

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE POLIPROPILENO
NA RESISTÊNCIA EFETIVA DE UM SOLO ARGILOSO

SABRINA ANDRADE ROCHA

SÃO CARLOS
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE POLIPROPILENO
NA RESISTÊNCIA EFETIVA DE UM SOLO ARGILOSO**

SABRINA ANDRADE ROCHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Prof^{fa}. Dr^a. Natália de Souza Correia

SÃO CARLOS

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

ROCHA, SABRINA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE POLIPROPILENO
NA RESISTÊNCIA EFETIVA DE UM SOLO ARGILOSO / SABRINA
ROCHA. -- 2019.

120 f.: 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador: NATÁLIA DE SOUZA CORREIA

Banca examinadora: EDMUNDO ROGÉRIO ESQUÍVEL, PAULO
CESAR LODI

Bibliografia

1. SOLO-FIBRA. 2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO. 3.
MÉTODOS DE PREVISÃO. I. Orientador. II. Universidade Federal de
São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SlIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Sabrina Andrade Rocha, realizada em 28/06/2019:

Profa. Dra. Natália de Souza Correia
UFSCar

Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel
EESC/USP

Prof. Dr. Paulo Cesar Lodi
UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por estar sempre ao meu lado iluminando meu caminho e pensamentos e por nunca permitir que eu desistisse de alcançar meus objetivos e sonhos, apesar de todos os percalços.

Aos meus pais por entenderem a minha ausência, pelas orações e por sempre acreditarem em meu potencial.

Ao Danilo pelo imenso apoio, compreensão, incentivo e por torcer para a realização deste sonho tanto quanto eu.

À empresa Geominas pelo incentivo à pesquisa, por disponibilizar equipamentos e recursos para a realização dos ensaios. Em especial, agradeço ao Diretor Paulo Henrique e Gerente Petrus Daniel pela oportunidade de trabalho e pelo crescimento profissional e pessoal durante minha jornada em Carajás.

Aos engenheiros Thiago Brienne e Higor Coelho, pelas discussões e opiniões sobre os temas abordados neste trabalho, pelo apoio na execução dos ensaios e principalmente pela amizade e companheirismo durante nossa jornada de trabalho em Carajás.

A amiga Marina Carvalho, pelo carinho, companheirismo e ensinamentos durante minha jornada em São Carlos. Agradeço imensamente a Deus por te colocado você no meu caminho. Aprendi tanto contigo!

A professora e orientadora Dr. Natália Correa, pela paciência, ensinamentos e contribuição para a realização dessa pesquisa.

Ao professor Dr. Cláudio Henrique Silva pelo imenso apoio ao abrir as portas do laboratório de geotecnia da UFV para que eu pudesse realizar os ensaios triaxiais e pelas diversas discussões e ensinamentos transmitidos durante a pesquisa.

Ao grupo de pesquisa INFRAGEO que sempre estiveram à disposição para me ajudar na realização desta pesquisa e por disponibilizarem o laboratório e recursos para a realização dos ensaios.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSCar e colegas e funcionários do LabGeo pelos ensinamentos transmitidos durante essa jornada.

RESUMO

O uso de solo-fibra tem sido reconhecido como viável técnica de melhoramento de solos em diversas aplicações geotécnicas. No entanto, as pesquisas existentes não estabeleceram ainda os mecanismos fundamentais que controlam o comportamento de misturas de argila-fibra e as condicionantes que podem afetar seu desempenho. Por outro lado, nota-se também um crescente aumento no desenvolvimento de metodologias de cálculo para previsão do comportamento solo-fibra, bem como uso de modelos constitutivos baseados em propriedades isoladas de resistência do solo e da fibra. Entretanto, poucas pesquisas avaliaram a efetividades dos métodos disponíveis e quais são as peculiaridades que podem afetar os resultados obtidos. Neste contexto, o presente trabalho busca contribuir para o entendimento do comportamento de resistência e deformabilidade de um solo argiloso melhorado com a inclusão de fibras curtas de polipropileno reciclado, por meio de ensaios de compressão uniaxial não confinada, resistência ao cisalhamento direto, bem como resistência à compressão triaxial (drenada e não drenada). Além disso, a pesquisa visou avaliar a efetividade de alguns métodos de previsão de resistência solo-fibra. Esta pesquisa evidenciou, em todos os ensaios, que as fibras melhoram a resistência ao cisalhamento do solo argiloso, aumentam ductilidade e melhoram a rigidez inicial. Verificou-se também que os mecanismos de interação entre o solo e as fibras, e por consequência a resistência ao cisalhamento do compósito, não foram significativamente influenciados pela condição de drenagem ou pelo desenvolvimento de pressões neutra durante o cisalhamento, uma vez que os valores de resistência ao cisalhamento efetivo para a condição de ruptura drenada e não drenada foram próximos. E quanto aos métodos de previsão de resistência ao cisalhamento, tanto em termos de tensões totais como efetivas, apresentaram pouca discrepância em relação aos resultados obtidos experimentalmente, mas verifica-se que os coeficientes de interação solo-fibra influenciam fortemente nos resultados de previsibilidade e devem ser analisados de forma mais efetiva para diminuir as discrepâncias capitadas nesta pesquisa.

Palavras-chave: solo-fibra, fibra polimérica, resistência ao cisalhamento, ensaios triaxiais, métodos de previsão

ABSTRACT

The use of soil-fiber has been recognized as a viable technique of soil improvement in numerous geotechnical applications. However, existing research has not yet established the fundamental mechanisms controlling the behavior of clay-fiber mixtures and the constraints that may affect their performance. On the other hand, there is a growing increase in the development of methodologies for predicting soil-fiber behavior, as well as the use of constitutive models for mixtures based on individual properties soil and fibers. However, few studies have evaluated the effectiveness of the methods available and the peculiarities that may affect the results. In this context, the present work aims to contribute to the understanding of the shear strength and deformability behavior of a clayey soil with the inclusion of short fibers from recycled polypropylene, through unconfined uniaxial compression tests, direct shear strength and triaxial compression (drained and undrained) tests. In addition, the research evaluated the effectiveness of some soil-fiber shear strength prediction methods. This research evidenced that, in all tests, the fibers improved the shear strength of the clayey soil, increasing its ductility and initial stiffness. It was also verified that the interaction mechanisms between the soil and the fibers, and consequently the shear strength of the composite, were not influenced by the drainage condition or by the development of pore water pressures during shearing, since values of effective shear strength at failure in drained condition and undrained condition were similar. Regarding the shear strength prediction methods, both in terms of total and effective stresses, analyses presented few discrepancies in relation to the results obtained experimentally, but it is verified that the soil-fiber interaction coefficients strongly influence the results of predictability and must be analyzed in a more effective way to reduce the discrepancies capitalized in this research.

Key-words: soil-fiber, polymeric fiber, shear strength, triaxial tests, prediction methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Aplicação das fibras de polipropileno na construção de aterros de rodovia (Gregory, 2006). .	20
Figura 2.2. Elementos de solo com e sem reforço (Adaptado de WHEELER, 1996).	22
Figura 2.3. Padrão de deformação das amostras: (a) solo argiloso natural não reforçado; (b) solo argiloso-fibra polimérica (FREILICH et al., 2010).....	22
Figura 2.4. Croqui do equipamento de cisalhamento direto utilizado no ensaio de arrancamento (Adaptado de LI e ZORNBERG, 2006).	23
Figura 2.5. Relação entre o coeficiente de interação do solo arenoso e fibras de polipropileno e a pressão de confinamento (Adaptado de LI e ZORNBERG, 2006).	24
Figura 2.6. Imagens de MEV de solo reforçado com 0,25% de fibras: (a) solo-fibra com ampliação de 1500x, (b) solo com ampliação de 1500x; (c) superfície de fibra com ampliação de 2000x; (d) distribuição de fibra na matriz do solo; (e) sulcos formados na superfície da fibra (TANG et al., 2007).	24
Figura 2.7. Esboço do comportamento mecânico na interface entre a superfície da fibra e a matriz do solo-fibra (TANG et al., 2007)	25
Figura 2.8. O efeito "ponte" do reforço de fibras no solo impede o desenvolvimento de trincas de tração (TANG et al., 2007).....	25
Figura 2.9. Efeito do teor de fibras na resistência à compressão (Adaptado de XIAO et al., 2014).....	27
Figura 2.10. Amostras de argila com inclusões de fibras de borrachas: (a) seção vertical; (b) seção horizontal (ÖZKUL e BAYKAL, 2007).....	28
Figura 2.11. Amostras de solo-fibra cortadas para avaliar a orientação das fibras após a compactação (EKINCI e FERREIRA, 2012).	29
Figura 2.12. Orientação 3D das fibras em uma amostra cortada (EKEINCI e FERREIRA, 2012).....	29
Figura 2.13. Disposição fibra/fissura idealizada (Adaptado TAYLOR, 1994).....	30
Figura 2.14. Efeito da inclusão de fibras na envoltória de ruptura da areia (Adaptado de MAHER e GRAY, 1990).....	31
Figura 2.15. Variação de tensão desvio e variação volumétrica com a deformação axial em solo argiloso com inclusão de fibras de cânhamo (DIAB et al., 2018).	32
Figura 2.16. Influência da adição de fibras de polipropileno à argila (FEUERHEMEL, 2000).....	33
Figura 2.17. Efeito da inclusão de fibras no comportamento tensão-deformação (LI e ZORNBERG, 2013).	34
Figura 2.18. Evolução da contribuição das fibras de polipropileno na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso (LI, 2005).	34
Figura 2.19. Resultados de ensaios triaxiais em amostras de argila e fibras naturais, compactadas estaticamente e dinamicamente (Adaptado de DIAB et al., 2018).....	37
Figura 2.20. Resistência à compressão não confinada de argila reforçada com diferentes teores de fibra (adaptado de NATARAJ e MCMANIS,1997).....	38

Figura 2.21. Efeito do teor de fibras e do comprimento na resistência à tração por compressão diametral de solo argiloso (Adaptado de TRAN et al., 2018).....	38
Figura 2.22. Montagem geral do teste na célula triaxial e amostra posicionada sob hastes de metal para o ensaio de compressão diametral (Adaptado de EHRLICH e ALMEIDA, 2019).....	39
Figura 2.23. Resistência à tração por compressão diametral e condutividade hidráulica versus deformação radial do solo natural e das misturas solo-fibra. (Modificado de EHRLICH e ALMEIDA, 2019)...	40
Figura 2.24. Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb de argila reforçada com diferentes teores de fibra (Adaptado de NATARAJ e MCMANIS, 1997).....	40
Figura 2.25. Tensão Cisalhante <i>versus</i> Tensão Normal em solo argiloso com a inclusão de fibra reciclada de PET (CASTILHO, 2017).	41
Figura 2.26. Curva de compactação da argila natural e das misturas de argila com a inclusão de fibras coco (BOLAÑOS e CASAGRANDE, 2016).	41
Figura 2.27, Resultados do ensaio triaxial consolidado drenado: (a) solo natural; (b) solo-fibra de 12 mm; (c) solo-fibra de 36 mm; (d) envoltória de resistência (Adaptado de FEUERHEMEL, 2000)	43
Figura 2.28. Envoltória de resistência obtida no triaxial CU e CD com solo argiloso e fibra de polipropileno (Fonte: FREILICH et al., 2010).....	44
Figura 2.29. Pressão neutra gerada versus deformação axial para amostras reforçadas e não reforçadas (Adaptado de FREILICH et al., 2010).....	45
Figura 2.30 Resultado do ensaio triaxial CU em solo argiloso com fibras de polipropileno: (a) tensão-deformação; (b) poropressão gerada no cisalhamento (Adaptado de LI, 2005).	46
Figura 2.31. Resultado do ensaio triaxial CU em solo argiloso com fibras de pneu: (a) tensão-deformação; (b) Pressão neutra gerada (Adaptado de ÖZKUL, 2007).....	46
Figura 2.32. Resultado do ensaio triaxial em solo argiloso com fibras de pneu: (a) Compressão triaxial CU; (b) Compressão triaxial CD (Adaptado de ÖZKUL, 2007).	47
Figura 2.33. Relação de tensão efetiva e tensão de desvio versus deformação axial de amostras de solo natural e solo-fibra para diferentes tensões de confinamento: (a) 50 kPa; (b) 100 kPa; (c) 200 kPa (Modificado de MIRZABEBEI, 2017).	48
Figura 2.34. Comparação entre os resultados de resistência ao cisalhamento experimentais e previstos pelo método de Zornberg (2002) (Adaptado de LI e ZORNBERG, 2003).....	50
Figura 2.35. Comparação entre os resultados de resistência ao cisalhamento experimentais e previstos pelo método de Jamei et al (2013). (Adaptado de Jamei et al, 2013).	52
Figura 2.36. Comparação qualitativa dos resultados de trajetória de tensões: (a) previsão do modelo; (b) dados experimentais de Freilich et al. 2010 (Adaptado de DIAMBRA e IBRAIM, 2013)	53
Figura 2.37. Dados experimentais e previstos para resposta de resistência ao cisalhamento de solo reforçado com fibras (a) Comparação com dados experimentais de Babu e Chouksey, 2010. (b) Comparação com dados experimentais de Özkul e Baykal, 2007 (Adaptado de MIRZABEBEI et al., 2017)	54
Figura 3.1. Curva granulométrica do solo argilo-arenoso utilizado nesta pesquisa.....	55
Figura 3.2. Fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa.	56
Figura 3.3. Solo-Fibras misturados manualmente: (a) solo-fibra 0,25%; (b) solo-fibra 0,50%.....	58
Figura 3.4. Solo-Fibras misturados mecanicamente: (a) Solo-Fibra 0,10%; (b) Solo-Fibra 0,25%.	58

Figura 3.5. Ensaio de Resistência à compressão não confinada.	60
Figura 3.6. Ensaio de compressão triaxial: (a) montagem do corpo-de-prova na célula triaxial; (b) fase de saturação por percolação e por contrapressão.	61
Figura 3.7. Equipamento triaxial para execução dos ensaios.	62
Figura 4.1. Curvas de compactação na energia Proctor Normal do solo natural e das misturas solo-fibra.	63
Figura 4.2. Tensão axial <i>versus</i> Deformação.	66
Figura 4.3. Corpos de prova após a ruptura por compressão uniaxial: (a) solo natural; (b) solo-fibra 0,10%; (c) solo-fibra 0,25%. (d) Efeito “ponte” das fibras no solo.	67
Figura 4.4. Índice de fragilidade para o solo natural e misturas solo-fibra.	67
Figura 4.5. Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizados nas amostras de solo natural e misturas solo-fibra.	68
Figura 4.6. Curvas tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal do solo natural e das misturas solo-fibra para todas as tensões normais.	69
Figura 4.7. Corpos de prova após a ruptura por cisalhamento direto: (a) solo-fibra 0,10%; (b) solo-fibra 0,25%.	70
Figura 4.8. Curvas variação volumétrica <i>versus</i> deslocamento horizontal do solo natural e das misturas solo-fibra para todas as tensões normais.	71
Figura 4.9. Relação de tensão (τ/σ) <i>versus</i> ângulo de dilatação do solo natural e das misturas solo-fibra.	72
Figura 4.10. Envoltórias de resistência ao cisalhamento direto do solo natural e das misturas solo-fibra.	73
Figura 4.11. Orientação das fibras após a ruptura do corpo-de-prova do solo-fibra 0,25% por cisalhamento direto.	75
Figura 4.12. Variação volumétrica durante a etapa de adensamento do ensaio de compressão triaxial drenado.	76
Figura 4.13. Curvas ($\sigma_1 - \sigma_3$) <i>versus</i> deformação axial e curvas variação volumétrica <i>versus</i> deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.	77
Figura 4.14. Superposição das curvas ($\sigma_1 - \sigma_3$) <i>versus</i> deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada no ensaio CD.	78
Figura 4.15. Superposição das curvas variação volumétrica <i>versus</i> deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada, no ensaio CD.	78
Figura 4.16. Envoltórias de resistência ao cisalhamento drenada: (a) solo natural; Solo-fibra 0,10%; (c) Solo-fibra 0,25%.	80
Figura 4.17. Módulo de elasticidade drenado em função da tensão normal para as amostras de solo natural e solo-fibra 0,10% e 0,25%.	82
Figura 4.18. Corpos de prova do solo natural e das misturas solo-fibras 0,10% e 0,25% após a ruptura por compressão triaxial drenado.	82
Figura 4.19. Variação volumétrica durante a etapa de adensamento do ensaio de compressão triaxial não drenado.	83
Figura 4.20. Curvas ($\sigma_1 - \sigma_3$) <i>versus</i> deformação axial e curvas de pressão neutra <i>versus</i> deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.	84

Figura 4.21. Superposição das curvas ($\sigma_1 - \sigma_3$) versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada, no ensaio CU.	85
Figura 4.22. Superposição das curvas de pressão neutra versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada, no ensaio CU.	85
Figura 4.23. Envoltórias de resistência total ao cisalhamento não drenado do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%, no ensaio CU.	86
Figura 4.24. Envoltórias de resistência efetiva ao cisalhamento não drenado: (a) Solo natural; (b) Solo-fibra 0,10%; (c) Solo-fibra 0,25%, no ensaio CU.	87
Figura 4.25. Módulo de elasticidade não drenado em função da tensão normal para as amostras de solo natural e solo-fibra 0,10% e 0,25%.	88
Figura 4.26. Corpos de prova do solo natural e das misturas solo-fibras 0,10% e 0,25% após a ruptura por compressão triaxial não drenada.	89
Figura 4.27. Superposição das curvas ($\sigma_1 - \sigma_3$) versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada: (a) condição drenada; (b) condição não drenada	90
Figura 4.28 . Superposição das trajetórias de tensões efetivas obtidas pelo ensaio CD e CU: (a) Solo natural; (b) Solo-Fibra 0,10%; (c) Solo-fibra 0,25%.	92
Figura 4.29. Valores de coesão do solo natural das misturas solo-fibras para todos os ensaios realizados.	95
Figura 4.30. Valores de ângulo de atrito do solo natural das misturas solo-fibras para todos os ensaios realizados.	95
Figura 5.1. Envoltórias de resistências ao cisalhamento efetiva previstas pelo método de Zornberg (2002) e comparação com resultados experimentais solo-fibra: (a) CD; (b) CU.	98
Figura 5.2. Influência da variação dos coeficientes de interação (C_i) na resistência ao cisalhamento efetiva prevista pelo método de Zornberg (2002) e obtida experimentalmente no ensaio triaxial CD: (a) Solo-fibra 0,10%; (b) Solo-fibra 0,25%.	99
Figura 5.3. Influência da variação dos coeficientes de interação (C_i) na resistência ao cisalhamento efetiva prevista pelo método de Zornberg (2002) e obtida experimentalmente no ensaio triaxial CU: (a) Solo-fibra 0,10%; (b) Solo-fibra 0,25%.	100
Figura 5.4. Aumento normalizado no ângulo de atrito e coesão efetivos obtidos pelos ensaios CD e CU e pelo método de Zornberg (2002).	101
Figura 5.5. Aumento normalizado do ângulo de atrito versus teor volumétrico de fibras.	104
Figura 5.6. Aumento normalizado da coesão versus teor volumétrico de fibras	104
Figura 5.7. Resultados de diferença nas tensões totais principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) obtidas pelo ensaio CU versus resultados calculadas pelo método de Jamei et al (2013): (a) Solo-fibra 0,10%; (b) Solo-fibra 0,25%	106
Figura 5.8. Diferença nas tensões totais principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) previsto pelo modelo de Jamei et. al (2013) versus a diferença nas tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) experimental. (Adaptado de Diab, 2018)	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Características geotécnicas do solo utilizado na pesquisa.	56
Tabela 3.2. Propriedades físicas das fibras de polipropileno.	57
Tabela 3.3. Programa experimental da pesquisa.	59
Tabela 4.1. Parâmetros ótimos de compactação do solo natural e das misturas solo-fibra.	64
Tabela 4.2. Resistência à compressão uniaxial do solo natural e das misturas solo-fibra.	65
Tabela 4.3. Tensões cisalhantes máxima (kPa) para o solo natural e misturas solo-fibra.	69
Tabela 4.4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento direto do solo natural e das misturas solo-fibra. ..	73
Tabela 4.5. Parâmetros de resistência ao cisalhamento drenado do solo natural e da mistura solo-fibra. ...	80
Tabela 4.6. Parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenado do solo natural e da mistura solo-fibra.	88
Tabela 4.7. Parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivo do solo natural e da mistura solo-fibra.	91
Tabela 4.8. Resumos dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo natural e das misturas solo-fibra obtidos na pesquisa.	94
Tabela 5.1. Ângulo de atrito e coesão efetivos obtidos pelos ensaios de compressão triaxial CD e CU e pelo método de previsão de Zornberg (2002).	101
Tabela 5.2. Dados experimentais de parâmetros utilizados no método de previsão de Zornberg (2002) em amostras de argila com a inclusão de fibras curtas de polipropileno.	102
Tabela 5.3. Ângulo de atrito e coesão efetivos obtidos nos ensaios de compressão triaxial e previstos pelo método de previsão de Zornberg (2002).	103
Tabela 5.4. Parâmetros para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenado pelo método de Jamei et al (2013).	106

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	OBJETIVOS.....	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.2.	Considerações iniciais	18
2.2.	Potenciais aplicações de solos melhorados com fibras.....	19
2.3.	Tipos de fibras	21
2.4.	Solo-fibra.....	21
2.5.	Fatores que influenciam a interação solo-fibra.....	26
2.5.1	Teor, comprimento e rugosidade das fibras.....	26
2.5.2	Orientação das fibras	27
2.5.3	Fator de forma das fibras e homogeneidade das misturas	29
2.5.4	Tensão confinante.....	30
2.5.5	Deformabilidade.....	33
2.5.6	Tamanho e método de compactação dos corpos de prova.....	35
2.6	Influência das fibras no comportamento geotécnico dos solos argilosos	37
2.7	Modelos de previsão de comportamento solo-fibra.....	48
2.8	Modelos constitutivos solo-fibra	53
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	55
3.1	Materiais e Métodos	55
3.1.1	Solo	55
3.1.2	Fibras.....	56
3.1.3	Preparação das amostras.....	57
3.1.4	Preparação dos corpos de prova	59
3.2	Programa Experimental	59
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	63
4.1	Compactação	63
4.2	Ensaio de compressão uniaxial não confinado	64
4.3	Ensaio de resistência ao cisalhamento direto	68
4.4	Ensaio de compressão triaxial	75
4.4.1.	Ensaio de compressão triaxial consolidado drenado (CD)	75
4.4.2	Ensaio de compressão triaxial consolidado não drenado (CU)	83
4.5	Comparação entre os ensaios de compressão triaxial drenado e não drenado.....	89
4.6	Análise da resistência ao cisalhamento	94

5.	APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA SOLO-FIBRA	97
5.1	Método de previsão de Zornberg (2002)	97
5.2	Método de previsão de Jamei et al (2013)	105
6.	CONCLUSÕES	108
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o uso de solo-fibra tem sido reconhecido como viável técnica de melhoramento de solos em inúmeras aplicações geotécnicas. Diversas pesquisas sobre a mecânica de solos com a inclusão de fibras vêm sendo realizadas, principalmente quanto a uma melhor compreensão dos fatores envolvidos na interação solo-fibra. No entanto, quando se compara a quantidade de pesquisas realizadas em solos granulares com o número de pesquisas utilizando solos finos, conclui-se que esta última é menos numerosa, e que estudos direcionados a explicar a interação entre as fibras e solos argilosos são ainda limitados.

De modo geral, as pesquisas vêm demonstrando que as fibras distribuídas aleatoriamente na matriz de solo têm como vantagem interceptar a zona potencial de ruptura, e através da mobilização da resistência à tração das fibras, melhora o comportamento tensão-deformação do solo, tornando a mistura mais dúctil. E com relação ao uso de solos argilosos e fibras (naturais ou sintéticas), pesquisas relatam alterações no comportamento de resistência à compressão e ao cisalhamento, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica e rigidez inicial. No entanto, cabe ressaltar que, a grande maioria dos estudos realizados utilizando-se solos finos concentrou-se em avaliar parâmetros de resistência e deformabilidade apenas à curto prazo.

Devido à maior complexidade relacionada ao mecanismo de interação das fibras em solos coesivos e do comportamento deste solo sob condições drenadas e não drenadas, há a necessidade de avaliações adicionais às existentes na literatura para o entendimento dos mecanismos de transferência de forças na interface entre as fibras e as partículas finas do solo. Neste caso, fatores como desenvolvimento de pressão neutra na interface, tendência à alteração de volume e taxa de deformação, resultam em diferentes resultados de resistência ao cisalhamento. De fato, as pesquisas não estabeleceram ainda os mecanismos fundamentais que controlam o comportamento de misturas de argila-fibra, ou as condicionantes que podem afetar seu desempenho.

Outra lacuna encontrada no universo solo-fibra é que para aplicação deste método de melhoramento em projetos, ainda se faz necessária a realização de ensaios de laboratório em amostras específicas para a mistura em questão, o que pode ser oneroso e

demorado. Mesmo com o desenvolvimento de modelos de previsão de resistência ou modelos constitutivos para o solo-fibra, estes para serem calibrados ou validados utilizam resultados de ensaios de laboratório, especialmente os ensaios triaxiais.

Neste contexto, o presente trabalho busca contribuir para o entendimento do comportamento de resistência e deformabilidade de um solo argiloso com a inclusão de fibras de polipropileno, por meio de ensaios de resistência à compressão (uniaxial e triaxial) e ao cisalhamento. Serão analisados, em especial, os resultados nas condições de saturação e drenagem estabelecidas nas aplicações práticas destes tipos de materiais, onde a influência das pressões neutras na interface, da alteração de volume durante o cisalhamento e da taxa de deformação são avaliados.

1.1. OBJETIVOS

A pesquisa apresentada tem como principal objetivo avaliar a influência da inclusão de fibras curtas de polipropileno, distribuídas de modo aleatório, na resistência ao cisalhamento de um solo argiloso de alta plasticidade, analisando-se em especial, o efeito das pressões neutras e o comportamento mecânico do solo. Especificamente, pretende-se avaliar, para diferentes teores de fibras:

- Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo natural e das misturas solo-fibra por meio de ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial (na condição drenada e não drenada), bem como avaliação do comportamento de resistência pós-pico;
- As pressões neutras dissipadas por meio de ensaios de compressão triaxial na condição drenada e as pressões neutras desenvolvidas por meio de ensaios de compressão triaxial na condição não drenada, ambos no solo natural nas misturas solo-fibra.
- O incremento de resistência à compressão do solo ocasionado pela inclusão das fibras, por meio de ensaios de resistência à compressão uniaxial;
- Comparação dos resultados dos ensaios de compressão triaxial com métodos de previsão de resistência solo fibra.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A inserção de elementos resistentes à tração numa matriz de solo, com objetivo de melhorar suas características mecânicas, é uma técnica há muito tempo conhecida e empregada. Civilizações antigas já utilizavam fibras naturais (raízes de plantas) para melhorar as propriedades geotécnicas dos solos em aplicações como muralhas, pavimentos e tijolos. Li (2005) relata que estudos com a adição de fibras poliméricas para melhoramento de solos iniciaram-se no final da década de 1980. De acordo com Ekinci e Ferreira (2012), o reforço de solo com elementos resistentes à tração é ainda uma prática comum em muitos países em desenvolvimento. Em concordância com as pesquisas citadas acima, Najjar et al. (2013) citam que o crescente interesse em entender o comportamento dos solos reforçados com fibras indica que esta tecnologia permanece como uma opção viável que poderá ser utilizada no futuro em uma ampla gama de aplicações geotécnicas.

Na última década, diversas pesquisas experimentais concentraram-se em avaliar a resposta de argilas com a inclusão de fibras discretas (ATTOM et al., 2009; VISWANADHAM et al., 2009; AL-MHAIDIB, 2010, FREILICH et al.; 2010; JIANG et al., 2010, BABU e CHOUKSEY, 2010, BABU e CHOUKSEY, 2011; MAHESHWARI et al., 2011, AMIR-FARYAR e AGGOUR, 2012, EKINCI e FERREIRA, 2012; PLÉ e LÊ, 2012, PRADHAN et al., 2012, DIAMBRA e IBRAIM, 2013; JAMEI et al., 2013; MALIAKAL e THIYYAKKANDI, 2013; MIRZABABAEI et al., 2013; QU et al., 2013; ANAGNOSTOPOULOS et al., 2014; NAJJAR et al., 2014; OTOKO 2014; WU et al., 2014, SONDURA e SENTHIL, 2015; DANG et al., 2016; DIAB et al. 2016; KHATRI et al. 2017; CASTILHO e RODRIGUES, 2018; DIAB et al., 2018; IBRAIM et al., 2018; EHRLICH e ALMEIDA, 2019). Especificamente, ensaios de resistência à compressão uniaxial, compressão triaxial em condições drenadas e não drenadas, cisalhamento direto e arrancamento foram realizados para estudar os efeitos da inclusão das fibras no comportamento de resistência e deformabilidade de solos argilosos.

Gregory et al (2006) relata que os solos argilosos constituem um real potencial para o uso prático e extensivo das fibras em aplicações geotécnicas, uma vez que muitos

taludes e encostas são constituídos por estes solos. Anagnostopoulos et al. (2014) enfatizam que, embora muito se tenha estudado sobre o comportamento de resistência de solos argilosos e fibras, não há ainda um consenso sobre o efeito das fibras no comportamento mecânico de solos finos. Zeynep et al. (2007) sugerem que maioria dos estudos se concentrou no comportamento da resistência de curto prazo e que, o comportamento de resistência e deformação de solos argilosos com fibras sob condições de carregamento saturadas e drenadas não foi amplamente estudado.

Desta forma, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica baseada em literatura nacional e internacional, sobre a técnica de inclusão de fibras em solos, com especial foco nos solos argilosos e fibras poliméricas, e seu comportamento em condições drenadas e não drenadas.

2.2. POTENCIAIS APLICAÇÕES DE SOLOS MELHORADOS COM FIBRAS

O uso de solo-fibra tem sido reconhecido como viável técnica de melhoramento de solos. Nas aplicações geotécnicas, a técnica de solo-fibra é indicada em aterros de estruturas de contenção, na melhoria da capacidade de carga de solos de fundação, na construção de aterros em solos moles. Em obras de transportes, a solução de solo-fibra pode ser aplicada na estabilização mecânica de subleitos e sub-bases, bem como camadas drenantes ou de absorção de vibrações em ferrovias. Em obras geoambientais, há indicação do uso de fibras no controle de condutividade hidráulica do solo, no melhoramento contra erosão, e na prevenção de *piping* (ZIEGLER et al. 1998; CHOUBANE et al. 2001; TANG et al. 2007; SHUKLA et al, 2017). Hejazi et al. (2012) relatam a melhoria no desempenho sísmico de estruturas geotécnicas com uso de fibras. Erlich et al. (2019) relatam ainda a potencial utilização de fibras na mitigação de trincas de retração em argilas compactadas em cobertura de aterros sanitários.

Gregory (2006) cita em sua pesquisa a aplicação de fibras de polipropileno, de 67 mm de comprimento, na construção de aterros de uma rodovia localizada em Dallas, no Texas. As fibras foram utilizadas para melhorar a capacidade de suporte dos solos argilosos utilizados para a construção dos aterros. Para tanto, os taludes que apresentaram alturas maiores que 4,7 metros e que possuíam inclinação igual ou maior que 4:1 (4 na horizontal e 1 na vertical) foram construídos com solo-fibra. Foram utilizados

aproximadamente 236.000 kg no projeto a uma taxa de aplicação de 3,6 kg por m³. A Figura 2.1 apresenta a aplicação das fibras em campo.



Figura 2.1. Aplicação das fibras de polipropileno na construção de aterros de rodovia (Gregory, 2006).

Em geral, a utilização de fibras para melhoramento do solo apresenta algumas vantagens em sua utilização em comparação aos reforços planares ou orientados, sendo elas:

- Manter a isotropia de resistência pela eliminação da presença de potenciais planos de fraquezas que podem se desenvolver em interfaces de reforços planares e orientados (MAHER e GRAY, 1990);
- Eliminar a profundidade ou comprimento ancoragem uma vez que as fibras são simplesmente misturadas dentro da massa do solo, enquanto os reforços planares necessitam comprimento de embutimento suficiente e/ou uma ancoragem projetada adequadamente para obter a resistência de arrancamento necessária (GREGORY, 2006);
- Usar equipamentos convencionais e métodos de compactação padrões para a mistura das fibras no campo e a compactação do compósito, com mínimo ou nenhum dano às fibras durante o processo (LI, 2005; GREGORY, 2006).

Ao contrário do uso de cal, cimento ou outros métodos de estabilização, o processo operacional, quando se utilizam as fibras, não é significativamente afetado pelas condições do tempo (LI, 2005).

2.3. TIPOS DE FIBRAS

Existem diversos tipos de fibras que podem ser utilizadas para melhoramento de solo. De modo geral, as fibras existentes e mais utilizadas podem ser classificadas em quatro grandes grupos: naturais (araucária, bambu, cana, coco e palmeira), artificiais (poliéster, poliamida, polietileno e polipropileno), minerais (vidro, carbono e amianto), metálicas, e recentemente as fibras recicladas (tais como as de carpete e pneus).

Segundo Caldeira (2012) algumas características devem ser consideradas na escolha da fibra, destacando-se: 1) a fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável; 2) não sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana; 3) apresentar características físicas e mecânicas adequadas ao tipo de aplicação. Para diversos autores, tais como Feuerhemel (2000), Heineck (2002), Casagrande (2005), Festugato (2008) e Girardello (2014) a definição do tipo de fibra a ser empregada no melhoramento dos solos irá depender das características da matriz e das características do material compósito resultante desejado. Assim, é necessário entender os mecanismos de interação do material compósito e a parcela de contribuição de cada uma das fases (solo e fibra) no comportamento geotécnico da mistura como um todo.

2.4. SOLO-FIBRA

O solo reforçado é um material compósito em que o solo é reforçado por elementos que podem suportar à tração. De acordo com Feuerhemel (2000) as fibras possuem alta resistência à tração e, introduzidas numa matriz de solo, passam a contribuir de forma efetiva quando estão submetidas aos esforços externos. Assim, quando a mistura é submetida a solicitações externas, o solo tende a mover-se em relação às fibras ocasionando tensões cisalhantes na interface solo/fibra (WHEELER, 1996). Neste sentido, a adição de fibras distribuídas aleatoriamente no solo pode melhorar a força de cisalhamento e o comportamento de deformabilidade do solo.

As fibras distribuídas aleatoriamente têm a vantagem de interceptar a zona potencial de ruptura, melhorando assim o comportamento tensão-deformação do solo. Além disso, a mobilização da resistência à tração das fibras aumenta a deformação de ruptura, fazendo com que a amostra de solo rompa de maneira dúctil (KHATRI et al., 2017). Na Figura 2.2 é possível observar a condição do solo natural e do solo fibroso quando solicitado por tensões externas e o nível de deformação em cada caso.

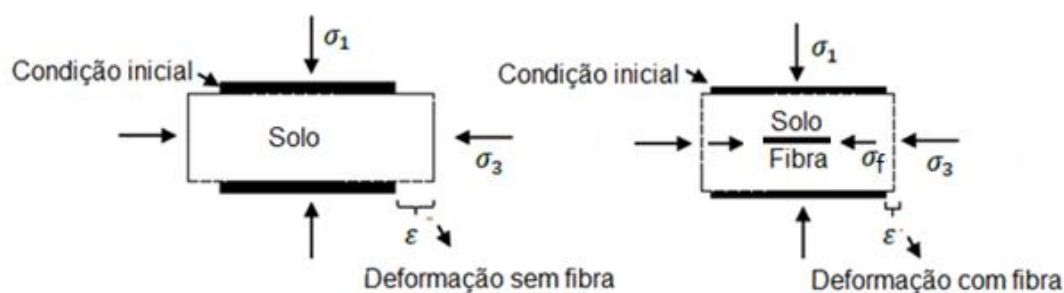


Figura 2.2. Elementos de solo com e sem reforço (Adaptado de WHEELER, 1996).

Na literatura encontram-se diversas pesquisas destinadas a avaliação do comportamento solo-fibra por meio de ensaios de compressão uniaxial não confinada (CONSOLI et al., 2012; PATEL e SINGH, 2014; OTOKO, 2014), ensaios triaxiais do tipo não consolidados não drenados (UU) (PLÉ e LÊ, 2012; JAMEI et al. 2013; DIAB et al., 2016; DIAB et al., 2018), do tipo consolidados não drenados (CU) (LI, 2005; EKINCI e FERREIRA, 2012; JIGHEH, 2014, MIRZABEBEI, 2017), do tipo consolidados drenados (CD) (FEUERHEMEL, 2000; TRINDADE et al., 2004; FREILICH e ZORNBERG, 2010; SACHETTI, 2012; BOLAÑOS e CASAGRANDE, 2016) e ensaios cisalhamento direto (CAI et al., 2006; ZAIMOGLU e YETIMOGLU, 2011; CASTILHO, 2017; KHATRI e KATRE, 2017).

Freilich et al. (2010) relatam que o efeito da inclusão de fibras poliméricas no comportamento de um solo argiloso, observado através de ensaios triaxiais (Figura 2.3), é verificado pelas deformações radiais nos corpos de prova, as quais indicam o desenvolvimento de planos de fraqueza para amostra natural e abaulamento para argila reforçada com fibras (indicativo de aumento na ductilidade do solo-fibra).

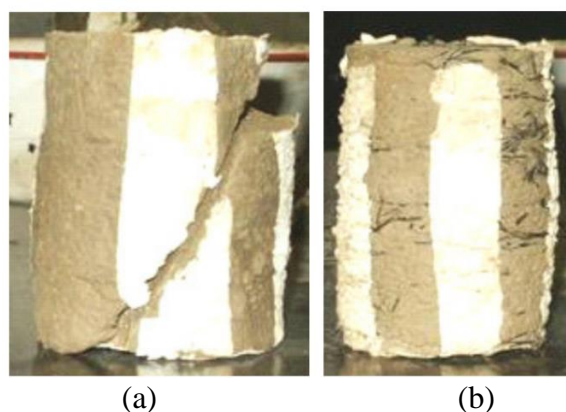


Figura 2.3. Padrão de deformação das amostras: (a) solo argiloso natural não reforçado; (b) solo argiloso-fibra polimérica (FREILICH et al., 2010).

Uma outra abordagem do mecanismo de avaliação da interação solo-fibra é relatada em Li e Zornberg (2006), onde ensaios de arrancamento foram realizados com o objetivo de estudar o coeficiente de interação ideal para a determinação da resistência ao cisalhamento equivalente de mistura solo-fibra, utilizando o método de estrutura discreta proposto por Zornberg (2002). Para a realização dos ensaios de arrancamento, os autores utilizaram uma única fibra longa de polipropileno (com comprimento efetivo da fibra de 152 mm), embutida na matriz de solo arenoso compactado com densidades relativa de 48% e 65%. Para tanto, uma caixa de cisalhamento direto de grande escala foi modificada para realizar os ensaios (Figura 2.4).

