductilidade e uma alternativa altamente sustentável.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKOTO, B. K. A. The effect of repeated loading on the ultimate unconfined compressive strength of a lime-stabilized laterite. *Engineering Geology*, n. 23, p. 125-135, 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), p. 714-725, 2016.

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

AMANN, K. A. P.; STEGLICH, C. F. O.; BERGAMINO G.; CAMPOS, F.; SANTOS, D. Estacas de solo-cimento plástico para fundações de pequeno porte. In: *ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022*. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estacas-de-solo-cimento-plastico-para-fundacoes-de-pequeno-porte?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3039: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, 2008.

\_\_\_\_\_. ASTM D3080: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, 2011.

\_\_\_\_\_. ASTM D792: Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement, 2020.

ANATER, G. A.; ZAMPIERI, L. Q.; BERNARDI, A. C.; NIENOV, F. A.; LUVIZÃO, G. Estudo da dosagem e comportamento do mecânico de solo-cimento autoadensável com variação no teor de cimento e água. In: *ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022*. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estudo-da-resistividade-eletrica-e-comportamento-mecanico-de-solo-cimento-autoad?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

ANDRADE JÚNIOR, A. C.; JOHANN, A. D. R.; MENEGAZZO, M. Resistência à compressão de um solo argiloso estabilizado com cal e cinza de casca de arroz. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/resistencia-a-compressao-de-um-solo-argiloso-estabilizado-com-cal-e-cinza-de-cas?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 set. 2023.

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, p. 372-381, 2015.

ARAGÃO, J. C.; PINTO, U. M. S. L.; ALMEIDA, M. S. S.; SANTOS, J. H. T.; COSTA, W. G. S. Estudo de um solo estabilizado com cimento portland a partir do método de dosagem físico-química. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estudo-de-um-solo-estabilizado-com-cimento-portland-a-partir-do-metodo-de-dosage?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (ABIPET). 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://abipet.org.br/publicacoes/>>. Acesso em: 03 mai. 2023.

\_\_\_\_\_. NBR 6458: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017a.

\_\_\_\_\_. NBR 6459: solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017b.

\_\_\_\_\_. NBR 6471: cal virgem e cal hidratada - Retirada e preparação de amostra - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 6502: solos e rochas - terminologia. Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. NBR 7175: cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 7180: solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7181: solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 7182: solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

AYALA, G. R. L.; PEREIRA, G. F.; MATTOS, Y. M. P.; LOPES, E. F.; MENEZES, P. H. L. B.; MOURA, A. S. Estudo da resistência ao cisalhamento drenado em solo pedregulho arenoso - compactado a diferentes energias de compactação. Geocentro, Brasília, 2019.

AYELDEEN, M.; KITAZUME, M. Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement stabilized soft clay. Geotextiles and Geomembranes, v. 45, p. 592-602, 2017.

BALDOVINO, J. A. Adição de cal em um solo sedimentar de Curitiba: fatores que influenciam na resistência mecânica. In: ANAIS DO XIX COBRAMSEG, Salvador, 2018.

BENETTI, M.; IBEIRO, L. S.; HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C. Influência do índice porosidade/teor volumétrico de cal na resistência e na rigidez de um solo residual tratado com cal. In: ANAIS DO XIX COBRAMSEG, Salvador, 2018.

BENTO, P. F. Uso de cal e fibras na melhora de materiais para utilização em estruturas de pavimentos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BOTERO, E.; OSSA, A.; SHERWELL, G.; OVANDO-SHELLEY, E. Stressestrain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). Geotextiles and Geomembranes, 2015.

BRAUS, G. B.; CASTRO, A. P. A. Uso de solo-cimento em solos argilosos para pavimentação. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/uso-de-solo-cimento-em-solos-argilosos-para-pavimentacao?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

BUDINSKI, K. G. Engineering materials: properties and selection. New Jersey: Prentice Hall International, 5 ed., 653 p., 1996.

BUENO, B. S. Aspectos de estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias. Texto Sistematizado de Livre Docência em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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, v. 1, p. 878-884, San Diego, 1996.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. Estabilização de solos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, Edição 06, Ano 02, Vol. 01, p. 425-438, 2017. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estabilizacao-de-solos>>. Acesso em: 08 mai. 2023.

