

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO VIEIRA DE GOES ROCHA

**SOLO SILTOSO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA REFORÇADO COM FIBRAS
DE POLIPROPILENO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2020

EDUARDO VIEIRA DE GOES ROCHA

**SOLO SILTOSO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA
REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
do Curso de Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo dos Santos Izzo

Co-orientador: M.Sc. Jair A. Baldovino

CURITIBA
2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

SOLO SILTOSO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Por

EDUARDO VIEIRA DE GOES ROCHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no segundo semestre de 2019 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

Orientador – Ronaldo Luis S. Izzo, Dr.

UTFPR

Co-Orientador – Jair Jesús Arrieta Baldovino, MSc.

UTFPR

Profa. Lidiane Fernanda Jochen, Dra.

UTFPR

Prof. Matheus David Inocente Domingos, Dr.

UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso

Dedico aos meus pais Edison Lopes Rocha e
Cleide Aparecida V. de Goes, com muito amor
e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por permitir essa experiência pela qual passei e por me rodear pelas pessoas aqui presentes.

Em especial, agradeço ao meu Orientador, Professor Ronaldo Izzo, que não só fez parte da realização deste trabalho, mas como foi a pessoa que me deu a oportunidade de seguir este caminho e a desenvolver este amor por Geotecnia e Mecânica dos Solos durante o período de graduação.

Reverencio meu Co-orientador, grande amigo e professor, Jair Arrieta Baldovino, por toda paciência, cuidado, e tempo disposto para me auxiliar com a realização de ensaios e com a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao professor Matheus Domingos, a quem tenho grande admiração, por todo o comprometimento e auxílio nesta pesquisa, bem como aos demais professores e pesquisadores envolvidos nessa banca, obrigado pela atenção e contribuição dedicadas.

Agradeço ao meu falecido avô, Benedito, responsável pela minha criação desde a infância até a adolescência, por permitir o crescimento do homem que me faço. Bem como à minha avó, Alzira, segunda mãe, por todo amor e carinho, estando presente em toda minha criação.

Agradeço ao meu pai Edison Lopes Rocha, por todos os ensinamentos de vida, e por ensinar que o melhor caminho para ser seguido é o apetite por conhecimento. Sem sua ajuda, estar cursando tal curso longe de casa não seria possível.

Agradeço à minha Mãe, Cleide Aparecida Vieira de Goes, mulher mais forte que conheço, por ser meu porto seguro em momentos de dificuldades. Obrigado por todo este amor.

À minha namorada, Emmyline, pessoa quem estive comigo durante este período e viu de perto todas as dificuldades passadas durante os últimos dias, e que sempre estive disposta a me ajudar. Com toda certeza, sua presença permitiu a conclusão desta caminhada fosse mais fácil.

Agradeço ao meu irmão Rafael, meu primeiro e eterno amigo, por todo apoio durante meu período acadêmico, e por todos momentos que cuidou da minha irmã e mãe enquanto me mantive ausente.

À minha irmã Giovana, com quem aprendi o que é responsabilidade como irmão mais velho e o cuidado que herdei de meu avô, obrigado por todo amor e carinho.

Agradeço a minha Família por todo apoio e afeto todo esse tempo.

E por fim, mas não menos importante, agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por ter concebido toda a estrutura para a realização dessa pesquisa.

“A alegria que se tem em pensar e aprender faz-nos pensar e aprender ainda mais.” - Aristóteles

RESUMO

Vieira De Goes Rocha, Eduardo. **Solo Siltoso da Formação Guabirotuba Reforçado com Fibras de Polipropileno**. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2020.

Diversos estudos têm buscado a melhora do comportamento mecânico dos solos, com a utilização de aditivos sintéticos ou naturais, para a utilização em obras de engenharia civil. Neste âmbito, pesquisas com utilização de fibras de polipropileno para reforço de solos apontam uma melhora no comportamento do solo quando sujeito à tração e à compressão. Neste contexto, considerando-se a inexistência de trabalhos que estudem os efeitos da fibra de polipropileno em solos que compõem a Formação Guabirotuba, cujo sedimentos jazem em sua maior parte no município de Curitiba(PR), a presente pesquisa tem por objetivo avaliar os efeitos no comportamento mecânico de um solo siltoso pertencente a esta formação, quando reforçado com a adição aleatória de tais fibras. Isto posto, foram realizados ensaios de compactação na energia normal de Proctor, de resistência à compressão simples (q_u) e à tração por compressão diametral (q_t), empregando teores de fibra de 0%, 0,10%, 0,25%, 0,35% e 0,50% relativos à massa seca do solo. Os resultados demonstraram que a mencionada adição e respectivos aumentos do teor de fibra de polipropileno acarretaram a uma diminuição no peso específico seco máximo (γ_{d-max}), ao passo que, houve pouca variação na umidade ótima do solo (ω_o). O comportamento observado no peso específico seco ocorre porque a fibra, material de densidade específica menor que a do solo, passa a ocupar espaços antes preenchidos pelos grãos de solo. Ainda, foi possível constatar que a umidade ótima variou ligeiramente, uma vez que a fibra é hidrófoba e, portanto, não absorve água. Também foram observados que os valores de q_u , q_t e do módulo de rigidez secante correspondente a tensões em 50% de q_u e q_t (E_{50}) aumentaram com a adição de fibra até teores de 0,25%, sendo este o que apresentou os maiores benefícios em termos mecânicos, e portanto, sendo definido como o teor ótimo. Após este teor, os valores dessas características diminuíram para 0,35%, retornando a aumentar quando o teor foi de 0,50%. Uma possível explicação para este comportamento é que conforme a quantidade de fibra aumenta na mistura, o efeito causado pelos grãos do solo é perdido porque há uma diminuição de grãos no corpo de prova, que advém da maior ocupação pela fibra, Dessa forma a superfície do material que antes se atritava e se ligava com a fibra não é suficiente para gerar tais intertravamentos e força de atrito. Após a adição 0,35%, as fibras de polipropileno assumiram o papel do solo e se prenderam umas às outras gerando intertravamentos e atrito entre as fibras. O aumento de q_u para o teor ótimo de fibra foi de 50% em comparação com o solo sem fibra, enquanto a resistência à tração (q_t) apresentou um aumento de 138%. Calculou-se uma relação direta tração/compressão média de 0,15 (i.e., $q_t=0,15q_u$), influenciada principalmente pela interação fibra-solo como relatado na literatura. Por fim, a partir dos resultados obtidos através dos ensaios realizados, foram recomendadas possíveis aplicações das misturas solo-fibra para uso em obras de engenharia.