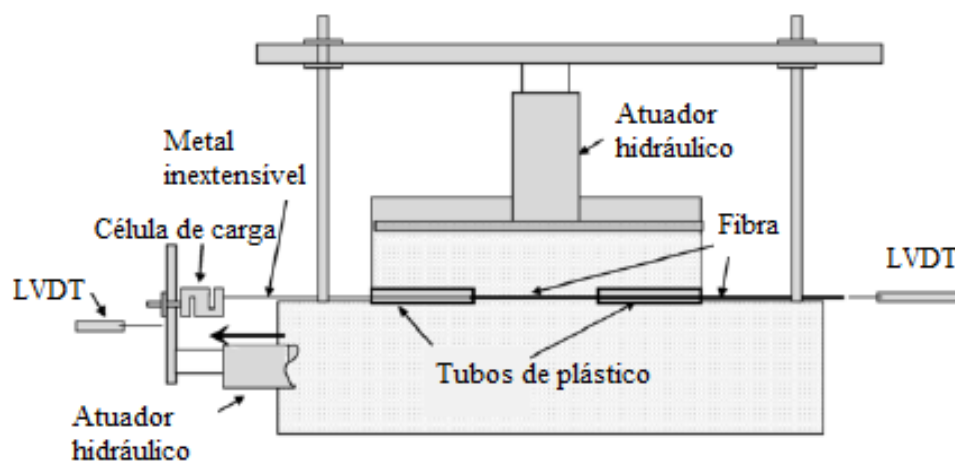


Figura 2.4. Croqui do equipamento de cisalhamento direto utilizado no ensaio de arrancamento (Adaptado de LI e ZORNBERG, 2006).

Li e Zornberg (2006) observaram neste estudo que o ângulo de atrito da interface (ou coeficiente de interação) calculado em termos da tensão normal de confinamento tende a diminuir à medida que a pressão confinante aumenta devido à dilatação do solo, e portanto, o coeficiente de interação deve ser selecionado considerando o nível de pressão confinante. Como resultado, a tensão normal que atua na interface do reforço do solo é maior do que a pressão de confinamento aplicada, o que, por sua vez, aumenta a resistência ao arrancamento. Esta tendência a redução no coeficiente de interação é mais significativa para testes conduzidos utilizando uma densidade relativa de 65% do solo, em comparação com testes realizados com 48% de densidade relativa (Figura 2.5).

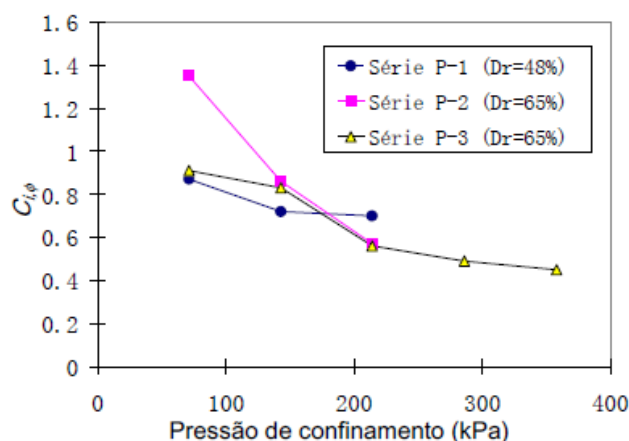


Figura 2.5. Relação entre o coeficiente de interação do solo arenoso e fibras de polipropileno e a pressão de confinamento (Adaptado de LI e ZORNBERG, 2006).

Com o objetivo de avaliar a microestrutura e o comportamento da interface entre a superfície da fibra de polipropileno e do solo argiloso, Tang et al. (2007) realizaram ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), tal como ilustrado na Figura 2.6. Os autores observaram que a inclusão de fibras não tem efeito perceptível na microestrutura do solo, ou seja, a porosidade do solo natural não foi alterada significativamente com a inclusão das fibras. Tang et al. (2007) observaram também que a superfície da fibra é presa por muitos minerais argilosos, o que contribui com o atrito entre a fibra e a matriz do solo (Figura 2.6c). Outra conclusão da pesquisa é que as fibras curtas distribuídas aleatoriamente funcionam como uma rede tridimensional espacial (Figura 2.6d), que conecta os grãos do solo à fibra, ajudando a formar uma matriz unitária e sólida, que restringe os deslocamentos.

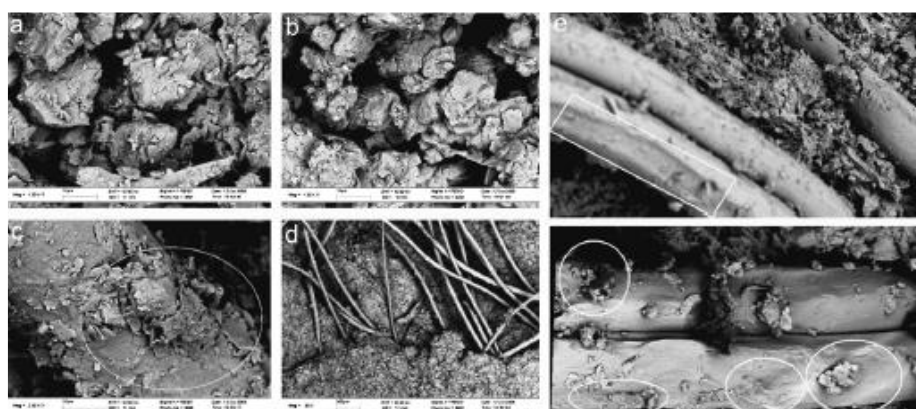


Figura 2.6. Imagens de MEV de solo reforçado com 0,25% de fibras: (a) solo-fibra com ampliação de 1500x, (b) solo com ampliação de 1500x; (c) superfície de fibra com ampliação de 2000x; (d) distribuição de fibra na matriz do solo; (e) sulcos formados na superfície da fibra (TANG et al., 2007).

Devido à força de embricamento, as fibras na matriz de solo são mais difíceis de deslizar e podem suportar maiores tensões de tração, como esboço apresentado na Figura 2.7. Quando as amostras estão sob carregamento, o efeito de “ponte” da fibra pode impedir o desenvolvimento de trincas de tração e por consequência a deformação do solo (Figura 2.8). Como resultado, a pesquisa de Tang et al. (2007) evidencia que o solo com a inclusão de fibras demonstra um comportamento mais dúctil.

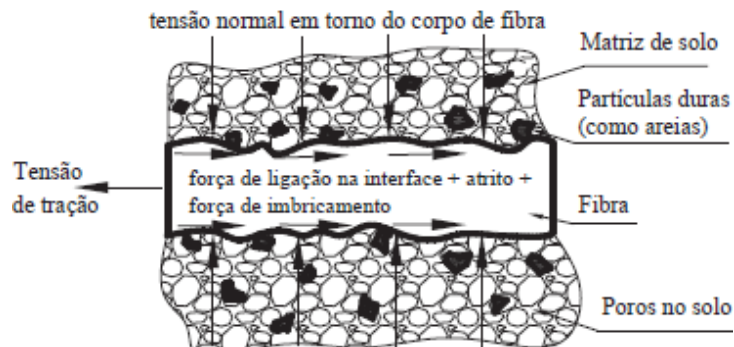


Figura 2.7. Esboço do comportamento mecânico na interface entre a superfície da fibra e a matriz do solo-fibra (TANG et al., 2007)

Diversos autores já concluíram que a resistência ao deslizamento das fibras é fortemente dependente da rugosidade da superfície da fibra (SHAH, 1991; TAGNIT-HAMOU et al., 2005; FROST e HAN, 1999). Tang et al. (2007) citam ainda que, durante o processo de homogeneização e compactação da mistura solo-fibra, partículas mais duras (como as areias) presentes na mistura desgastaram a superfície da fibra, causando deformação plástica e até remoção de parte da camada superficial. Observa-se na Figura 2.8 de Tang et al. (2007), que os sulcos formados na superfície da fibra melhoram o embricamento e por consequência as interações entre a superfície da fibra e a matriz do solo.

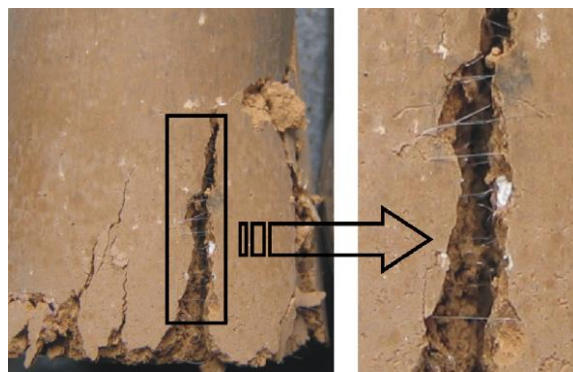


Figura 2.8. O efeito "ponte" do reforço de fibras no solo impede o desenvolvimento de trincas de tração (TANG et al., 2007)

2.5. FATORES QUE INFLUENCIAM A INTERAÇÃO SOLO-FIBRA

Diversas pesquisas sobre a mecânica de solos com a inclusão de fibras levaram a uma melhor compreensão dos fatores envolvidos na interação solo-fibra. E sabe-se que existem inúmeras variáveis envolvidas no comportamento final do compósito fibroso, e que estas diferentes combinações de variáveis podem resultar em mudanças significativas nos mecanismos de interação (FEUERHEMEL, 2000).

As características dos solos (granulometria, índice de vazios, grau de cimentação), bem como as características das fibras e as condições de execução dos ensaios são fatores relevantes na determinação dos mecanismos de interface, e por consequência, na resistência final do compósito.

Em comparação às inúmeras pesquisas com solos granulares e fibras, as pesquisas com solos finos e fibras não foram tão extensas, e estudos direcionados a explicar a interação entre as fibras e os grãos finos de argila são ainda limitados (EKINCI e FERREIRA, 2012). Embora o comportamento de cisalhamento do solo coesivo e granular seja fundamentalmente diferente, muito dos conhecimentos adquiridos sobre o comportamento dos solos granulares melhorados com fibras podem ser relevantes para o comportamento dos solos argilosos.

Além do tipo de solo, diversos são os fatores relacionados as características das fibras que irão compor o material compósito, assim como são diversos os fatores externos que podem provocar mudanças no mecanismo de interação solo-fibra e, conseqüentemente, nos parâmetros geotécnicos desejados para a mistura. A seguir, apresentam-se os principais fatores.

2.5.1 TEOR, COMPRIMENTO E RUGOSIDADE DAS FIBRAS

O teor de fibra presente, em relação ao volume total do compósito, é um dos fatores mais relevantes na definição das propriedades finais do compósito fibroso. Quanto maior o teor de fibra, maior o número de fibras interceptando cada microfissura, permitindo, assim, uma menor propagação e maior controle (COELHO, 2008). Segundo Bernardi (2003), as porcentagens de fibras viáveis a serem incorporadas numa matriz de solo encontram-se entre o volume crítico e o volume limite. O volume crítico diz respeito ao volume mínimo para que haja um efeito significativo nas propriedades do compósito. Já o volume limite, é o volume máximo, determinado pela quantidade de fibras que podem

ser adicionadas de modo a se obter uma dispersão uniforme, e onde um maior incremento tende a prejudicar as características geotécnicas desejadas.

Xiao et al. (2013) realizaram ensaios de resistência à compressão uniaxial, realizados em amostras de argila cimentadas com a adição de fibras de polipropileno (PP) e de álcool povilínico (PVA). Os autores também observaram um acréscimo na tensão de pico com o aumento no teor de fibras de polipropileno até um determinado teor de fibras (entre 0,16% e 0,24%), e após, houve uma ligeira diminuição na resistência da mistura (Figura 2.9). Já para as fibras de PVA, o incremento foi mais significativo. E do mesmo modo que o teor de fibras possui um valor máximo, o comprimento da fibra é proporcional à resistência mecânica, até um limite assintótico (SANTONI et al., 2001; HEINECK, 2002; VENDRUSCOLO, 2013).

Quanto à rugosidade das fibras, Taylor (1994) relata que, é necessário que as fibras estejam bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada. E em relação ao módulo de elasticidade, fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica (SPECHT, 2002). Em contrapartida, quanto maior o módulo de elasticidade mais facilmente as fibras podem ser arrancadas (SHEWBRIDGE e SITAR, 1990).

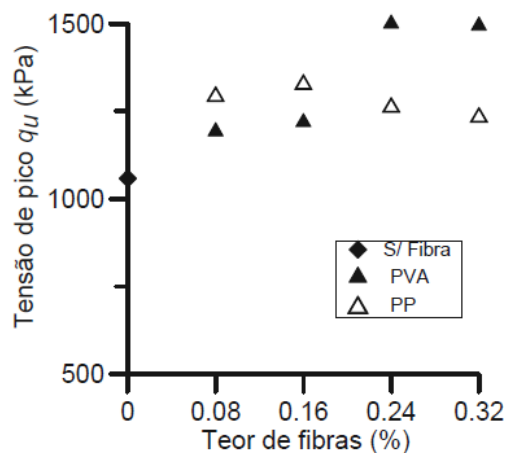


Figura 2.9. Efeito do teor de fibras na resistência à compressão (Adaptado de XIAO et al., 2014)

2.5.2 ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

A orientação das fibras em relação à superfície cisalhante afeta os mecanismos de interação solo/fibra, uma vez que a isotropia do sistema é influenciada pela orientação das fibras. Quando as fibras são distribuídas em uma única direção, podem alcançar ótimos valores de tensão e rigidez, caso o carregamento seja aplicado normal à direção

das fibras. Entretanto, tais propriedades podem ser reduzidas caso o carregamento seja aplicado de maneira paralela à direção das fibras (BENTO e CARVALHO, 2006).

Özkul e Baykal (2007) examinaram a orientação de fibras de borracha de diversos tamanhos (2 a 25 mm), incluídas em solo argiloso, e congelaram com nitrogênio líquido duas amostras cortadas ao longo dos planos horizontais e verticais. Os autores observaram que o processo de compactação (energia modificada) induziu o alinhamento preferencial das fibras na direção horizontal (Figura 2.10).

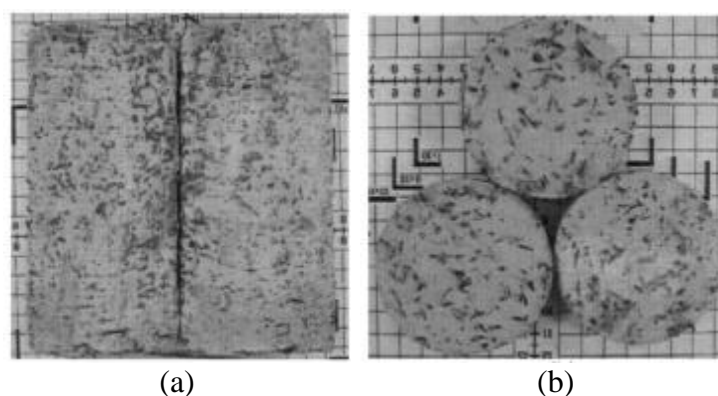


Figura 2.10. Amostras de argila com inclusões de fibras de borrachas: (a) seção vertical; (b) seção horizontal (ÖZKUL e BAYKAL, 2007).

Embora a anisotropia da força não tenha sido estudada, Özkul e Baykal (2007) concluíram que o alinhamento geral das fibras (direcionado à $\pm 45^\circ$ do plano horizontal) é favorável para a melhoria da resistência ao cisalhamento porque não coincide com o plano de tensão máxima de cisalhamento esperado em testes triaxiais. Neste estudo, a espessura de cada camada de compactação (3 cm) era quase três vezes o comprimento médio das fibras e cerca de 15% maior do que o maior comprimento da fibra. No campo, uma orientação menos preferencial pode ser esperada, já que as espessuras das camadas compactadas são muito maiores.

Com o objetivo de avaliar o alinhamento das fibras em um solo argiloso, Ekinci e Ferreira (2012) cortaram 10 amostras fibrosas com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (Figura 2.11). As fibras utilizadas são de polipropileno e possuem comprimento igual a 63 mm. Os resultados das análises mostraram que cerca de 80% das fibras estão localizadas dentro de $\pm 20^\circ$ com o plano horizontal e 51% estão alinhadas dentro de $\pm 10^\circ$. Isto é uma consequência do procedimento de preparação da amostra, uma vez que o comprimento da fibra é maior do que a espessura de uma camada compactada na amostra.



Figura 2.11. Amostras de solo-fibra cortadas para avaliar a orientação das fibras após a compactação (EKINCI e FERREIRA, 2012).

Os resultados obtidos por Ekeinci e Ferreira (2012) estão de acordo com os obtidos por Diambra et al. (2007), Özkul e Baykal (2006) e Özkul e Baykal (2007). A pesquisa conclui ainda que, a compactação de misturas solo-fibra durante o preparo da amostra leva a um alinhamento preferencial das fibras em uma direção horizontal. A Figura 2.12 apresenta uma representação gráfica da distribuição das fibras em uma amostra dissecada.

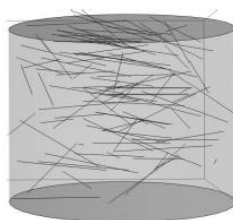


Figura 2.12. Orientação 3D das fibras em uma amostra cortada (EKEINCI e FERREIRA, 2012).

2.5.3 FATOR DE FORMA DAS FIBRAS E HOMOGENEIDADE DAS MISTURAS

O fator de forma das fibras, ou seja, a relação entre o comprimento (l) e o diâmetro (d) da fibra, também influencia fortemente no mecanismo que rege o comportamento da mistura, uma vez que as forças são mobilizadas na interface solo-fibra e, por consequência, na seção transversal das fibras (TAYLOR, 1994; FEUERHEMEL, 2000; CASAGRANDE, 2005; FESTUGATO, 2008). Illston (1994) e Taylor (1994) apresentam um equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como mostra a Figura 2.13 e a Equação 2.1. Observa-se na Equação 2.1 que o fator de forma é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_f) e a resistência de aderência fibra/matriz (F_a).

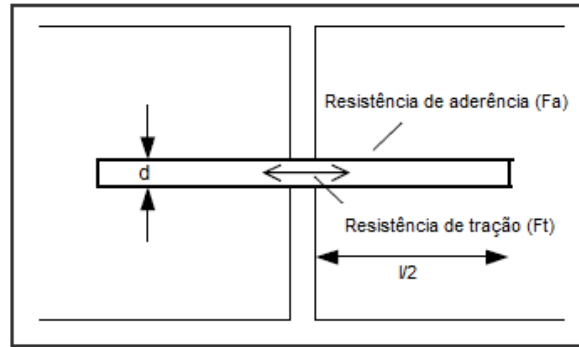


Figura 2.13. Disposição fibra/fissura idealizada (Adaptado TAYLOR, 1994).

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot F_t = \pi \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot F_a \quad (1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_w} \quad (2)$$

onde: d: diâmetro da fibra; l: comprimento da fibra; F_a : resistência de atrito mobilizada ao longo da fibra e F_t : resistência à tração da fibra.

Assim, para um emprego técnico, deverão ser utilizadas fibras que apresentem alta resistência à tração, ou que possuam resistência de aderência necessária para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou tenham alta relação l/d . E de acordo com Girardello (2014), para a garantia de homogeneidade dos constituintes presentes na mistura, é necessário que exista compatibilidade entre os materiais, facilitando o processo durante a mistura e garantindo essa homogeneidade ao longo da vida útil da estrutura geotécnica.

2.5.4 TENSÃO CONFINANTE

Sabe-se que o incremento de tensão confinante, numa matriz de solo, eleva a sua resistência ao cisalhamento, uma vez que há um acréscimo no atrito entre as partículas. Por consequência, aumenta-se também o atrito entre o solo e a fibra, para o caso de solos fibrosos (LI, 2005).

Diversos autores verificaram que, quando a matriz solo-fibra está submetida à baixas tensões confinantes, a inclusão de fibras afeta de resistência por atrito. Já para tensões maiores, existe um ponto onde há uma clara mudança no mecanismo de interação solo-fibra a partir do qual a parcela de resistência por atrito atinge o mesmo patamar do solo sem inclusões, correspondendo a alteração somente à parcela coesiva (MAHER e

GRAY, 1990; CASAGRANDE, 2005; COELHO, 2008; LI, 2013; e GIRARDELLO, 2014).

A tensão de confinamento correspondente à mudança no mecanismo de interação solo-fibra é denominada tensão de confinamento crítica (σ_{crit}), caracterizando o ponto onde a resistência ao cisalhamento, desenvolvida na interface solo-fibra, se iguala ou supera a resistência à tração das fibras. Esta mudança na envoltória de cisalhamento pode ser observada na Figura 2.14, e é evidenciado na literatura pelas envoltórias bi-lineares (FEUERHEMEL, 2000).

Em tensões de confinamento abaixo da crítica, as fibras deslizam durante o cisalhamento, e observa-se um ângulo de atrito maior em comparação ao solo natural. Tal fenômeno é explicado como um efeito de dilatância, que aumenta a interface de resistência ao cisalhamento entre a fibra e o solo. Em tensões mais altas que a tensão crítica, as envoltórias do solo fibroso tornam-se paralelas ao solo sem fibra e, as fibras, durante o cisalhamento, esticam ou rompem (GRAY e OHASHI, 1983 *apud* LI, 2005).

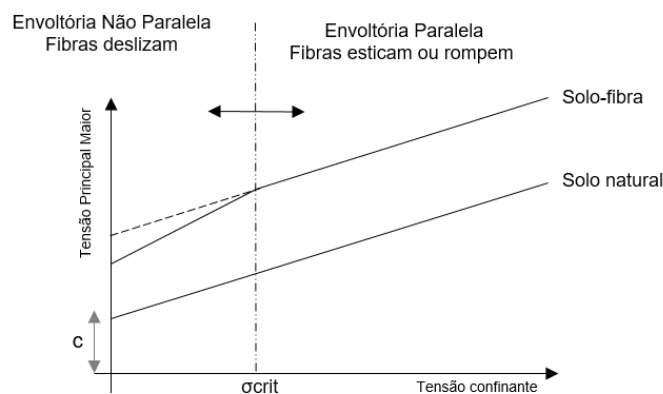


Figura 2.14. Efeito da inclusão de fibras na envoltória de ruptura da areia (Adaptado de MAHER e GRAY, 1990).

Esta observação no comportamento das misturas solo-fibra também foi relatada por Freilich et al. (2010). Os autores citam que o acréscimo na tensão de confinamento aumenta a eficácia das fibras na resistência ao cisalhamento do solo. Em tensões de confinamento altas, na fase de consolidação, há maior interação entre as partículas do solo e as fibras, fazendo com que as fibras se estiquem cada vez mais. Portanto, ao iniciar a fase de ruptura, as fibras contribuem melhor na distribuição das tensões de cisalhamento impostas, pois a área das fibras interceptando o solo é maior. Ainda para Freilich et al. (2010), em tensões de confinamento mais baixas, na fase de consolidação, as fibras podem não interagir efetivamente com os grãos de solo, e podem escorregar no momento

do cisalhamento, uma vez que as fibras podem não confinar efetivamente os grãos de solo e nem adicionar resistência excedente ao compósito fibroso. Isso indica que um aumento no teor de fibras a uma baixa tensão inicial de consolidação pode ter efeito adverso na resistência do solo com a inclusão de fibras.

Diab et al. (2018) realizaram ensaios triaxiais não consolidados não drenados em amostras de argila com inclusão de fibras naturais do cânhamo, com tensões de confinamento variando de 20 kPa a 200 kPa para representar os estados de tensão que são indicativos de altas pressões de sobrecarga (ex.: aterros e fundos atrás das paredes) ou baixas pressões de confinamento (ex.: reparo localizados em rupturas superficiais de taludes e coberturas de aterro). Os resultados com tensões de 20 kPa indicaram que as inclusões de fibras tiveram um impacto negativo (nulo) na resposta tensão-deformação (Figura 2.15). No entanto, a adição de fibras no teor de 1% suprimiu a tendência à dilatação, principalmente para amostras relativamente não saturadas (preparadas com umidade 5% abaixo da ótima), onde as deformações volumétricas diminuíram aproximadamente de 4% (solo natural) para 0,5% (solo-fibra).

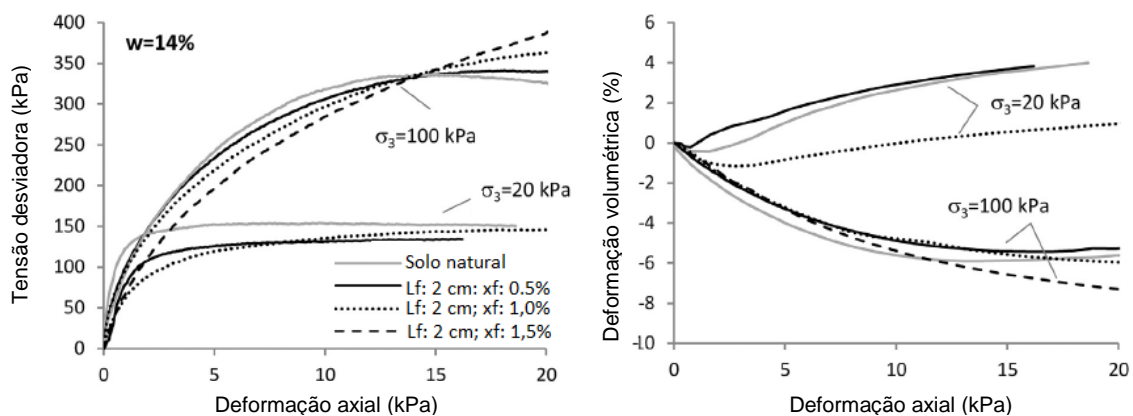


Figura 2.15. Variação de tensão desvio e variação volumétrica com a deformação axial em solo argiloso com inclusão de fibras de cânhamo (DIAB et al., 2018).

A capacidade das fibras de restringir a dilatação com baixa pressão de confinamento foi também relatada em outras pesquisas (PUNTHUTAECHA et al., 2006; ABDI et al., 2008; VISWANADHAM et al., 2009; AL-MHAIDIB, 2010). Essa redução pode ser atribuída à resistência oferecida pelas fibras à expansão através do contato fibra-fibra (VISWANADHAM et al., 2009).

2.5.5 DEFORMABILIDADE

Segundo MCGown et al. (1978), as fibras passam a atuar a partir de um momento em que o solo que as envolve sofre deformações. Jewell e Wroth (1987) também observaram que o efeito das fibras é muito pequeno até o momento em que passam a predominar as deformações plásticas na amostra.

Feuerhemel (2000) verificaram nas curvas tensão x deformação, obtidas através de ensaios de compressão triaxial CD, que o efeito das fibras é muito pequeno até o momento em que passam a predominar as deformações plásticas do solo natural. A Figura 2.16 apresenta as curvas tensão x deformação para um nível de tensão efetiva de 60 kPa e a seta marcam o ponto a partir do qual as fibras passam a atuar de forma mais efetiva.

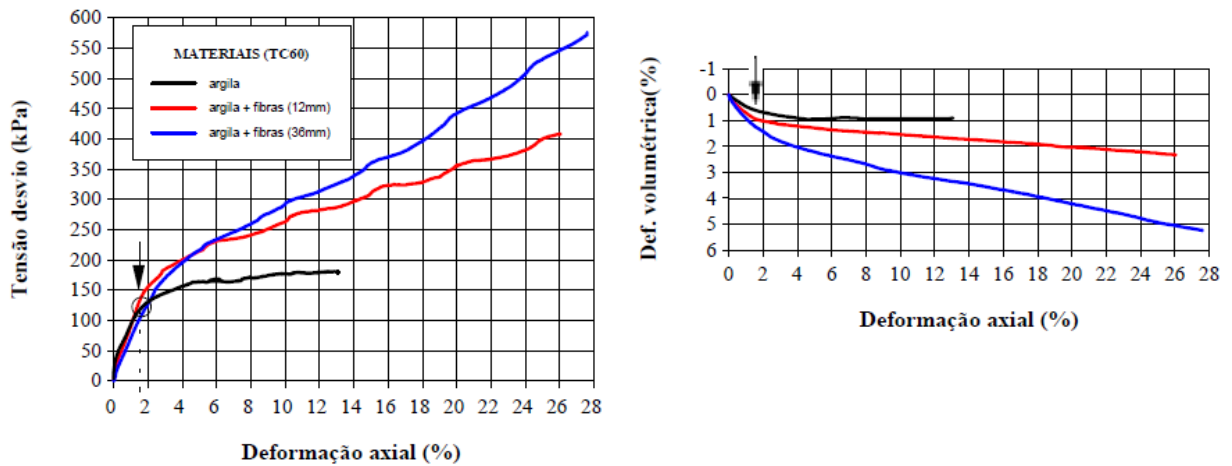


Figura 2.16. Influência da adição de fibras de polipropileno à argila (FEUERHEMEL, 2000).

Li e Zornberg (2013) também observaram, por meio de ensaios triaxiais CD, realizados em areia com a inclusão de fibras de polipropileno (50 mm), que a mobilização de tensões induzidas pelas fibras requer níveis de deformações maiores que o necessário para mobilizar a resistência máxima ao cisalhamento do solo. A Figura 2.17 demonstra que mesmo com aumento da tensão de cisalhamento com o acréscimo de fibras, as porções iniciais das curvas tensão-deformação das amostras reforçadas e não reforçada foram aproximadamente semelhantes. Isso sugere que a matriz do solo parece resistir à carga aplicada em pequenos níveis de deformações, enquanto a contribuição das fibras é mais substancial em níveis de deformações mais elevados.

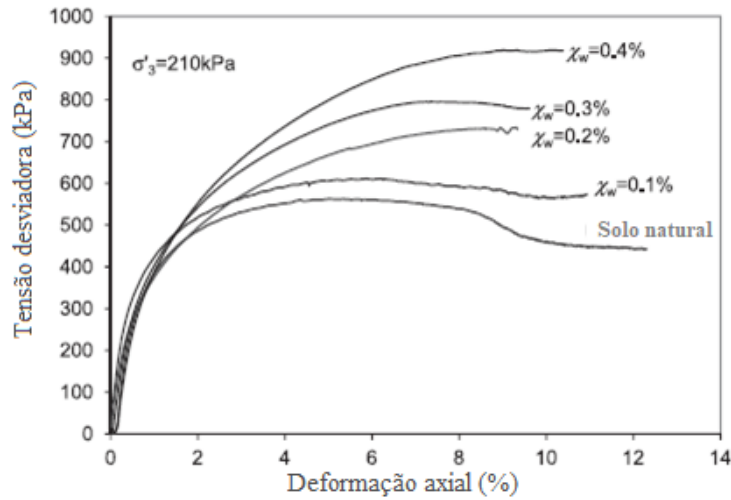


Figura 2.17. Efeito da inclusão de fibras no comportamento tensão-deformação (LI e ZORNBERG, 2013).

Li (2005) assume em suas análises que a matriz de solo-fibra tem a mesma resposta tensão-deformação que o solo natural, mas que a diferença entre as curvas tensão desviadora *versus* deformação axial, obtidas por meio de ensaios triaxiais, pode ser considerada como a contribuição das fibras. Na Figura 2.18 observa-se que a contribuição das fibras de polipropileno em um solo arenoso foi gradualmente mobilizada à medida que o nível de deformação aumenta. Ao nível de deformação equivalente a máxima resistência do solo natural (aproximadamente 6%), em média 60% da tensão induzida pela fibra havia sido mobilizada.

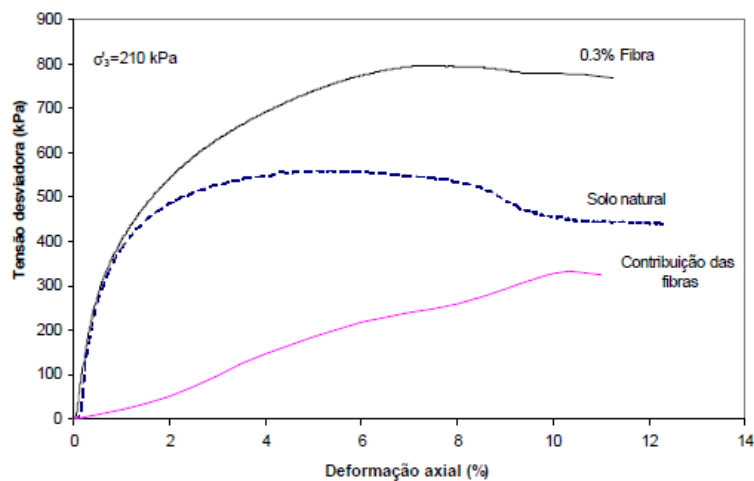


Figura 2.18. Evolução da contribuição das fibras de polipropileno na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso (LI, 2005).

2.5.6 TAMANHO E MÉTODO DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os fatores relacionados a moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados também podem interferir nos parâmetros geotécnicos obtidos para as misturas, sendo eles o tamanho da amostra ensaiada e o método de compactação do solo para a moldagem dos corpos de prova. Alguns estudos investigaram o efeito do tamanho dos corpos de prova na resistência à compressão uniaxial não confinada e na resistência ao cisalhamento de argilas com inclusões de fibras.

Xiao et al. (2014) observaram um aumento significativo na resistência à compressão uniaxial não confinada em amostras de argila com a inclusão de fibra de polipropileno, quando o diâmetro do corpo-de-prova aumentou de 50 mm para 100 mm. No entanto, a mudança foi menor quando o tamanho do corpo-de-prova foi alterado de 100 mm para 150 mm. Os autores também investigaram a resistência ao cisalhamento nas condições CD e CU da mistura argila-fibra e descobriram que, até a tensão de consolidação de 110 kPa, o tamanho do corpo-de-prova não afeta significativamente a resistência final do compósito.

Nataraj e McManis (1997) também investigaram o comportamento da mistura argila-fibra através de ensaios de resistência à compressão uniaxial não confinada em corpos de prova com diâmetros de 33 mm, 70 mm e 100 mm. Os autores observaram um aumento na resistência com o acréscimo no diâmetro do corpo-de-prova, passando de 33 para 70 mm. No entanto, a resistência à compressão da mistura solo-fibra obtida para os corpos de prova com diâmetro de 100 mm foi ligeiramente menor do que a resistência obtida para os corpos de prova com diâmetro igual a 70 mm.

Ang e Loehr (2003) também investigaram o efeito do tamanho do corpo-de-prova através de ensaios de resistência à compressão de argilas com a inclusão de fibras, com diâmetro variando de 38 mm a 152 mm. Os autores concluíram que corpos de prova ensaiados com diâmetros de 70 mm ou maiores têm a probabilidade de obter resistências que sejam razoavelmente representativas das propriedades dos compósitos fibrosos.

Com relação ao método de compactação e a resistência drenada e não drenada de argila com inclusões de fibras, Diab et al. (2018) avaliaram fibras naturais de cânhamo (comprimento de 40 mm e teor de 1%) por compactação estática (amassamento) e dinâmica, com mesmos pesos específicos secos, em 73 ensaios triaxiais CD e UU. Os resultados (Figura 2.19a e 2.19b) indicaram que a resistência não drenada da argila é

dependente do método de compactação, podendo-se obter melhorias na resistência três vezes superiores em amostras moldadas por meio de compactação dinâmica, quando comparada com amostras moldadas por compactação estática. Os autores observaram também que o efeito do tipo de compactação é mais influenciado em amostras compactadas com umidade abaixo do teor ótimo, ou seja, para amostras compactadas na umidade ótima de compactação.

Quanto a estes dois métodos de compactação, espera-se que este comportamento esteja ligado a diferenças na estrutura e orientação das partículas pós-compactação. Para um determinado teor de umidade, sabe-se que o processo estático produz uma estrutura de argila mais dispersa e orientada em comparação com a compactação dinâmica, que produz uma estrutura com partículas de argila relativamente aleatórias/floculadas. A diferença na estrutura afeta a resposta de resistência em pequenas deformações, mas espera-se que seja menos significativa em deformações maiores, onde as partículas de argila em ambos os métodos de compactação tendem a se orientar durante o cisalhamento. Quanto a deformação volumétrica, os autores observaram que as amostras com inclusões de fibras naturais, preparadas por compactação dinâmica, foram mais eficientes em reduzir a tendência à dilatação da argila (DIAB et al., 2018).

Ainda de acordo com Diab et al. (2018), para isolar o efeito do tipo de fibra na influência do tipo de compactação na resistência não drenada do solo, os autores realizaram uma série adicional de ensaios UU utilizando fibras de polipropileno. Os resultados indicaram que o método de compactação também influenciou a resistência do compósito com fibras de polipropileno, onde nenhuma melhoria na resistência não drenada dos corpos de prova preparados por compactação estática foi observada em relação à compactação dinâmica. Desta forma, a melhoria relativamente baixa na resposta de resistência avaliada para amostras de argila moldadas por compactação estática com inclusões de fibras naturais, não poderia ser atribuída às propriedades das fibras de cânhamo.

Özkul e Baykal (2006) citam que o processo de compactação dinâmica causa um alinhamento preferencial das fibras em uma direção paralela ao plano de compactação. Um estudo de Özkul e Baykal (2007) confirmou que o processo de compactação induz o alinhamento preferencial das fibras em uma direção horizontal. Este alinhamento preferencial ($\pm 45^\circ$ da horizontal) foi considerado favorável para a melhoria da resistência ao cisalhamento, uma vez que não coincide com o plano de tensão máxima de

cisalhamento esperado em um ensaio triaxial. Benefícios obtidos com a inclusão de fibras se mostraram também dependentes do grau de compactação empregado (KUMAR e TABOR, 2003; ÖZKUL e BAYKAL, 2007).