CAMPELLO, C. S.; MOURÃO, P. V.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; REZENDE, L. R. Estabilização com cal da mistura solo-revestimento asfáltico fresado. In: 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Anais, v.1, p. 453-468, Brasília, 2000.

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 em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

CASTRO, F. J. C. O. Contribuição ao conhecimento e determinação de reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização). Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

CHEVALIER, C.; HAGHIGHI, I.; HERRIER, G. Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. In: International Conference Scour and Erosion, 6, Paris, 2012.

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

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M.; PASA, G. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v. 128, n. 6, p. 462-472, 2002.

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.

CONSOLI, N. C.; ULBRICH, L. A.; PRIETTO, P. D. M. Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cement soil. In: *International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*. Rotterdam: A. A. Balkema, Rio de Janeiro, p. 481-486, 1997.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; PRIETTO, P. D. M. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v. 129, n. 1, p. 96-101, 2003.

CORREA, B. R. S.; TEBECHRANI NETO, A.; NASCIMENTO, L. V. Avaliação da resistência e rigidez com substituição parcial de uma areia natural por vidro moído. In: *ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022*. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/avaliacao-da-resistencia-e-rigidez-com-substituicao-parcial-de-uma-areia-natural?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

CORRÊA, P. K.; GODOI, C. S.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, F. Avaliação das características físico-mecânicas de um solo melhorado com cal hidratada. In: *ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022*. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/avaliacao-das-caracteristicas-fisico-mecanicas-de-um-solo-melhorado-com-cal-hidr?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 set. 2023.

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. 1-13, 2015.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 213: Solo - determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ME - 419: Pavimentação - Solo-cal - Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo - Método de ensaio. Brasília, 2019.

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.

EMARAH, D. A.; SELEEM, S. A. Swelling soils treatment using lime and sea water for roads construction. *Alexandria Eng. J.* 8 (5), p. 714-725, 2016.

FAGUNDES, L. S. Avaliação da resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2014.

FATAHI, B.; KHABBAZ, H.; FATAHÍ, B. Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynth. Int.*, v. 19, p. 252-262, 2012.

FATAHI, B.; LE, T. M.; KHABBAZ, H. Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynth. Int.*, v. 20, p. 286-300, 2013.

FAZZANI, V. M. F. C. Estudo comparativo de um solo laterítico e um solo saprolítico com cimento e cal. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FESTUGATO, L.; SILVA, A. P.; DIAMBRA, A.; CONSOLI, N. C.; IBRAIM, E. Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 46, p. 155-165, 2018.

FEUERHARMEL, M. R. Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FERREIRA, J. W. S.; CASAGRANDE, M. D. T.; TEIXEIRA, R. S. Efeito do teor e tipo de cimento no módulo de resiliência de misturas solo-cimento. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/efeito-do-teor-e-tipo-de-cimento-no-modulo-de-resiliencia-de-misturas-solo-cimen?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

FERREIRA, J. W. S.; MILANI, D. M.; CASAGRANDE, M. D. T.; TEIXEIRA, R. S. T. Aplicabilidade da dosagem físico-química em misturas solo-cimento para a pavimentação. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/aplicabilidade-da-dosagem-fisico-quimica-em-misturas-solo-cimento-para-a-pavimen?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

GARCÍA, I.; ACOSTA, D. B.; CATÓLICO, C. M.; ALDANA, D. A. Desempeño mecánico de suelos finos con cal para construcción de terraplenes. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/desempeno-mecanico-de-suelos-finos-con-cal-para-construccion-de-terraplenes?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 set. 2023.

GENTIL, G. A.; PEREIRA, E. L.; PITANGA, H. N.; GALINDO, J. R. F. Estabilização química de rejeito de minério de ferro com cimento portland para aplicação em pavimentos. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estabilizacao-quimica-de-rejeito-de-minerio-de-ferro-com-cimento-portland-para-a?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

GONÇALVES, L. M. O.; CARVALHO, F. S.; BRITO, M. M. F.; OLIVEIRA, A. C.; RAMBO, L. H. Análise das características mecânicas de solo cimento com adição de metacaulim. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-das-caracteristicas-mecanicas-de-solo-cimento-com-adicao-de-metacaulim?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

GRAY, D.; OHASHI, H. Mechanics of fibers reinforced in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 109, n. 3., p. 335-353. 1983.