Palavras-chave: Fibra de polipropileno, Reforço de solo, Resistência à compressão simples, Resistência à tração por compressão diametral.

ABSTRACT

Vieira De Goes Rocha, Eduardo. **Silty Soil from Guabirotuba Formation Reinforced with Polypropylene Fibers**. 70p. Undergraduate Thesis (Undergraduate Program of Civil Engineering), Federal University of Technology-Paraná. Curitiba, Brazil, 2020.

Several studies have sought to improve the mechanical behavior of soils, with the use of synthetic or natural additives, for use in civil engineering works. In this context, research with the use of polypropylene fibers for soil reinforcement, shows an improvement in the behavior of the soil when subjected to tensile and compression. In this scope, considering the lack of research that study the effects of polypropylene fiber in soils that make up the Guabirotuba Formation, whose sediments lie mostly in the municipality of Curitiba (PR), the present research aims to evaluate the effects in the mechanical behavior of a silty soil belonging to this formation, when reinforced with the random addition of such fibers. Therefore, compaction tests were carried out on normal Proctor energy, unconfined compressive (q_u) and to splitting tensile strength (q_t), using fiber contents of 0%, 0.10%, 0.25%, 0.35% and 0.50% relative to the dry mass of the soil. The results showed that the aforementioned addition and respective increases in the polypropylene fiber content led to a decrease in the maximum dry density (γ_{d-max}), whereas there was little variation in the optimum soil moisture (ω_o). The behavior observed in the dry specific weight occurs because the fiber, a material with a specific density lower than that of the soil, starts to occupy spaces previously filled by the soil grains. Still, it was possible to verify that the optimum humidity varied slightly, since the fiber is hydrophobic and, therefore, does not absorb water. It was also observed that the values of (q_u), (q_t) and the secant stiffness module corresponding to stresses in 50% of q_u and q_t (E_{50}) increased with the addition of fiber up to 0.25%, which was the one with the highest mechanical benefits, and therefore being defined as the optimum content. After this content, the values of these characteristics decreased to 0.35%, increasing again when the content was 0.50%. A possible explanation for this behavior is that as the amount of fiber increases in the mixture, the effect caused by the grains of the soil is lost because there is a decrease of grains in the specimen, which comes from the greater occupation by the fiber. material that previously rubbed and bonded with the fiber is not enough to generate such interlocks and frictional force. After adding 0.35%, the polypropylene fibers assumed the role of the soil and stuck to each other, generating interlocks and friction between the fibers. The increase of q_u for the optimum fiber content was 50% compared to the soil without fiber, while the tensile strength (q_t) showed an increase of 138%. A direct average traction / compression ratio of 0.15 (i.e., $q_t = 0.15q_u$) was calculated, mainly influenced by the fiber-soil interaction as reported in the literature. Finally, from the results obtained through the tests carried out, possible applications of soil-fiber mixtures were recommended for use in engineering works.

Keywords: Polypropylene Fiber, Soil Reinforcement, Unconfined Compression, Splitting Tensile Strength

FIGURAS

Figura 1. As três fases do solo.....	16
Figura 2. Região da Formação Guabirota	17
Figura 3. Perfil típico de alteração da Formação Guabirota.....	19
Figura 4. Efeito da temperatura nos polímeros.....	22
Figura 5. Fases do solo reforçado com fibra	26
Figura 6 . Interação fibra no solo.....	27
Figura 7. Efeito "Ponte" da fibra no solo	28
Figura 8 . Exemplo de um solo não cimentado reforçado com fibra de polipropileno (teor de 0,25% de fibra)	29
Figura 9. Curva granulométrica do solo estudado	33
Figura 10. Curvas de compactação do solo	33
Figura 11. Gráfico de Limite de Liquidez	33
Figura 12. Fibra de Polipropileno após Desfiada	35
Figura 13. Fibra de Polipropileno de Comprimento igual a 24mm	36
Figura 14. Corpo de Prova do Ensaio de Compactação	37
Figura 15. Máquina de Utilizada no Ensaio de compressão Direta e Exemplo de ensaio	39
Figura 16. Curva de compactação do solo e misturas com 0,10%, 0,25%, 0,35%, e 0,50% de fibra. Sr é o grau de saturação.	41
Figura 17. Influência do teor de fibra no peso específico seco máximo do solo.....	42
Figura 18. Influência do teor de fibra no teor de umidade ótimo do solo.....	43
Figura 19. Curva tensão-deformação do solo natural	44
Figura 20. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,10% de fibra de polipropileno.....	45
Figura 21. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,25% de fibra de polipropileno	46
Figura 22. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,35% de fibra de polipropileno	47
Figura 23. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,50% de fibra de polipropileno.....	48
Figura 24. Fissuras formadas após moldagem em um corpo de prova com 0,50% de fibra....	49
Figura 25. Comparação das curvas médias das misturas solo-fibra ensaiadas.	50
Figura 26. Relação teor de fibra e resistência à compressão simples q_u	51