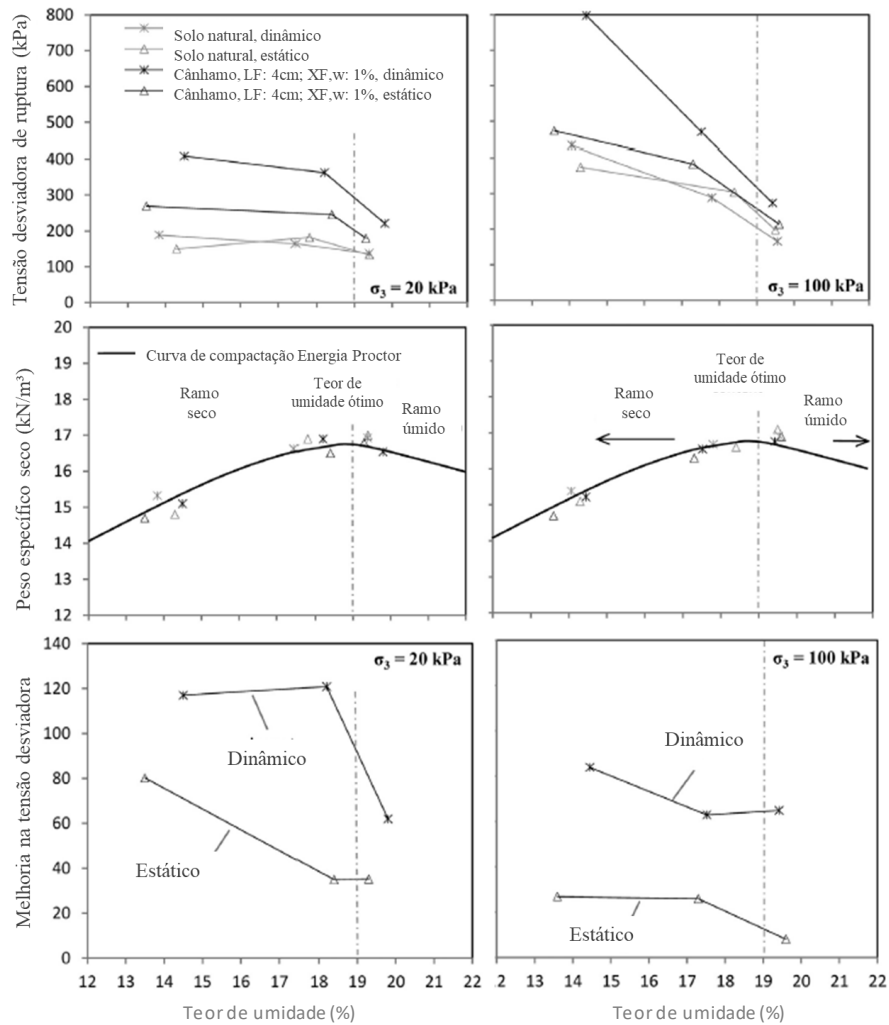


Figura 2.19. Resultados de ensaios triaxiais em amostras de argila e fibras naturais, compactadas estaticamente e dinamicamente (Adaptado de DIAB et al., 2018).

2.6 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS SOLOS ARGILOSOS

Pesquisas com uso de solos argilosos (de baixa ou alta plasticidade) e fibras (naturais ou sintéticas) relatam, em geral, alterações no comportamento dos solos em função da adição de fibras, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica e rigidez inicial, além da influência quanto ao tipo de compactação.

Al Wahab e El-Kedrah (1995) verificaram que o pico de resistência da argila siltosa, em compressão não confinada, aumentou devido à adição de fibras poliméricas, bem como aumentou também a ductilidade e a tenacidade do solo. Nataraj e McManis (1997) verificaram que tanto o teor de fibra como o teor de umidade de compactação de uma argila de baixa plasticidade influenciam no aumento de resistência à compressão uniaxial não confinada (Figura 2.20). Kumar e Tabor (2003) relatam ainda, melhora na resistência residual do solo-fibra.

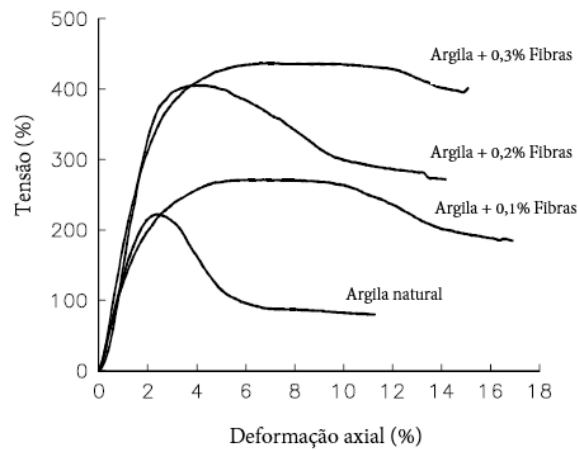


Figura 2.20. Resistência à compressão não confinada de argila reforçada com diferentes teores de fibra (adaptado de NATARAJ e MCMANIS,1997).

Ziegler et al. (1998) descobriram que fibras de polipropileno discretas aumentam a resistência à tração de argilas para diversos valores de plasticidades. Recentemente, a resistência à tração por compressão diametral foi analisada por Tran et al. (2018), em um solo argiloso com adição de fibras de milho, com comprimentos de 10 mm, 30 mm e 50 mm. Neste trabalho, verificou-se que a resistência à tração do compósito fibroso (Figura 2.21) aumentou com o teor de fibras e também com o comprimento das fibras.

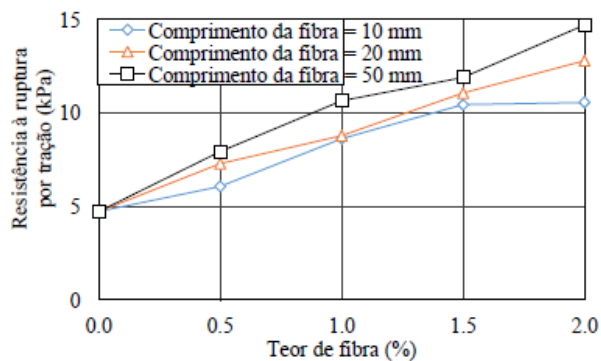


Figura 2.21. Efeito do teor de fibras e do comprimento na resistência à tração por compressão diametral de solo argiloso (Adaptado de TRAN et al., 2018).

Ehrlich e Almeida (2019) realizaram ensaios de laboratório para avaliar o uso de compósitos de fibra-solo como uma barreira para aterro sanitário. Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica e de compressão diametral em amostras de solo compactado natural e em amostras de solo com fibra de PET de 10 mm de comprimento no teor igual a 1%. Segundo estes autores, os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em condições de confinamento semelhantes às encontradas no campo (10 e 100 kPa) e os ensaios de compressão diametral foram realizados para induzir rachaduras nos espécimes. Ambos os ensaios foram realizados em uma célula triaxial especialmente adaptada (Figura 2.22), para que os dois testes pudessem ser realizados sequencialmente, a fim de determinar o efeito de possíveis aberturas de fissura nos resultados de condutividade hidráulica do material. A taxa de carga durante os ensaios diametrais foi de 0,25 mm / min. Os autores observaram que a adição de fibras no solo aumenta a resistência à tração do solo em relação aos resultados obtidos para o solo natural e retarda o processo de abertura das trincas (Figura 2.23). Já para os ensaios realizados sob alta pressão de confinamento (100 kPa), verificou-se um decréscimo na condutividade hidráulica em todas as etapas da aplicação da carga diametral, enquanto que nos ensaios realizados sob baixa pressão de confinamento (10 kPa), as aberturas de fissuras levaram a um aumento significativo na condutividade hidráulica.



Figura 2.22. Montagem geral do teste na célula triaxial e amostra posicionada sob hastes de metal para o ensaio de compressão diametral (Adaptado de EHRlich e ALMEIDA, 2019).

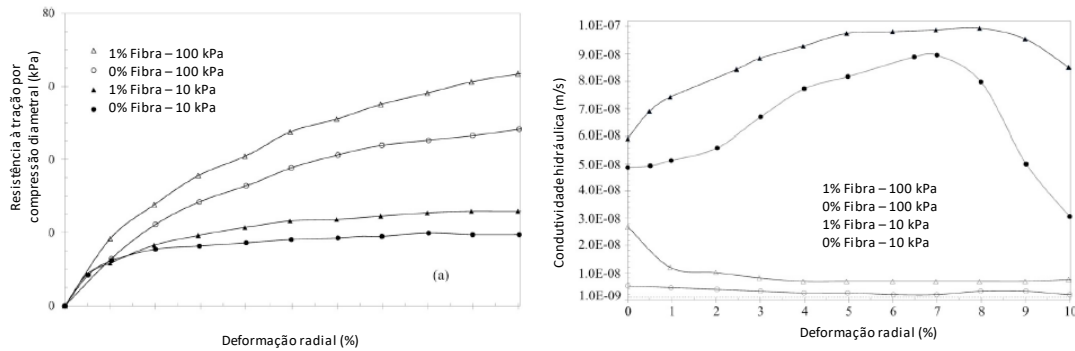


Figura 2.23. Resistência à tração por compressão diametral e condutividade hidráulica versus deformação radial do solo natural e das misturas solo-fibra. (Modificado de EHRlich e ALMEIDA, 2019)

Pesquisas sobre resistência ao cisalhamento de solos argilosos e fibras, utilizando ensaios de cisalhamento direto, também foram realizadas. A pesquisa de Nataraj e McManis (1997) com uma argila de baixa plasticidade reforçada com 0.3% de fibra de polipropileno mostrou que houve aumento de 45% nos valores de coesão com a adição de fibras, mas que o mesmo não ocorreu para os valores de ângulo de atrito (Figura 2.24).

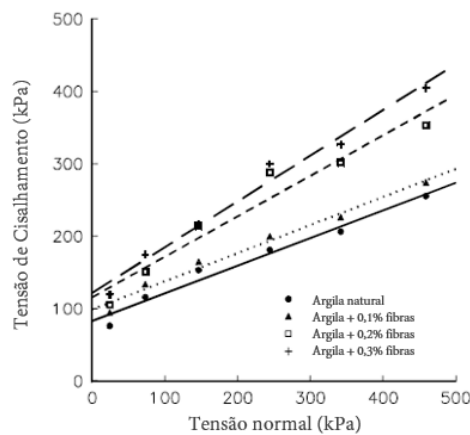


Figura 2.24. Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb de argila reforçada com diferentes teores de fibra (Adaptado de NATARAJ e MCMANIS, 1997)

A recente pesquisa de Castilho (2017) realizou ensaios de cisalhamento direto em solos argilosos com a inclusão de fibras recicladas de PET (20 mm). Os corpos de prova foram preparados com grau de compactação de 100% e teor de fibras igual a 1,5%. Na análise dos resultados (Figura 2.25), observa-se que as envoltórias de resistência do solo-fibra, estudadas até o nível de tensão de 246 kPa, foram praticamente paralelas as da argila sem fibras. Ainda, verifica-se que não foi notada a bi-linearidade esperada para solo-fibra relatada por Maher e Gray (1990). Isso indica que as tensões de confinamento analisadas podem ser menores do que a tensão crítica, e que as fibras podem ter deslizado durante a deformação.

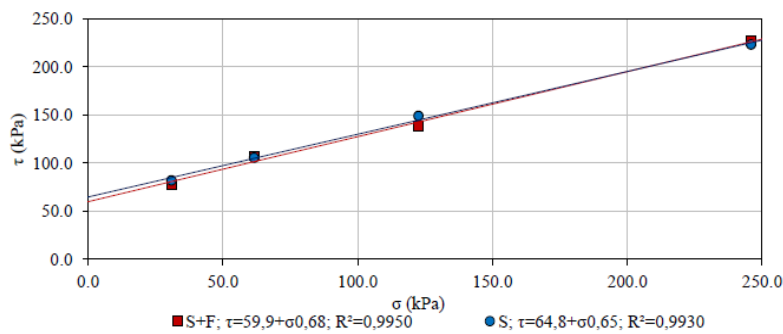


Figura 2.25. Tensão Cisalhante *versus* Tensão Normal em solo argiloso com a inclusão de fibra reciclada de PET (CASTILHO, 2017).

Os efeitos nos parâmetros de compactação (peso específico seco máximo e teor de umidade ótima) dos compósitos fibrosos, em relação ao solo natural, podem ser mais ou menos pronunciados dependendo do atrito desenvolvido entre o solo e a fibra. Ou seja, o tipo, comprimento e teor de fibras utilizados são variáveis que influenciam fortemente na compactação do compósito, e conseqüente, em seu comportamento mecânico. Alguns autores citam que as fibras, quando misturadas em solo argiloso, diminuem o peso específico seco máximo e aumentam o teor de umidade ótima (PRABAKAR e SRIDHAR, 2002; CETIN et al., 2006; TRAN et al., 2018). No entanto, Bolaños e Casagrande (2016) relatam que não é possível estabelecer uma relação direta com o acréscimo no teor de fibras, tal como observado na Figura 2.26.

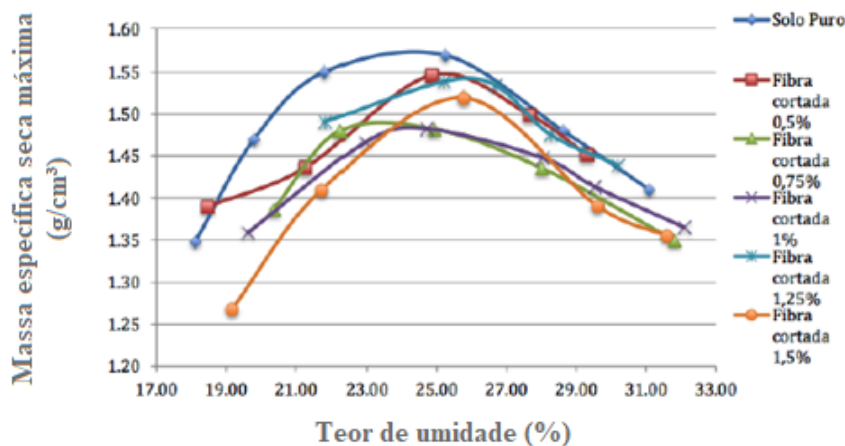


Figura 2.26. Curva de compactação da argila natural e das misturas de argila com a inclusão de fibras coco (BOLAÑOS e CASAGRANDE, 2016).

Em contrapartida, outros pesquisadores não observaram alterações significativas nos parâmetros de compactação das misturas argila-fibra (AL-TABBAA e

ARAVINTHAN, 1998; FEUERHEMEL, 2000; RIFAI e MILLER, 2004; TRINDANDE, 2006; EKINCI e FERREIRA, 2012; DIVYA, 2017). A Figura 2.27 apresenta um resultado de compactação do estudo de Feuerhemel (2000), onde nenhuma alteração foi verificada.

Cabe ressaltar que, a grande maioria dos estudos realizados utilizando-se solos finos concentrou-se em avaliar parâmetros de resistência e deformabilidade apenas à curto prazo. A resistência e deformabilidade sob condições saturadas e drenadas, as quais podem diferir dos solos arenosos, não foram amplamente estudadas (ÖZKUL e BAYKAL, 2007).

Trindade et al. (2004) avaliaram o comportamento da inclusão de fibras de polipropileno em solo argiloso através de ensaios triaxiais consolidado drenado (CD) com a adição de fibras de 20 mm e um teor igual a 0,25% em relação a massa de solo seco. A adição de fibras, no geral, provocou a diminuição da rigidez do solo e um aumento na tensão de pico. Observou-se também que o de ângulo de atrito ficou praticamente inalterado, mas a coesão apresentou um ganho de aproximadamente 70%.

Feuerhemel (2000) também estudou o comportamento de um solo argiloso com adição de fibras de polipropileno, com comprimentos iguais a 12 mm e 36 mm, no teor igual a 0,5%, distribuídas aleatoriamente na matriz de solo. Foram realizados ensaios de compressão triaxial consolidado drenado (CD) com tensões de 20 kPa, 60 kPa e 100 kPa. Observa-se na Figura 2.27 (a) que as fibras aumentaram a resistência do solo argiloso, mas a característica mais marcante é o contínuo crescimento da resistência do solo-fibra com a deformação, mesmo para níveis de deformação na ordem de 28%. Quanto as envoltórias de resistência ao cisalhamento (Figura 2.27 (d)), os resultados mostram um aumento de 3 vezes na coesão para fibras de 12 mm, e 5 vezes de aumento para fibras de 36 mm, em relação ao solo natural. Já o ângulo de atrito foi praticamente não afetado pela inclusão das fibras.

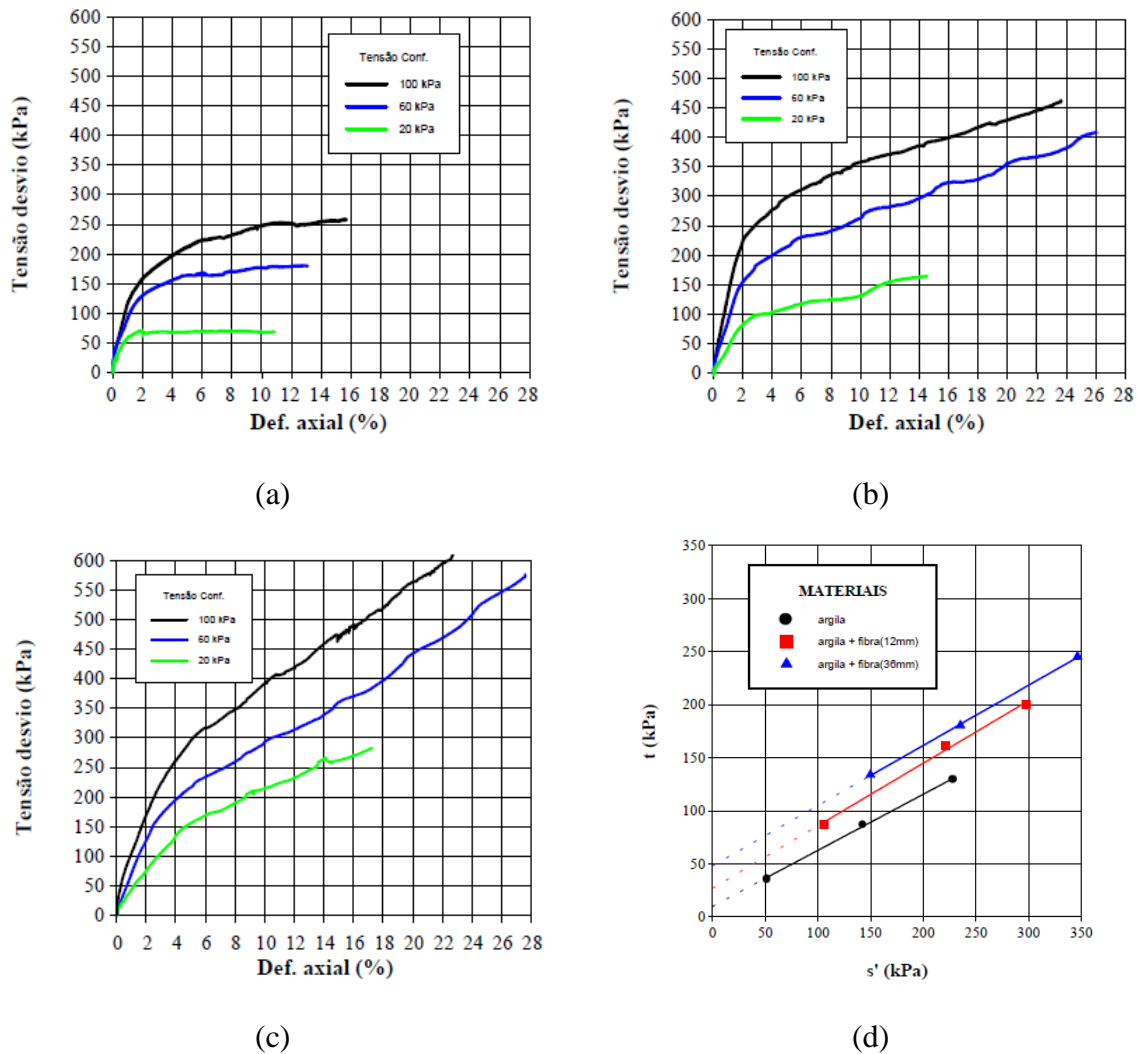


Figura 2.27, Resultados do ensaio triaxial consolidado drenado: (a) solo natural; (b) solo-fibra de 12 mm; (c) solo-fibra de 36 mm; (d) envoltória de resistência (Adaptado de FEUERHEMEL, 2000)

Bolaños e Casagrande (2016) avaliaram o comportamento de um solo argiloso com a inclusão de fibras de coco verde, também através de ensaios triaxiais drenados (CD). Os ensaios foram realizados em amostras compactadas na densidade máxima e umidade ótima, com fibras de 20 mm de comprimento, nas proporções de 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5%, em relação ao peso seco do solo. Para as amostras com fibras não foram observadas tensões de pico de ruptura no estudo da tensão desviadora *versus* deformação axial, caracterizando o comportamento como dúctil. O solo-fibra no teor mais alto (1,5%) apresentou o melhor resultado, com um acréscimo de 4° no ângulo de atrito e de 188% na coesão, em relação a amostra de solo natural.

Segundo Li (2005), o mecanismo de interação em solos coesivos é mais complexo de ser analisado e necessita de avaliação adicional para o entendimento dos mecanismos

de transferência de força na interface entre as fibras e as partículas finas que podem compor o solo. O excesso de pressão neutra na interface, influenciado pela tendência à alteração de volume e taxa de deformação, resultam em diferentes resultados de resistência ao cisalhamento de argilas com inclusões de fibras.

Freilich et al. (2010) analisaram as condições de drenagem e os efeitos da pressão neutra na resistência efetiva ao cisalhamento em amostras de argila com fibras de polipropileno, através de ensaios triaxiais CU e CD. Os autores observaram uma redução na resistência do compósito fibroso obtida nos ensaios drenados em comparação com os ensaios não drenados. Já os ensaios realizados nas amostras de solo natural não apresentaram diferenças significativas nos resultados obtidos, o que evidencia uma redução de resistência apenas nas amostras com fibras. A Figura 2.28 evidencia os resultados obtidos pelos autores.

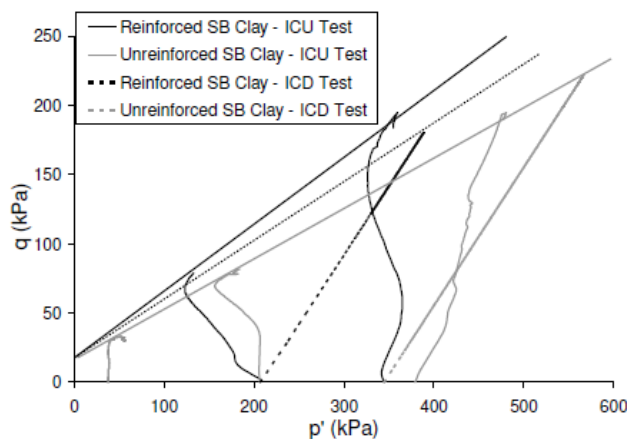


Figura 2.28. Envoltória de resistência obtida no triaxial CU e CD com solo argiloso e fibra de polipropileno (Fonte: FREILICH et al., 2010)

A redução da resistência drenada, obtida através do ensaio CD, do solo reforçado com fibras fornece evidências da influência do tempo, da drenagem, ou de ambos, no comportamento da massa de solo-fibra. As diferenças nas tensões obtidas nos ensaios CU e CD foram inicialmente atribuídas as deformações ao longo da interface do solo-fibra. Os efeitos do tempo sobre a força de interface, como deslizamento, ou rearranjo das partículas de argila, são mais evidentes nos ensaios drenados, devido à menor taxa de deformação e aumento significativo no tempo de ensaio (FREILICH et al., 2010). Os autores também notaram, através do ensaio triaxial CU, que o comportamento da argila com a presença de fibras de polipropileno é alterado durante o cisalhamento, modificando também a geração de pressão neutra dentro das amostras. A Figura 2.29 evidencia que a

inclusão de fibras proporcionou um acréscimo de pressão neutra em relação ao solo natural. Como a pressão neutra positiva está associada à tendência de contração do volume, pode-se concluir que as fibras restringem a dilatação do solo fibroso (CONSOLI et al., 1998; LI, 2005).

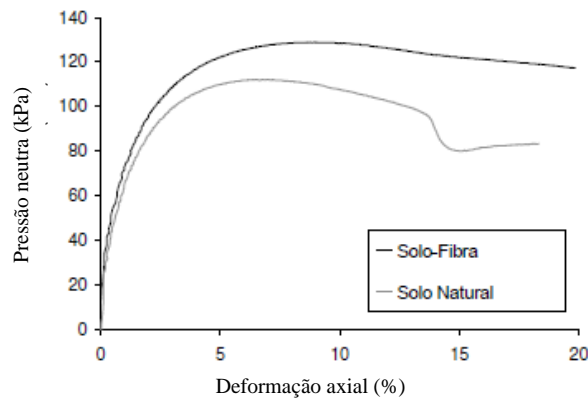


Figura 2.29. Pressão neutra gerada versus deformação axial para amostras reforçadas e não reforçadas (Adaptado de FREILICH et al., 2010)

Este acréscimo na pressão neutra do solo-fibra diminui a tensão efetiva dentro da massa do solo, mas resulta em uma maior resistência ao cisalhamento do solo-fibra em comparação ao solo natural.

Assim, pode-se perceber que a tendência de alteração de volume do solo durante o cisalhamento também pode influenciar no desempenho das fibras, pois ocorre variação nas pressões de água geradas durante o processo de arrancamento das fibras. Segundo Li (2005), a tendência a contração do solo sob cisalhamento levará a um aumento do excesso de pressão neutra positiva na interface solo-fibra, o que tende a diminuir a resistência ao arrancamento das fibras. Em contraste, a tendência de dilatação do solo durante o cisalhamento levará a uma diminuição da pressão neutra excessiva na interface, o que aumenta a resistência ao arrancamento das fibras. O efeito da tendência de mudança de volume pode ser verificado ensaiando-se solos coesivos com diferentes densidades.

Este acréscimo na pressão neutra do solo-fibra diminui a tensão efetiva dentro da massa do solo, mas resulta em uma maior resistência ao cisalhamento do solo-fibra em comparação ao solo natural, como observado na Figura 2.30.

No entanto, conforme indicado na Figura 2.30, a pressão neutra gerada durante o cisalhamento é maior para as argilas fibrosas. Consequentemente, a tensão de confinamento efetiva para o compósito fibroso é menor do que para o solo natural. Ou

seja, a amostra com fibras alcançou uma tensão de desvio de pico igual ou superior à amostra natural sob uma tensão confinante efetiva mais baixa. Isso indica que a adição de fibras aumentou a resistência ao cisalhamento (LI, 2005).

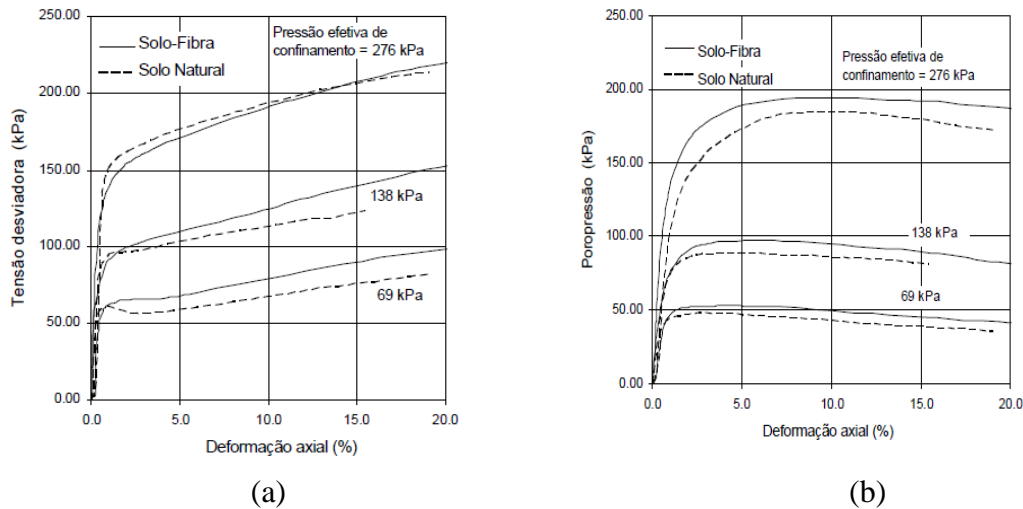


Figura 2.30 Resultado do ensaio triaxial CU em solo argiloso com fibras de polipropileno: (a) tensão-deformação; (b) poropressão gerada no cisalhamento (Adaptado de LI, 2005).

Este aumento de resistência e aumento de pressão neutra gerada durante o cisalhamento, em amostras de argila com a inclusão de fibras de polipropileno, também foram relatadas nos estudos realizados por Li (2005) e por Özkul (2007). Li (2005) realizou ensaios CU em amostras de argila com a inclusão de fibras de polipropileno de 25 mm, com teor igual a 0,2% (Figura 2.30) e Özkul (2007) realizou ensaios de compressão CU em amostras de argila com a inclusão de fibras recicladas de pneu, com comprimentos limitados a 25 mm, compactadas na energia normal (Figura 2.31).

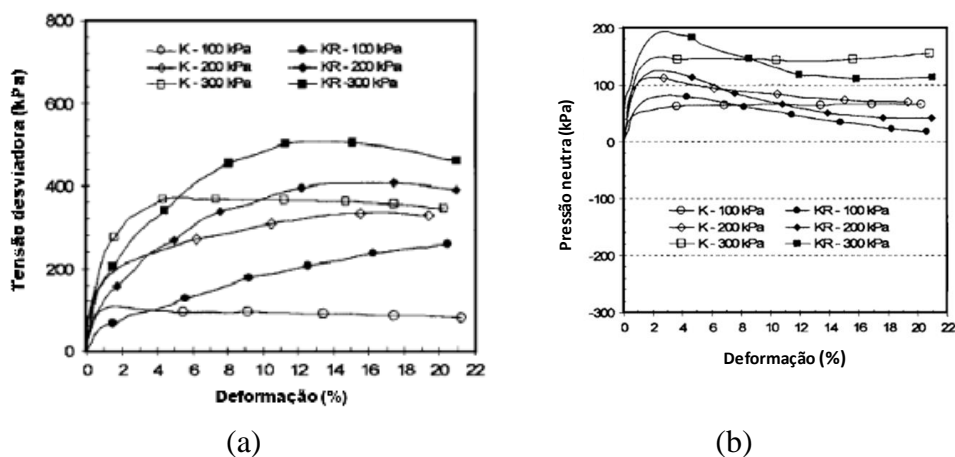


Figura 2.31. Resultado do ensaio triaxial CU em solo argiloso com fibras de pneu: (a) tensão-deformação; (b) Pressão neutra gerada (Adaptado de ÖZKUL, 2007)

Özkul (2007) também realizou ensaios CU e CD em amostras de argila com a inclusão de fibras recicladas de pneu, com comprimentos limitados a 25 mm, compactadas na energia modificada (Figura 2.32). Os ensaios CU revelaram valores de 34 kPa de coesão para natural e 64 kPa para o solo-fibra, enquanto os ensaios CD mostraram valores de 19 kPa de coesão para solo natural e 38 kPa para o solo-fibra. Os resultados obtidos por Özkul (2007) estão em concordância com os de Freilich et al. (2010), onde a resistência ao cisalhamento drenada, obtida através do ensaio CD, foi menor em relação a resistência obtida no ensaio CU. Os valores de ângulo de atrito não apresentaram alteração significativa em ambos os casos.

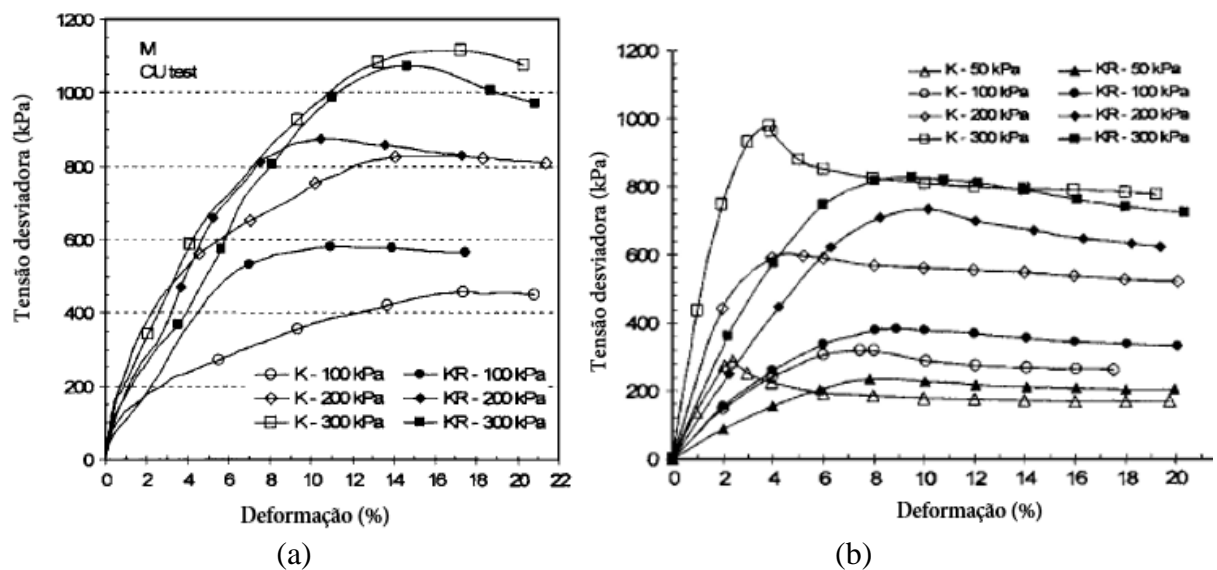


Figura 2.32. Resultado do ensaio triaxial em solo argiloso com fibras de pneu: (a) Compressão triaxial CU; (b) Compressão triaxial CD (Adaptado de ÖZKUL, 2007).

Mirzabebei et al. (2017) realizaram uma série de ensaios triaxiais CU, em amostras de argila com a adição de fibras recicladas de carpete, com diferentes tensões de confinamento e diferentes teores de fibras (1%, 3% e 5%). Os solos fibrosos demonstraram melhoria significativa na tensão de desvio em relação ao do solo natural. O teor de fibras de 3% apresentou maior resistência ao cisalhamento na tensão de consolidação efetiva inicial de 50 kPa, em comparação ao solo com 5% de fibras. No entanto, com um aumento na tensão de consolidação inicial efetiva para 100 kPa e 200 kPa, a ordem observada foi revertida (Figura 2.33). Os autores também concluíram que a inclusão de fibras resultou na transformação do comportamento plástico de tensão-deformação do solo natural para um comportamento de endurecimento de deformação.

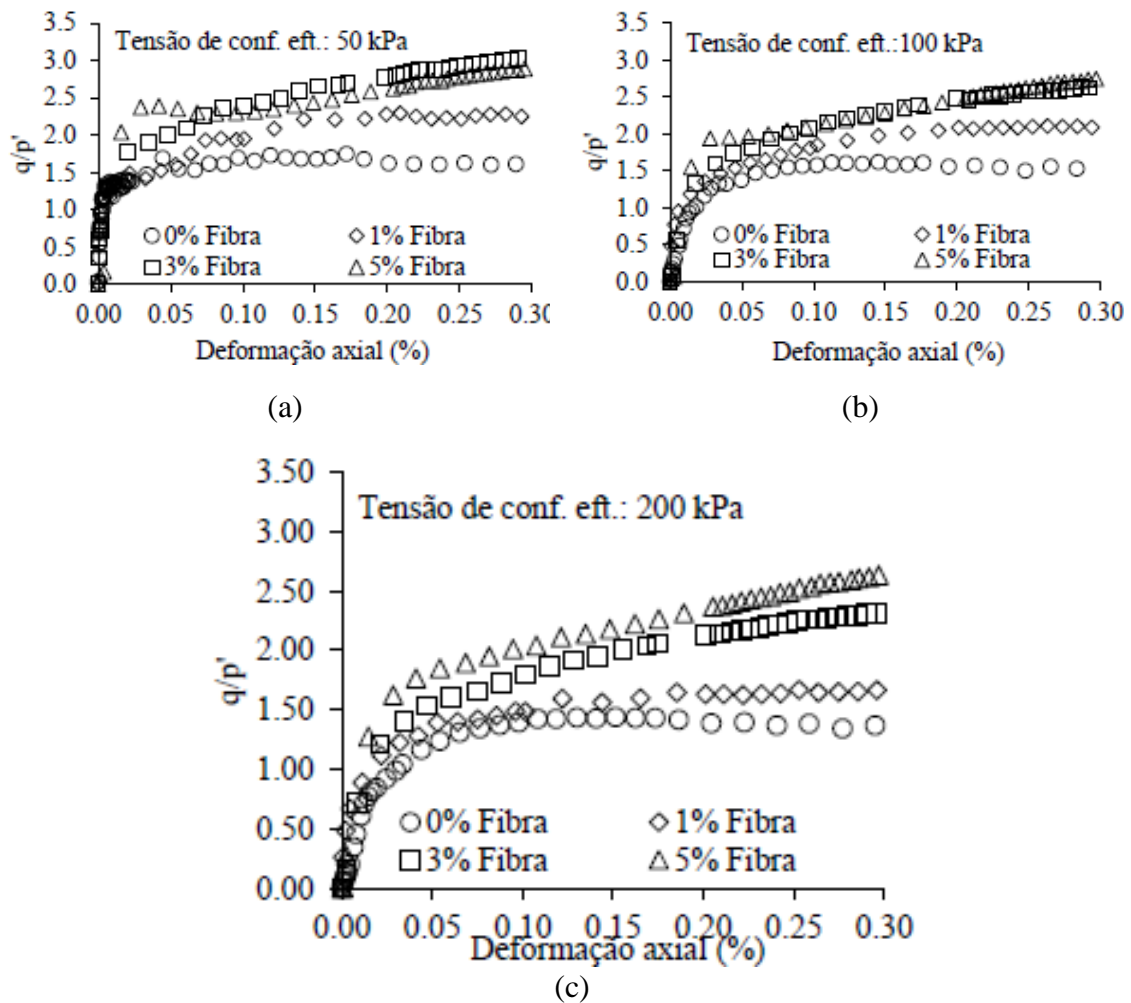


Figura 2.33. Relação de tensão efetiva e tensão de desvio versus deformação axial de amostras de solo natural e solo-fibra para diferentes tensões de confinamento: (a) 50 kPa; (b) 100 kPa; (c) 200 kPa (Modificado de MIRZABEBEI, 2017).

2.7 MODELOS DE PREVISÃO DE COMPORTAMENTO SOLO-FIBRA

Embora o benefício das inclusões de fibras em solos argilosos seja um conceito já estabelecido na atual prática geotécnica, a obtenção de parâmetros para projetos de solos melhorados com fibras ainda se dá por meio da realização de ensaios em amostras com a inclusão de fibras específicas para o projeto em questão, o que pode ser oneroso e demorado. Assim, para superar essa necessidade, pesquisadores tem desenvolvido modelos analíticos para quantificar as alterações nas propriedades geotécnicas do solo obtidos pela inclusão das fibras. Neste caso, a principal dificuldade reside em definir um modelo apropriado para o mecanismo de interação solo-fibra, o qual é governado por

diversos fatores, tais como as propriedades do solo e das fibras, o nível de tensão, umidade do solo, bem como as condições dos ensaios.

Zornberg (2002) propôs um modelo de previsão da resistência ao cisalhamento equivalente do solo-fibra baseando-se apenas nas propriedades isoladas do solo e da fibra. Tal metodologia utiliza conceitos derivados do equilíbrio limite e contrapõe a análise tradicional do solo reforçado com fibras, no qual são utilizados ensaios de laboratório no compósito para definição das propriedades do conjunto solo-fibra.