GUIMARÃES, J. E. P. Estabilização de solos - Nova e importante aplicação da cal - Seus conceitos e suas vantagens. ABCP, Boletim n.º 1, São Paulo, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil. PINI, 2ª ed., São Paulo, 2002.

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 composites. In: J. Illston, *Construction Materials: their nature and behavior*. London: J. M. Illston/E e FN Spon, 2 ed., p. 359-403, 1994.

HEINECK, K. S. Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HEJAZIA, S. M.; SHEIKHZADEHA, M.; ABTAHIB, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 100-116, 2012.

HERRIER, G.; CHAVALIER, C.; FROUMENTIN, M.; CUISINER, O.; BONELLI, S.; FRY, J. Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures. In: *International Conference on Scour and Erosion*, 6, Paris, 2012.

HOLT, C. C.; FREER-HEWISH, R. J.; GHATAORA, G. S. The use of lime-treated British clays in pavement construction. Part 2: The effect of mellowing on the stabilization process. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport*, v. 141, p. 207-2016, 2000.

HOWARD, A. K.; BARA, J. P. Lime stabilization on Friant-Kern canal. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, 1976.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. *Soil stabilization - Principles and practice*. Butterworths, 374 p., Sidney, 1972.

IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L.; BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; RISSARDI, J. L. Adição de cal hidratada em três solos da Formação Guabirotuba: relação entre resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral In: *ANAIS DO XIX COBRAMSEG*, Salvador, 2018.

JOHANN, A. D. R.; CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V. Análise da influência da sucção matricial na resistência à compressão simples de um solo siltoso estabilizado com cal. In: *ANAIS DO XIX COBRAMSEG*, Salvador, 2018.

KALKAN, E. Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils. *Appl. Clay Sci.* S 80-81 (8), p. 117-125, 2013.

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

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*, San Diego, v. 1, p. 868-877, 1996.

LITTLE D. N. Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. Summary of Findings. Prepared for The Nacional Lime Association, v. 1, 1999.

LOCH, F. C.; BALDISSERI, F.; CAMARINI SEGUNDO, L.; PEJON, O. J. Avaliação do comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de misturas de solo arenoso e cimento com o uso de planejamento fatorial de experimentos. In: *ANAIS DO XX COBRAMSEG*, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/avaliacao-do-comportamento-dos-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-mist?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

LOPES, A. A. F.; MUSSE, A. C. N.; MOREIRA, D. F.; BASTOS, J. B. S.; FARIAS, T. R. L. Estabilização de solo areno-argiloso com cinza volante e cal. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estabilizacao-de-solo-areno-argiloso-com-cinza-volante-e-cal?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 set. 2023.

LÓPEZ-LARA, T.; HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, J. B.; HORTA-RANGEL, J.; ROJAS-GONZÁLEZ, E.; LÓPEZ-AYALA, S.; CASTAÑO, V. M. Expansion reduction of clayey soils through surcharge application and lime treatment, case stud. Construction Materials, v. 7, p. 102-109, 2017.

LOVATO, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 164 p., 2004.

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

LUCENA, A. L. P.; BRUGNARA, C. M. Estabilização de sub-bases e subleitos com emprego de cal. In: XI Reunião Anual de Pavimentação, Anais, Campinas, 1970.

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

MARÇAL, R. Avaliação de parâmetros de resistência de solos com fibras de polipropileno reciclado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração: Geotecnia) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

MARÇAL, R.; LODI, P. C., CORREIA, N. S.; GIACHETI, H. L.; RODRIGUES, R. A.; MCCARTNEY, J. S. Reinforcing effect of polypropylene waste strips on Compacted lateritic soils. Sustainability, 12, 9572, 2020.

MENDES, G. C. M.; AGUIAR, M. F. P.; SOUSA, V. B.; OLIVEIRA, M. F.; BASTOS, I. J. F. S. Influência da utilização de solo-cimento na capacidade de carga de fundações superficiais. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/influencia-da-utilizacao-de-solo-cimento-na-capacidade-de-carga-de-fundacoes-sup?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

MEURER, P. H. S.; PASCOAL, P. T.; MELLO, L. B.; SAGRILO, A. V.; BARONI, M. Avaliação do efeito de cimento em solo de Rondonópolis - MT para aplicação em pavimento flexível. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/avaliacao-do-efeito-de-cimento-em-solo-de-rondonopolis-mt-para-aplicacao-em-pavi?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

MICHALOWSKI, R. L.; CERMAK, J. Triaxial compression of sand reinforced with fibers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, p. 125-136, 2003.