Figura 27. Relação do ganho de resistência residual q_{u-r} e teor de fibra.	51
Figura 28. Influência do teor de fibra no módulo de elasticidade E50.	52
Figura 29. Corpos de Prova Ensaaiados 0,0%, 0,10%, 0,25%, 0,50% (da esquerda para direita).	53
Figura 30. Corpo de prova com 0,35% de fibra após ensaio de compressão simples	53
Figura 31. Curva Tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para solo sem fibra	54
Figura 32. Curva Tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura de solo- fibra com teor de 0,10%	55
Figura 33. Curva tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura solo- fibra com teor de 0,25%	56
Figura 34. Curva tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura solo- fibra com teor de 0,35%	57
Figura 35. Curva tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura solo- fibra com teor de 0,50%	58
Figura 36. Comparação das curvas médias das misturas solo-fibra ensaiadas.	58
Figura 37. Influência do teor de Fibra na Resistência de Pico	59
Figura 38. Influência do teor de Fibra na Resistência à tração residual	60
Figura 39. Influência do teor de Fibra no módulo de elasticidade.	60
Figura 40. Relação resistência de pico para tração e resistência de pico para compressão	61
Figura 41. Possíveis aplicações de fibras de polipropileno em obras de engenharia civil. (a) Em barragens. (b) Reforço de Aterros e (c) Reforço de fundações	64

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	SOLO	16
2.2	SOLOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA	17
2.3	FIBRAS	20
2.3.1	Fibras Sintéticas	21
2.4	SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS	22
2.5	INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS	26
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	30
3.1	MATERIAIS	30
3.1.1	Solo	30
3.1.2	Fibras de Polipropileno	34
3.1.3	Água	36
3.2	METODOLOGIA	36
3.2.1	Dosagens	36
3.2.2	Ensaio de compactação das misturas solo-fibra de polipropileno	36
3.2.3	Preparação dos corpos de prova para ensaios de resistência à tração e compressão simples	38
3.2.4	Ensaio de Compressão Simples	39
3.2.5	Ensaio de Tração por compressão diametral	39

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	41
4.1	PROPRIEDADES DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E DAS MISTURAS SOLO-FIBRA.....	41
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	43
4.2.1	Influência da adição de fibra no módulo secante E_{50} em ensaio de compressão simples.....	52
4.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	54
4.3.1	Influência da adição de fibra no módulo secante E_{50} em ensaio de tração por compressão diametral.....	60
4.4	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA MÁXIMA DE COMPRESSÃO E RESISTÊNCIA MÁXIMA DE TRAÇÃO	61
5	POSSÍVEIS APLICAÇÕES DO SOLO-FIBRA	63
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	65
6.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil, inúmeras são as preocupações para a realização de um projeto de boa qualidade. Dentre esses entraves, a redução da disponibilidade de recursos naturais, bem como, a utilização de um material de baixa qualidade podem acarretar elevação de custos durante a execução da obra e também após obra finalizada, quando algumas patologias podem começar a surgir na construção.

Quando se trata de obras de engenharia civil, é importante que o solo local, que será utilizado, apresente propriedades mecânicas capazes de suportar tensões elevadas sem sofrer rupturas, e não ultrapassar as medidas de recalque permitidas.

A região de Curitiba e municípios ao redor estão apoiados sobre o solo pertencente à Formação Guabirota, solo este conhecido pelos especialistas e profissionais que trabalham com geotecnia por ser de má qualidade. De acordo com Felipe (2011), os sedimentos da Formação Guabirota residem em atributos de expansividade e retratividade, com alta suscetibilidade à erosão e movimentos gravitacionais de massa em encosta. A partir destas considerações, para tornar sua viabilidade em construções.

No intuito de dirimir estes impactos resultantes dos sedimentos encontrados na Formação Guabirota, pesquisas tem buscado formas de melhorar as características mecânicas do solo. Vestígios da adição de outros materiais que permitam a supressão dos defeitos do solo já são encontrados em construções da Antiguidade, sendo que num contexto moderno, o precursor desta técnica foi o arquiteto francês Henry Vidal (Vidal, 1969) que utilizou fitas metálicas para reforço de solo, vindo a chamar de “Terra Armada”. Desta forma, existem muitos estudos voltados para a adição de alguns aglomerantes, em especial cal, cimento e betume (BALDOVINO, 2018 e SPECHT, 2000) e resíduos, quais sejam cinza volante, de papel, de casca de arroz, materiais pulverizados ricos em sílica e alumina, na medida em que a quantidade de materiais empregados nestas misturas tem aumentado com o decorrer dos anos e aperfeiçoamento dos estudos.

Recentemente, estudos com adição de fibra de polipropileno ganharam notoriedade âmbito dos solos, ressaltando-se que este material já é bastante usado na produção de concreto, na qual detém a função de evitar o aparecimento de fissuras durante o processo de cura, uma vez que aumenta a resistência e a tração deste material.

Análises mostram um aumento na resistência à tração e compressão dos solos quando se incorpora fibra de polipropileno à sua estrutura (PLÉ & LÊ, 2012, PRADHAN et al. ,2012 e TANG et al. ,2007 e ZAIMOGLU; YETIMOGLU ,2012). Salienta-se, entretanto, que os efeitos da utilização da fibra de polipropileno dependem de alguns fatores relacionados às particularidades dos solos e da fibra, tais como concentração, distribuição e orientação, além do tipo de mistura, dos métodos de mistura e compactação (SHUKLA, 2017).

Ainda é escasso a quantidade de pesquisas que estudem o de fibra de polipropileno em solos pertencentes a Formação Guabirota. Logo, considerando-se a amplitude deste assunto, e tendo em vista a importância do aperfeiçoamento das pesquisas abrangendo a melhoria dos solos a partir da aplicação de fibra de polipropileno, faz-se imperioso o estudo dos efeitos desta utilização, em especial em um solo siltoso, de características peculiares, pertencentes à Formação Guabirota.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar os efeitos da adição aleatória de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de um solo sedimentar da Formação Guabirota, na energia de compactação normal de Proctor.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência de vários teores de fibra de polipropileno (0,10%, 0,25%, 0,35% e 0,50%), na umidade ótima e no peso específico seco máximo de compactação na energia normal de Proctor.
- Estudar a melhoria ocasionada pela da adição de fibra de polipropileno na resistência a compressão e à tração, bem como no comportamento elástico das misturas durante ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral.