Assim, o estudo de Zornberg (2002) tem por finalidade analisar independentemente as características do solo (peso específico, coesão e ângulo de atrito), das fibras (teor de fibras, índice de aspecto e resistência à tração última da fibra) e a resistência ao cisalhamento na interface solo-fibra, a fim de quantificar o efeito da inclusão das fibras na resistência ao cisalhamento do compósito. O método proposto adota uma envoltória de resistência ao cisalhamento bilinear e o comportamento de ruptura pode ser governado de duas formas, a depender da tensão de confinamento aplicada e da tensão crítica de confinamento do compósito solo-fibra. A tensão crítica de confinamento, responsável pela mudança no mecanismo de interação solo-fibra, é definida como:

$$\sigma_{n,crit} : \frac{\sigma_{f,ult} - \eta_F \cdot c_{i,c} \cdot c}{\eta_F \cdot c_{i,\phi} \cdot \tan\phi} \quad (4)$$

Onde: $c_{i,c}$ e $c_{i,\phi}$ são os coeficientes de interação para a componente de coesão e ângulo de atrito na interface do cisalhamento, η_F é o índice de forma da fibra (relação entre comprimento e diâmetro da fibra), c e ϕ são parâmetros de resistência drenados de Mohr-Coulomb do solo natural e $\sigma_{f,ult}$ é a resistência última à tração da fibra. Os parâmetros $C_{i,\phi}$ e $\tan\phi$ são equivalentes à tangente do ângulo de atrito na interface.

Neste método, para os casos em que a tensão de confinamento que atua sobre as fibras está abaixo da tensão crítica de confinamento, ou seja, para rupturas governadas pelo arrancamento das fibras, a resistência ao cisalhamento é dada pela seguinte equação:

$$S_{eq,t} : c_{eq,t} + (\tan\phi)_{eq,t} \cdot \sigma_n \quad (5)$$

em que:

$$c_{eq,p} : (1 + \alpha \cdot \chi_F \cdot \eta_F \cdot c_{i,c}) \cdot c \quad (6)$$

$$(\tan\phi)_{eq,p}: (1 + \alpha \cdot \chi_F \cdot \eta_F \cdot C_{i,\phi}) \cdot \tan\phi \quad (7)$$

onde: χ_F é teor de fibras na mistura e α_F é o coeficiente que explicita a orientação e a eficiência das fibras na mistura, sendo $\alpha_F:1$ para casos de fibras distribuídas aleatoriamente e que trabalham com 100% de eficiência e caso contrário, α_F será menor que 1.

Para os casos em que a tensão de confinamento que atua sobre as fibras está acima da tensão crítica de confinamento, ou seja, para rupturas governadas pela ruptura das fibras, a resistência ao cisalhamento é dada pela seguinte equação:

$$S_{eq,t}: C_{eq,t} + (\tan\phi)_{eq,t} \cdot \sigma_n \quad (8)$$

em que:

$$C_{eq,p}: c + \alpha \cdot \chi_F \cdot \sigma_{f,ult} \quad (9)$$

$$(\tan\phi)_{eq,t}: \tan\phi \quad (10)$$

A Figura 2.34 apresenta os resultados da pesquisa de Li e Zornberg (2003), comparando as envoltórias de cisalhamento experimentais e previstas para um solo argiloso com a inclusão de fibras curtas de polipropileno (25 mm) nos teores de 0,2% e 0,4%.

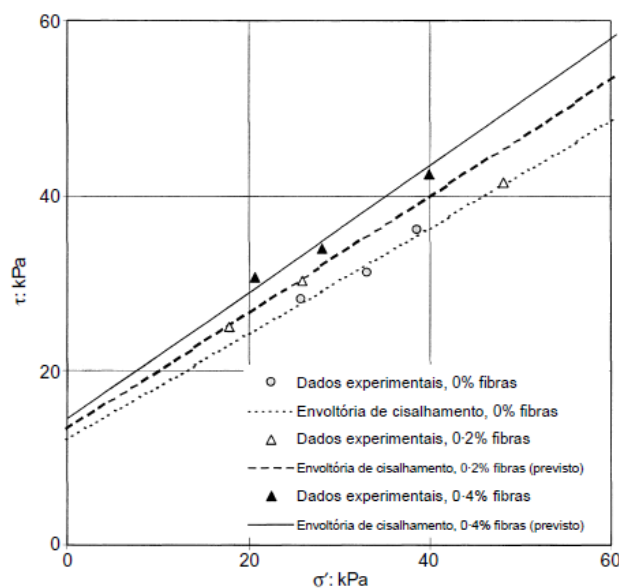


Figura 2.34. Comparação entre os resultados de resistência ao cisalhamento experimentais e previstos pelo método de Zornberg (2002) (Adaptado de LI e ZORNBERG, 2003)

Os parâmetros previstos por Li e Zornberg (2003) para a resistência ao cisalhamento equivalente evidenciado pela envoltória apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais obtidos através de ensaios de compressão triaxial CU.

Li e Zornberg (2003) relatam ainda que resultados experimentais adicionais são necessários para validar o modelo proposto, e que a precisão da previsão desses modelos também depende da compreensão adequada do mecanismo de interação da interface entre fibras e solos.

Jamei et al (2013) desenvolveram um modelo analítico para prever a resistência ao cisalhamento não drenado de solos argilosos com a inclusão de fibras curtas para casos de deformação plana e deformação assimétrica. O modelo proposto pelos autores é uma extensão do modelo proposto por Michalowski na Zhao (1996), o qual é aplicado em solos arenosos reforçados. De acordo com os resultados experimentais realizados pelos autores, a ruptura do material compósito do solo é causada pelo deslizamento das fibras. Assim, o comportamento na interface entre as fibras individuais e o solo argiloso foi investigado pelos autores por meio de ensaios de arrancamento da fibra. Levando em consideração o teor volumétrico de fibras, a coesão e o ângulo totais da argila natural e os parâmetros de resistência ao cisalhamento da interface foi elaborado um modelo que possibilita a previsão do comportamento de ruptura do solo argiloso-fibra. A formulação do modelo de Jamei et al. (2013) é apresentada abaixo:

$$\sigma_1(1 + D\chi_f \cdot \tan\delta_i) - \sigma_3(-2K - D\chi_f \cdot \tan\delta_i) + \chi_f \cdot c_i(I_1 + KI_2) - B = 0 \quad (11)$$

Em que:

$$\chi_f: \eta \cdot \frac{d_f \cdot L_f^2 \cdot N_v}{2} \quad (12)$$

$$N_v: \frac{\chi_{F,v}/100}{\pi(d_f/2)^2 L_f(1 + \chi_{F,v}/100)} \quad (13)$$

$$K_p: \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (14)$$

$$K: -0,5K_p \quad (15)$$

$$K_a: \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (16)$$

$$\Psi_o: \arctan(\sqrt{2K_a}) \quad (17)$$

$$H: -c \cdot \cot\phi \quad (18)$$

$$B: H(1 - K_p) \quad (19)$$

$$I_1: \frac{\cos^3 \psi_0}{3} \quad (20)$$

$$I_2: \frac{3 \cdot \cos^3 \psi_0 - \cos^3 \psi_0}{3} \quad (21)$$

$$I_1'': \frac{2 \cos^5 \psi_0}{5} - \frac{\cos^3 \psi_0}{3} \quad (22)$$

$$I_2'': \cos^3 \psi_0 - \cos \psi_0 - \frac{2 \cos^5 \psi_0}{5} - \frac{\cos^3 \psi_0}{3} \quad (23)$$

$$A': (I_1'' + K \cdot I_2'') \quad (24)$$

$$D: (I_1 + K \cdot I_2 - A') \quad (25)$$

Onde:

L_f : comprimento da fibra; d_f : diâmetro da fibra; $\chi_{F,v}$: teor de fibra volumétrico; σ_3 : Tensão confinante; σ_1 : tensão principal tensão na ruptura, c e ϕ : parâmetros totais de resistência do solo natural; c_i e δ_i : coesão e ângulo de atrito na interface solo-fibra, respectivamente.

A Figura 2.35 apresenta as curvas q versus p , onde q : $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ e p : $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$, obtidos nos ensaios de compressão triaxial não drenado experimentais e previstos pelo modelo proposto para um solo argiloso com a inclusão de fibras curtas naturais de sisal, nos teores volumétricos de 0,19%, 0,38%, 0,57%, 0,95%. Para a determinação da coesão e ângulo de atrito na interface solo-fibra, os autores realizaram ensaios de arrancamento obtendo valores igual a 13 kPa e 8° . Pode-se observar pelas envoltórias que os resultados previstos pelo modelo apresentam uma boa concordância com os dados experimentais obtidos através de ensaios de compressão triaxial não drenado (UU), para os níveis de tensão apresentados.

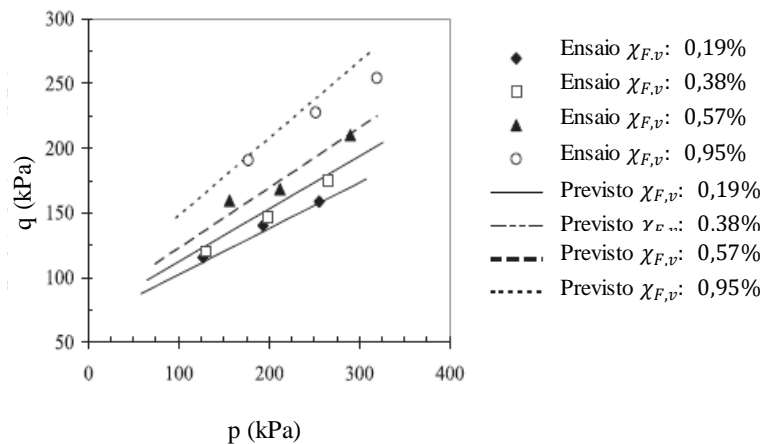


Figura 2.35. Comparação entre os resultados de resistência ao cisalhamento experimentais e previstos pelo método de Jamei et al (2013). (Adaptado de Jamei et al, 2013).

2.8 MODELOS CONSTITUTIVOS SOLO-FIBRA

Diambra e Ibraim (2013) propuseram um modelo constitutivo para solos coesivos reforçados com fibras baseado em ensaios triaxiais. O mecanismo de interação solo-fibra, assumido nesse modelo, leva em consideração o deslizamento parcial entre a fibra e a matriz, o arrancamento da fibra do solo, a deformação plástica da fibra e a possível quebra das fibras. A distribuição da orientação das fibras é também contabilizada quando a contribuição global de tensão das fibras é calculada através de uma discretização do espaço em domínios angulares sólidos. Usando parâmetros típicos para a argila e fibras de polipropileno obtidos por Freilich et al. (2010), o desempenho do modelo proposto foi analisado para a determinação da resistência ao cisalhamento triaxial sob condições drenadas e não drenadas. Os resultados do estudo paramétrico mostram que o modelo proposto prevê tendências similares com os mesmos níveis de tensões (Figura 2.36). Para o cisalhamento não drenado, o modelo poderia reproduzir a variação da resistência ao cisalhamento e as trajetórias de tensão efetiva com o teor de fibra e a tensão de confinamento. Além disso, o modelo também pode explicar a diminuição da eficácia das fibras associada a um aumento no teor de umidade do solo.

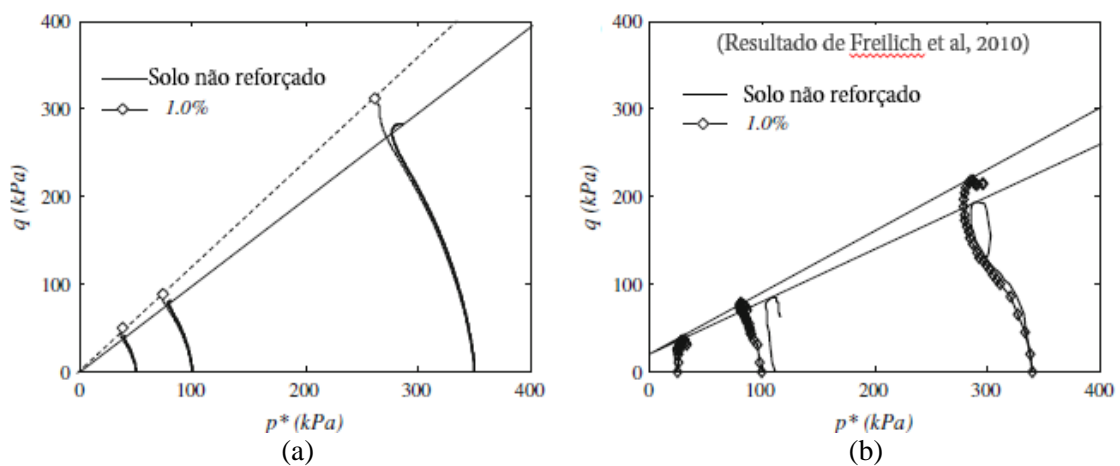


Figura 2.36. Comparação qualitativa dos resultados de trajetória de tensões: (a) previsão do modelo; (b) dados experimentais de Freilich et al. 2010 (Adaptado de DIAMBRA e IBRAIM, 2013)

Mirzabebei et al. (2017) também desenvolveram dois modelos de regressão não-linear com base no modelo hiperbólico modificado proposto por Horpibulsuk e Miura (2001) para prever a trajetória de tensão efetiva e a tensão desvio da argila com adição de fibras. Os parâmetros do modelo podem ser determinados a partir de resultados de ensaios

triaxiais realizados em solo natural e em amostra de solo-fibra com duas tensões de consolidação diferentes. O modelo pode prever a curva tensão-deformação da argila reforçada com fibras, conhecendo a tensão de consolidação inicial efetiva e o teor de fibra. Os autores validaram o modelo com dados disponíveis na literatura e as previsões obtidas concordaram bem com os dados experimentais publicados (Figura 2.37).

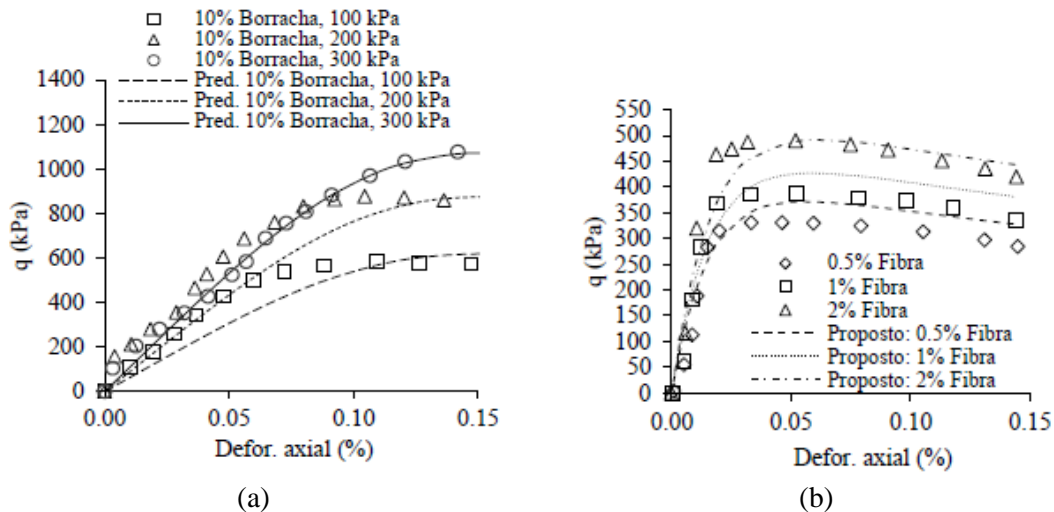


Figura 2.37. Dados experimentais e previstos para resposta de resistência ao cisalhamento de solo reforçado com fibras (a) Comparação com dados experimentais de Babu e Chouksey, 2010. (b) Comparação com dados experimentais de Özkul e Baykal, 2007 (Adaptado de MIRZABEBEI et al., 2017)

O modelo proposto por Mirzabebai et al. (2017) é relativamente simples em comparação com outros modelos de regressão desenvolvidos e modelos constitutivos relatados na literatura, na medida em que elimina a necessidade de ensaios avançados de solo e conhecimento das propriedades das fibras. Este modelo pode ser usado como uma ferramenta para prever a resistência ao cisalhamento de argila com a inclusão de fibras na prática de engenharia geotécnica.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, descrevem-se os materiais e métodos empregados no programa experimental, bem como os ensaios de laboratório utilizados para a realização desta pesquisa.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1 SOLO

O solo utilizado nesta pesquisa consiste em um solo argilo-arenoso laterítico, típico do interior do estado de São Paulo, coletado em uma jazida localizada no município de Santa Gertrudes – São Paulo. A Figura 3.1 mostra a curva granulométrica do solo (ABNT NBR 7181, 2016).

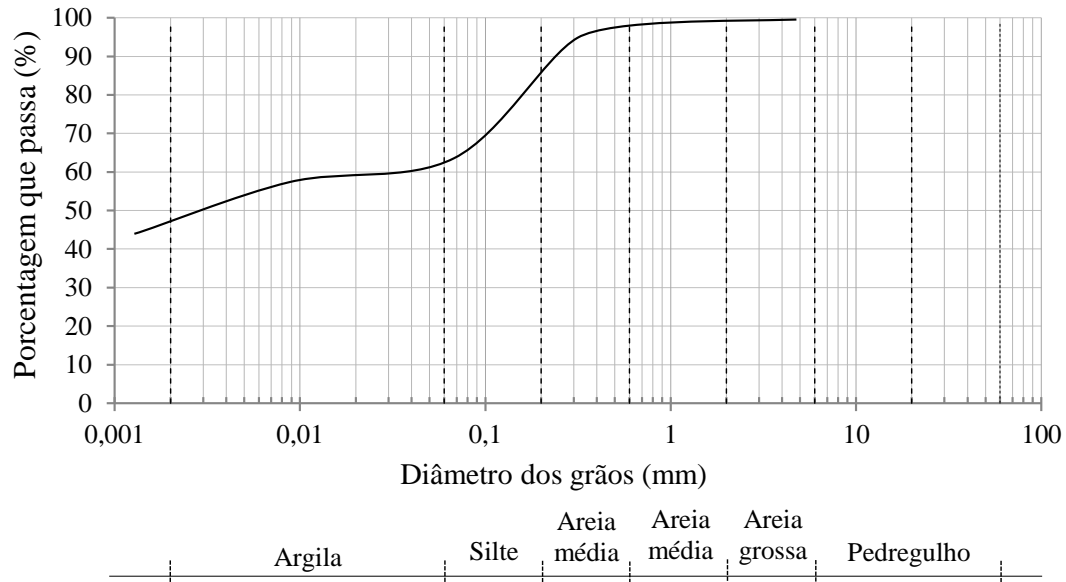


Figura 3.1. Curva granulométrica do solo argilo-arenoso utilizado nesta pesquisa.

As características geotécnicas do solo são apresentadas na Tabela 3.1. Verifica-se que o solo escolhido para a pesquisa apresenta fração significativa de argila, alta plasticidade e baixa capacidade de suporte, sendo passível do desenvolvimento de elevados níveis de pressões neutras.

Tabela 3.1. Características geotécnicas do solo utilizado na pesquisa.

Ensaio	Valor	Especificação
Fração areia (%)	36	
Fração silte (%)	14	ABNT NBR 7181
Fração argila (%)	50	
Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	3,019	ABNT NBR 6508
Limite de Liquidez, LL (%)	51	ABNT NBR 6459
Limite de Plasticidade, LP (%)	30	ABNT NBR 7180
Índice de Plasticidade, IP (%)	21	-
Massa específica seca máxima, ρ_d (g/cm^3)	1,70	
Teor de umidade ótimo, w (%)	24,0	ABNT NBR 7182
Classificação SUCS	CH	ASTM D2487
Classificação MCT	LG'	DNER – ME 258
CBR (24,0%)	7,38	
Expansão	0,13	ABNT NBR 9895

3.1.2 FIBRAS

As fibras utilizadas na pesquisa são comercialmente disponibilizadas, sendo fibras poliméricas de polipropileno reciclado aditivado, de pequenos filamentos. A Figura 3.2 apresenta as fibras de polipropileno. A Tabela 3.2 apresenta suas características físicas, disponibilizadas pelo fabricante.



Figura 3.2. Fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa.

Tabela 3.2. Propriedades físicas das fibras de polipropileno.

Propriedades Físicas	Fibras
Matéria prima	Polipropileno aditivado
Massa específica	0,90 g/cm ³
Diâmetro médio	18 µm
Comprimento	12 mm
Tensão de ruptura	810 MPa
Alongamento na ruptura	28%
Absorção de água	0

As fibras apresentam características uniformes, são inertes quimicamente, o que possibilita a sua aplicação em projetos de engenharia. Por serem de polímero aditivado, apresentam elevada tensão de ruptura (810 MPa) em comparação a fibras de polipropileno (cerca de 400 MPa), tal como relatado por Li et al. (2005), Anagnostopoulos (2013) e Xiao et al (2016).

3.1.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Diversas pesquisas que avaliaram o comportamento da inclusão de fibras curtas em solos argilosos utilizaram teores gravimétricos variando de 0,10% a 1,5% de fibras em relação a massa de solo seco (FEUERHEMEL, 2000; LI e ZORNBERG, 2005, ÖZKUL e BAYKAL, 2007; FREILICH et al.; 2010, MIRZABABAEI et al., 2013, DIAMBRA e IBRAIM, 2013, OTOKO 2014, DIAB et al., 2018).

Assim, com o objetivo de verificar a incorporação das fibras de polipropileno no solo argiloso e a da mistura, foram realizados testes preliminares com teores gravimétricos de fibras de 0,10%, 0,25%, 0,50% e 1,0%, em relação ao peso seco de solo. Para tanto, seguiu-se a seguinte sequência: 1) homogeneizou-se o solo na umidade ótima do solo natural, obtida através do ensaio de compactação na energia Proctor normal, e calculou-se a quantidade de água em relação ao peso total da matéria prima seca (solo + fibra); 2) distribuiu-se aleatoriamente as fibras na matriz de solo; 3) iniciou-se o processo de mistura dos materiais.

A primeira tentativa de incorporar as fibras ao solo aconteceu de forma manual e logo constatou-se que este processo de mistura não seria adequado para a homogeneização do compósito, uma vez que houve a formação de diversos aglomerados de fibras, como pode-se observar na Figura 3.3. Desta forma, optou-se por misturar mecanicamente as fibras ao solo. A pesquisa de Li (2005) também utilizou um misturador mecânico para a homogeneização das fibras ao solo argiloso.

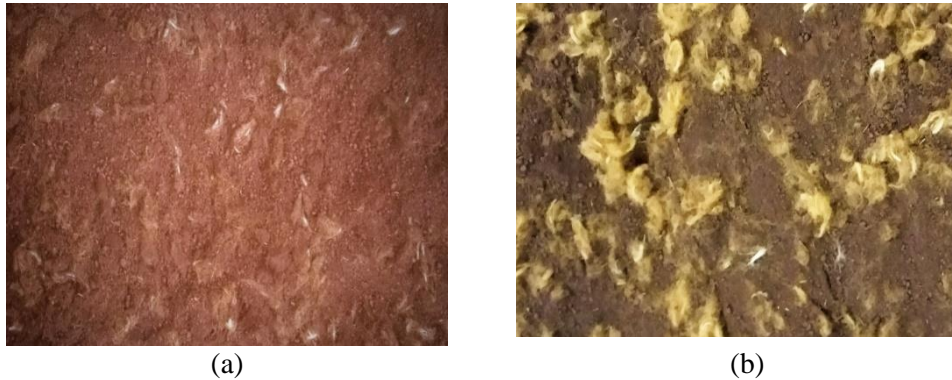


Figura 3.3. Solo-Fibras misturados manualmente: (a) solo-fibra 0,25%; (b) solo-fibra 0,50%.

Durante este o processo de mistura mecânica com uso de um agitador, observou-se que os teores gravimétricos de fibras igual a 0,10% e 0,25% apresentaram homogeneidade adequada e boa trabalhabilidade. Já o teor de 0,50% apresentou ainda uma grande quantidade de aglomerações de fibras, o que impossibilitou a realização dos ensaios propostos nesta pesquisa para este teor. Teores superiores também foram testados, porém apresentaram baixa trabalhabilidade. Assim, os teores de fibras de 0,10% e 0,25% foram os escolhidos para a realização dos ensaios geotécnicos. A Figura 3.4 apresenta as misturas finais com fibras homogeneizadas.

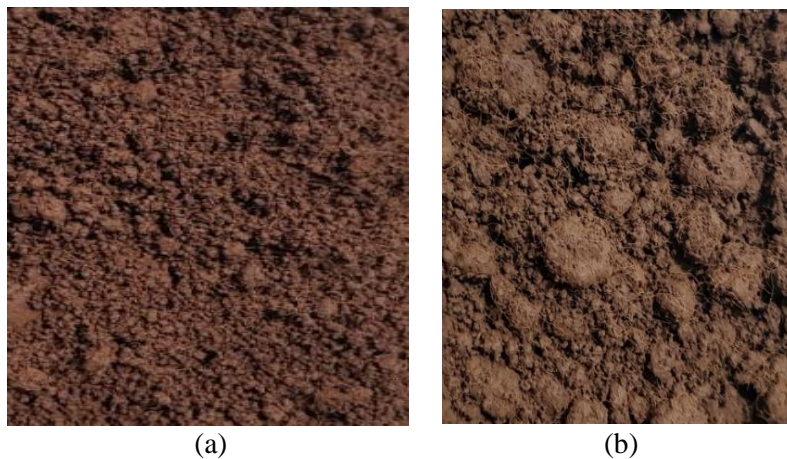


Figura 3.4. Solo-Fibras misturados mecanicamente: (a) Solo-Fibra 0,10%; (b) Solo-Fibra 0,25%.

3.1.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram realizados ensaios de compactação, na energia proctor normal, nas misturas de solo-fibra com teores de 0,10% e 0,25% com o objetivo de analisar a influência das fibras na compactação e definir os parâmetros para moldagem dos corpos de prova.

Os corpos de prova utilizados nesta pesquisa para dos ensaios foram moldados nos parâmetros ótimos de compactação de cada mistura, na energia Proctor normal (NBR 7182, ABNT 2016). Para os ensaios de resistência à compressão uniaxial não confinada e compressão triaxial, utilizaram-se corpos de prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, com grau de compactação especificado em 95% ($\pm 1\%$). Os corpos de prova que não atenderam esta especificação foram descartados das análises.

Para os casos dos ensaios de cisalhamento direto, os corpos de prova foram compactados dinamicamente diretamente na caixa do equipamento, seguindo-se as especificações de grau de compactação em 95% nos teores ótimos de compactação de cada mistura.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A Tabela 3.3 apresenta o programa experimental proposto para esta pesquisa, as respectivas normas de referência para cada ensaio, bem como o número total de ensaios realizados.

Tabela 3.3. Programa experimental da pesquisa.

Etapa	Ensaio	Especificação	Número de ensaios
Comportamento mecânico	Resistência à compressão uniaxial não confinada	NBR 12770 (1992)	15
	Cisalhamento direto (drenado não inundado)	ASTM D3080 (2004)	12
Comportamento tensão-deformação	Triaxial Consolidado Drenado (CD)	ASTM D7181 (2011)	12
	Triaxial Consolidado Não Drenado (CU)	ASTM D4767 (2011)	12

Os ensaios de resistência à compressão não confinada foram realizados em uma prensa de ensaio de 50 kN de capacidade e velocidade de ruptura de 1,27 mm/min, respeitando-se os intervalos sugeridos pela norma NBR 12770 (ABNT, 1992), a qual indica que o acréscimo de carga deve ser aplicado de maneira a se obter uma velocidade de deformação axial entre 0,5%/min e 2%/min. Os critérios de aceitação dos resultados de resistência de cada corpo-de-prova seguiram as recomendações desta especificação, sendo o desvio padrão máximo aceitável de 10%. A Figura 3.5 ilustra um ensaio de resistência à compressão não confinada realizados com amostras solo-fibra.



Figura 3.5. Ensaio de Resistência à compressão não confinada.

Com relação aos ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial, pesquisas encontradas na bibliografia com misturas solo-fibra utilizaram a faixa de tensões confinantes entre 50 e 400 kPa (LI e ZORNBERG, 2005; ÖZKUL e BAYKAL, 2007; FREILICH et al.; 2010; BOLAÑOS e CASAGRANDE, 2016; MIRZABABAEI et al., 2017). De acordo com Diab et al. (2018), esta faixa de tensão representa, em geral, os estados de tensões que são indicativos de baixas pressões de confinamento (ex.: reparo localizados em rupturas superficiais de taludes e coberturas de aterro) ou altas pressões de sobrecarga (ex.: aterros e fundos atrás das paredes). Segundo Li (2005), para solos com a inclusão de fibras de polipropileno, o modo de ruptura do compósito sob cisalhamento é o arrancamento das fibras da matriz de solo, uma vez que as fibras possuem alta resistência à tração e pequeno comprimento, e este comportamento de ruptura é observado em tensões de confinamento mais baixas.

Para esta pesquisa, as tensões normais aplicadas nos ensaios de cisalhamento direto e as tensões confinantes aplicadas nos ensaios de compressão triaxial CD e CU foram 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa. O ensaio de cisalhamento direto foi realizado na

condição drenada não inundada, seguindo as prescrições da ASTM D3080 (2004), em amostras compactadas.

Os ensaios de compressão triaxial CD e CU foram realizados em uma prensa com capacidade de 10 kN, a qual permite o monitoramento das pressões neutras e da pressão confinante em uma câmara de 13 cm de diâmetro. Para a montagem dos corpos de prova, utilizou-se duas pedras porosas e papel filtro no topo, na base e circundante ao corpo-de-prova. Por fim, o corpo-de-prova foi envolto por uma membrana de látex, presa por *o-rings* de borracha. Para as medidas de deslocamentos, utilizou-se sensor do tipo LVDT (com resolução de 0,001 mm) instalado no topo da célula triaxial. Para as medidas de pressão neutra, utilizou-se transdutores de pressão com capacidade de 1400 kPa. E para as leituras de variação de volume durante as etapas do ensaio, fez-se o uso de um medidor de volume automático. A Figura 3.6 apresenta o detalhe da montagem do corpo-de-prova.



Figura 3.6. Ensaio de compressão triaxial: (a) montagem do corpo-de-prova na célula triaxial; (b) fase de saturação por percolação e por contrapressão.

A realização dos ensaios de compressão triaxial ocorreu conforme procedimentos recomendados pelas normas ASTM D7181 (2011) e ASTM D4767 (2011). A primeira fase foi a de saturação, seguida do adensamento e por fim, o carregamento axial até a ruptura. A fase de saturação das amostras (natural e com fibras) levou aproximadamente dez dias. A primeira etapa da saturação durou em média quatro dias e ocorreu através da percolação de água da base para o topo do corpo de prova, sob uma diferença de pressão entre a pressão de confinamento e a pressão de contrapressão de 5 kPa. A segunda etapa de saturação durou em média seis dias e ocorreu por meio do incremento de estágios de pressão de confinamento, com uma diferença para a pressão de contrapressão igual a 5

kPa. A pressão de confinamento foi aplicada em incrementos de 50 kPa até um máximo de 300 kPa. A cada incremento de pressão, realizou a verificação da saturação da amostra, através do parâmetro B. Segundo Skempton (1954), o parâmetro B é a relação entre a diferença de pressão neutra e a diferença de pressão de confinamento.

Cada estágio foi mantido por duas horas e processo finalizava-se quando o parâmetro B alcançava aproximadamente 0,95, o que garante a saturação da amostra e estão em acordo com pesquisas que mostram que o parâmetro B alcança em torno de 0,95 para solo com a inclusão de fibra (LI, 2005; ÖZKUL, 2005, MIRZABABAEI et al., 2017).

Após a saturação da amostra, iniciou-se a fase de adensamento. Desta forma, a amostra foi consolidada sob uma pressão confinante pré-definida, permitindo a drenagem da água para o sistema de contrapressão. Nesta etapa foram realizadas leituras de variação de volume em tempos definidos até que uma dissipação da pressão neutra em torno de 95% seja atingida, como detalhado por Head (1994).

Concluídas as fases de saturação e adensamento, procedia-se para a fase de cisalhamento da amostra a uma taxa de deformação axial constante de 0,15 mm/minuto, tanto para a condição drenada quanto para a condição não drenada.

A Figura 3.7 apresenta as câmaras de ensaio com os sensores utilizados nos ensaios.

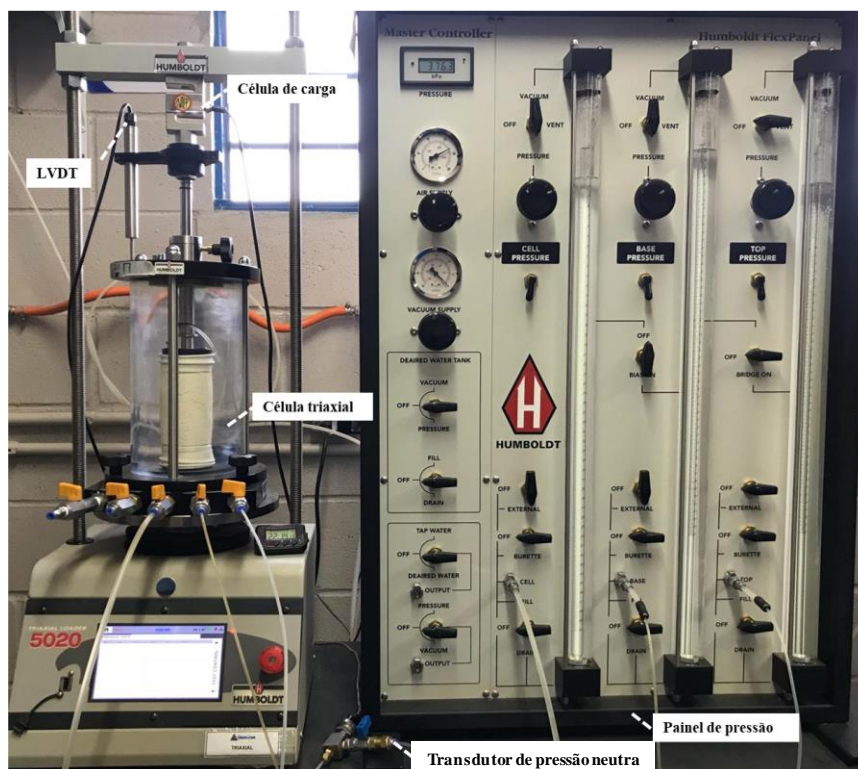


Figura 3.7. Equipamento triaxial para execução dos ensaios.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta a avaliação dos resultados obtidos na investigação das propriedades mecânicas e de resistência das misturas solo-fibra estudadas nesta pesquisa.

4.1 COMPACTAÇÃO

A Figura 4.1 apresenta os resultados da curva de compactação do ensaio de compactação na energia Proctor Normal, obtida para o solo natural e para as misturas solo-fibra nos teores gravimétricos de 0,1% e 0,25%. A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros ótimos de compactação do solo natural e das misturas solo-fibra.

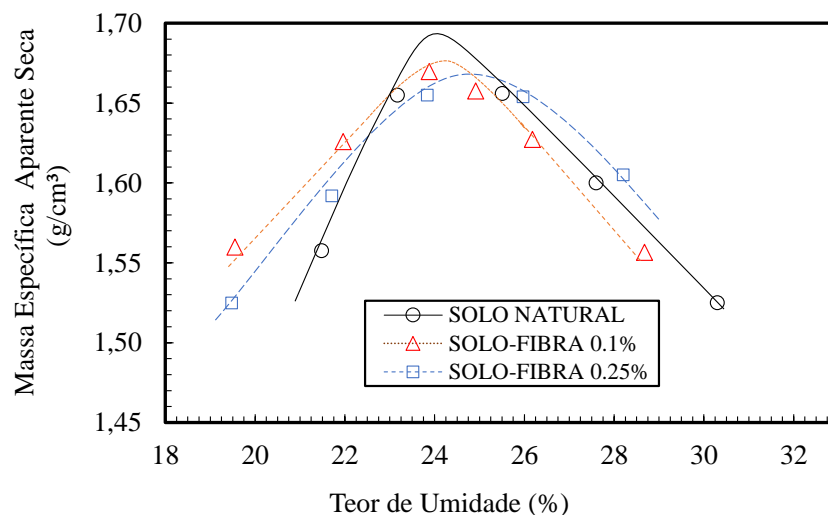


Figura 4.1. Curvas de compactação na energia Proctor Normal do solo natural e das misturas solo-fibra.

Verifica-se nos resultados apresentados que após a inserção dos teores de 0,1% e 0,25% de fibra polimérica no solo argiloso houve pequena alteração nos valores obtidos de umidade e massa específica seca máxima, apesar de verificar mesma ordem de grandeza entre os parâmetros analisados. De modo geral, os resultados de compactação estão de acordo com resultados de pesquisas que avaliaram as mudanças nos parâmetros de compactação de misturas argila-fibra, tal como em Prabakar e Sridhar (2002), Cetin et al (2006), Tran et al. (2018).

Tabela 4.1. Parâmetros ótimos de compactação do solo natural e das misturas solo-fibra.

Solo	Teor de umidade	Massa específica seca
	ótimo (%)	máxima (g/cm ³)
Solo natural	24,0	1,693
Solo-Fibra 0,10%	24,3	1,675
Solo-Fibra 0,25%	24,7	1,668

Essa pequena redução observada na massa específica seca máxima das misturas solo-fibra em relação ao solo natural é explicada pela adição de elementos mais leves (fibras) em relação aos outros materiais presentes no compósito (grãos de solo e água), uma vez que a massa específica seca máxima sofre influência da massa de todos os componentes presentes na mistura. É possível inferir também que as fibras podem alterar o rearranjo dos grãos de sólidos sob o processo de compactação e ao se apoiarem nos grãos sólidos da mistura, as fibras restringem a possibilidade de incremento de massa de grão sólidos por volume unitário do compósito, proporcionando aumento no volume de vazios da estrutura de solo compactado, sendo também responsável por essa redução na massa específica seca máxima e pelo acréscimo no teor de umidade ótimo observados. Tal comportamento também foi verificado por Trindade (2018).

4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL NÃO CONFINADO

A Tabela 4.2 apresenta os resultados de máxima resistência à compressão uniaxial não confinada do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25% considerando-se uma média de cinco corpos de prova para cada caso. Estes resultados são baseados em corpos de prova moldados com grau de compactação de 95% ($\pm 1\%$). Com base nos valores de coeficiente de variação obtidos na Tabela 4.2, observa-se baixa dispersão entre os resultados, validando todos os corpos de prova ensaiados.

A Figura 4.2 apresenta as curvas típicas de tensão-deformação obtidas para o solo natural e para as misturas solo-fibra, considerando-se a curva média tensão-deformação de cada caso. Observa-se pouca alteração na rigidez inicial das curvas tensão-deformação, o que demonstra que o efeito das fibras na rigidez é baixo para pequenas deformações, até o momento em que começam a predominar as deformações plásticas da matriz solo-fibra. Isso reforça a hipótese de MCGown et al. (1978), em que as fibras concedem maior resistência ao solo e apresentam maior mobilização quanto maior for a deformação

imposta ao material. Estes resultados são consistentes com os apresentados em estudos anteriores realizados em solo argiloso, utilizando diversos tipos de fibras (NATARAJ e MCMANIS, 1997, LI e ZORNBERG, 2013, TANG et al., 2007, DANSO et al., 2015; TRAN et al., 2018).