MILANI, D. M.; FERREIRA, J. W. S.; MANSANO, A. P.; SANTOS, G. M.; TEIXEIRA, R. S. Aplicabilidade da dosagem físico-química na estabilização de misturas solo-cimento para diferentes solos. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/aplicabilidade-da-dosagem-fisico-quimica-na-estabilizacao-de-misturas-solo-cimen?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

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

NATARAJ, M. S.; ADDULA, H. R.; McMANIS, K. L. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: International Symposium on Environmental Geotechnology, Proceedings Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v. 1, p. 826-835, San Diego, 1996.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (NLA). Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. 2004. Disponível em: <<https://www.lime.org/documents/other/MechEmpPavement.pdf>>. Acesso em: 06 mai. 2023.

NETO, A. T.; HEIDEMANN, M.; NIERWINSKI, H. P. Estabilização de um solo arenosiltoso com matéria orgânica usando cal e cimento In: ANAIS DO XIX COBRAMSEG, Salvador, 2018.

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, 1991.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. Livros Técnicos e Científicos, 2 ed., 378 p., Rio de Janeiro, 1995.

OSINUBI, K. J. Influence of compactive efforts and compaction delays on lime-treated soil. Journal of Transportation Engineering, March/April, 1998.

PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. Revista Matéria, v. 21, n. 02, p. 437-449. 2016.

PRADO, S. C.; AGUIAR, M. F. P.; MENDES, G. C. M.; ESPÍNOLA, I. H.; BASTOS, I. J. F. S. Estudo comparativo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de amostras de solo-cimento. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estudo-comparativo-dos-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-amostras-de?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, J. Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils. Transportation Research Record, Washington D. C., n. 1652, p. 215-227, 1999.

QUARIGUASI, J. B. F.; GONÇALVES, H. B. B.; OLIVEIRA, F. H. L.; AGUIAR, M. F. P. Estudo do comportamento de misturas de solo, cal e fibras de polipropileno para uso em pavimentos rodoviários. 20ª RPU - Reunião de Pavimentação Urbana. 6ª Expo Pavimentação. Florianópolis, 2017.

QUARIGUASI, J. B. F.; GONÇALVES, H. B. B.; OLIVEIRA, F. H. L.; AGUIAR, M. F. P. Estudo da capacidade de suporte da estabilização de solos para pavimentação rodoviária. In: ANAIS DO XIX COBRAMSEG, Salvador, 2018.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. Soil properties affecting the lime stabilization of red tropical soils from North East Brazil. These of Doctorate - Univerity of Leeds, Leeds, England, 344 p., 1979.

REGALIN JÚNIOR, G.; NIENOV, F. A.; ZAMPIERI, L. Q.; LUVIZÃO, G.; CONTINI, M. Estudo para utilização de resíduo de celulose e papel no melhoramento de solo para o uso em obras geotecnias. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estudo-para-utilizacao-de-residuo-de-celulose-e-papel-no-melhoramento-de-solo-pa?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

ROCHA, G. S.; CORTE, G. D.; PITANGA, H. N.; SILVA, C. H. C.; MENDONÇA, E. P. S.; LIMA, D. C. Deformabilidade das misturas solo-cal. In: ANAIS DO XIX COBRAMSEG, Salvador, 2018.

ROSA, A. D. Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SALIMI, K.; GHAZAVI, M. Soil reinforcement and slope stabilisation using recycled waste plastic sheets. Geomechanics and Geoengineering. An International Journal. 2019.

SANTOS, A. P. S. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 125 p., 2004.

SANTOS JUNIOR, R. D.; SILVA, J. L. Desempenho à compressão simples e diametral de misturas solo-cimento reforçadas com fibras de polipropileno e aço. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/desempenho-a-compressao-simples-e-diametral-de-misturas-solo-cimento-reforcadas?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

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

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

SILVA, E. B.; BARBOSA, T. S.; SOUZA FILHO, H. L. Análise de estabilização do solo com cal e cimento para camada primária de uma estrada não pavimentada de Ceraíma-BA. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-de-estabilizacao-do-solo-com-cal-e-cimento-para-camada-primaria-de-uma-e?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 set. 2023.