- Avaliar as relações empíricas entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples (q_t/q_u) do solo e das misturas solo-fibra dependendo do teor de fibra.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dentro do âmbito da construção civil, um dos principais materiais de trabalho é o solo, que possui múltiplas funções, podendo receber cargas de diferentes origens de estrutura (compressão, tração, flexão e torsão), servir como base e sub-base de pavimentos, ser usado na constituição de barragens, sendo que neste caso pode receber cargas provenientes de fluídos, para fins de impedir a permeabilidade da água em seu interior, entre outras funcionalidades, as quais revelam as boas características deste material.

É comum na natureza deparar-se com solos que não preencham as características exigidas para certas finalidades, pois estes podem variar desde sua composição química, formação geológica até as suas características físico-mecânicas. Dessa forma, os estudos envolvendo misturas de solo com outros materiais objetivam melhorar o desempenho e buscam alcançar avanços tecnológicos no contexto da construção civil.

Nesse sentido, algumas pesquisas que envolvem o uso de fibras de polipropileno demonstram melhorias no comportamento do solo, especificamente nas situações em que se exige compressão e tração. São observados um aumento no pico de resistência a tração do solo bem como um aumento da resistência residual (Tang et al. ,2007).

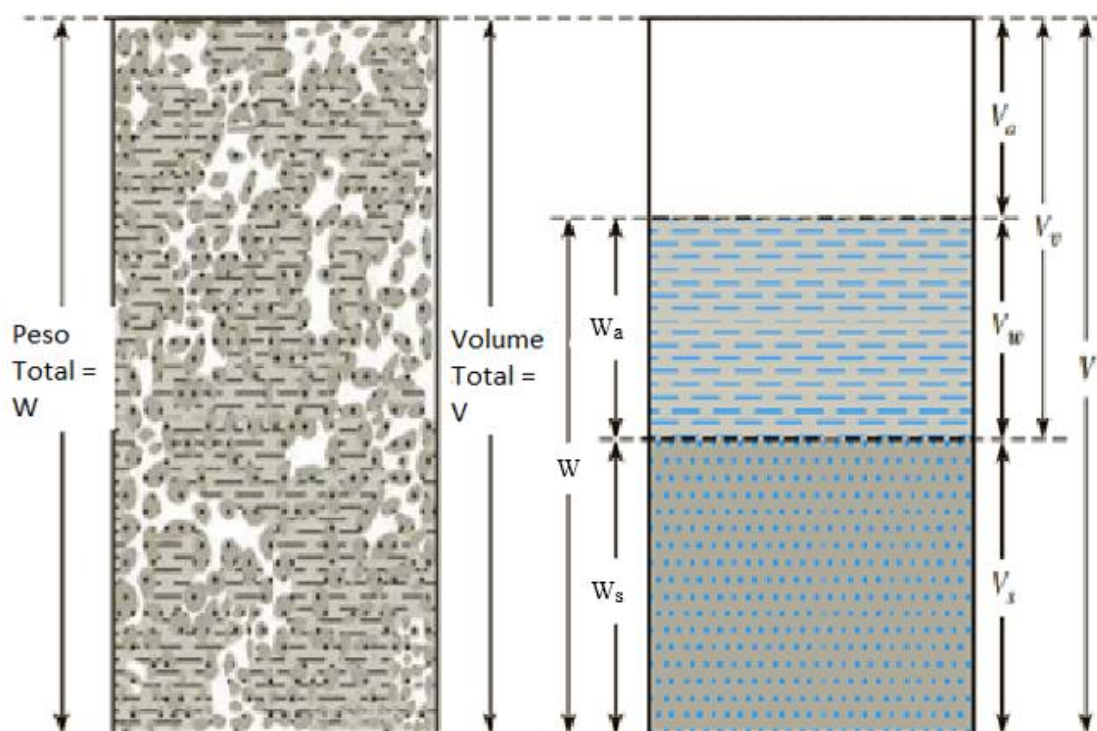
O presente trabalho ganha relevância pelos poucos trabalhos realizados com solos siltosos e por ser primeiro a investigar a interação das fibras de polipropileno em solos da Formação Guabirota, sendo analisadas as propriedades físicas e mecânicas de um solo proveniente desta formação, tratado com microfibras de 24 milímetros de comprimento, na energia normal do Proctor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLO

Os solos são materiais formados pelo intemperismo de rochas. Desta forma, as propriedades físicas do solo são ditadas primeiramente pelos minerais que o constitui (DAS, 2018). A NBR 6502 (ABNT, 1995) ainda relata que os solos são formados a partir da presença da fauna e flora que promovem o ataque químico da rocha matriz através de reações físico-químicas, tais como: hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, entre outros. Os solos são formados por partículas sólidas, incluindo vazios ou poros. Os espaços vazios podem ser preenchidos com ar ou água ou ambos (BODÓ & JONES 2013). A representação das três fases do solo é apresentada na Figura 1. A água e o ar constituem-se como os vazios do solo.