Tabela 4.2. Resistência à compressão uniaxial do solo natural e das misturas solo-fibra.

Mistura	Corpos de prova	Grau de compactação (%)	Resistência à compressão uniaxial máx. (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Solo Natural	CP01	95,3	122,9	132,6	8,9	6,7
	CP02	95,1	143,1			
	CP03	95,2	143,7			
	CP04	94,0	126,8			
	CP05	94,4	126,8			
Solo-fibra 0,10%	CP01	94,7	199,3	193,6	5,5	2,9
	CP02	95,0	198,9			
	CP03	94,4	194,6			
	CP04	94,7	184,7			
	CP05	94,7	190,2			
Solo-fibra 0,25%	CP01	94,0	209,5	211,2	5,2	2,5
	CP02	94,0	204,8			
	CP03	94,0	209,9			
	CP04	94,4	220,7			
	CP05	94,3	210,8			

Observa-se na Figura 4.2 que a resistência à compressão para solo natural ocorreu em aproximadamente 2,1% de deformação, enquanto para as misturas solo-fibra, em ambos teores, (0,10% e 0,25%), ocorreu com aproximadamente 3,7% e 4,5% de deformação, respectivamente. De acordo com os resultados encontrados por Tran et al. (2018), essa melhoria da resistência à compressão uniaxial e na deformação é adequadamente atribuída ao aparecimento de força de embricamento constituída por uma rede de fibras distribuídas na matriz do solo.

De modo geral, verifica-se que as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência após a matriz de solo sofrer deformações iniciais, aumentando a capacidade do compósito no que diz respeito à absorção de energia.

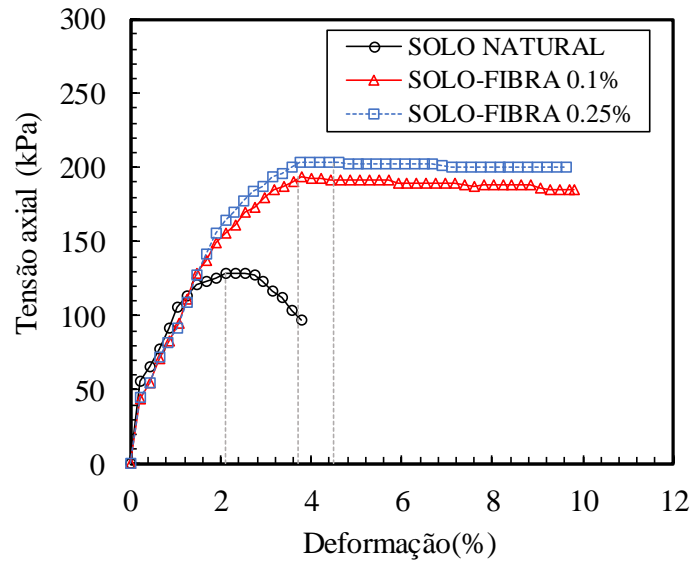


Figura 4.2. Tensão axial *versus* Deformação.

A partir dos resultados das curvas de tensão axial *versus* deformação da Figura 4.2, pode-se perceber também uma importante vantagem da inclusão de fibras no solo, a melhoria na ductilidade. Segundo Consoli et al. (2002) os solos com inclusão de fibras apresentam maior ductilidade e menor perda de resistência ao cisalhamento pós-pico do que o solo natural. Segundo Li (2005) a ductilidade melhorada é benéfica para casos de carregamento nos quais grandes deslocamentos são antecipados, por exemplo aterros sob solos moles ou muros de arrimo sujeito a empuxo ativo.

A Figura 4.3 apresenta os corpos de prova rompidos após a ruptura por compressão uniaxial. É possível observar que os corpos de prova do solo argiloso natural se romperam abruptamente, já os corpos de prova preparados com fibras formaram o efeito “ponte” de fibras relatadas por Tang et al. (2017), como ilustra a Figura 4.3d. No entanto, as fibras não evitam a formação de fissuras, mas, ao acrescentar resistência ao solo, principalmente resistência à tração, a propagação da fissura é reduzida. Isso ocorre, pois, as fibras formam pontes de transferências que absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuída, o que gera uma melhoria nas propriedades mecânicas no estado pós-fissuração e na ductilidade.

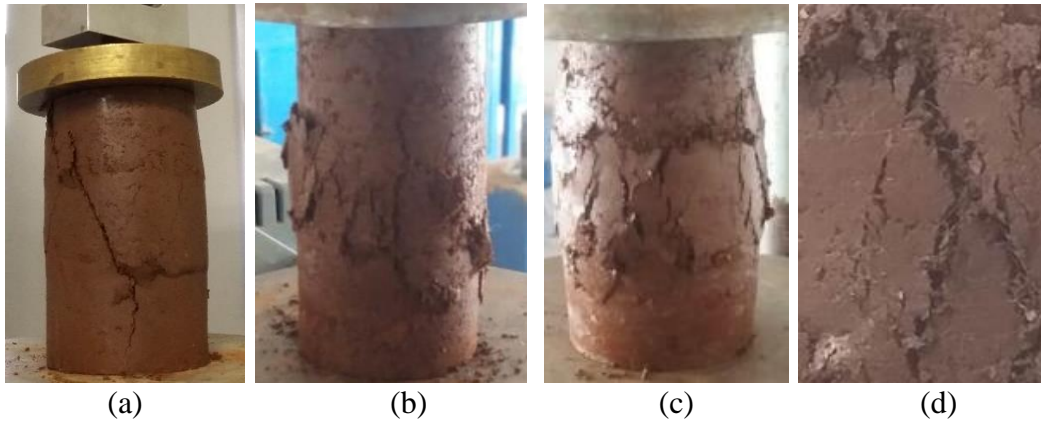


Figura 4.3. Corpos de prova após a ruptura por compressão uniaxial: (a) solo natural; (b) solo-fibra 0,10%; (c) solo-fibra 0,25%. (d) Efeito “ponte” das fibras no solo.

Consoli et al. (2002) cita que a ductilidade do material pode ser quantificada comparando-se a tensão de ruptura e a tensão residual utilizando o índice de fragilidade (I_B), que é definido como:

$$I_B: \frac{q_f}{q_{ult}} - 1 \quad (1)$$

Onde: q_f é a tensão na ruptura; q_{ult} é a tensão na última. A fragilidade aumenta à medida que o I_B aumenta, ou seja, a ductilidade aumenta à medida que o I_B diminui. Para valores de $I_B:0$ o solo representa um comportamento perfeitamente dúctil.

Assim, para o solo natural e as misturas solo-fibra (0,10% e 0,25%) desta pesquisa considerou-se a tensão de ruptura como a máxima tensão imposta ao material e a tensão última como a tensão correspondente a uma deformação de 4% para o solo natural e 8% para as misturas solo-fibra. Verifica-se na Figura 4.4. que há uma redução significativa no índice de fragilidade com o acréscimo de fibras, indicando que as fibras aumentaram a ductilidade do solo argiloso.

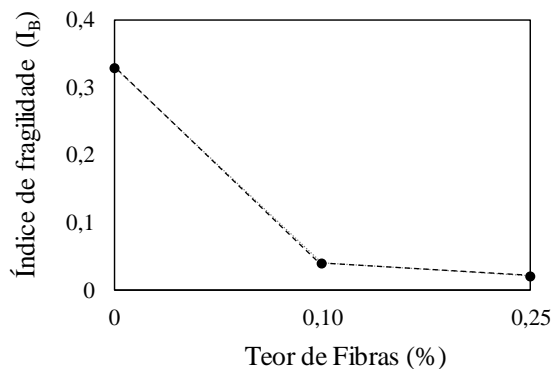


Figura 4.4. Índice de fragilidade para o solo natural e misturas solo-fibra.

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

A fim de verificar o comportamento de resistência ao cisalhamento e deformabilidade do solo natural em comparação às misturas solo-fibra (SF), foram realizados ensaios de cisalhamento direto com tensões normais iguais 50, 100, 200 e 300 kPa.

A Figura 4.5 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, por meio das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, e curvas de variação volumétrica *versus* deslocamento horizontal do solo natural e das misturas solo-fibra com teores de 0,10% e 0,25%, respectivamente. Estes resultados são baseados em corpos de prova moldados com grau de compactação de 95%.

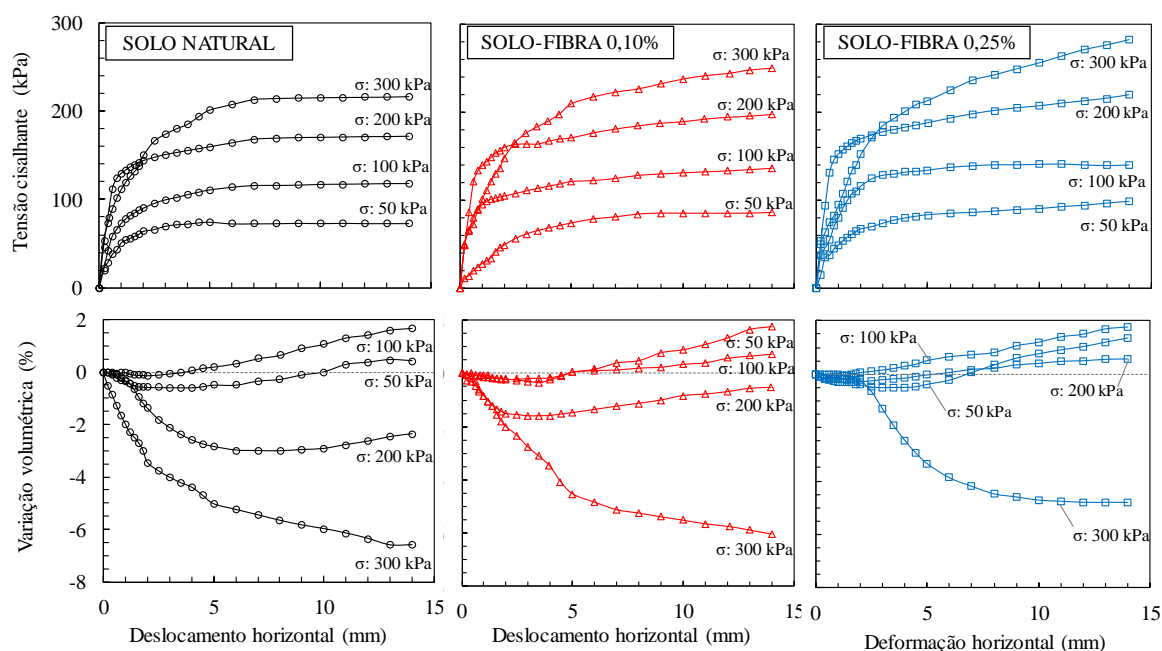


Figura 4.5. Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizados nas amostras de solo natural e misturas solo-fibra.

A Tabela 4.3 apresenta os valores de tensão cisalhante máximos obtidos para o solo natural e para as mistura solo-fibra, para tensão normal aplicada.

De modo geral, verifica-se nos resultados apresentados um aumento na tensão cisalhante com o aumento da tensão normal aplicada durante o ensaio tanto para o solo argiloso natural quanto para as misturas solo-fibra. Observa-se também, que a adição de fibras no solo argiloso provocou aumento de tensão cisalhante e uma menor compressibilidade das amostras solo-fibra em relação ao solo natural.

Tabela 4.3. Tensões cisalhantes máxima (kPa) para o solo natural e misturas solo-fibra

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)		
	Solo natural	Solo-Fibra 0,10%	Solo-Fibra 0,25%
50	74,5	86,2	97,9
100	118,0	136,5	140,9
200	171,1	197,8	219,3
300	216,7	249,9	281,9

Para melhor evidenciar as alterações proporcionadas pela inclusão das fibras ao solo argiloso, a Figura 4.6 apresenta uma comparação das curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada.

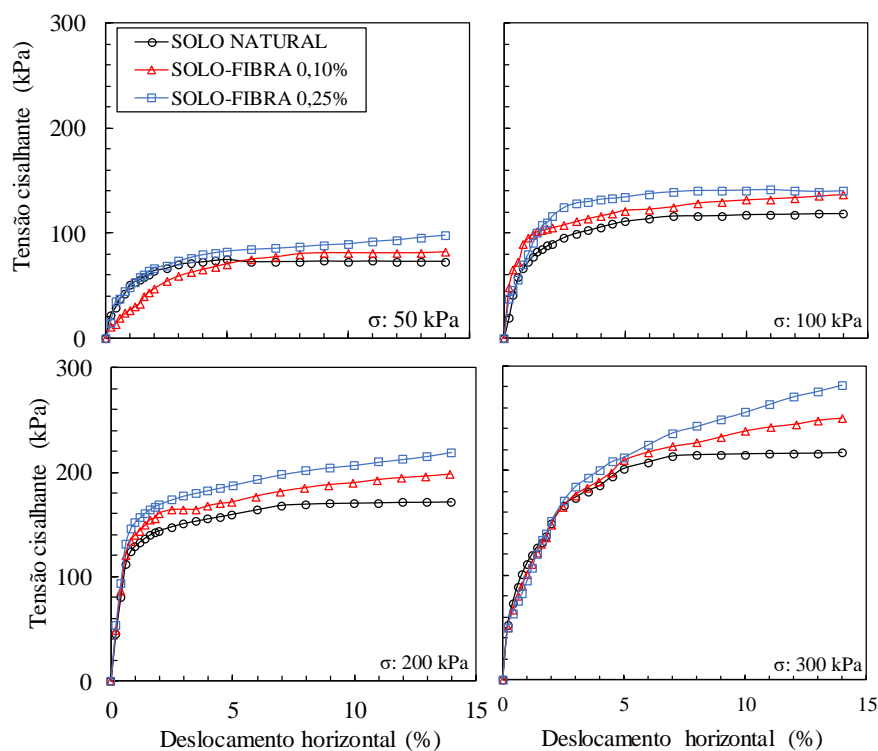


Figura 4.6. Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal do solo natural e das misturas solo-fibra para todas as tensões normais.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.6, pode-se observar que o aumento da inclusão de fibras no solo argiloso melhora o comportamento tensão-deformação do compósito para todas as tensões normais analisadas. Este comportamento está de acordo com os resultados apresentados nas pesquisas realizadas por Nataraj e McManis (1997) e Anagnostopoulos et al. (2014).

Observa-se também na Figura 4.6 que o comportamento das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo natural e das misturas solo-fibra foram semelhantes para a faixa inicial de deslocamento. Isto indica que o efeito das fibras na rigidez do compósito foi pequeno para este nível de deformações, e passou a ser predominante após a matriz do solo argiloso sofrer maiores deformações plásticas. Esta conclusão está em concordância com o observado também no ensaio de resistência à compressão uniaxial e com as pesquisas realizadas por MCGown et al. (1978) e Feuerhemel (2000).

As fibras por serem distribuídas aleatoriamente na matriz de solo interceptam a zona potencial de ruptura, fazendo com que o comportamento tensão-deformação do solo melhore, justificando o resultado alcançado (TANG et al. (2017). A Figura 4.7 apresenta os corpos de prova de solo-fibra ensaiados, mostrando as fibras na interface cisalhada.



Figura 4.7. Corpos de prova após a ruptura por cisalhamento direto: (a) solo-fibra 0,10%; (b) solo-fibra 0,25%.

Outra análise relevante no comportamento das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal das misturas de solo-fibra (Figura 4.6) é observada para elevados níveis de deslocamento onde pode-se verificar um contínuo crescimento na tensão cisalhante, principalmente para as maiores tensões normais. Esse comportamento também foi verificado na pesquisa de Feuerhemel (2000), e é justificado por Khatri et al. (2017) pela mobilização da resistência à tração das fibras, a qual aumenta a deformação imposta ao material na ruptura.

Quanto à variação volumétrica, a Figura 4.8 apresenta uma comparação das curvas variação volumétrica *versus* deslocamentos horizontal do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada. Observa-se ainda na Figura 4.8 uma menor compressibilidade das amostras com fibra em relação ao solo natural. Para as tensões normais iguais a 50 kPa e 100 kPa, após uma redução inicial no volume, todas as amostras de solo natural e misturas solo-fibra exibiram uma dilatação volumétrica. Para as tensões normais de 200 kPa e 300 kPa, observa-se que ambas as amostras apresentaram redução no volume, sendo essa redução de volume mais significativa para o solo natural.

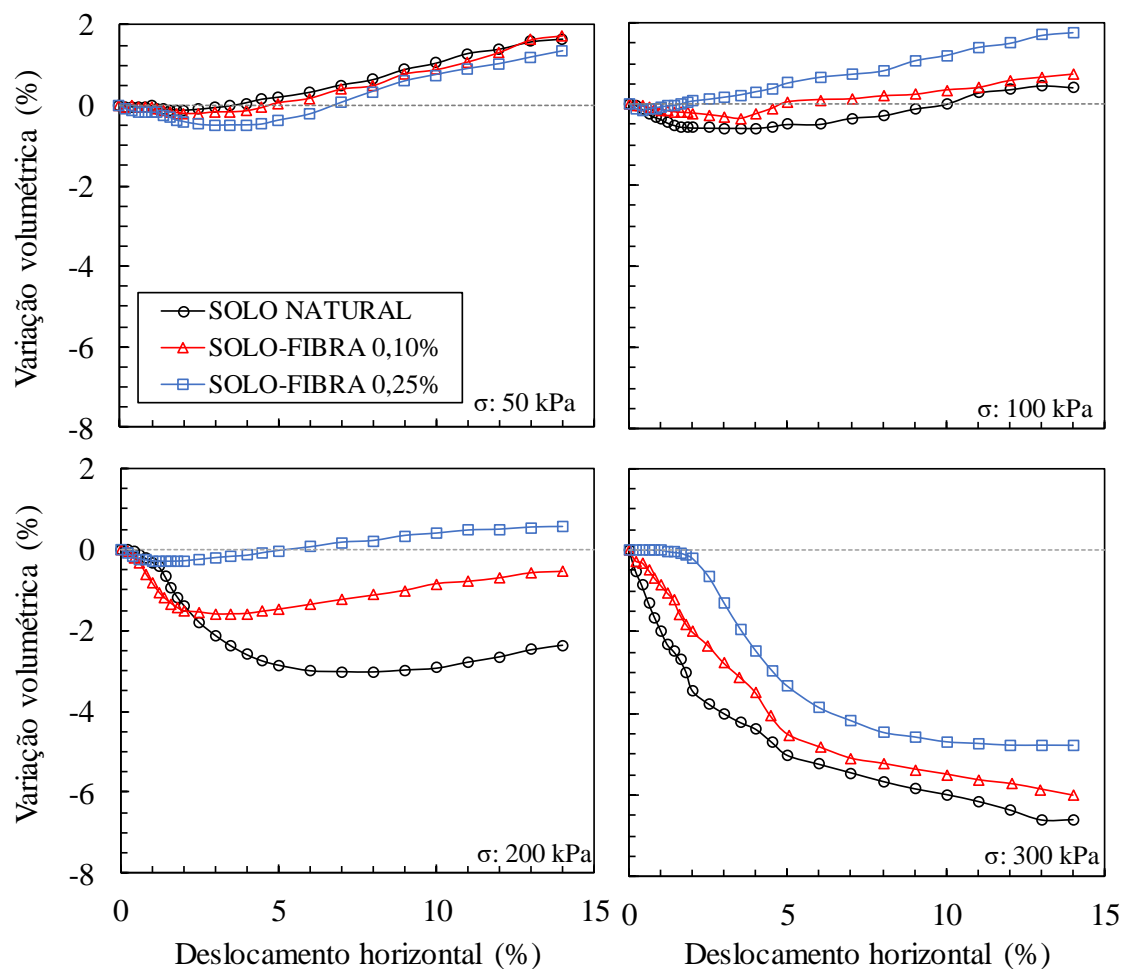


Figura 4.8. Curvas variação volumétrica versus deslocamento horizontal do solo natural e das misturas solo-fibra para todas as tensões normais.

No geral, as curvas de variação volumétrica indicam claramente que a presença de fibras limita consideravelmente a tendência de contração em todas as diferentes tensões normais aplicadas. Esse comportamento é interessante porque contradiz os resultados dos ensaios relatados por Punthutaecha et al. (2006), Feuerhemel (2000), Viswanadham et al. (2009), Al-Mhaidib (2010) e Diab et al. (2018), que apoiam a ideia de que as fibras geralmente inibem a dilatância. No entanto, comportamento semelhante ao encontrado por essa pesquisa foi publicado por outros pesquisadores (KANIRAJ e HAVANAJI, 2001; IBRAIM e FOURMONT, 2006; SADEK et al., 2010; IBRAIM et al., 2010; CASTILHO, 2017).

A Figura 4.9 apresenta o gráfico de relação de tensão cisalhante / tensão normal (τ/σ) versus ângulo de dilatação (deslocamento vertical / deslocamento horizontal) para as amostras de solo natural e solo-reforçado com fibras.

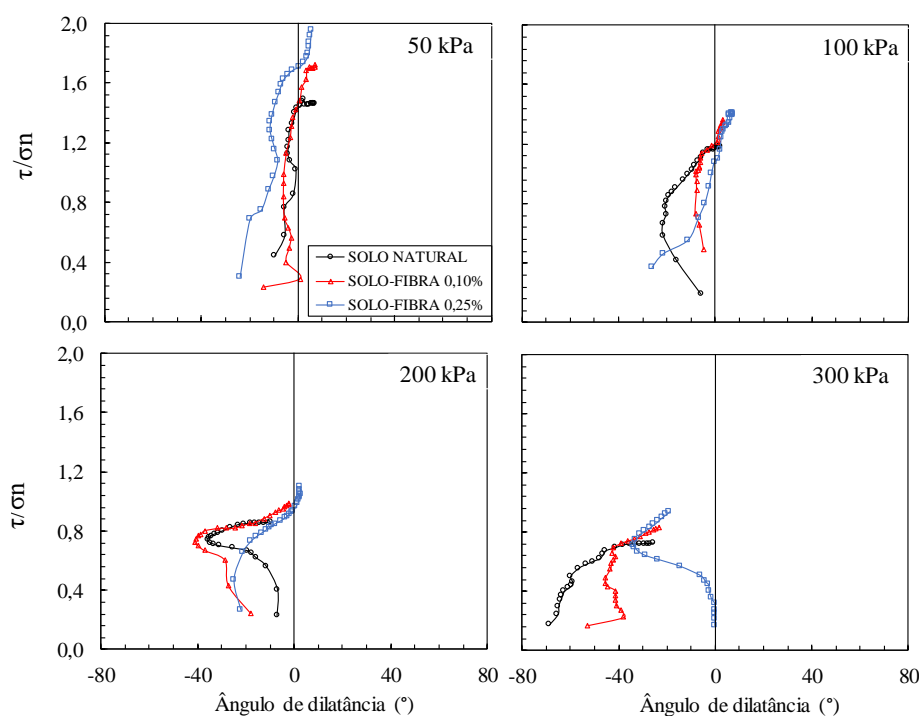


Figura 4.9. Relação de tensão (τ/σ) versus ângulo de dilatação do solo natural e das misturas solo-fibra.

Observa-se na Figura 4.9 que, em todos os níveis de tensões normais analisados, à medida que a relação de tensão cisalhante / tensão normal (τ/σ) aumenta, as amostras com fibra apresentam tendência à dilatação em relação ao solo natural. Ou seja, a medida que as amostras se aproximam da ruptura, o ângulo de atrito de dilatação da mistura solo-fibra fica maior em comparação com o solo natural. As fibras possivelmente transferem as deformações de cisalhamento do plano de cisalhamento para outras zonas dentro da massa do solo e, portanto, o tamanho da zona de cisalhamento é aumentado, o que leva a ângulos de dilatação mais altos (ELDESOUKY e MANSOUR, 2015).

Este comportamento de tendência à dilatação próximo a ruptura para as amostras de solo-fibra, podem ser consequência de uma aparente densificação da matriz solo-fibra, resultante do mecanismo de interação entre as fibras e as partículas de solo, que formam uma rede tridimensional, relatada por Tang et al. (2007). As fibras dentro do plano de cisalhamento atuam como obstáculos ao cisalhamento. Ao se estenderem através desta zona de cisalhamento, as fibras interferem no desenvolvimento de outros planos de cisalhamento, transferindo algumas das tensões de cisalhamento e deformações para zonas mais distantes, as quais as fibras estão emaranhadas. Para Khatri et al. (2017), as fibras aleatoriamente distribuídas causam um aumento na espessura da zona de

cisalhamento, e o conseqüente rearranjo e desestruturaco dos grãos do solo dentro desta zona, o que pode ser a razão da tendência a dilataco que foi obtida, mesmo para as tensões normais de 200 e 300 kPa. Conclusões semelhantes foram alcançadas zkul e Baycal (2007) e Shewbridge e Sitar (1990) que afirmaram que a largura da zona de cisalhamento aumenta com o aumento da rigidez do compósito.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos correspondentes à ruptura para o solo natural e para as misturas solo-fibra. A Figura 4.10 apresenta as envoltórias de resistência, para todos os casos analisados.

Tabela 4.4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento direto do solo natural e das misturas solo-fibra.

Solo	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo natural	33,9	32,8
Solo-Fibra 0,10%	48,4	36,4
Solo-Fibra 0,25%	55,6	37,8

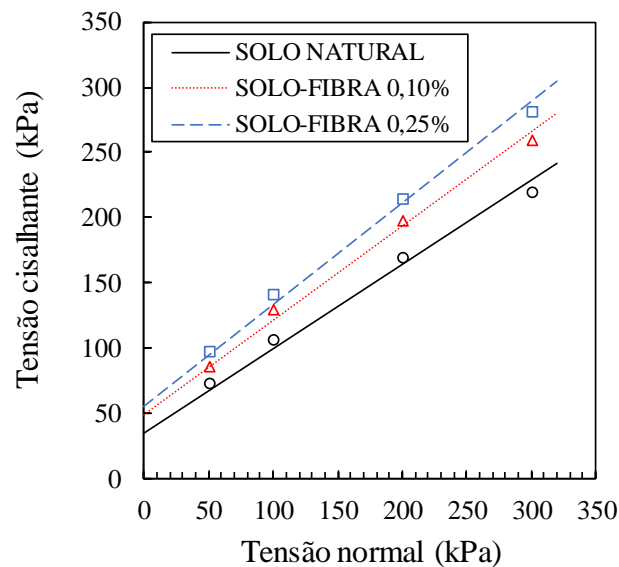


Figura 4.10. Envoltórias de resistência ao cisalhamento direto do solo natural e das misturas solo-fibra.

Verifica-se na Tabela 4.4 que o aumento nos valores de coesão com a adio de fibras em comparao ao solo natural, foi de aproximadamente 42,8% e 64,0% para os teores de 0,10% e 0,25%, respectivamente. Em relao ao ângulo de atrito, comparando com o solo natural verifica-se um acréscimo de 11,0% para a mistura solo-fibra 0,10% e um acréscimo de 15% para a mistura solo-fibra 0,25%. Pesquisas realizadas por Tang et

al. (2007), Ahmad et al. (2010) e Pradhan et al (2012) também demonstraram que a inclusão de fibras na matriz argiloso resulta em aumento em ambos os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito).

Segundo Lucarelli (2018), a coesão apresenta maiores acréscimos em comparação com o ângulo de atrito interno, devido ao fato de as fibras atuarem, principalmente, gerando ancoragem às partículas de solo, o que afeta majoritariamente a coesão. Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), o autor cita ainda que as partículas mais duras no solo tendem a desgastar a superfície da fibra, formando sulcos que podem constituir um intertravamento e por consequência, uma melhor interação entre a matriz do solo e a superfície da fibra, melhorando a resistência ao cisalhamento da mistura com relação a coesão. Tal comportamento é verificado principalmente em solos predominante granulares, no entanto, o solo utilizado nesta pesquisa apresenta em sua granulometria uma fração de areia igual a 40%, o que justifica o comportamento citado pelo autor.

Também na Figura 4.10, observa-se que as envoltórias estudadas até o nível de tensão de 300 kPa não apresentaram a bi-linearidade relatada por Maher e Gray (1990). É possível que as tensões aplicadas utilizadas nessa pesquisa sejam menores do que a crítica, e as fibras tenham deslizado durante a deformação.

Um fator interessante a destacar é que segundo diversos autores (MAHER e GRAY, 1990; CASAGRANDE, 2005; COELHO, 2008; LI, 2013; e GIRARDELLO, 2014) quando a matriz solo-fibra está submetida a tensões confinantes abaixo da tensão crítica, a inclusão de fibras afeta tanto a parcela de coesão quanto o ângulo de atrito da resistência e por sua vez as envoltórias não são paralelas, o que contradiz as envoltórias alcançadas nesta pesquisa. Por outro lado, as pesquisas que avaliaram tal comportamento realizaram seus ensaios em amostras de solo arenoso, o que pode justificar o comportamento contrário observado nos ensaios de cisalhamento direto desta pesquisa.

Na Figura 4.11 observa-se um alinhamento das fibras após a ruptura dos corpos de prova, o que demonstra que as fibras podem ter deslizado durante o cisalhamento. Outro ponto importante a se destacar na Figura 4.11 é a homogeneidade das fibras no corpo-de-prova ensaiado.

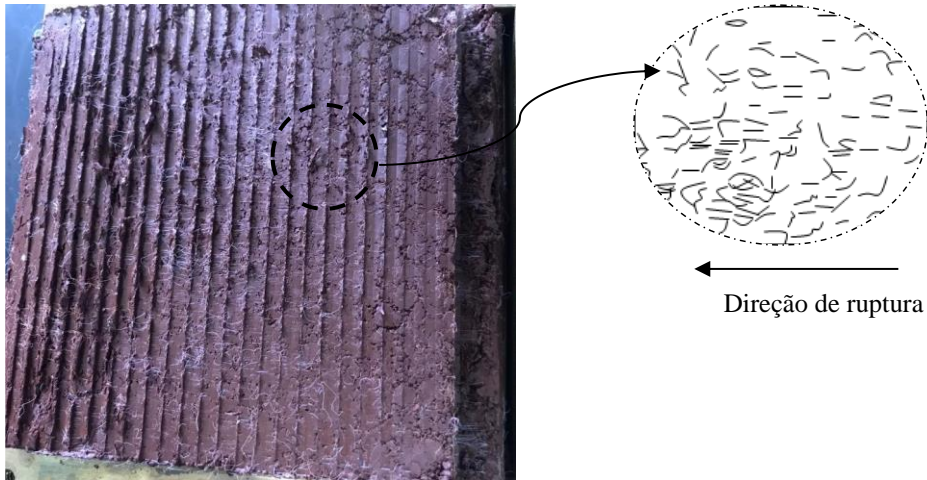


Figura 4.11. Orientação das fibras após a ruptura do corpo-de-prova do solo-fibra 0,25% por cisalhamento direto.

4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

Com o objetivo de analisar a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade sob condições drenadas e não drenadas do solo argiloso melhorado com fibra, foram realizados nas amostras de solo natural e solo-fibra 0,10% e 0,25% ensaios de compressão triaxial do tipo consolidado drenado (CD) e do tipo não consolidado e não drenado (CU), ambos com tensões confinantes de 50, 100, 200 e 300 kPa. Inicialmente serão apresentados os resultados dos ensaios CD e CU individualmente, e após será feita uma comparação entre os resultados obtidos.

4.4.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CONSOLIDADO DRENADO (CD)

Por meio dos dados obtidos na etapa de adensamento do ensaio de compressão triaxial drenado a Figura 4.12 apresenta as curvas de variação volumétrica com o tempo para todas as amostras de solo natural e misturas solo-fibra submetidos às tensões confinantes expostas acima. De modo geral, pode-se notar nos gráficos que praticamente toda a variação de volume ocorre nos primeiros minutos de ensaio, com rápida estabilização após este período. Todos os ensaios foram finalizados com o tempo médio 8 horas, uma vez que, para todos os casos, observou-se uma aproximação dos valores lido de pressão neutra e contrapressão, garantido desta forma uma dissipação de pressão neutra média de 95%.

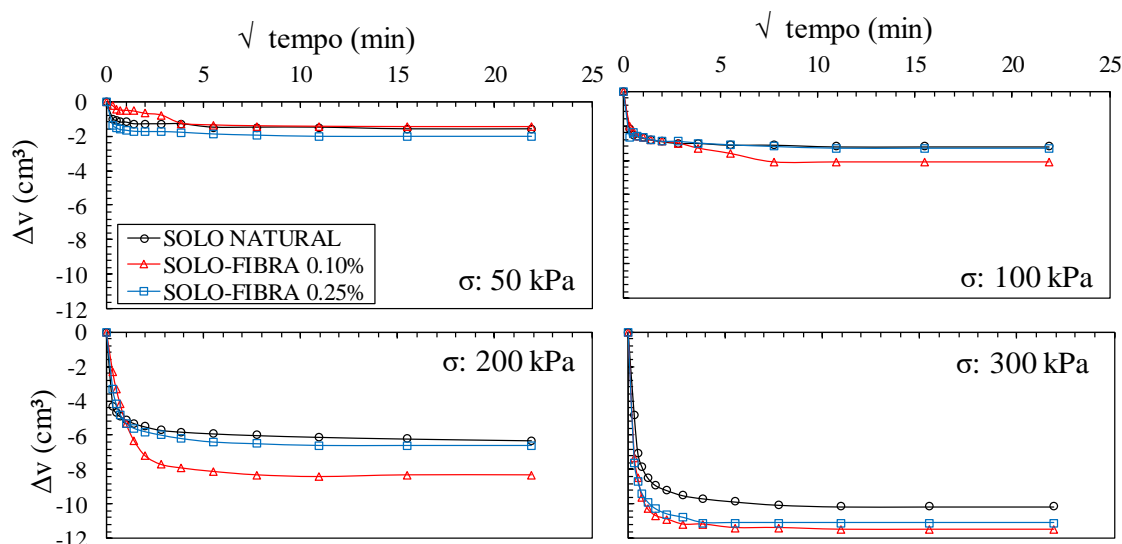


Figura 4.12. Variação volumétrica durante a etapa de adensamento do ensaio de compressão triaxial drenado.

Comparando a compressibilidade devido à inclusão de fibras ao solo, verifica-se que estas aumentaram a compressibilidade do solo argiloso, sendo este resultado mais significativo para as amostras solo-fibra 0,10% com maiores tensões de confinamento.

Sabe-se que as fibras podem alterar o rearranjo dos grãos de sólidos sob o processo de compactação, proporcionando aumento no volume de vazios da estrutura de solo compactado o que pode justificar o acréscimo de compressibilidade observado nos ensaios de compressão triaxial drenado. Este acréscimo de compressibilidade em função da adição de fibras em solo argiloso foi relatado também por Morandini e Schneider (2017).

A Figura 4.13 apresenta os resultados dos ensaios de compressão triaxial tipo consolidado drenado, por meio da diferença entre as tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) *versus* deformação axial e curvas variação volumétrica *versus* deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.

De modo geral, observa-se um aumento na diferença entre as tensões principais com o aumento da tensão confinante aplicada durante o ensaio, tanto para o solo argiloso natural, quanto para a misturas solo-fibra. Quanto a variação volumétrica, todos os corpos de prova (natural e solo-fibra) apresentaram efeito de contração durante o cisalhamento drenado. O comportamento das curvas tensão-deformação e variação volumétrica resultantes deste ensaio são característica de uma argila normalmente adensada.

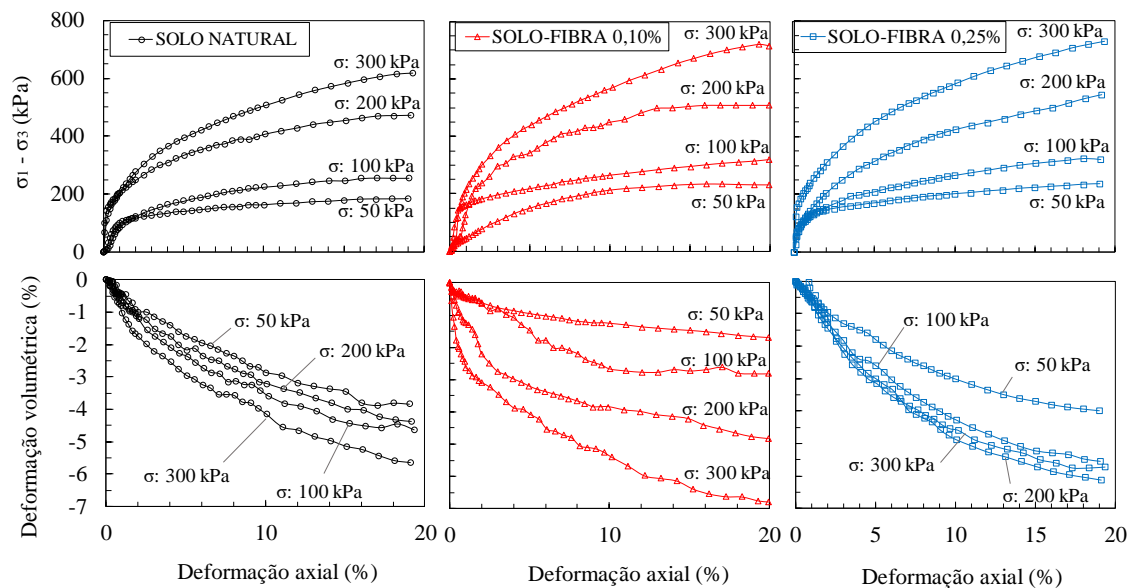


Figura 4.13. Curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial e curvas variação volumétrica versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.

Para melhor evidenciar as alterações proporcionadas pela inclusão das fibras ao solo argiloso, a Figura 4.14 e a Figura 4.15 apresentam as superposições das curvas de diferença entre as tensões principais *versus* deformação axial e curvas variação volumétrica *versus* deformação axial, respectivamente, para o solo natural e as misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada no ensaio.

Verifica-se na Figura 4.14, para o teor igual a 0,10% e para a tensão confinante igual a 50 kPa que as fibras passam a atuar a partir do momento em que o solo argiloso que as envolve sofre deformações em torno de 5%, alcançando assim maiores tensões efetivas, em relação ao solo natural. Para as demais tensões confinantes do solo-fibra 0,10% e todos os ensaios do solo-fibra 0,25% verifica-se que após o solo sofrer as deformações plásticas, as fibras passam a atuar de forma mais significativa resultando em um aumento na resistência ao cisalhamento drenado, em comparação ao solo natural

Observa-se também que o acréscimo na tensão de confinamento aumenta a eficácia das fibras na resistência ao cisalhamento do solo, uma vez que, para a tensão confinante igual a 300 kPa os acréscimos de diferença entre as tensões principais das misturas solo-fibra foram mais significativos em comparação aos resultados obtidos para as tensões de confinamento inferiores. Este comportamento está em concordância com as pesquisas realizada por Feuerhemel (2000), Diab et al. (2018) e Ma et al (2018).