SILVA, J. C.; SILVANI, C.; SOUSA, N. S.; ARRUDA, S. M. Dosagem de solo-cimento para reforço de base de fundações superficiais. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/dosagem-de-solo-cimento-para-reforco-de-base-de-fundacoes-superficiais?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

SILVA, M. F. Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 118 p., São Carlos, 2016.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil. *Ground Improvement*, n. 2, p. 27-32, 1998.

SILVEIRA, M. R. Efeito da inclusão de tiras poliméricas de polietileno tereftalato e da adição de cimento na resistência mecânica de solo arenoso laterítico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração: Geotecnia) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 117 p., 2019.

SILVEIRA, M. R.; LODI, P. C.; CORREIA, N. S.; RODRIGUES, R. A.; GIACHETI, H. L. Effect of recycled polyethylene terephthalate strips on the mechanical properties of cement-treated lateritic sandy soil. *Sustainability*, 12, 9801, 2020.

SILVEIRA, M. R.; ROCHA, S. A.; CORREIA, N. S.; RODRIGUES, R. A.; GIACHETI, H. L.; LODI, P. C. Effect of polypropylene fibers on the shear strength-dilation behavior of compacted lateritic soils. *Sustainability*, 13, 12603, 2021.

SOMENSI, T. C.; TOGNI, G.; MACHADO, M. H.; MATTOS, J. R. G.; GAUER, E. A. Efeito do teor de cimento em um solo residual estabilizado. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/efeito-do-teor-de-cimento-em-um-solo-residual-estabilizado?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

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

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

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

TEIXEIRA, W. Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

TENÓRIO, E. A. G.; SILVANI, C.; RAMALHO, L. A. M.; BRAZ, R.; AGUIAR, P. A. Avaliação da resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com cimento portland e resíduo industriais. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/avaliacao-da-resistencia-a-compressao-simples-de-um-solo-expansivo-estabilizado?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

TEODORO, J. M. Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). Lime stabilization, reactions, properties, design and construction. Washington: TRB, 58 p., 1987.

TSUGAWA, J. K.; PEREIRA, K. F. S.; BOSCOV, M. E. G. Influence of lime on the undrained shear strength of water treatment sludge from Cubatão: miniature vane and fall-cone tests. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/influence-of-lime-on-the-undrained-shear-strength-of-water-treatment-sludge-from?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 set. 2023.

UCHÔA, L. F.; GONDIM, L. M. Análise da variação da resistência a compressão simples de um solo plástico estabilizado com resíduo de gesso acartonado e cal. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-da-variacao-da-resistencia-a-compressao-simples-de-um-solo-plastico-esta?lang=pt-br>>. Acesso em: 11 set. 2023.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). Earth Manual. United States Department of the Interior, Part 1, 3 ed., Denver, 1998.

VENDRUSCOLO, M. A. Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VENSON, G. I.; SOUSA, P. G. B.; MOTA, A. L. F. Uso da razão porosidade por teor volumétrico na estimativa do comportamento mecânico de um solo argiloso com adição de cimento. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/uso-da-razao-porosidade-por-teor-volometrico-na-estimativa-do-comportamento-meca?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

XAVIER, J. M.; SOUZA NETO, J. B.; BANDEIRA, A. P. N. Estabilização de um solo para uso em camadas de pavimento utilizando resíduos de construção e demolição

(RCD) e cimento portland. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/estabilizacao-de-um-solo-para-uso-em-camadas-de-pavimento-utilizando-residuos-de?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.

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*, v. 172, p. 300-308, 2018.

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

ZAMPIERI, L. Q.; ROCHA, G. R.; NIENOV, F. A.; LUVIZÃO, G. Análise da resistência mecânica e sucção mátrica de um solo residual fino artificialmente cimentado, com variações de porosidade e teor de umidade. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-da-resistencia-mecanica-e-succao-matrica-de-um-solo-residual-fino-artifi?lang=pt-br>>. Acesso em: 10 set. 2023.