Figura 1. As três fases do solo



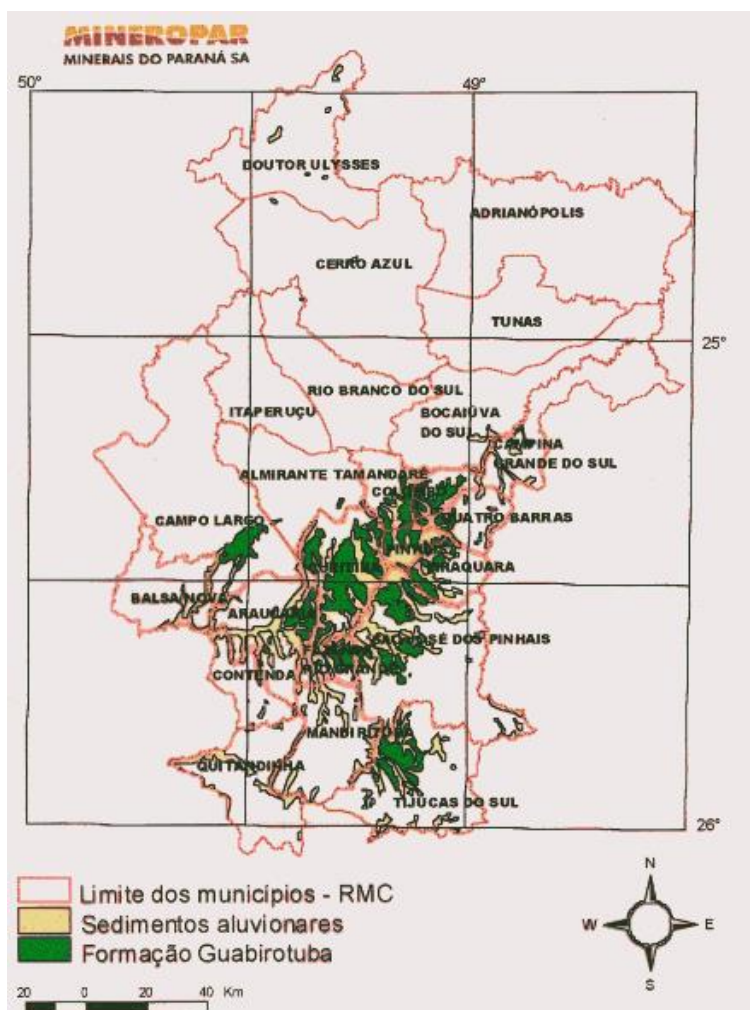
Fonte: Modificado de Das, 2013

2.2 SOLOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

A região denominada região metropolitana de Curitiba está localizada sobre uma formação sedimentar, sendo maior parte desta preenchida pela Formação Guabiro tuba. Os sedimentos desta formação, por sua vez, repousam sobre rochas pertencentes ao Complexo Cristalino, e se constituem principalmente em argilas siltosas ou siltes argilosos (KORMANN, 2002)

De acordo com Felipe (2011), os sedimentos da Formação Guabiro tuba estão distribuídos desde o Município de Campo Largo até o Município de Quatro Barras, abrangendo igualmente o Município de Curitiba integralmente, assim como parte dos seis municípios limítrofes, como se observa na Figura 2:

Figura 2. Região da Formação Guabiro tuba



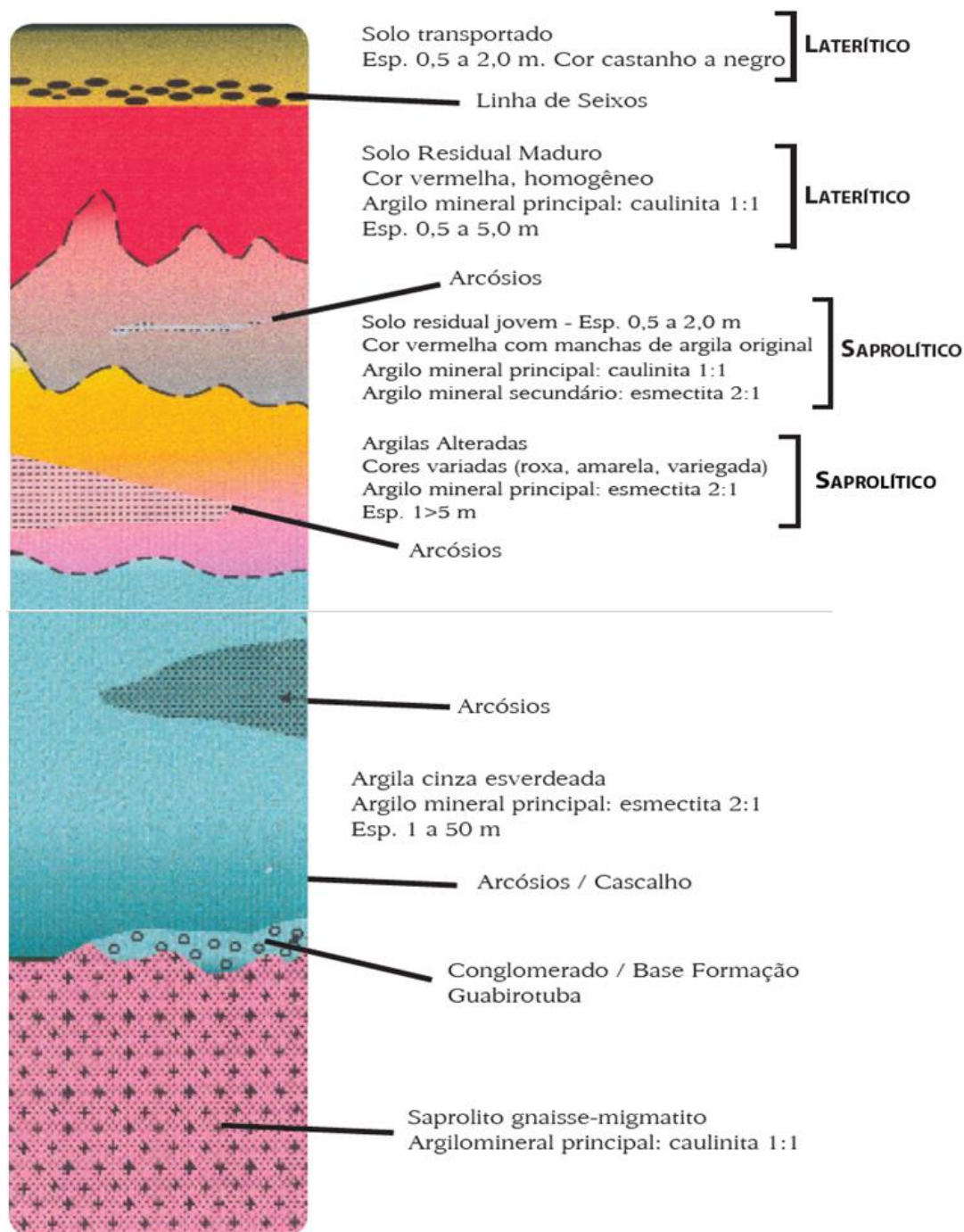
Fonte: Felipe (2011)

Os solos argilosos que constituem a Formação Guabirota possuem como característica predominante uma consistência elevada (variando de rijas a duras). De igual modo, nestes solos são típicas as cores cinza com tonalidades esverdeadas ou azulada e marrom, na medida em que os sedimentos que sofreram ações intensas de intemperismo químico, podem apresentar tons avermelhados ou amarelados. Em relação às argilas rijas e duras presentes na região de Curitiba, apesar da compressibilidade reduzida, possuem características que resultantes de frequentes ocorrências de acidentes em obras (KORMANN, 2002).