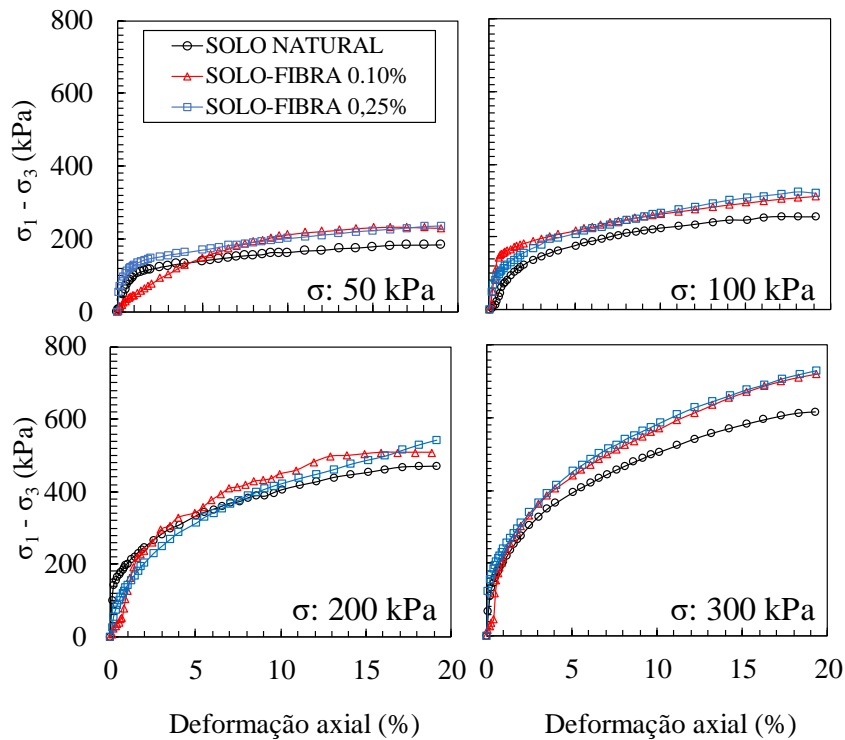


Figura 4.14. Superposição das curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada no ensaio CD.

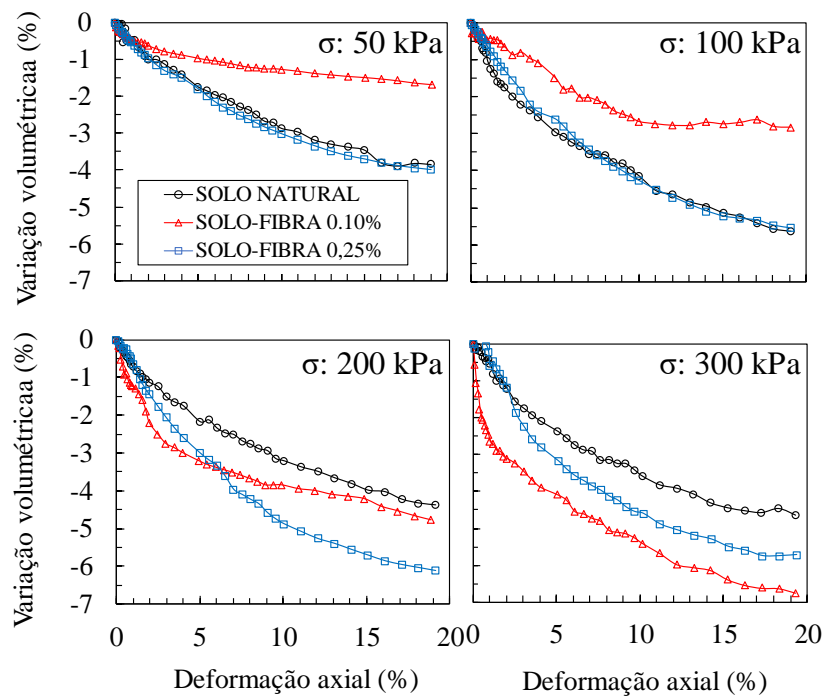


Figura 4.15. Superposição das curvas variação volumétrica versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada, no ensaio CD.

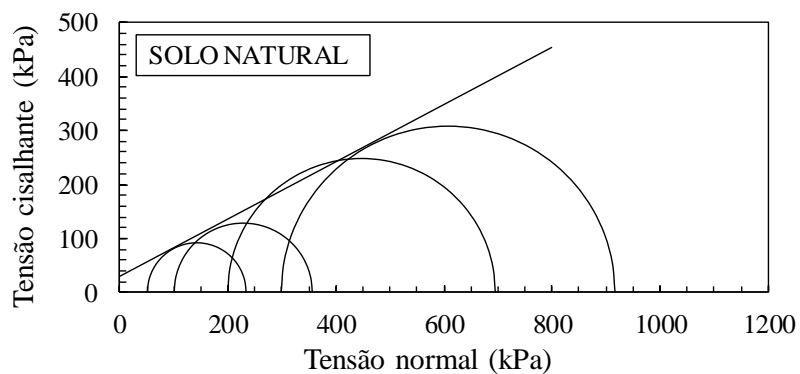
Comparando a variação de volume das misturas solo-fibra, percebe-se na Figura 4.15 que o solo-fibra 0,10% apresentou comportamento contrário ao comportamento

verificado para a mistura solo-fibra 0,25%. Para o solo-fibra 0,10%, verifica-se que nas tensões de 50 kPa, 100 kPa a adição de fibras proporcionou menor variação volumétrica em relação ao solo argiloso, e para as tensões de 200 kPa e 300 kPa houve maior compressibilidade, em relação ao solo natural. Por sua vez, analisando o comportamento do solo-fibra 0,25%, observa-se que para as tensões confinantes iniciais (50 kPa e 100 kPa) houve pouca variação no comportamento volumétrico durante o cisalhamento e para as tensões confinantes maiores (200 kPa e 300 kPa) as fibras proporcionaram maior compressibilidade ao solo quando comparamos com o solo natural. Os resultados encontrados estão em acordo com o ensaio de cisalhamento direto e com pesquisas que avaliaram o efeito das fibras na variação volumétrica do solo é de maior compressibilidade em relação ao solo na condição natural (KANIRAJ e HAVANAJI, 2001; IBRAIM e FOURMONT, 2006; SADEK et al., 2010; IBRAIM et al., 2010; CASTILHO, 2017).

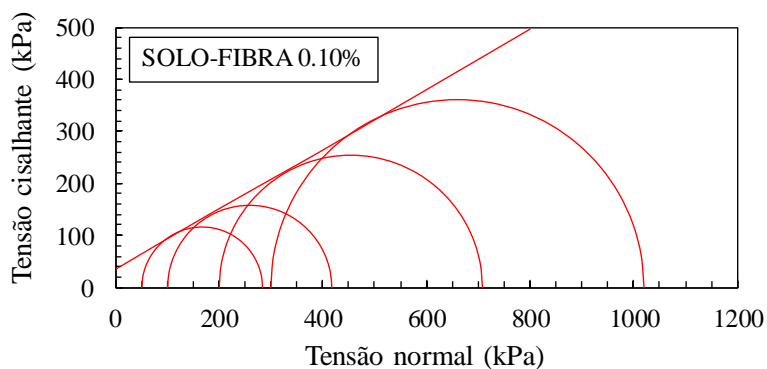
A variação volumétrica de compressão, verificada para as misturas solo-fibra sob maiores tensões confinantes, pode ser justificado pela menor densidade apresentada pelas misturas solo-fibra em relação ao solo natural. Como apresentando nos resultados de compactação, as fibras diminuem o peso específico seco da mistura por constituírem barreiras física ao rearranjo dos grãos sólidos do solo sob ação do esforço de compactação. Por isso, quando maiores tensões confinantes são aplicadas, o solo com fibras tende a se comprimir mais do que o sem fibras, reduzindo assim o seu volume e aumentando a sua densidade.

A Figura 4.16 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento drenado para o solo natural e para as misturas solo-fibra.

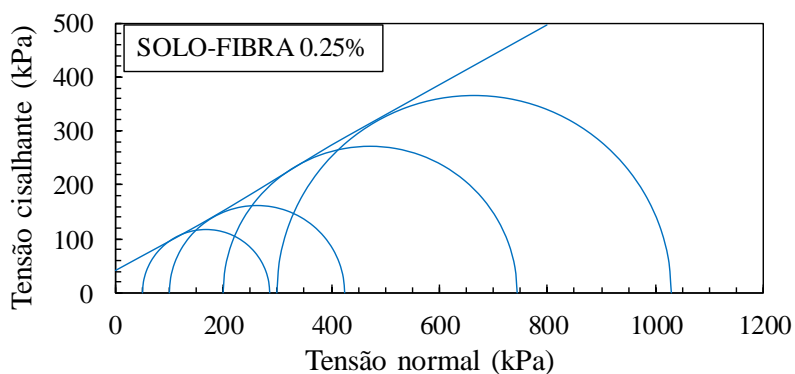
A Tabela 4.5 apresenta os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos para o solo natural e para as misturas solo-fibra. Verifica-se que as inclusões de fibras na matriz argilosa provocaram aumento nos valores de coesão de aproximadamente 23% e 41%, quando comparamos o solo natural com as misturas solo-fibra no teor igual a 0,10% e 0,25%, respectivamente. Quanto ao ângulo de atrito, verifica-se que não houve mudanças significativas devido à inclusão de fibras e os valores de ângulo de atrito permaneceram os mesmos para o solo-fibra 0,10% e 0,25%.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16. Envoltórias de resistência ao cisalhamento drenada: (a) solo natural; Solo-fibra 0,10%; (c) Solo-fibra 0,25%.

Tabela 4.5. Parâmetros de resistência ao cisalhamento drenado do solo natural e da mistura solo-fibra.

Solo	Coesão efetiva (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)
Solo natural	29,0	28,0
Solo-Fibra 0,10%	35,7	29,8
Solo-Fibra 0,25%	40,9	29,8

Ainda na Tabela 4.5, o acréscimo observado nos valores obtidos de coesão devido à inclusão de fibras, está em concordância com a pesquisa de Feuerhemel (2000) que realizou os ensaios triaxiais drenado em amostras argila-fibra. No entanto, tais resultados foram menos expressivos dos que os apresentados por Trindade (2006), Özkul (2007) e Bolaños e Casagrande (2016), onde foram verificados acréscimos na faixa de 200% na coesão no solo argiloso após a inclusão de fibras curtas. Já com relação ao ângulo de atrito, todas as pesquisas citadas acima mostram que este não é significativamente afetado pela inclusão das fibras.

Assim como observado no ensaio de cisalhamento direto, até o nível de tensão confinante de 300 kPa não foi verificado o comportamento de envoltórias bilineares relatado por Maher e Gray (1990). Sabe-se que Zornberg (2002), em seu método de previsão, adota uma envoltória de resistência ao cisalhamento bilinear e, segundo o autor, a tensão de confinamento crítica ($\sigma_{n,crit}$) é a responsável pela mudança nos mecanismos de interação solo-fibra. Desta forma, a conforme a Equação 4, da proposta de Zornberg (2002), os resultados destes ensaios triaxiais apresentam tensão de confinamento crítica 62083,42 kPa, considerando-se coeficientes de interação iguais a 0,8.

Verifica-se assim que a tensão crítica de confinamento está muito acima do nível de tensões de confinamento utilizados nesta pesquisa e dos valores de campo, confirmando que as envoltórias apresentadas na Figura 4.16 refere-se somente da primeira porção da resistência ao cisalhamento bilinear relatada por Maher e Gray (1990). Neste sentido, a ruptura do compósito é governada pelo arrancamento das fibras. Como a tensão de confinamento crítica calculada é alta para aplicações práticas na engenharia geotécnica, apenas a primeira parte da envoltória de resistência é de interesse para esta pesquisa, não sendo necessário realizar ensaios complementares de modo a obter-se a envoltória bilinear.

Com o objetivo de avaliar a influência das fibras na rigidez do solo argiloso na condição drenada, a Figura 4.17 apresenta os valores de módulo de elasticidade inicial, para um nível de deformação máximo igual a 1,0%, obtido para as amostras de solo natural e solo-fibra 0,10% e 0,25%, de acordo com a tensão de confinamento imposta nos materiais. Verifica-se que, de modo geral, as fibras ocasionaram acréscimo de rigidez ao compósito para todos os níveis de tensões confinante, exceto para o solo-fibra 0,10% sob tensão confinante igual a 50 kPa e para o solo-fibra 0,10% e 0,25% sob tensão confinante de 200 kPa.

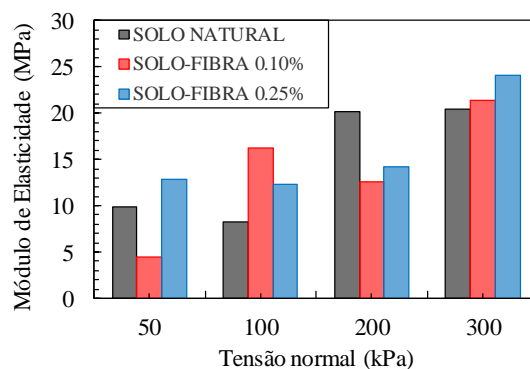


Figura 4.17. Módulo de elasticidade drenado em função da tensão normal para as amostras de solo natural e solo-fibra 0,10% e 0,25%.

Por fim, observa-se na Figura 4.18 que todos os corpos de prova após a ruptura drenada apresentaram um comportamento tipo “abaulamento”, típico da ruptura de amostras argilosas e estão de acordo com os resultados apresentadas de Özkul e Baykal (2007) e Ekinici e Ferreira (2012).

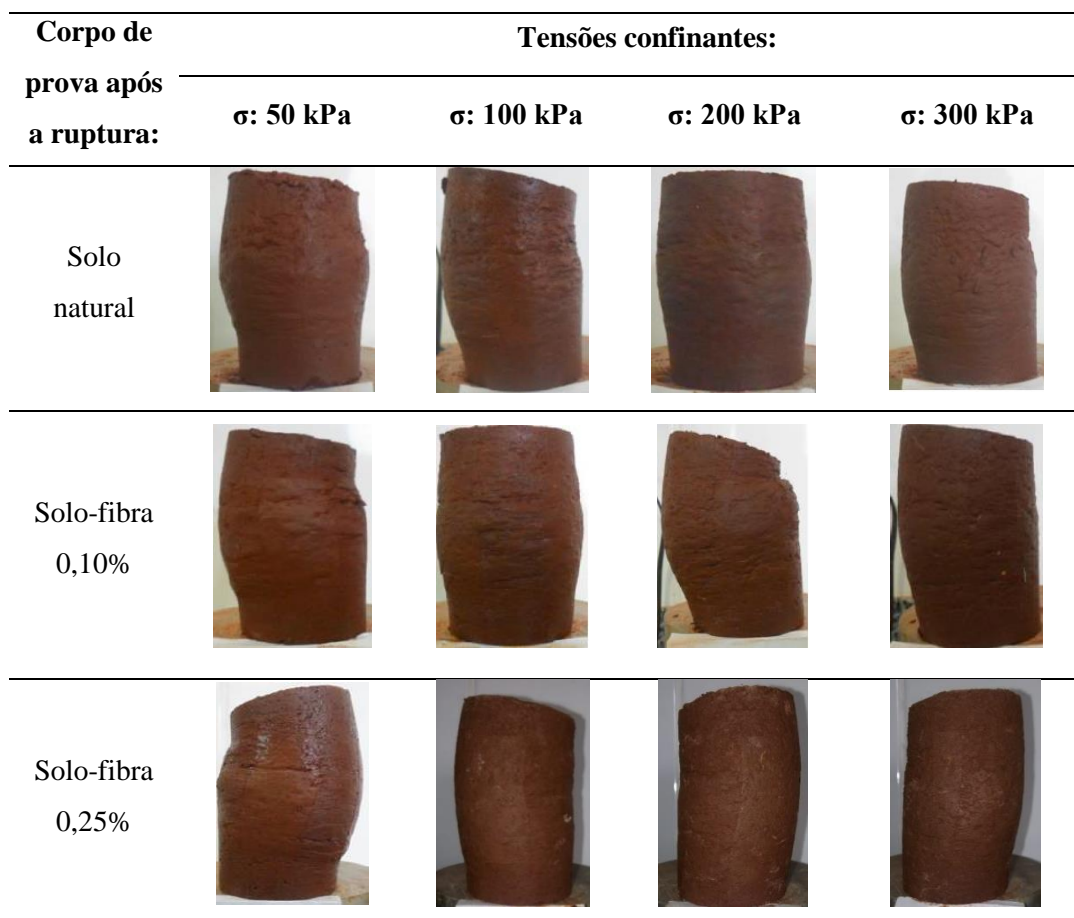


Figura 4.18. Corpos de prova do solo natural e das misturas solo-fibras 0,10% e 0,25% após a ruptura por compressão triaxial drenado.

4.4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CONSOLIDADO NÃO DRENADO (CU)

Analisando-se a variação volumétrica na etapa de adensamento do ensaio de compressão triaxial não drenado, a Figura 4.19 apresenta as curvas de variação volumétrica com o tempo para todas as amostras de solo natural e misturas solo-fibra submetidas à tensão confinante expostas acima. Assim como no ensaio CD, verifica-se que toda a variação de volume ocorre nos primeiros minutos de ensaio, com rápida estabilização após este período, desta forma esta etapa foi finalizada com um tempo médio de 8 horas, para todas as amostras.

Como os procedimentos para a execução das primeiras etapas dos ensaios CD e CU são os mesmos, o ensaio CU também evidencia que as fibras proporcionam maior compressibilidade ao solo argiloso, uma vez que maiores valores de variação volumétrica foram verificados nas misturas solo-fibra, sendo estes acréscimos mais significativos para a mistura solo-fibra 0,10%.

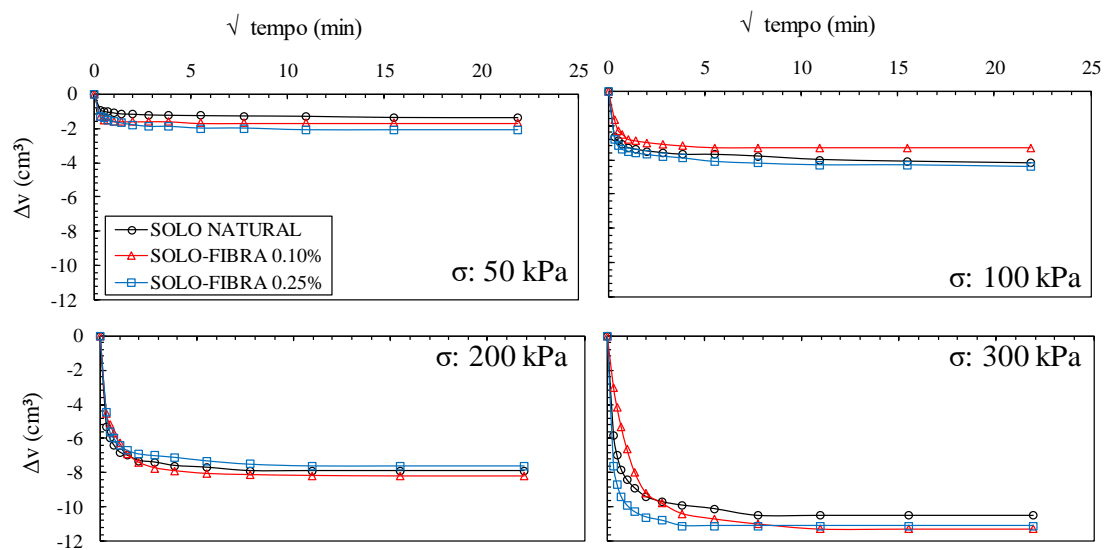


Figura 4.19. Variação volumétrica durante a etapa de adensamento do ensaio de compressão triaxial não drenado.

A Figura 4.20 apresenta os resultados dos ensaios de compressão triaxial do tipo consolidados e não drenados, por meio da diferença entre as tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) versus deformação axial e curvas pressão neutra versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.

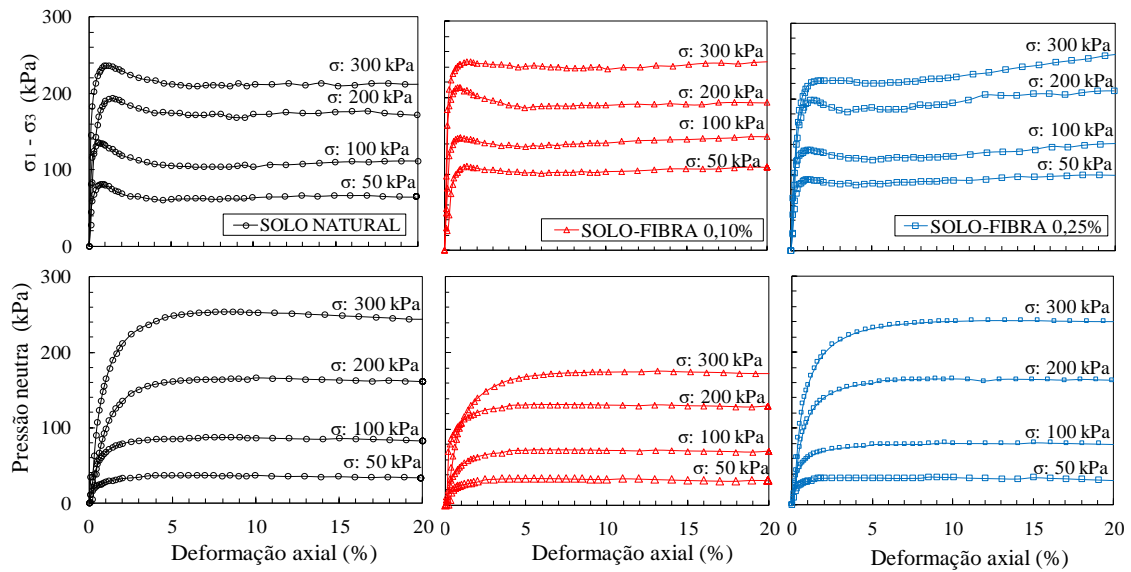


Figura 4.20. Curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial e curvas de pressão neutra versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.

Para melhor evidenciar as alterações proporcionadas pelas inclusões das fibras ao solo argiloso, as Figuras 4.21 e 4.22 apresentam a superposição das curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ e curvas pressão neutra *versus* deformação do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%, para cada tensão normal aplicada.

A partir das curvas tensão-deformação, apresentadas na Figura 4.21 observa-se a influência no comportamento do solo argiloso sob tensões de confinamento crescentes, podendo concluir de modo geral que o acréscimo na tensão de confinamento aumenta a eficácia das fibras na resistência ao cisalhamento do solo.

Para todas as tensões confinantes, as curvas tensão-deformação das misturas solo-fibra apresentaram acréscimo de resistência e uma redução após o pico de ruptura menos significativa que as reduções observadas no solo natural. Verifica-se para esses níveis de tensões que as fibras passam a contribuir melhor para a distribuição das tensões de cisalhamento impostas ao compósito após ocorrer deformações no solo argiloso, assim como verificado para os ensaios triaxiais drenados. E um fator interessante a ser analisado é que após a redução na resistência de pico as amostras de solo-fibra apresentam novos ganhos de resistência ao cisalhamento com o acréscimo de deformação. Tal comportamento é justificado pela maior interação entre as partículas de solo e as fibras durante a consolidação, devido à maiores tensões de confinamento impostas. Essa maior interação entre as fases (solo e fibra) faz com que as fibras se estiquem cada vez mais e

por consequência, ao iniciar a fase de ruptura, as fibras contribuem melhor na distribuição de tensões de cisalhamento, pois a área das fibras interceptando o solo é maior.

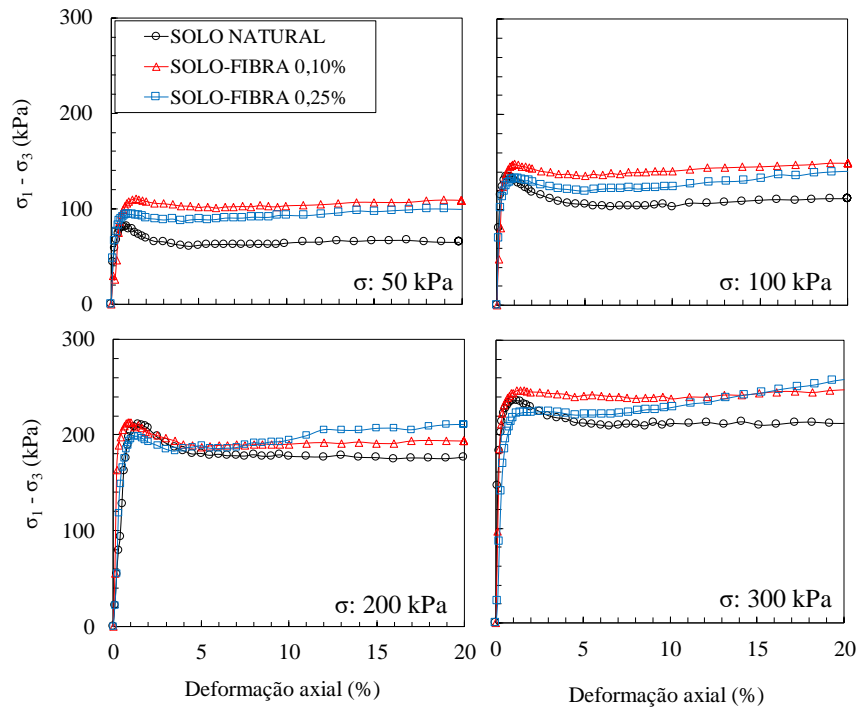


Figura 4.21. Superposição das curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada, no ensaio CU.

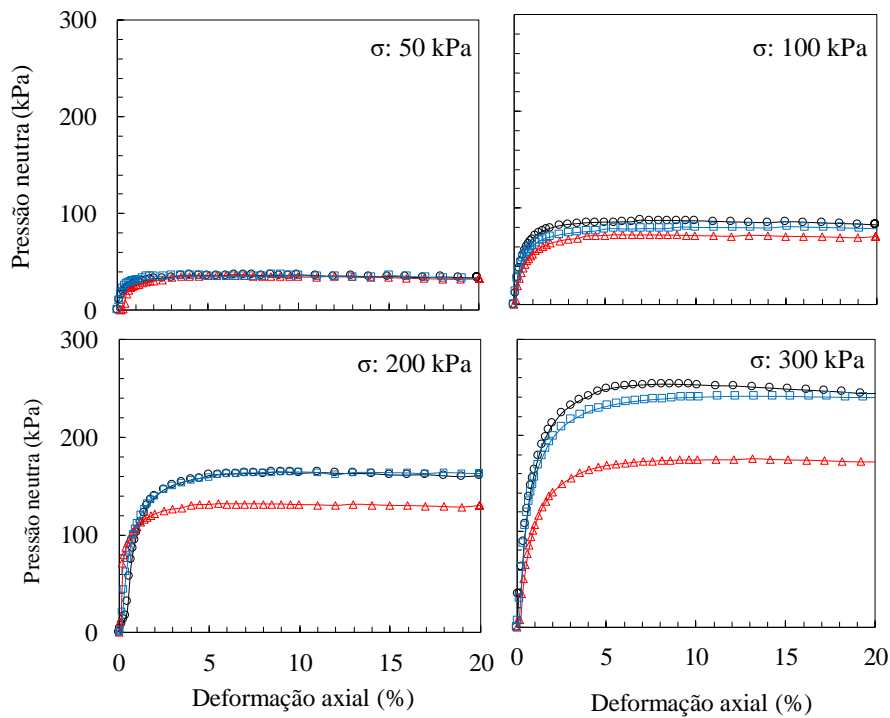


Figura 4.22. Superposição das curvas de pressão neutra versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada, no ensaio CU.

Verifica-se na Figura 4.22 que ocorre uma modificação no comportamento com a adição de fibras, principalmente para a mistura solo-fibra 0,10%. Para as tensões de confinamento iguais a 50 kPa e 100 kPa, não foram observadas alterações significativas para todas as misturas solo-fibra em relação ao solo natural. Já para as tensões 200 kPa e 300 kPa houve uma redução de pressão neutra para a mistura solo-fibra 0,10% e não foram observadas mudanças significativas nos valores de pressão neutra do solo-fibra 025%, em comparação com o solo natural. Em todos os casos, os valores obtidos de pressão neutra foram positivos e como a pressão neutra positiva está associada à tendência de contração do volume, pode-se concluir que as fibras restringem a dilatação do solo fibroso durante o cisalhamento não drenado (CONSOLI et al., 1998; LI, 2005; FREILICH et al., 2010).

As Figuras 4.23 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais para o solo natural e para as misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.

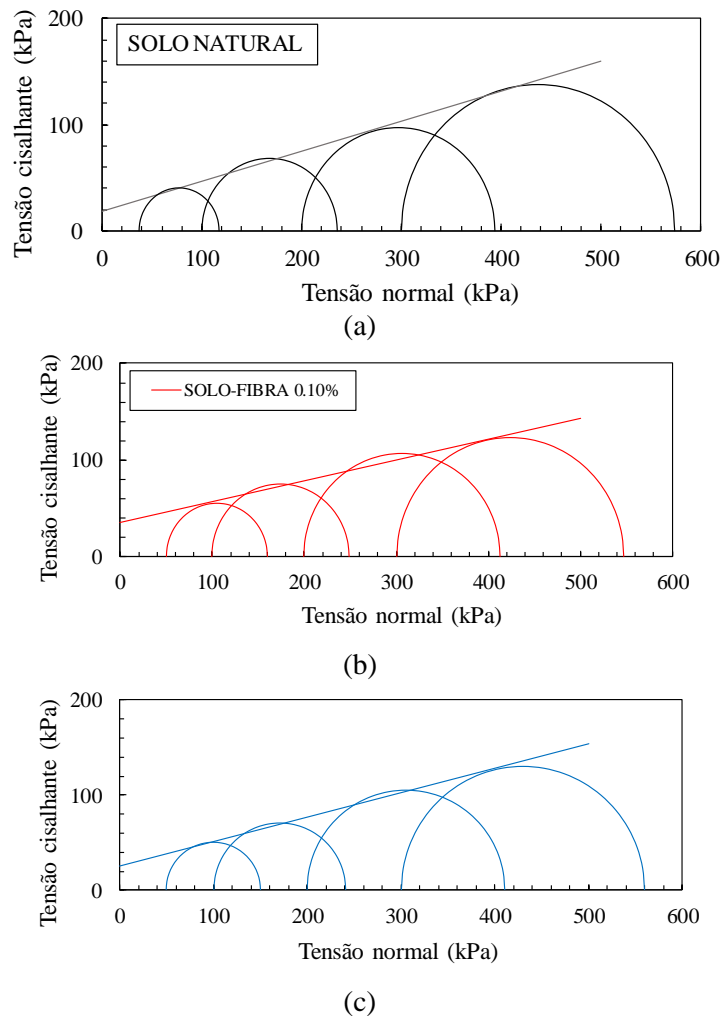


Figura 4.23. Envoltórias de resistência total ao cisalhamento não drenado do solo natural e das misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%, no ensaio CU.

A Figura 4.24 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas para o solo natural e para as misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%.

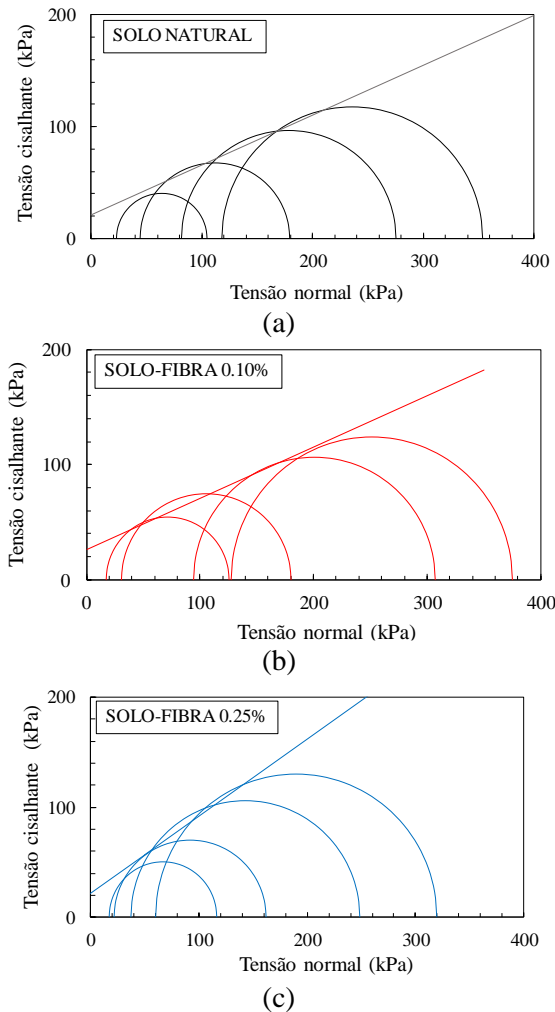


Figura 4.24. Envoltórias de resistência efetiva ao cisalhamento não drenado: (a) Solo natural; (b) Solo-fibra 0,10%; (c) Solo-fibra 0,25%, no ensaio CU.

Confirmando o comportamento apresentado no ensaio CD, até o nível de tensão confinante igual a 300 kPa também não foi verificado o comportamento de envoltórias bilineares e pelo método de previsão de Zornberg (2002), para coeficientes de interação iguais a 0,8, a tensão de confinamento crítica ($\sigma_{n,crit}$) para a condição não drenada é 67100 kPa. E tal como verificado nos ensaios CD, a tensão de confinamento crítica para a condição não drenada evidencia que os valores de tensão confinantes utilizados na pesquisa estão bem abaixo do valor necessário para resultar em envoltórias bilineares.

A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivo e totais obtidos para o solo natural e para as misturas solo-fibra. Em termos de tensões totais, verifica-se que ambas as amostras solo-fibra apresentam acréscimos nos valores de

coesão de 66% e 19% e quanto ao ângulo de atrito este houve uma pequena redução de 2% para o solo-fibra 0,10% e para o solo-fibra 0,25% houve um pequeno acréscimo igual 5%.

Em relação aos resultados em termos de tensões efetivas, ainda na Tabela 4.6, para o solo-fibra 0,10% foi verificado um acréscimo de coesão de 18% e mantendo o valor para o ângulo de atrito e para o solo-fibra 0,25% a coesão manteve-se inalterada e houve um acréscimo de 37% no ângulo de atrito, em relação ao solo natural.

Tabela 4.6. Parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenado do solo natural e da mistura solo-fibra.

Solo	Tensões totais		Tensões efetivas	
	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo natural	21,0	13,8	22,0	24,0
Solo-Fibra 0,10%	35,0	12,2	26,0	24,0
Solo-Fibra 0,25%	25,0	14,6	22,0	33,0

Assim como avaliado no ensaio CD, a Figura 4.25 apresenta os valores de módulo de elasticidade inicial não drenado, para um nível de deformação máximo igual a 1%, obtido para as amostras de solo natural e solo-fibra 0,10% e 0,25%, de acordo com a tensão de confinamento imposta nos materiais. Comparando com o solo natural, verifica-se que as fibras em ambos os teores proporcionaram acréscimos de rigidez no solo argiloso para todas as tensões confinantes avaliadas, com exceção do solo-fibra 0,25% sob tensão confinante igual a 300 kPa. Verifica-se que os acréscimos na rigidez mais significativo foram observados para a mistura solo-fibra 0,10%.

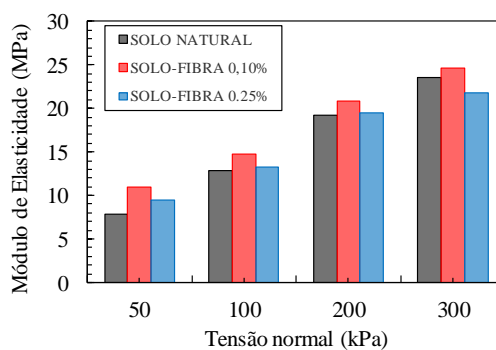


Figura 4.25. Módulo de elasticidade não drenado em função da tensão normal para as amostras de solo natural e solo-fibra 0,10% e 0,25%.

A Figura 4.26 apresenta os corpos de prova após a ruptura não drenada. Ao contrário do verificado para o ensaio na condição drenada, observa-se que para a condição não drenada os corpos de prova do solo natural apresentam um plano de ruptura ao cisalhamento bem definido. Já as amostras de solo-fibra, para todos os teores, os corpos de prova apresentaram um comportamento de ruptura tipo “abaulamento”.

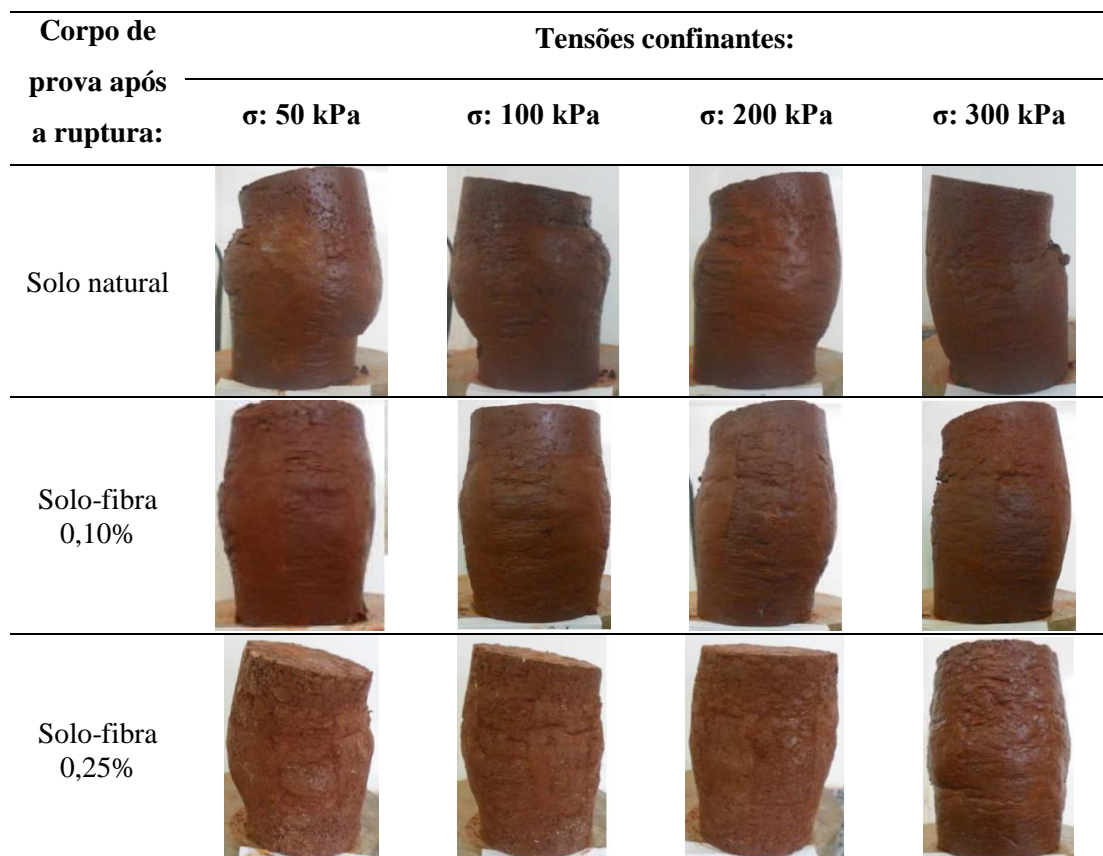


Figura 4.26. Corpos de prova do solo natural e das misturas solo-fibras 0,10% e 0,25% após a ruptura por compressão triaxial não drenada.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL DRENADO E NÃO DRENADO

Com o objetivo verificar a influência da condição de drenagem e do excesso de pressão neutra durante o cisalhamento, apresenta-se a seguir, a comparação entre os resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial tipo CD e CU. Para facilitar o entendimento, a Figura 4.27 apresenta as curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial na condição drenada e não drenada de todas as amostras, para cada tensão confinante analisada nesta pesquisa.