Em uma perspectiva histórica, Kormann (2002) explica que a maioria dos sedimentos que constituem a Formação Guabirota foram originados a partir da decomposição química das rochas Pré-Cambrianas, sendo que atingem espessuras na ordem de 60 a 80 metros, e compreendem sequências litológicas, nas quais predominam as argilas e areias arcólicas (constituídas na proporção variável de 20 - 40% de feldspato). Em relação à parte basal, esta é composta, por vezes, de cascalhos e arcólios de granulometria grosseira.

Sob uma ótica geral, este pacote de sedimentos encontra-se depositado sobre as rochas do Complexo Atuba, o qual, por sua vez, se constitui um embasamento gnáissico-migmatítico, bem como sobre rochas metassedimentares do Grupo Açungui. Não raramente, ocorre concentração de carbonato de cálcio, que impregna entre os sedimentos, na medida em que junto a estas impregnações carbonáticas verificam-se elementos de terras raras, tais como lantânio, neodímio, etc. (FELIPE, 2011). A Figura 3 apresenta o perfil da Formação Guabirota detalhado:

Figura 3. Perfil típico de alteração da Formação Guabiro tuba



Fonte: Felipe (2011)

Salamuni e Salamuni (1999) dividem as litologias da Formação Guabiro tuba em 4 grupos, que são: argilas arcósios e areias arcossianas, depósitos conglomeráticos e depósitos carbonáticos; onde o grupo de argilas se constitui no principal grupo

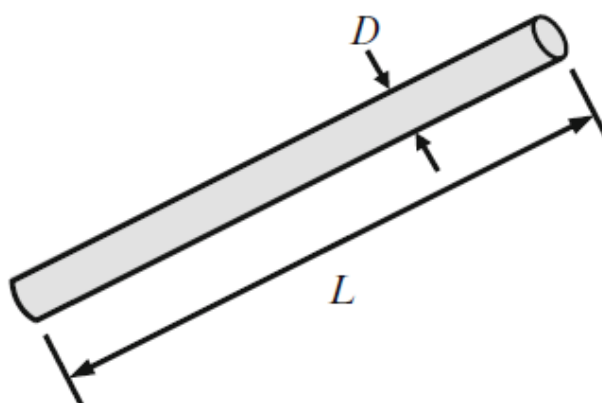
litofaciológico da formação. Em termos hidrogeológicos, a Formação Guabirota comporta-se como um aquícludo e apenas localmente em lentes arenosas e/ou arcossianas há um comportamento aquífero. Em geral, poços tubulares nesta Formação apresentam produtividade bastante baixa ou, no máximo, temporariamente medianas. O embasamento da referida Formação, no entanto, apresenta média a alta produtividade onde ocorrem descontinuidade estruturais, independentemente da profundidade, comportando-se, no seu todo, como um aquífero fraturado (SALAMUNI e STELLFELD, 2001).

2.3 FIBRAS

A fibra é uma unidade de matéria cujas características principais são a flexibilidade, finura e alta razão de comprimento por espessura (ou diâmetro), podendo ser obtidas a partir de materiais naturais, residuais ou sintéticos (SHUKLA, 2017). A razão entre comprimento L e espessura (ou diâmetro equivalente) D da fibra (ver Figura 4) é chamada por Shukla (2017) de razão de aparência a_r . Dado pela Equação 1.

$$a_r = \frac{L}{D} \quad (1)$$

Figura 4. Relação comprimento e diâmetro



Fonte: Shukla (2017)

2.3.1 Fibras Sintéticas

Atualmente várias fibras de origem polimérica vêm sendo empregadas como reforço de solos, entre elas estão as fibras de nylon, fibras de polipropileno, fibras de polietileno, fibras de poliéster e as fibras de poliamida.

O presente trabalho foi realizado com fibras de polipropileno, material utilizado em muitos setores industriais, um polímero termoplástico. Pode ser processado de diferentes formas: injeção, sopro, extrusão de filamentos, e extrusão de filmes. As fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplásticos. São constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma que podem deslizar umas sobre as outras (HOLLAWAY, 1994). Segundo Taylor (1994), esta característica explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno e concede substancial aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é incorporado.