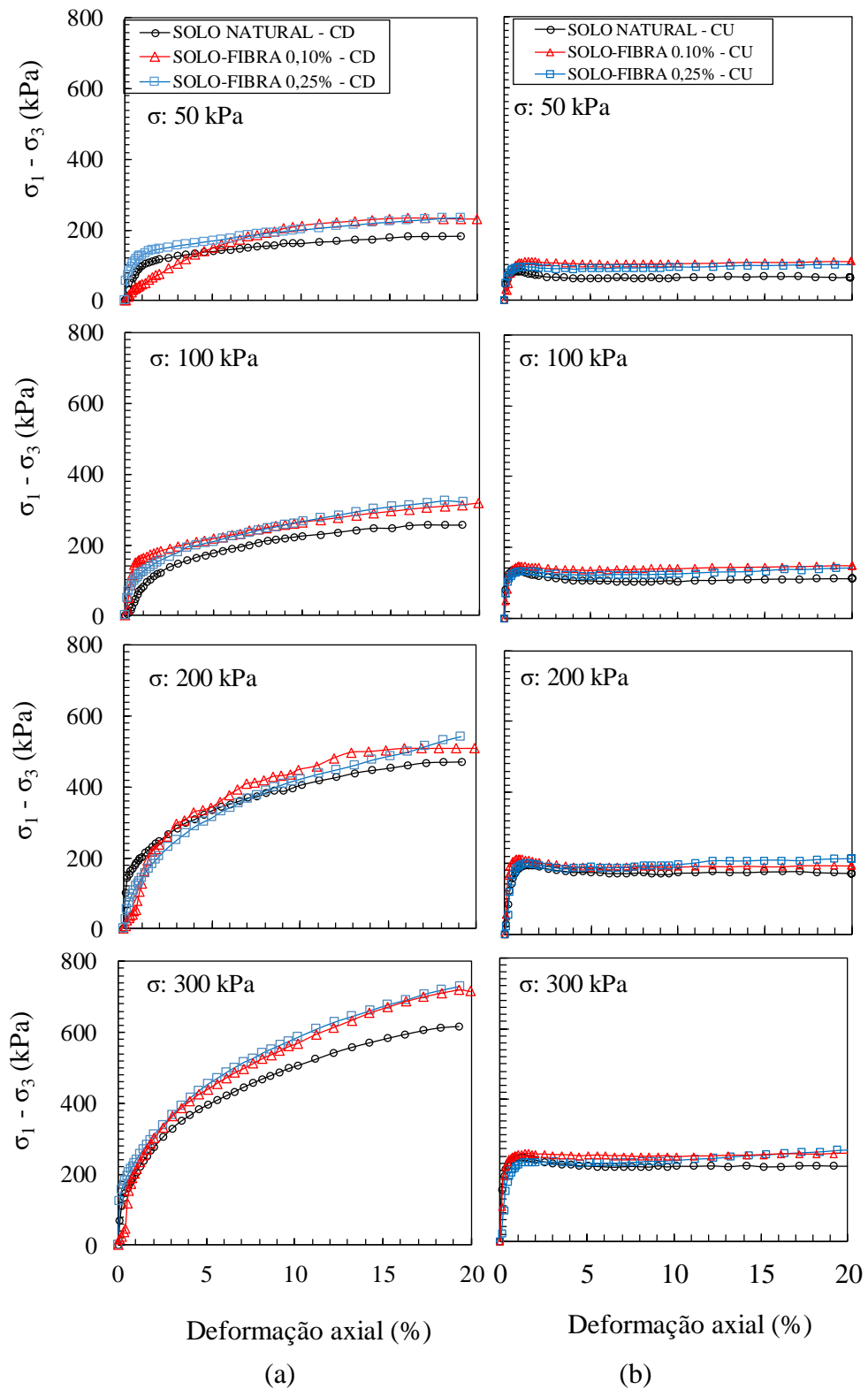


Figura 4.27. Superposição das curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial do solo natural e das misturas solo-fibra, para cada tensão normal aplicada: (a) condição drenada; (b) condição não drenada

De modo geral, comparando-se os ensaios CD e CU, alguns comportamentos distintos podem ser observados nas curvas $(\sigma_1 - \sigma_3)$ versus deformação axial. Os resultados dos ensaios CD não apresentam picos de resistência definidos e indicaram acréscimos de resistência com aumento das deformações, comportamento semelhante ao de um material plástico, tanto para solo natural, quanto para amostras com fibras. Enquanto os ensaios CU apresentam picos definidos de resistência em baixas deformações e um decréscimo não significativo na tensão com a evolução do cisalhamento, tanto para solo natural, quanto para amostras com fibras.

A Tabela 4.7 apresenta um panorama geral dos valores de coesão e ângulo de atrito efetivos obtidos por meio dos ensaios de compressão triaxial na condição drenada e não drenada nesta pesquisa.

Tabela 4.7 . Parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivo do solo natural e da mistura solo-fibra.

Solo	Ensaio CD		Ensaio CU	
	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo natural	29,0	28,0	22,0	24,0
Solo-Fibra 0,10%	35,7	29,8	26,0	24,0
Solo-Fibra 0,25%	40,9	29,8	22,0	33,0

Comparando os parâmetros obtidos na condição drenada e na condição não drenada, verifica-se que houve pequenas alterações nos parâmetros de coesão e ângulo de atrito do solo natural. Em relação às misturas solo-fibra, percebe-se que na condição drenada houve maiores acréscimos de coesão, principalmente para o solo-fibra 0,25%. Já na condição não drenada, o intercepto coesivo apresentou variações menores sendo o maior ganho apresentado no ângulo de atrito para o solo-fibra 0,25%.

A Figura 4.28 apresenta as trajetórias de tensões efetivas obtidas nos ensaios de compressão triaxial tipo CU e CD. Para o traçado das trajetórias, as retas traçadas nas trajetórias de tensões foram determinadas pelas equações:

$$q = a + p.\tan \alpha \quad (26)$$

A partir dos triângulos formados pelos centros e raios, obtém-se: $\sin \phi = \tan \alpha$ e $c/\tan \phi = a/\tan \alpha$.

Verifica-se nas trajetórias de tensões efetivas obtidas nos ensaios CU que o comportamento apresentado evidencia uma tendência à compressão durante o cisalhamento, concordando com os dados apresentados nos ensaios tipo CD. E quanto aos parâmetros de resistência para o solo natural, verifica-se pouca variação nos valores de coesão e ângulo de atrito quando compara-se os resultados efetivos alcançados nos ensaios CD e CU. Quanto às misturas solo-fibra, houve reduções no intercepto coesivo para as duas misturas, redução no ângulo de atrito para o solo-fibra 0,10% e acréscimo no ângulo de atrito para o solo-fibra 0,25%, comparando os resultados dos ensaios CD e CU.

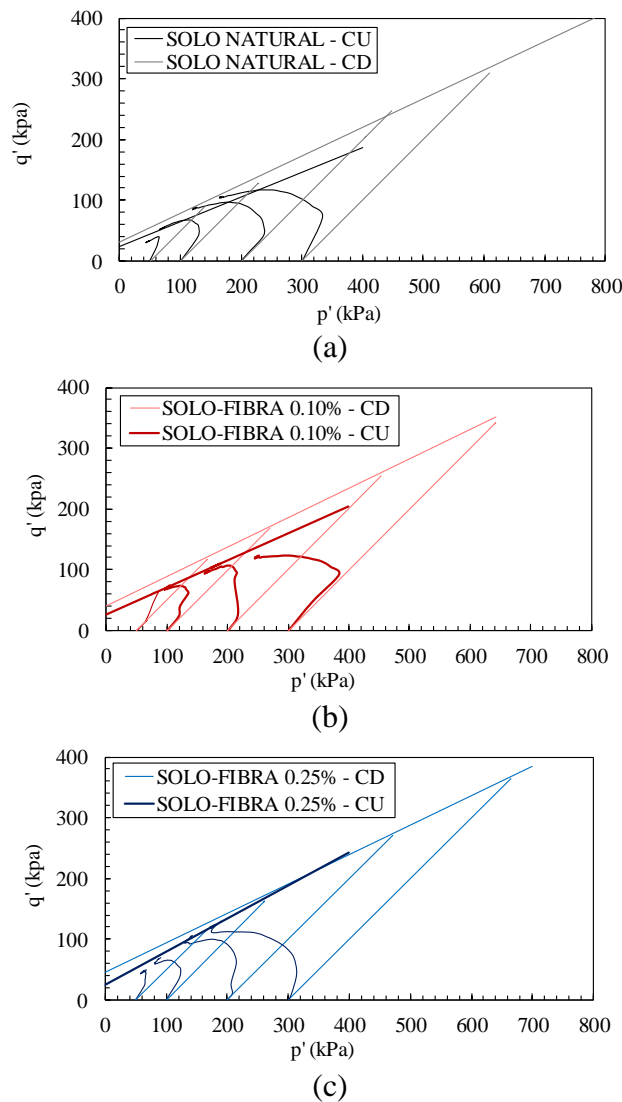


Figura 4.28. Superposição das trajetórias de tensões efetivas obtidas pelo ensaio CD e CU: (a) Solo natural; (b) Solo-Fibra 0,10%; (c) Solo-fibra 0,25%.

Comparando as trajetórias de tensões efetivas verifica-se que a resistência ao cisalhamento efetiva obtidas pelos ensaios drenados e não drenados não apresentaram alterações significativas, tanto para o solo natural quanto para as misturas solo-fibra 0,10% e 0,25%. Segundo Farrag e Griffon (1993) e Al Wahab e Al-Qurna (1995), o desenvolvimento de pressão neutra durante o cisalhamento não drenado (CU) pode reduzir a tensão efetiva entre as partículas, resultando em perturbação e rearranjo na interface, enfraquecendo assim a resistência interfacial entre o solo e as fibras. Por consequência, uma melhoria na resistência ao cisalhamento no ensaio CD em comparação ao ensaio CU pode ser esperada. Entretanto verifica-se nesta pesquisa que o desenvolvimento de pressão neutra na interface não influenciou significativamente na resistência ao cisalhamento do compósito.

Discordando dos resultados apresentados por Farrag e Griffon (1993) e Al Wahab e Al-Qurna (1995), Freilich et al. (2010) cita que a drenagem durante o cisalhamento reduz a resistência ao cisalhamento, proporcionando maiores valores de resistência ao cisalhamento no ensaio tipo CU em comparação ao ensaio CD. Nesta pesquisa, verifica-se que mesmo com a água fluindo em direção às fibras e com um aumento do teor de água na interface solo-fibra, devido a condição de ensaio drenada, a influência das fibras na resistência do compósito não foi reduzida.

Um outro fator também exposto por Freilich et al. (2010), que poderia influenciar na resistência efetiva é o tempo de execução dos ensaios, ou seja, a taxa de deformação imposta no ensaio, e por consequência o desenvolvimento das deformações ao longo da interface solo-fibra, o que poderia ocasionar um deslizamento e rearranjo das partículas do solo durante a condição de cisalhamento drenada. Li (2005) relata ainda que, na condição de ensaio não drenada, a taxa de deformação imposta também pode influenciar no excesso de pressão neutra na interface solo-fibra, logo a taxa deve ser baixa o suficiente para permitir que o excesso de pressão neutra na interface solo-fibra esteja em equilíbrio com a pressão neutra na matriz do solo. Vale ressaltar ainda que, nesta pesquisa, ambos os ensaios foram realizados com mesma velocidade de ruptura (0,15 mm/min) e por consequência, o mesmo tempo para execução dos ensaios.

Desta forma, assim como exposto por Li (2005), percebe-se que a interação entre os solos finos e as fibras é bem complexa e, a depender do tipo de solo e de fibra, os fatores relacionados às condições de carregamento podem, ou não, influenciar de forma significativa na resistência ao cisalhamento efetiva do compósito. E não foram

encontrados nas pesquisas disponíveis na literatura os mecanismos que controlam o comportamento do solo-fibra e as condicionantes que podem afetar no desempenho das fibras na resistência ao cisalhamento do solo sob diferentes condições de carregamento.

4.6 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Com objetivo de analisar de forma global a efetividade da inclusão de fibras curtas de polipropileno no solo argiloso na resistência ao cisalhamento, este capítulo apresenta uma análise global dos resultados obtidos em todos os ensaios proposto nesta pesquisa. Para tanto, a Tabela 4.8 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo natural e das misturas solo-fibra para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 4.8. Resumos dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo natural e das misturas solo-fibra obtidos na pesquisa.

Parâmetros	Coesão (kPa)			Ângulo de atrito (°)		
	Solo	Solo-fibra	Solo-fibra	Solo	Solo-fibra	Solo-fibra
	Nat.	0,10%	0,25%	Nat.	0,10%	0,25%
Resistência à compressão uniaxial	66,3	96,8	104,4	-	-	-
Cisalhamento direto	33,9	48,4	55,6	32,8	36,4	37,8
Compressão triaxial drenado	29,0	35,7	40,9	28,0	29,8	29,8
Compressão triaxial não drenado (dados efetivos)	22,0	24,0	22,0	24,0	24,0	33,0
Compressão triaxial não drenado (dados totais)	21,0	35,0	25,0	13,8	12,2	14,6

Para melhor evidenciar o efeito da inclusão de fibras nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso e a influência das particularidades de cada ensaio nos resultados alcançados nesta pesquisa, a Figura 4.29 e a Figura 4.30 apresenta os valores obtidos de coesão e ângulo de atrito, respectivamente, do solo natural e das misturas solo-fibra.

Ao realizar análise comparativa dos valores de coesão e ângulo de atrito com a inclusão de fibras, é possível verificar que houve maior influência das fibras nos valores de intercepto coesivo do que nos valores obtidos para o ângulo de atrito, para os ensaios de resistência ao cisalhamento realizados nesta pesquisa. Ou seja, que a parcela coesiva

corresponde à principal contribuição das fibras, sendo a responsável pelo desempenho superior destes compósitos, comparativamente ao solo natural.

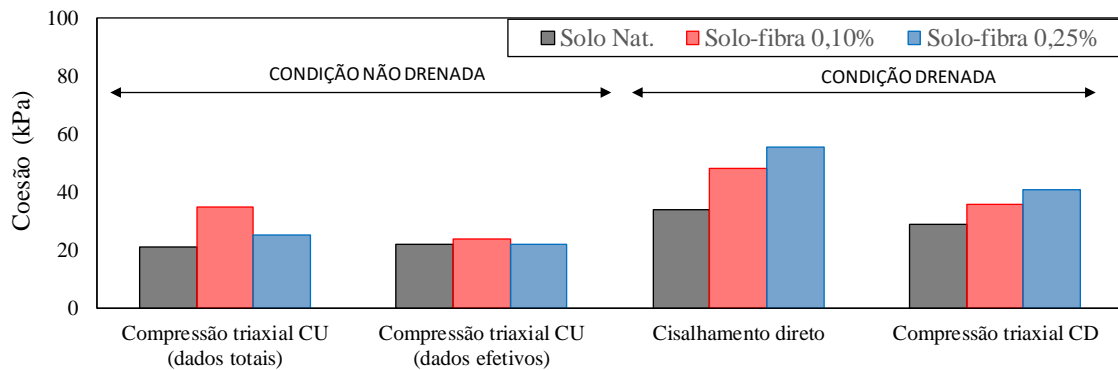


Figura 4.29. Valores de coesão do solo natural das misturas solo-fibras para todos os ensaios realizados.

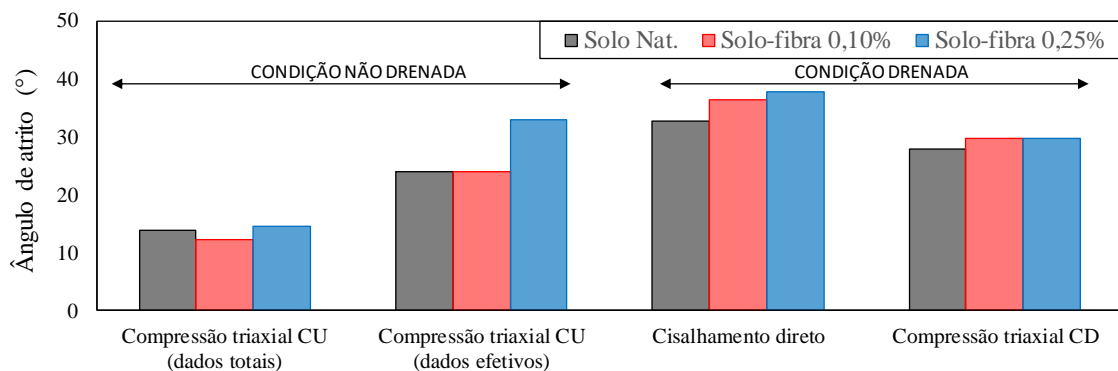


Figura 4.30. Valores de ângulo de atrito do solo natural das misturas solo-fibras para todos os ensaios realizados.

Segundo Tang et al. (2007) as fibras podem atuar como uma estrutura tridimensional, gerando um intertravamento das partículas, restringindo o deslocamento na interface solo-fibra, aumentando mais significativamente o intercepto coesivo. Neste sentido, Tang et al. (2010) afirmam que uma menor probabilidade de se reorganizar e uma boa interligação das partículas do solo são fatores importantes para se obter maiores valores nos parâmetros coesivos de resistência ao cisalhamento.

Ademais, o solo em questão é representado por 40% dos grãos compostos por partículas arenosas e estas partículas contribuem impactando e desgastando a superfície da fibra, gerando sulcos que podem constituir um intertravamento e melhorar a interação entre a matriz de solo e a superfície da fibra, ocasionando em acréscimo de resistência,

principalmente com relação ao parâmetro de coesão, conforme relatado por Darvishi e Erken (2018).

Analisando-se de forma global, constata-se que apesar das fibras possuírem o dobro de resistência à tração do que as fibras usuais de polipropileno relatadas na literatura, os acréscimos de resistência obtidos pela inclusão de fibras no solo argiloso não foram tão significativos. Isso indica que as fibras podem ter sido arrancadas da matriz de solo antes que a resistência à tração tenha sido completamente mobilizada. Taylor (1994) cita que para fibras que possuem altos valores de resistência à tração, é necessário que a resistência de aderência seja alta ou que as fibras tenham alto fator de forma, para impedir o arrancamento das fibras antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada.

Por fim, sabe-se que as características dos solos e os possíveis cenários de obra: grau de saturação, estados de tensões e deformações, condições de drenagem, velocidade de carregamento, cisalhamento de interface entre dois materiais, entre outros, balizam a escolha entre os diversos tipos de ensaios para a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Para a condição drenada, os ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial CD apresentaram parâmetros de resistência com ordens de grandezas próximos, principalmente para o solo natural. Assim, a escolha do tipo de ensaio irá depender do tipo solicitação e condições da obra a ser avaliado.

5. APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA SOLO-FIBRA

Diversos pesquisadores têm desenvolvido métodos analíticos de previsão para prever a resistência ao cisalhamento e, de modo geral quantificar os efeitos geotécnicos obtidos pela inclusão das fibras. Porém, até o momento, a eficácia e a confiabilidade desses métodos não foram objeto de uma avaliação abrangente (DIAB et. al, 2018).

Assim, com o objetivo de quantificar a incerteza e a tendência dos modelos atuais de previsão de resistência das misturas solo-fibra, sujeitas a condições de carregamento drenado e não drenado, foram utilizados nesta pesquisa dois métodos de previsão do comportamento de resistência ao cisalhamento existentes na literatura. Além de comparar os resultados obtidos experimentalmente nesta pesquisa com os resultados obtidos por meio destes métodos de previsão, este capítulo analisa também um banco de dados constituído por resultados de ensaios triaxiais drenados e não drenados de ensaios conduzidos em solos argilosos e fibras curtas, presentes na literatura atual.

O primeiro método a ser apresentado foi proposto por Zornberg (2002), o qual é baseado apenas nas propriedades isoladas do solo (resistência efetiva) e das fibras, eliminando assim, a necessidade de ensaios solo-fibra para a determinação da resistência ao cisalhamento da mistura. O segundo método utilizado nesta pesquisa para quantificar a resistência ao cisalhamento do compósito foi desenvolvido especificamente para solos argilosos por Jamei et al (2003), e leva em consideração parâmetros de resistência totais da argila natural e os parâmetros de resistência ao cisalhamento da interface solo-fibra.

5.1 MÉTODO DE PREVISÃO DE ZORNBERG (2002)

Como apresentado no Capítulo 4, os resultados obtidos nos ensaios de compressão triaxial evidenciaram que as amostras com a inclusão de fibras apresentaram maior resistência ao cisalhamento efetiva em comparação com as amostras de solo natural. Os níveis de tensões de confinamento adotados para a realização dos ensaios CD e CU foram menores que tensão crítica de confinamento obtidas na previsão de Zornberg (2002).

Assim, os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivo avaliados na previsão de Zornberg (2002) serão determinados utilizando as Equações 6 e 7.

Para estas análises, foram considerados a resistência à tração última das fibras de 810 MPa (valor de catálogo) e fibras distribuídas aleatoriamente no solo ($\alpha_F: 1$). Os coeficientes de interação para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito na interface do cisalhamento ($c_{i,c}$ e $c_{i,\phi}$) foram 0,8, tal como proposto por Zornberg (2002), uma vez que não se realizou o ensaio de arrancamento da fibra no solo em estudo. A Figura 5.1 apresenta os dados experimentais das misturas solo-fibra (Triaxial CD e CU) e as envoltórias de resistência ao cisalhamento previstas pelo método.

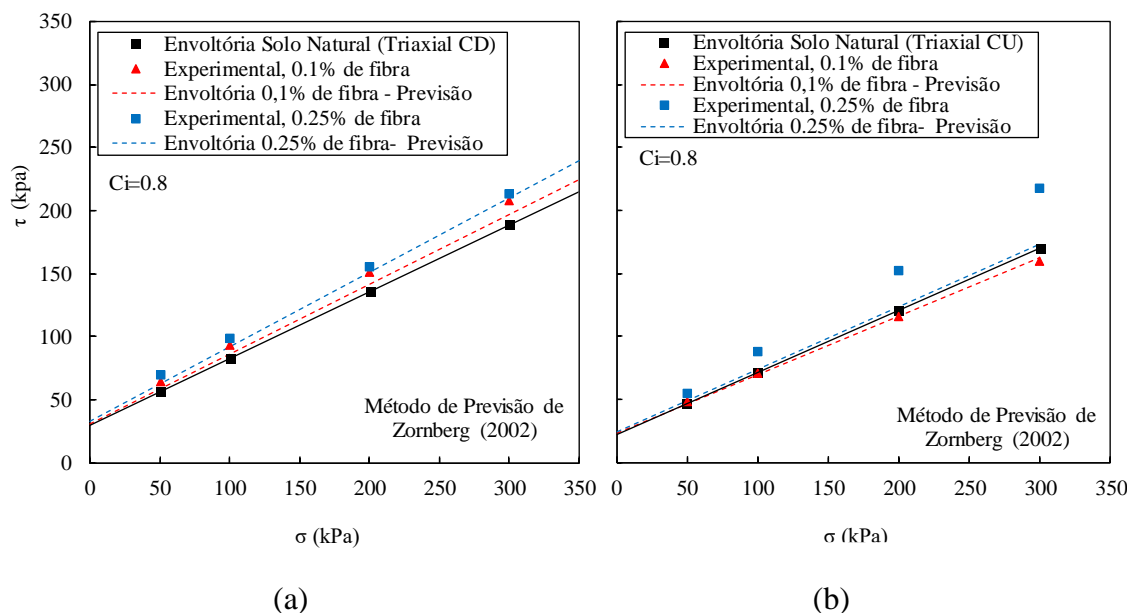


Figura 5.1. Envoltórias de resistências ao cisalhamento efetiva previstas pelo método de Zornberg (2002) e comparação com resultados experimentais solo-fibra: (a) CD; (b) CU.

Verifica-se na Figura 5.1a que a previsibilidade do método de Zornberg (2002) para a condição drenada forneceu resultados precisos, ou seja, os valores de tensões cisalhantes previstas pelo método se aproximaram-se dos valores de tensões cisalhantes obtidos por meio dos ensaios triaxiais realizados em laboratório. No entanto, na Figura 5.1b, verifica-se que para a condição não drenada, os valores de valores de tensões cisalhantes efetivos obtidos pelo método de previsão tiveram boa previsibilidade para o solo-fibra 0,10%, mas foram subestimados para o solo-fibra 0,25%, uma vez que o acréscimo no ângulo de atrito obtido no ensaio foi superior ao previsto pelo método. Ao contrário do analisado por Najjar et al. (2013), o qual verificou em suas análises que a proposta de Zornberg (2002) mostrou superestimação do ângulo de atrito em 6% sobre

os valores reais. Essa variação na previsibilidade do ângulo de atrito para a condição não drenada pode estar associada ao fato que o método Zornberg (2002) não leva em consideração o efeito na pressão neutra desenvolvida na interface solo-fibra.

Segundo Li (2005) os coeficientes de interação e, por consequência, a previsibilidade do método em questão pode ser influenciada por diversos fatores, e não estão relacionadas apenas aos diferentes tipos de solo e fibras. Assim, esta variabilidade encontrada entre os resultados experimentais e previstos, principalmente para a condição não drenada, podem ser verificadas também em solos com mesma granulometria e mesmo tipo de fibra. Ou seja, as condições de drenagem, a tendência a mudança de volume, as pressões neutras geradas durante o cisalhamento influenciam na interação de interface solo-fibra e por consequência influência nos resultados alcançados. Para Diab et al. (2018), as incertezas dos métodos de previsão solo-fibra ainda estão mais fortemente relacionadas com o coeficiente de interação utilizados para calibrar os modelos.

De forma a verificar a influência das alterações nos coeficientes de interação na equação equivalente proposta por Zornberg (2002), as Figuras 5.2 e 5.3 apresentam a resistência ao cisalhamento efetiva equivalente obtida utilizando o método proposto com coeficientes de interação iguais a 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0.

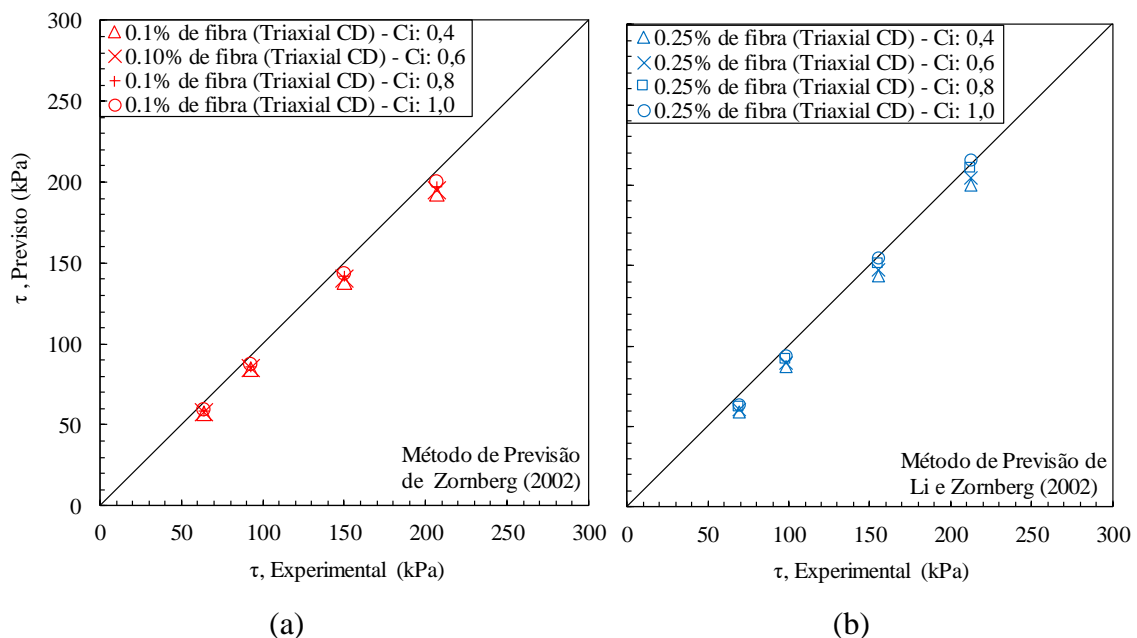


Figura 5.2. Influência da variação dos coeficientes de interação (C_i) na resistência ao cisalhamento efetiva prevista pelo método de Zornberg (2002) e obtida experimentalmente no ensaio triaxial CD: (a) Solo-fibra 0,10%; (b) Solo-fibra 0,25%.

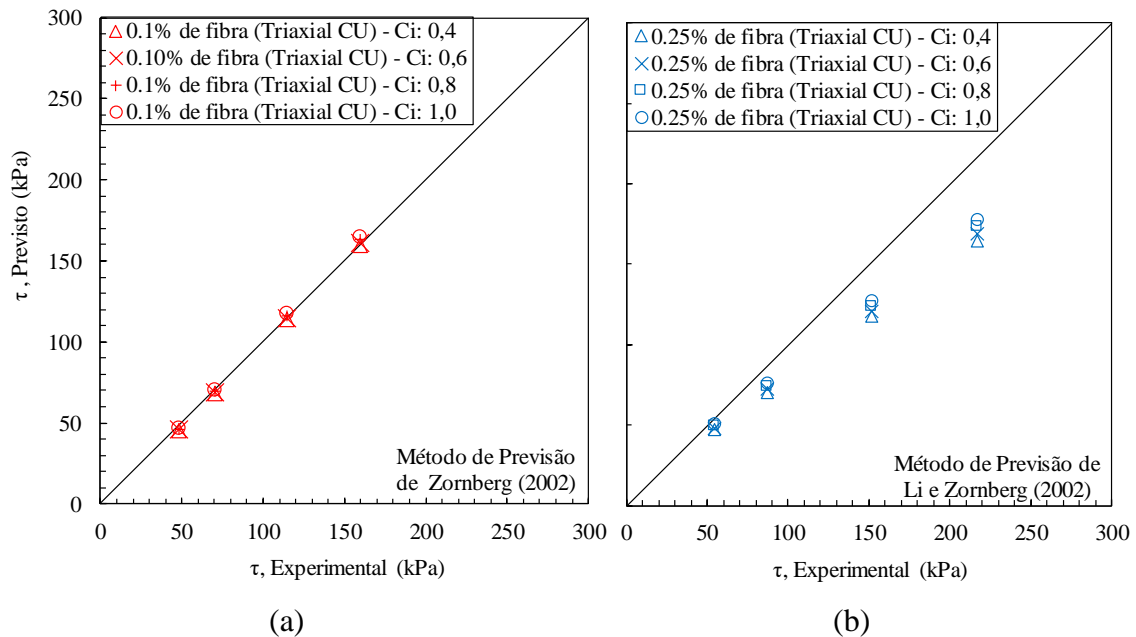


Figura 5.3. Influência da variação dos coeficientes de interação (C_i) na resistência ao cisalhamento efetiva prevista pelo método de Zornberg (2002) e obtida experimentalmente no ensaio triaxial CU: (a) Solo-fibra 0,10%; (b) Solo-fibra 0,25%.

De modo geral, para os resultados obtidos nesta pesquisa, na condição drenada e não drenada, verifica-se que a variabilidade dos coeficientes de interação, $c_{i,c}$ e $c_{i,\phi}$, não resultaram em diferenças significativas nos valores cisalhantes obtidos pelos ensaios. Isso demonstra que o método proposto não é sensível as variações de coeficientes de interação para as tensões confinantes utilizadas nessa pesquisa, porém mostrando influência dos coeficientes de interação nos resultados para maiores tensões e na condição de ensaio não drenada.

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros de resistência efetiva obtidos pelos ensaios de compressão triaxial CU e CD, pela proposta por Zornberg (2002), com coeficientes de interação iguais a 0,8 em relação ao teor volumétrico de fibras. A Figura 5.4 apresenta a análise da melhoria normalizada, a qual é definida pelo acréscimo obtido no ângulo de atrito solo-fibra em razão do ângulo de atrito do solo natural ($[\tan\phi_f - \tan\phi] / \tan\phi$), e a coesão normalizada é definida como o acréscimo obtido na coesão solo-fibra em razão da coesão solo natural ($[c_f - c] / c$). Os resultados são apresentados com base no teor volumétrico de fibras, exemplificado nas equações 6 e 7 do método de Zornberg (2002).

De acordo com a Figura 5.4, pelos parâmetros de resistência efetiva normalizados verifica-se de modo geral que, os valores obtidos pela proposta de Zornberg (2002) subestimam os valores de coesão drenando e não drenado obtidos experimentalmente, com exceção do solo-fibra 0,25% na condição não drenada que não foi verificado

experimentalmente acréscimo no intercepto coesivo. E em relação ao ângulo de atrito, verifica-se que houve maior proximidade dos valores obtidos experimentalmente com relação aos dados previstos, exceto para o solo-fibra 0,25% onde constatou-se experimentalmente um maior acréscimo de ângulo de atrito.

Tabela 5.1. Ângulo de atrito e coesão efetivos obtidos pelos ensaios de compressão triaxial CD e CU e pelo método de previsão de Zornberg (2002).

Parâmetros efetivos	σ_n	$\gamma_{d\text{ máx}}$	L_f	l_d	G_f	χ_w	χ	Experimental		Zornberg (2002)	
								c' (kPa)	ϕ (°)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)
CD	50,					natural	natural	29,0	28,0	-	-
	100,			1000	0,91	0,10	0,19	35,7	29,8	30,4	29,1
	200	17,0	0,012			0,25	0,48	40,9	29,8	32,4	30,6
CU	e					natural	natural	22,0	24,0	-	-
						0,10	0,19	26,0	24,0	23,0	24,5
	300					0,25	0,48	22,0	33,0	24,9	26,4

NOTA: c' : Coesão efetiva do solo natural (kPa); c_f : Coesão equivalente (kPa); G_f : Densidade específica (g/cm³); L_d : Densidade linear da fibra (denier: 1g / 9000m); l_f : Comprimento da fibra (m); ϕ : Ângulo de atrito efetivo do solo natural (°); ϕ_f : Ângulo de atrito equivalente (°); $\gamma_{d\text{ máx}}$: Densidade seca do solo-fibra (kN/m³); χ_w : Teor gravimétrico de fibras; χ : Teor volumétrico de fibras; σ_n : Tensão confinante (kPa)

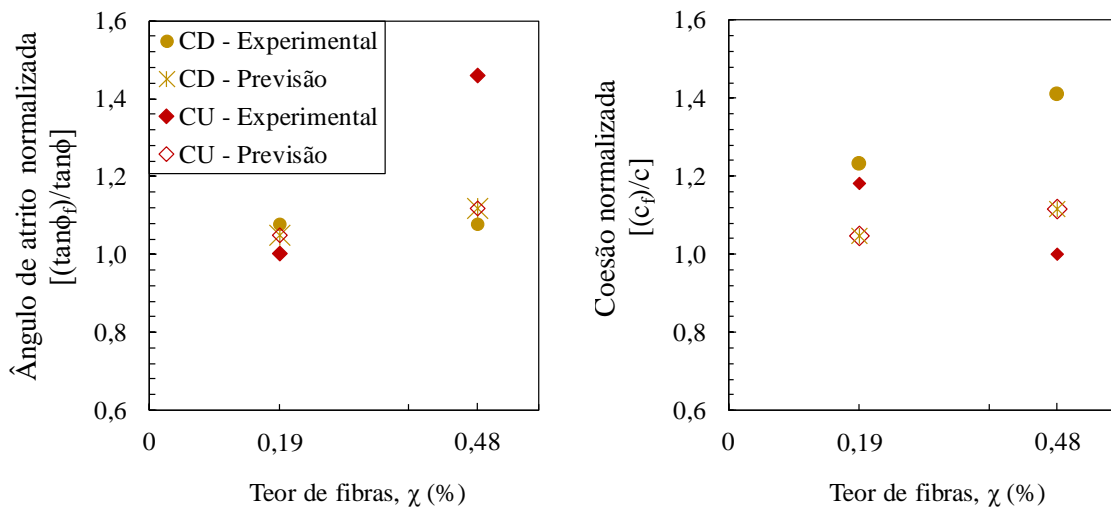


Figura 5.4. Aumento normalizado no ângulo de atrito e coesão efetivos obtidos pelos ensaios CD e CU e pelo método de Zornberg (2002).

Os incrementos de coesão e ângulo de atrito devido ao acréscimo de fibras no solo argiloso, propostos pelo método de Zornberg (2002), diferentemente dos resultados apresentados, foram diretamente proporcionais ao aumento no teor volumétrico de fibras presente nas misturas e não consideraram as peculiaridades das condições de contorno,

ou seja, foram iguais para as condições drenadas e não drenadas avaliadas nesta pesquisa, independente do desenvolvimento de pressões neutra na interface, tendência à alteração de volume e taxa de deformação.

Com o objetivo de avaliar de forma mais abrangente esses resultados com os de outras pesquisas e condições variáveis de ensaios, utilizou-se um banco de dados composto por 7 ensaios de compressão triaxial, realizados em amostras de solo argiloso com a adição de fibras curtas, compilados de 2 publicações (Feuerhemel, 2000 e Li, 2005) Os dados utilizados para a comparação e utilizados na equação do método de previsão de resistência de Zornberg (2002) são apresentados na Tabela 5.2. Assim como na análise realizada anteriormente, em todos os estudos, foram considerados α_F : 1 e os coeficientes de interação para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito na interface ($c_{i,c}$ e $c_{i,\phi}$) foram considerados iguais a 0,8.

Tabela 5.2. Dados experimentais de parâmetros utilizados no método de previsão de Zornberg (2002) em amostras de argila com a inclusão de fibras curtas de polipropileno.

Referência Bibliográfica	Nº de ensaio	Tipo de Ensaio	σ_n	Solo				Fibra de Polipropileno							
				Tipo	γ_d máx	c'	ϕ'	L_f	l_d	χ_w	χ	G_r	$\sigma_{f,ult}$		
Li (2005)	1	CU	60,	CH (Solo 4)	13,4	14,6	18,0	0,05	1000	0,24	0,36	0,91	425		
	2		115 e 211	CH (Solo 7)	14,0	28,8	11,2	0,05	2610	0,2	0,31	0,91	425		
	3			CL	16,3	11,2	26,2	0,05	2610	0,19	0,35	0,91	425		
Feuerhemel (2000)	4	CD	20,	CH	26,4	11,7	31,9	0,012	3300	0,5	1,47	0,91	120		
	5		60 e 100					0,036							
Esta pesquisa	6	CU	50,	CH	17,0			0,012	1000	0,10	0,19	0,91	810		
	7		100,							22,0	24,0			0,25	0,48
	8		200 e							29,0	28,0			0,10	0,19
	9	CD	300							0,25	0,48				

NOTA: CH: Argila de alta plasticidade; CL: Argila de baixa plasticidade; c' : Coesão efetiva do solo natural (kPa); G_r : Densidade específica (g/cm^3); L_f : Densidade linear da fibra (denier: $1g / 9000m$); l_f : Comprimento da fibra (m); ϕ : Ângulo de atrito efetivo do solo natural ($^\circ$); γ_d máx: Densidade seca do solo-fibra (kN/m^3); χ_w : Teor gravimétrico de fibras; χ : Teor volumétrico de fibras; σ_n : Tensão confinante (kPa); $\sigma_{f,ult}$: Resistência à tração última da fibra (MPa).

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da previsão de resistência solo-fibra. Para todos os casos, verifica-se que a tensão de confinamento que atua sobre as fibras está abaixo da tensão crítica de confinamento. Logo, os parâmetros de resistência ao cisalhamento equivalente foram determinados utilizando as Equações 6 e 7. Desta forma, para evidenciar melhor a diferença entre os resultados obtidos experimentalmente e os previstos, a Figura 5.5 e Figura 5.6 apresentam o aumento normalizado do ângulo de atrito

efetivo e o aumento normalizado da coesão efetiva normalizada, em relação ao teor de fibra volumétrico (χ), respectivamente.

Analisando-se a Tabela 5.3, verifica-se que os ensaios de compressão triaxial não drenado realizadas por Li (2005) obtiveram nos resultados experimentais reduções na coesão efetivos devido ao acréscimo das fibras. Entretanto, verifica-se que a previsão de Zornberg (2002) propõe para estes casos acréscimos nos valores de coesão, estando em desacordo com os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 5.3. Ângulo de atrito e coesão efetivos obtidos nos ensaios de compressão triaxial e previstos pelo método de previsão de Zornberg (2002).

Referência Bibliográfica	Nº de ensaio	Tipo de Ensaio	Solo natural		Ensaio experimental		Previsão de Zornberg (2002)		
			c'	ϕ'	c _r '	ϕ_r'	$\sigma_{n,crit}$	c _f	ϕ_f
Li (2005)	1		14,6	18,0	13,4	18,4	12615,4	20,0	24,1
	2	CU	28,8	11,2	28,8	15,5	34035,6	34,5	13,3
	3		11,2	26,2	9,8	33,3	13731,7	13,6	30,9
Feuerhemel (2000)	4				20,4	35,3	14365,2	14,0	36,7
	5	CD	11,7	31,9	34,6	38,2	4775,9	18,6	44,7
Esta pesquisa	6				26,0	24,0	58614,07	23,0	24,5
	7	CU	22,0	24,0	22,0	33,0		24,9	26,4
	8				35,7	29,8	62083,4	30,4	29,1
	9	CD	29,0	28,0	40,9	29,8		32,4	30,7

NOTA: c': Coesão efetiva do natural (kPa); c_f: Coesão equivalente (kPa); ϕ' : Ângulo de atrito do solo efetivo do solo natural (°); ϕ_f : Ângulo de atrito equivalente (°); $\sigma_{n,crit}$: Tensão crítica de confinamento (kPa).

Com relação aos ensaios de compressão triaxial drenados, os parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados nesta pesquisa e os parâmetros apresentados por Feuerhemel (2000) apontam que as fibras ocasionaram acréscimos mais significativos nos valores de coesão, em relação ao ângulo de atrito. Como apresentado anteriormente, verifica-se que o método de previsão de Zornberg (2002) apresenta boa previsibilidade para os ensaios propostos nesta pesquisa, no entanto, verifica-se que os valores de coesão normalizados para a pesquisa de Feuerhemel (2000) afastam-se dos valores propostos por Zornberg (2002).

Analisando-se de forma genérica, o método de previsão de Zornberg (2002) tende a apresentar melhores previsibilidade nos valores de ângulo de atrito, com menores discrepâncias entre os dados propostos pelo modelo e os dados obtidos experimentalmente. Os resultados de previsão de Zornberg (2002) indicam também uma diferença na relação entre a melhoria normalizada e o conteúdo volumétrico de fibra para

as diferentes categorias de ensaios. Concordando com o exposto por Najjar et al (2013), o método de previsão de Zornberg (2002) não apresenta boa previsibilidade para altos teores volumétricos de fibra, uma vez que o modelo foi calibrado para teores volumétricos baixos. Além disso, o método de previsão de Zornberg (2002) não especifica nenhum limite superior para a melhoria na resistência para grandes teores de fibras.

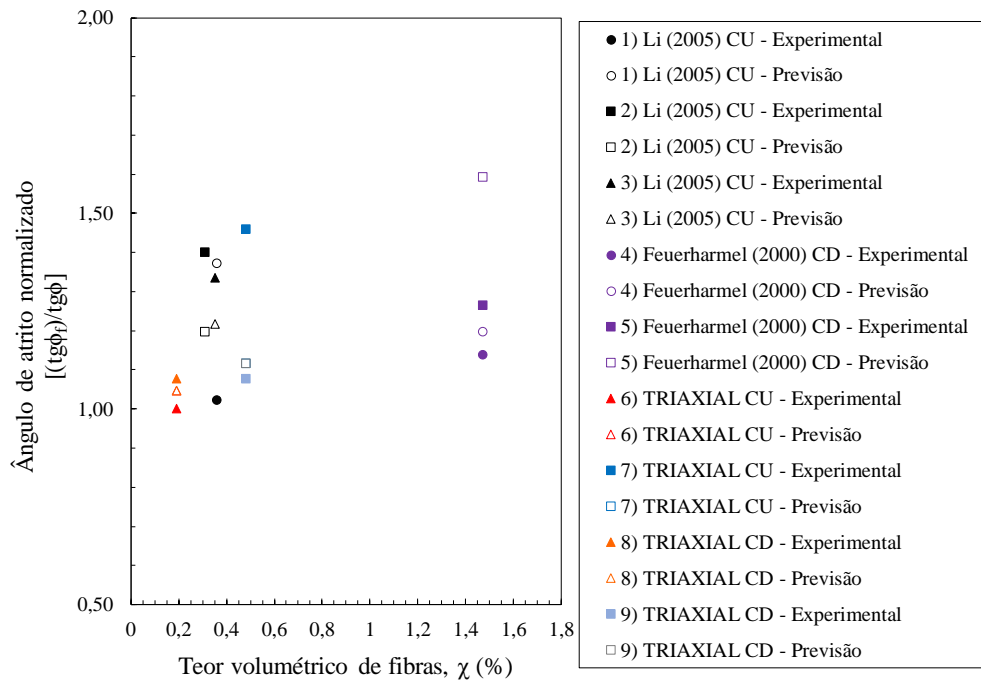


Figura 5.5. Aumento normalizado do ângulo de atrito versus teor volumétrico de fibras.

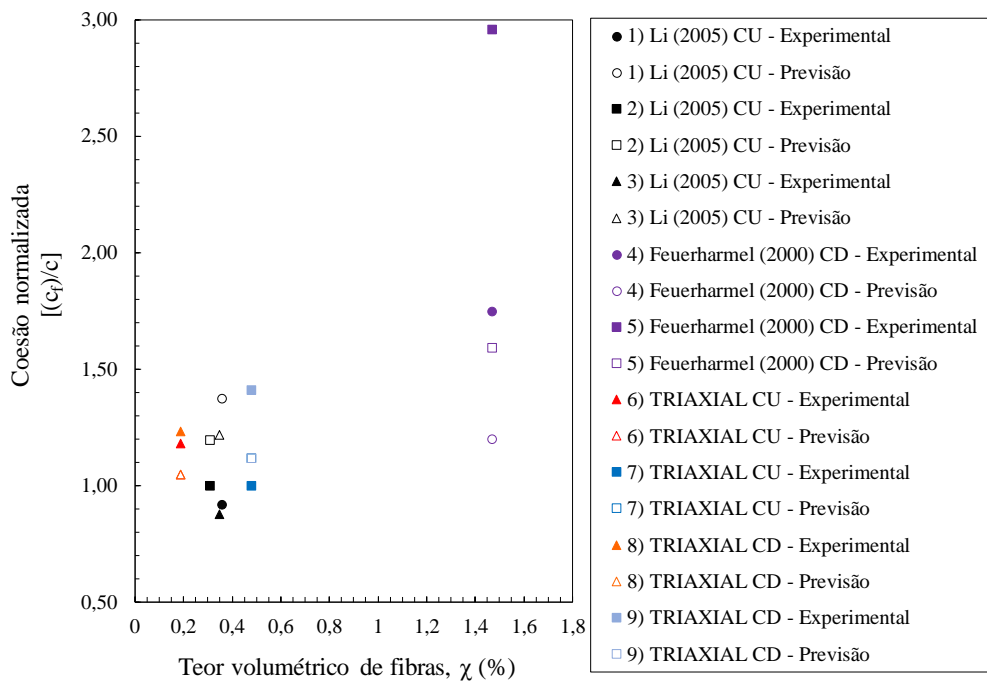


Figura 5.6. Aumento normalizado da coesão versus teor volumétrico de fibras

Por fim, verifica-se que o método de previsão de Zornberg (2002) assume uma relação linear entre o conteúdo de fibras volumétricas e a porcentagem de melhoria na resistência ao cisalhamento. Entretanto, os resultados apresentados acima indicam que a relação linear nem sempre é aplicável e tal o método não leva em consideração as especificidades de cada solo e condições de ensaios. De modo geral, verifica-se que o método proposto por Zornberg (2002) tem uma boa previsibilidade da resistência ao cisalhamento do compósito, no entanto, algumas modificações empíricas devem ser implementadas.

5.2 MÉTODO DE PREVISÃO DE JAMEI ET AL (2013)

Segundo Diab et al (2018), o único método analítico formulado com a finalidade de prever a força de cisalhamento não drenada de argilas com adição de fibra em condições de estabilidade de curto prazo é o modelo proposto em Jamei et al (2013). Desta forma, será avaliado nesta pesquisa, a eficiência do método de previsão de Jamei et al. (2013) na quantificação da resistência ao cisalhamento solo-fibra, em termos de tensões totais do solo natural argiloso com a inclusão de fibras nos teores gravimétricos de 0,10% e 0,25%.

Para obter os parâmetros de interface entre as fibras e a argila, Jamei et al. (2013) realizaram testes de arrancamento sob um esforço de tração controlado obtendo como resultados a coesão e o ângulo de atrito na interface solo-fibra. No entanto, com a atual pesquisa não contempla análises na interface argila-fibra, Diab et al. (2018) propõe a coesão na interface solo-fibra (c_i) como o produto da coesão do solo natural pelo coeficiente de interação coesivo e a tangente do ângulo de atrito na interface solo-fibra (δ_i) como o produto da tangente do ângulo de atrito do solo natural pelo coeficiente de interação atritivo. Segundo o autor os coeficientes de interfaces são iguais para ambos os componentes coesivos e atritivos (c_i e δ_i) e podem variar de 0,4 a 1,0.

O método prevê a diferença nas tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) na ruptura para os compósitos, obtidas por meio de ensaios triaxiais. Para a análise da previsibilidade da resistência ao cisalhamento não drenado, além dos dados dos resultados obtidos na pesquisa fez-se o uso de dados disponibilizados na literatura, conforme apresentados na Tabela 5.4. Para a realização dos cálculos, utilizou-se as equações 11 a 26, descritas anteriormente.

Tabela 5.4. Parâmetros para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenado pelo método de Jamei et al (2013).

Referência Bibliográfica	Tipo de Ensaio	σ_n	Solo			Fibra						
			γ_d	c	ϕ	Tipo	L_f	l_d	χ_w	χ	Gf	$\sigma_{f,ult}$
Esta pesquisa	CU	50, 100, 200 e 300	17,0	21,0	13,8	PP	0,012	1000	0,10 0,25	0,19 0,48	0,91	810

LEGENDA:
c: Coesão do solo natural (kPa); Gf: Densidade específica (g/cm³); l_d: Densidade linear da fibra (denier: 1g / 9000m); L_f: Comprimento da fibra (m); PP: Polipropileno; ϕ : Ângulo de atrito efetivo do solo natural (°); γ_d : Densidade seca do solo-fibra (kN/m³); χ_w : Teor gravimétrico de fibras; χ : Teor volumétrico de fibras; σ_n : Tensão confinante (kPa); $\sigma_{f,ult}$: Resistência à tração última da fibra (MPa).

Assim, a Figura 5.7 apresenta a diferença nas tensões totais principais ($\sigma_1-\sigma_3$) medida pelo ensaio não drenado solo-fibra versus a diferença nas tensões principais ($\sigma_1-\sigma_3$) calculadas pelo método de previsão de Jamei et al. (2013), além da verificação da influência das alterações nos coeficientes de interação.

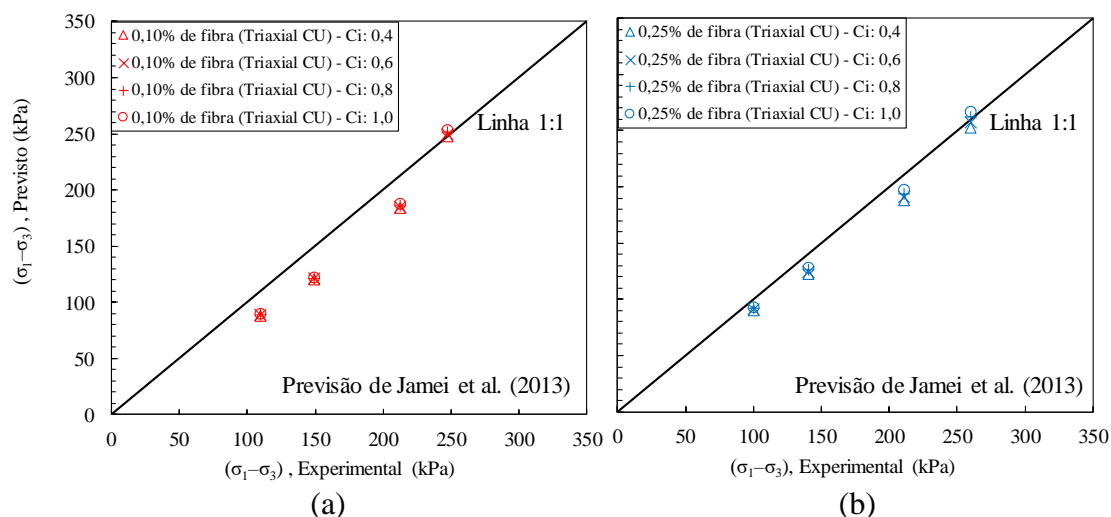


Figura 5.7. Resultados de diferença nas tensões totais principais ($\sigma_1-\sigma_3$) obtidas pelo ensaio CU versus resultados calculadas pelo método de Jamei et al (2013): (a) Solo-fibra 0,10%; (b) Solo-fibra 0,25%

Verifica-se na Figura 5.7 que o método de Jamei et al. (2013) apresentou melhores previsões para o solo-fibra 0,25%, uma vez que para o solo-fibra 0,10%, houve uma maior discrepância entre os dados experimentais e previstos. Entretanto, de modo geral, os resultados obtidos mostram que não houve variação significativa nos valores de ($\sigma_1-\sigma_3$) obtidos pelo método para todos os coeficientes de interação, $c_{i,c}$ e $c_{i,\phi}$, utilizados.

Segundo Diab (2018), o modelo de Jamei et al. (2013) superestima a diferença de tensões ($\sigma_1-\sigma_3$) na ruptura, e conclui que é necessário realizar avaliações adicionais para

calibrar melhor os coeficientes de interação a serem utilizados, diminuindo a dispersão significativa nas previsões do modelo com os ensaios obtidos em laboratório.

Comparando a variabilidade nos resultados em razão dos diversos coeficientes de interação ($c_{i,c}$ e $c_{i,\phi}$) utilizados, a proposta de Zornberg (2002) apresentou melhores resultados para baixas tensões confinantes, ao contrário do que foi verificado para a proposta de Jamei et al. (2013), a qual apresentou melhores resultados para maiores tensões confinantes.

Diab (2018) avaliou o modelo proposto com Jamei et. Al (2013) por meio da análise de diversas pesquisas disponíveis na literatura. A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos nesta pesquisa com os resultados alcançados na análise realizada por Diab (2018).

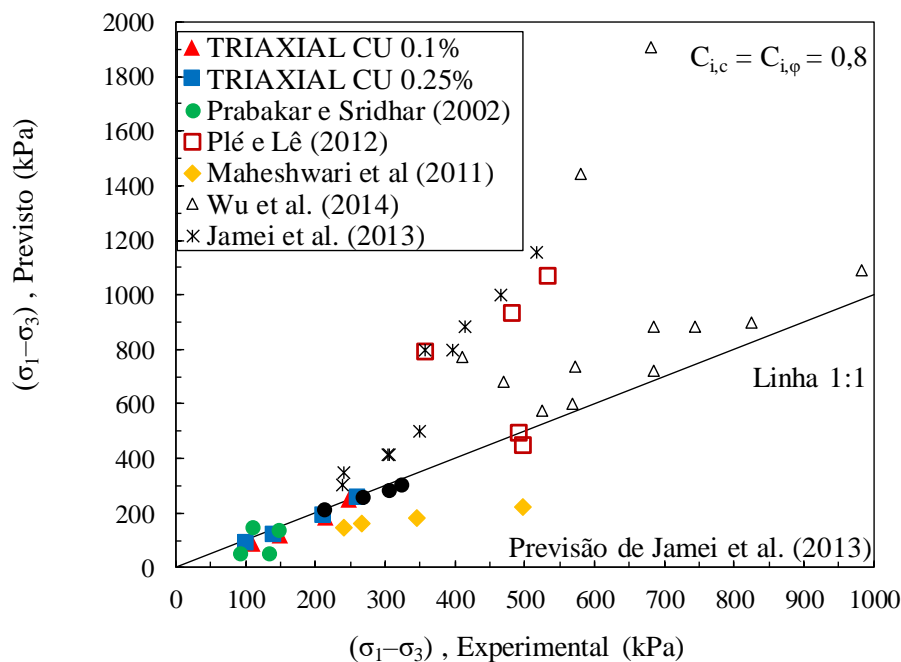


Figura 5.8. Diferença nas tensões totais principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) previsto pelo modelo de Jamei et. al (2013) versus a diferença nas tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) experimental. (Adaptado de Diab, 2018)

Verifica-se na Figura 5.8 que para o caso de um parâmetro de interface constante de 0,8 que o modelo proposto por Jamei et. al (2013) tende a superestimar os valores de diferenças nas tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$) para altas tensões, obtendo valores de previsão próximos dos valores experimentais para tensões mais baixas, em média até 400 kPa.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o comportamento de resistência e deformabilidade de um solo argiloso com a inclusão de fibras de polipropileno, por meio de ensaios de resistência à compressão (uniaxial e triaxial) e ao cisalhamento. Foram analisados, em especial, os resultados nas condições de saturação e drenagem estabelecidas nas diferentes aplicações práticas da Engenharia Geotécnica. Pode-se concluir que:

- A inclusão de fibras curtas de polipropileno no solo argiloso proporcionou acréscimos de resistência e rigidez inicial aos compósitos em todos os ensaios. Em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, percebe-se que as fibras proporcionaram aumentos mais significativos no intercepto coesivo, sendo esta parcela responsável pelo desempenho superior dos compósitos. Já o ângulo de atrito permaneceu praticamente inalterado em relação ao solo natural. De modo geral, observou-se que as fibras contribuíram de forma mais efetiva na resistência após o solo sofrer deformações iniciais, aumentando sua capacidade no que diz respeito à absorção de energia. Verificou-se também que as fibras formam pontes de transferências que absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuídas, o que gerou uma melhoria nas propriedades mecânicas no estado pós-fissuração e na ductilidade das amostras.
- Quanto ao ensaio de compressão triaxial, não foram observadas diferenças significativas na resistência ao cisalhamento efetiva das misturas na condição drenada em comparação à condição não drenada. Desta forma, conclui-se que a pressão neutra durante o cisalhamento não drenado, durante o cisalhamento, não influenciou de forma significativa a resistência ao cisalhamento das misturas solo-fibra para o caso deste solo argiloso;
- Quanto ao tipo de fibra utilizado, verificou-se que, apesar das fibras apresentarem elevada resistência à tração, diante do fator de forma e teores avaliados, estas não foram tão eficientes em promover melhoria significativa na resistência ao cisalhamento do solo. A tendência é que com outros fatores de forma e/ou teores de fibras, o acréscimo na resistência ao cisalhamento

seja mais significativo. É importante ressaltar que, com teores de fibras superiores a 0,25%, não obteve boa a trabalhabilidade destas fibras.

- Quanto aos modelos de previsão de resistência ao cisalhamento, tanto o método de Zornberg (2002) quanto o de Jamei et al. (2013) apresentaram, de modo geral, poucas discrepâncias em relação aos resultados obtidos experimentalmente nesta pesquisa, sendo o método de Zornberg (2002) mais sensível para tensões maiores, e o de Jamei et al. (2003), melhor representado para maiores teores e tensões maiores. No entanto, para ambos os métodos, conclui-se que os coeficientes de interação solo-fibra apresentam forte influência e devem ser melhor analisados para a diminuição da discrepância entre os resultados obtidos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDI, R. M.; PARSAPAJOUH, A; ARJOMAND, A. M. **Effects of Random Fiber Inclusion on Consolidation , Hydraulic Conductivity, Swelling , Shrinkage Limit and Desiccation Cracking of Clays.** International Journal of Civil Engineering. v.6, n.4, p. 284 – 292, 2008.
- ANG, E. C.; LOEHR, J. E. **Specimen size effects for fiber-reinforced silty clay in unconfined compression.** Geotechnical Testing Journal, v.2, 1-10, 2003
- AKBULUT, S., ARASAN, S., AND KALKAN, E. **Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibres.** Applied Clay Science, 38, p. 23-32, 2007
- AL-TABBAA, A. & ARAVINTHAN, T. **Natural Clay-Shredded Tire Mixtures as Landfill Barrier Materials.** Waste Management, 18, 1998
- AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. **Fiber Reinforced Cohesive Soils For Application In Compacted Earth Structures.** Geosynthetics 95 Conference, Nashville. Proceedings. v.2, p.433-466, 1995
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils: D4767.** Philadelphia, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils: D7181.** Philadelphia, 2011.
- AMIR-FARYAR, B. AND AGGOUR, M. **Determination of optimum fiber content in a fiber-reinforced clay.** J. Test. Eval., v.2, p. 334–337, 2012.
- ANAGNOSTOPOULOS 2013
- ANAGNOSTOPOULOS, C. A., TZETZIS, D. AND BERKETIS, K. **Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils.** Geomech. Geoeng., v9, p. 241–251, 2014
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Análise Granulométrica dos solos: NBR 7181.** Rio de Janeiro, 2016.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concretos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222**. Rio de Janeiro, 1993
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada: NBR 12777**. Rio de Janeiro, 1995
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Determinação do limite de liquidez: NBR 6459**. Rio de Janeiro, 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180**. Rio de Janeiro, 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Ensaio de compactação: NBR 7182**. Rio de Janeiro, 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457**. Rio de Janeiro, 2016
- ATTOM, M., AL-AKHRAS, N. AND MALKAWI, A. **Effect of fibres on the mechanical properties of clayey soil**. Proc. Inst. Civ. Eng. – Geotech. Eng. P. 277–282, 2009
- BABU, G. L. S.; CHOUKSEY, S. K. **Model for analysis of fiber-reinforced clayey soil”.. Geomech Geoeng.**, p. 277-285, 2010
- BABU, G. L. S.; CHOUKSEY, S. K. **Stress–strain response of plastic waste mixed soil**. Waste Management, p. 481–488, 2011
- BENTO, P.F.; CARVALHO, J.C. **Estudo da utilização de fibras de polipropileno como reforço de solos estabilizados para pavimentação da região de Urucu-Am**. Congresso Brasileiro De Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, 2006.
- BERNARDI, S.T. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibra de Aramida Kevlar**. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 164, 2013

- BOLAÑOS, R. E. Z; CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo Experimental de Solo Reforçado com Fibra de Coco Verde para carregamentos estáticos em obras geotécnicas**. Longman Scientific & Technical, p. 284, 2016
- BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO N.J. **Soil Fiber Reinforcement: Basic Understanding**. International Symposium On Environmental Geotechnology, San Diego. Anais, v.1, p. 878-884, 1996.
- CAI, Y, SHI, B; NG, C, W, W; TANG, C. S. **Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil**. J Geo- tech Geoenviron Eng p. 230–240, 2006
- CALDEIRA, I. M. G. **Resistência e Deformabilidade de uma Areia Estabilizada com Cimento e Fibras de Polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia, Porto, Portuga, 125p, 2012
- CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras Submetidos a Grandes Deformações**. Dissertação de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005
- CASTILHO, T. W. L. **Resistência ao cisalhamento de solos com fibras de politereftalato de etileno reciclado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 100 p. 2017
- CASTILHO, T. W. L; RODRIGUES, R. A. **Resistência ao cisalhamento de solos com fibras de politereftalato de etileno reciclado**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, Brasil, 2018
- CETIN, H.; FENER, M.; GUNAYDIN, O. **Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material**. Engineering Geology, p. 88-98, 2016
- CHOUBANE, B.; HO, R.K.; ARMAGHANI, J.M. **Full-scale laboratory evaluation of polypropylene fiber reinforcement of sub-grade soils**. Florida: State Materials Office. Florida Department of Transportation, p. 99-432, 2001
- COELHO, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas**. Dissertação – Universidade Federal de Ouro Pret., 2008

- 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
- DANG, L, C; FATAHI, B; KHABBAZ, H. **Behaviour of Expansive Soils Stabilized with Hydrated Lime and Bagasse Fibrese**. Advances in Transportation Geotechnics. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics. Volume 143, 2016, Pages 658–66, 2016
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER – ME 228/94. Solos – Compactação em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1994
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER – ME 254/94. Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão**. Rio de Janeiro, 1994
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER – ME 256/94. Solos – Compactação em equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão**. Rio de Janeiro, 1994
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER – ME 258/94. Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-MCV**. Rio de Janeiro, 1994
- DIAMBRA, A. IBRAIM, E. **Modelling of fibre-cohesive soil mixtures**. Acta Geotechnica, P 1-18, 2013
- DIAB, A. A; SADEK, S. NAJJAR, S. DAYA, M. H. A. **Undrained shear strength characteristics of compacted clay reinforced with natural hemp fibers**. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016
- DIAB, A. A; NAJJAR, S; SADEK, S; TAHA, H; JAFFAL, M. A. **Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay**. International Journal of Geotechnical Engineering, 2018

- DIVYA, P.V.; VISWANADHAMA, B.V.S.; GOURCB, J.P. **Hydraulic conductivity behaviour of soil blended with geofiber inclusions.** Journal of Geotextiles and Geomembranes 46. P 121-130, 2017
- ELDESOUKY, H. M.; MONEY, M. M., MANSUOR. **Fiber-reinforced sand strength and dilation characteristics.** Ain Shams Engineering Journal, 2015
- EKINCI, A.; FERREIRA, P. M. V. **The undrained mechanical behaviour of a fibre-reinforced heavily over-consolidated clay.** ISSMGE-TC 211 Int. Symp. on Ground Improvement, CurranAssociates, New York, 2012
- EHRlich, M.; ALMEIDA, M.S.S; CURCIO, D. **Hydro-mechanical behavior of a lateritic fiber-soil composite as a waste containment liner.** Geotextiles and Geomembranes, p. 42-47, 2019
- FEUERHEMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 131p, 2000
- FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008
- FREILICH, B., LI, C.; ZORNBERG, J.G. **Effective Shear Strength of Fiber-Reinforced Clays.** Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, 9ICG, Guarujá, Brazil, May, Vol. 4, pp. 1997-2000, 2010
- FROST, J.D.; WANG, Y.; MURRAY, J; JONES, A. **Utilization of carpet, textile & apparel waste for soil reinforcement.** Proceedings of the Fourth Annual Conference on Recycling of Fibrous Textile and Carpet Waste, Dalton, 1999
- GIRARDELLO, V. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 141p, 2010.
- GIRARDELLO, V. **Comportamento de ensaios de arrancamento de placas embutidas em camadas de solo-cimento-fibra.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2014

- GRAY, D.H.; OHASHI, H. **Mechanics of fiber reinforcement in sand**. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.109, n.3, p. 335-353, 1983
- GREGORY, A.S.; WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; BIRD, N.R.A.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. **Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data**. Soil Tillage Res. p. 45 e 57, 2006
- HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais**. Porto Alegre, Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 251p, 2002
- HEINECK, K. S.; COOP, M. R.; CONSOLI, N. C. **Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131, No. 8, 1024–1033, 2005
- HEJAZI, S.M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S.M.; ZADHOUSH, A., **A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers**. Constr. Build. Mater, 2012
- ILLSTON, J.M. **Construction materials; their nature and behavior**. London: E & FN Spon, London, p. 518, 1994.
- JAMEI, M.; VILLARD, P.; GUIRAS, H. **Shear failure criterion based on experimental and modeling results for fiber-reinforced clay**. Int. J. Geomech., 13, p. 882–893, 2013.
- JEWELL, R.A.; WROTH, C.P. **Direct shear tests on reinforced sand**. Géotechnique, London, v.37, n.1, p.53-68, 1987
- JIANG, H., CAI, Y. & LIU, J. **Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber**. Journal of Materials in Civil Engineering, No. 12, p. 1315–1322, 2010
- JIGHEH, H. **Undrained Behavior of Clay–Plastic Waste Mixtures**. 11° International Congress on advances in civil engineering, Istanbul, 2014
- KANIRAJ, S.R.; HAVANAGI, V.G. **Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p. 574–584, 2001

- KHATRI, V. N.; DUTTA, R. K.; VENKATARAMAN, G.; SHRIVASTAVA, R. **Shear Strength Behaviour of Clay Reinforced with Treated Coir Fibres**. Periodica Polytechnica. Civil Eng., p. 135-143, 2017
- KHATRI, V. DUTTA, R. K. **Shear strength, bearing ratio and settlement behavior of clay reinforced with chemically treated coir fibres**. Article in Jordan Journal of Civil Engineering, 2017
- KUMAR, S.; TABOR, E. **Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers**. J. Geotech. Eng., p. 774–782, 2003
- LI, C. **Mechanical Response of Fiber-Reinforced Soil**. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 2005
- LI, C.; ZORNBERG. J, G. **Mobilization Of Reinforcement Forces In Fiber-Reinforced Soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Asce, 2013
- LI, J; TANG, C.; WANG, D.; PEI, X.; SHI, B. **Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.6, p. 133-137, 2014
- MAHER, M. H.; GRAY, D. H. **Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers**. J. of Geotech. Engrg., ASCE, v. 116, p. 1661-1677, 1990
- MAHER, M. H.; HO, Y. C. **Mechanical-properties of kaolinite fiber soil composite**. J. of Geotech. Engrg, ASCE, v. 120, p. 1381-1393, 1994
- MAHESHWARI, V. **Performance of fiber reinforced clayey soil**. EJGE, v.16, p.1067–87, 2011
- MALIAKAL, T; THIYYAKKANDI, S. **Influence of randomly distributed coir fibers on shear strength of clay**, Geotechnical and Geological Engineering, p. 425–433, 2013
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; HYTIRIS, N. MERCER, F.B. **Soil strengthening using randomly distributed mesh elements**. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.3, p. 1735-1738, São Francisco, 1998
- MIRZABABAEI, M; ARULRAJAH. A; HORPIBULSUK, S; ALDAVA, M. **“Shear strength of a fibre-reinforced clay at large shear displacement when**

- subjected to different stress histories.** Geotextiles and Geomembranes, p. 422-429, 2017
- MIRZABABAEI, M.; MIRAFTAB, M.; MOHAMED, M.; MACMOHAN, P.,
Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibres, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p. 483-493, 2013.
- NAJJAR, S., SADEK, S. AND ALCOVERO, A. **Quantification of model uncertainty in shear strength predictions for fiber-reinforced sand.** J. Geotech. Geoenviron. Eng., 139, (1), p. 116–133, 2013
- NAJJAR, S., SADEK, S. AND TAHA, H. **Use of hemp fibers in sustainable compacted clay systems.** Geo-Congress 2014 Technical Papers, Geocharacterization and Modeling for Sustainability, ASCE, Atlanta, Georgia, 1415–1424, 2014
- NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. **Strength and deformation characteristics of Fiber Reinforced Soils.** International Symposium On Environmental Geotechnology, San Diego, Pennsylvania: Technomic Publishing Co., v.1, p.826-835, 1996
- NATARAJ M.S; MCMANIS, K.L. **Strength and deformation properties of soil reinforced with fibrillated fibers.** Geosynthetics International., p. 65-79, 1997
- ÖZKUL, Z.H.; BAYKAL, G. **Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading.** Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering, p. 767-781, 2007
- OTOKO. G. **Stress – Strain Behaviour of an Oil Palm Fibre Reinforced Lateritic Soil George.** International Journal of Engineering Trends and Technology, v. 14 N.6, 2014
- PATEL, S. K; SINGH, B. **Unconfined Compressive Strength Behaviour of Fibre-Reinforced Lateritic Soil.** Journal of Civil Engineering and Environmental Technology. v.1, n. 4. P. 93-98, 2014
- PLÉ, O.; LÊ, T.N.H.. **Effect of polypropylene fibre- reinforcement on the mechanical behaviour of silty clay.** Geotextiles and Geomembranes, p. 111-116, 2012
- PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R.S. **Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behavior of soil.** Construction and Building Materials, p. 20 – 24, 2002.

- PUNTHUTAECHEA K; PUPPALA J; VANAPALLI K, INYANG H. **Volume change behaviors of expansive soils stabilized with recycled ashes and fibers.** Journal Geotech Geoenviron Eng, p. 295–306, 2006
- QU, J.; LI, C.; LIU, B.; CHEN, X.; LI, M; YAO, Z. **Effect of random inclusion of wheat straw fibers on shear strength characteristics of shanghai cohesive soil.** Geotech. Geol. Eng. p. 511–518, 2013
- RIFAI, S.; MILLER, C. **Fiber Reinforcement for Waste Containment Soil Liners.** Journal of Environmental Engineering, p. 130, 2004
- SACHETTI, A. S. **Solo reforçado com cal e fibras de polipropileno: comportamento quando submetido à compressão triaxial.** Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012
- SANTONI, I. R.L.; TINGLE, J.S.; WEBSTER, S.L. **Engineering Properties of sand-fiber mixtures for road construction.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.127, n.3, p.258-268, 2001
- SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. **Deformation-based model for reinforced sand.** **Journal of Geotechnical Engineering,** New York, v.116, n.7, p.1153-1170, 1990
- SKEMPTON, A.W. **The pore-pressure coefficients A and B.** Géotechnique, London, v.4, 1954
- SPECHT, L.P.; HEINECK, K.S.; CERATTI, J.A.P.; CONSOLI, N.C. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos.** Solos e Rochas, ABMS/ABGE, v.25, n.1, p.15-34, São Paulo, 2002
- SHARMA, V. KUMAR, A. **Influence of relative density of soil on performance of fiber-reinforced soil foundations.** Geotextiles and Geomembranes, p. 1–9, 2017
- SHEWBRIDGE, S. E.; SITAR, N. **Deformation based model for reinforced sand.** ASCE J. Geotech. Engng, v. 116, n. 7, p. 1153– 1170, 1990
- SHUKLA, S.K.; SIVARAM, N.; DAS, B.M. **Fundamental concepts of soil reinforcement- an overview;** Journaul. of Geotech. Eng., p. 329-342, 2017

- VENDRUSCOLO, M. **Estudo do comportamento de fundações superficiais em solo melhorado mediante ensaios de placa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 141p, 2013
- VISWANADHAM, B. V. S.; PHANIKUMAR, B. R.; MUKHERJEE, R. V. **Swelling behaviour of a geofibre-reinforced expansive soil**. Geotext. Geomembr., p. 73–76, 2009
- TRAN, K.Q; SATOMI, T; TAKAHASHI, H. **Effect of Waste Cornsilk Fiber Reinforcement on Mechanical Properties of Soft Soils**. Transportation Geotechnics, 2018
- TAGNIT-HAMOU, A.; VANHOVE, Y.; PETROV, N. **Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes**. Cement and Concrete Research, p. 364–370, 2005
- TANG, C.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, Y. **Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil**. Geotext. Geomembr., p. 194–202, 2007
- TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed, p. 284, 1994
- TRINDADE, T.P.; IASBIK, I; LIMA, D.C.; SILVA, C.H.C.; BARBOSA, P.S.A. **Latossolo Vermelho-amarelo Reforçado com Fibras de Polipropileno de Distribuição Aleatória: Estudo em Laboratório**. Revista da Escola de Minas de Ouro Preto, p: 53-58, 1994
- TRINDADE, T. P.; IASBIK, I; LIMA, D. C.; MINETTE, E.; SILVA, C. H. C.; CARVALHO, A. B.; BUENO, B. S.; MACHADO, C. C. **Estudo laboratorial 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. 02, p. 215-222, 2006
- ZAIMOGLU A. **FREEZING–THAWING BEHAVIOR OF FINE-GRAINED SOILS REINFORCED WITH POLYPROPYLENE FIBERS**. Cold Reg Sci Technol, v. 5, p. 60-63, 2010
- ZIEGLER S, LESHCHINSKY D, LING HI. **Effect of short polymeric fibres on crack development in clays**. Journal Soils Found, v. 38, p.247–253, 1998

- ZORNBERG, J.G. **Discrete framework for limit equilibrium analysis of reinforced soil.** Geotechniqu., v.52, p.593–604, 2002
- VISWANADHAM, B. V. S.; PHANIKUMAR, B. R.; MUKHERJEE, R. V. **Swelling behaviour of a geofibre-reinforced expansive soil.** Geotext. Geomembr., v. 27, p. 73–76, 2009
- WU, Y.; LI, Y.; NIU, B. **Assessment of the mechanical properties of sisal fiber-reinforced silty clay using triaxial shear tests.** The Scientific World Journal, 436231, 2014
- XIAO, H.W.; YANNICK, N.C.H.; LEE, F.H.; ZHANG, M.H.; AHMAD B.S. **Size effect study on fibre-reinforced cement-treated clay.** Proceedings of the International Symposium on Geomechanics and Geotechnics: From Micro to Macro, Cambridge, p. 1351 -1356, 2014