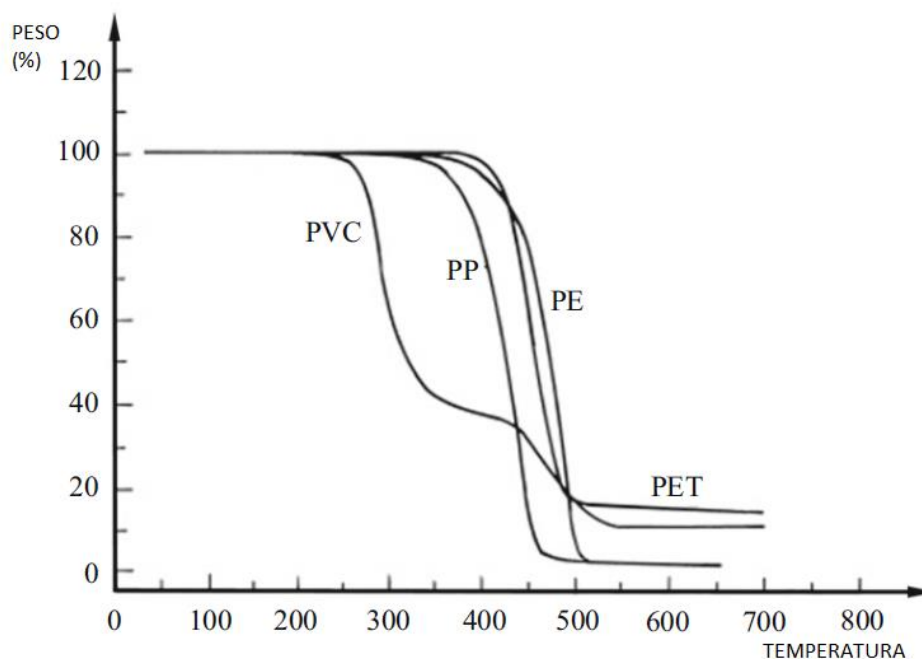
O módulo de elasticidade é menor do que qualquer outra fibra comumente utilizada, aproximadamente 8 GPa. Esta propriedade não a recomenda para ser utilizada com a finalidade de aumentar a resistência pré-fissuração ou rigidez dos materiais. Fibras de polipropileno são resistentes a uma variedade de produtos químicos e aos álcalis.

Algumas das principais características são a alta resistência ao ataque químico e biológico, baixa absorção de umidade, alta resistência à ação dos raios solares (ARAÚJO, 2011). A Tabela 1 sintetiza as relações de resistências de alguns polímeros. A Figura 4 apresenta em qual temperatura que os polímeros começam a perder massa e como é o comportamento dessa perda de peso.

Tabela 1. A comparação da resistência de alguns polímeros

Fator influenciador	PP	PET	PE	PA
Luz Ultravioleta (desestabilizada)	Médio	Alto	Baixo	Médio
Luz Ultravioleta (estabilizada)	Alto	Alto	Alto	Médio
Alcalinos	Alto	Baixo	Alto	Alto
Ácidos	Alto	Baixo	Alto	Baixo
Sais	Alto	Alto	Alto	Alto
Cura ao ar livre (acima de 100 °C)	Médio	Alto	Baixo	Médio
Vapor (acima de 100 °C)	Baixo	Baixo	Baixo	Médio
Hidrólise (reação com calor)	Alto	Alto	Alto	Alto
Microrganismos	Alto	Alto	Alto	Médio
Deformação	Baixo	Alto	Baixo	Médio

Fonte: modificado de Shukla, 2017

Figura 4. Efeito da temperatura em alguns polímeros geossintéticos

Fonte: Modificado de Shukla (2017)

2.4 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos ou químicos que busquem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. O termo melhoria do solo está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes (CASAGRANDE, 2005). Nos últimos anos diversos estudos têm sido realizados em torno do tema relacionado ao reforço do solo a partir da utilização de fibras.

Vidal (1969) um dos pioneiros dessas pesquisas, constatou que ao se adicionar elementos de reforço em solos, cria-se a possibilidade de aumento de sua resistência ante ao fenômeno de cisalhamento. De acordo com Palmeira (1992), foram encontrados vestígios dessa técnica na construção da Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas no Peru, empregando lã de lhama como material de reforço. Em 1926, foi pioneira a utilização de mantas de algodão como reforço de camadas asfálticas em pavimentos pelo Departamento de estradas da Carolina do Sul, Estados Unidos (PALMEIRA, 1992).

Primeiros trabalhos sobre o assunto se enfocavam no efeito de inclusões aleatoriamente distribuídas dentro da massa de solo, tentando avaliar o efeito na resistência ao cisalhamento. Gray & Ohashi, (1983), realizaram ensaios de cisalhamento direto para diferentes tipos de fibras, naturais e sintéticas. Eles observaram um acréscimo no ápice da força de cisalhamento e uma limitação na queda de sua força residual de cisalhamento. Também observaram que o ângulo de orientação das fibras em relação ao plano de cisalhamento, concentração e área de fibras no corpo de prova são os principais parâmetros para esse ganho de resistência, sendo os mesmos resultados repetidos quando os ensaios são realizados em loco.

Ola (1989) também, encontrou o mesmo comportamento na força de cisalhamento quando estudado o reforço de solos lateríticos por fibras de diferentes tipos. Ele percebeu aumentos na resistência ao cisalhamento foram maiores para orientações iniciais de fibra de 0° e 60° em relação à superfície de corte. A 0° , a maior parte da área de superfície da armadura é utilizada para resistir à falha de cisalhamento. De acordo com Gray e Ohashi (1983), a orientação de 60° coincide com a direção da tensão máxima de tração principal em um teste de cisalhamento direto. A orientação de 90° mostra menor resistência ao cisalhamento, enquanto a orientação de 120° indica o a maior resistência.

Ultimamente, diversas pesquisas foram realizadas no âmbito de reforço do solo com fibras naturais, poliméricas e minerais. Os pontos de convergência destes estudos têm sido descobrir como algumas características das fibras estão vinculadas ao melhoramento dos solos, especialmente através da análise do teor, comprimento, orientação das fibras, bem como rugosidade do material polimérico e módulo de elasticidade, constituindo-se estas as principais propriedades que influenciam nesta interação fibra-solo. (ALHOZAIMY et al., 1996; CONSOLI et al, 2010; DALL'AQUA, et al, 2010).

O teor de fibra está relacionado ao aumento de resistência a tração e compressão da mistura de solo fibra. (MCGOWN et al., 1978;GRAY & OHASHI, 1983; MAHER; HO, 1993; SPECHT, 2000; VENDRUSCOLO, 2003, ZAIMOGLU, 2010) o aumento do teor de fibra provoca aumento do índice de fragilidade e da capacidade de absorção de energia de deformação (MAHER; HO, 1993); a inclusão de fibras diminui o índice de fragilidade e aumenta a capacidade de absorção de energia Gray; Ohashi (1983);

Gray & Ohashi,(1983),Vendruscolo (2003) observaram que quanto maior o comprimento da fibra, maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico;

o aumento no comprimento da fibra provoca redução do índice de fragilidade e aumento da capacidade de absorção de energia (CONSOLI et al., 2004). O aumento do comprimento provoca diminuição da resistência de pico e aumento da capacidade de absorção de energia (MAHER; HO, 1993).

As fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada (TAYLOR, 1994); fibras com módulo baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis ((GRAY & OHASHI, 1983); SPECHT, 2000) porém não geram contribuição no aumento da resistência mecânica (SPECHT, 2000; CONSOLI et al., 2004); quanto maior for o módulo do reforço, mais facilmente as fibras poderão ser arrancadas (SHEWBRIDGE; SITAR, 1990).

Foi verificada uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, os elementos de reforço são arrancados (GRAY & OHASHI, 1983; TEODORO, 1999). A tensão confinante crítica é sensível a alguns parâmetros do compósito solo – fibra como o fator de forma das fibras (L/d), coeficiente de uniformidade e forma das partículas do solo. Nesse sentido, alguns dos estudos mais recentes têm realizado diferentes ensaios, nos quais são depositados distintos teores de fibra para fins de misturo com o solo.

Dall'aqua et al. (2010) fizeram pesquisas com solo-fibra, realizando ensaios com fibras de 18 mm de Polipropileno em uma taxa de 0,3% estabilizados com 4% e 6% de cal e cimento. Seus estudos mostraram que o solo caulinita com 6% de cimento sob repetidas cargas axiais deformou menos de 1% após 3600 ciclos de carga.

Plé & Lê, (2012), estudaram os efeitos do reforço de um solo argilo-siltoso com fibras de polipropileno, aplicando microfibras de 12 mm de comprimento e com taxas de 0%, 0,3% e 0,6% da mesma fibra. Em todos os casos de carga, um aumento na resistência foi percebido. Na compressão, o material composto tornou-se mais rígido. Podendo a ductilidade ser excedida para 68% sob confinamento. Já sob tração direta, o solo reforçado exibiu um benefício na ductilidade. Para o teor de 0,6%, a ductilidade atingiu um ganho de 62%. Ele também percebeu ganhos na condutividade hidráulica com o aumento de fibra. O ganho na ductibilidade também foi observado por Zaimoglu (2010). Ao estudar a performance de um solo reforçado com fibras de polipropileno em quando congelado e descongelado. Contudo, em seus ensaios não foram encontrados diferenças de rigidez inicial como em Plé & Lê (2012)

Freitag (1986) investigou a ação três tipos de fibras sintéticas lançadas aleatoriamente na mistura de um solo residual calcário classificado como argilo arenoso:

nylon, polipropileno e fibra de polipropileno de olefina polipropileno. Dentre seus resultados encontraram que as fibras distribuídas aleatoriamente em solo-fino compactado resultam em maior resistência e rigidez. A quantidade de ganhos de resistência para corpos de prova em sua umidade ótima é de 25%, que é comparável aos benefícios encontrados por outros materiais e outras fibras.

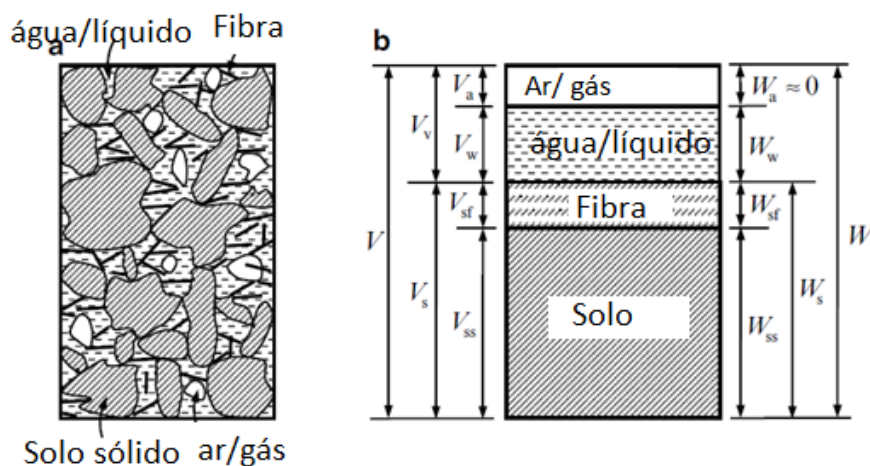
Ainda, Freitag (1986) investigou a influência de inclusão de fibras sintéticas realizando ensaios de resistência à compressão simples de um solo argiloso com presença de areia compactado. O solo foi misturado com água, e então a quantidade desejada de fibra foi adicionada e misturada no solo. A quantidade de fibra usada foi de 1% por volume. O autor conclui que:

- A resistência não confinada do solo reforçado compactado com umidade próxima da ótima é maior que para um solo não reforçado com uma mesma quantidade de água. Para espécimes compactadas bem no lado seco do ótimo, não parece haver nenhum benefício da presença das fibras.
- O tipo de fibra utilizada não parece ter um efeito significativo na resistência.
- O UCS (unconfined compressive strength), ou seja, resistência a compressão simples, máximo ocorre perto do peso específico seco máximo e não é muito diferente para solos não reforçados e reforçados.
- Em quantidades mais altas de água, a resistência do solo não reforçado diminui mais rapidamente do que o solo reforçado. Uma análise das curvas de tensão-deformação para amostras com o mesmo teor de água mostrou que o solo reforçado falha a uma tensão maior do que o solo não reforçado (PRADHAN et al. 2012)

2.5 INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS

Fibras podem ser consideradas semelhantes às partículas sólidas do solo, portanto, como uma massa de solo não reforçada, o solo reforçado com fibra pode ser representado pelo sistema de três fases representados na Figura 5, com sólidos de fibra e solo representados separadamente. O conceito de fases do solo, empregado amplamente na engenharia geotécnica para solo não-reforçados, pode ser utilizado para desenvolver as fases de relação de um solo reforçado com fibra (SHUKLA, 2017).

Figura 5. Fases do solo reforçado com fibra

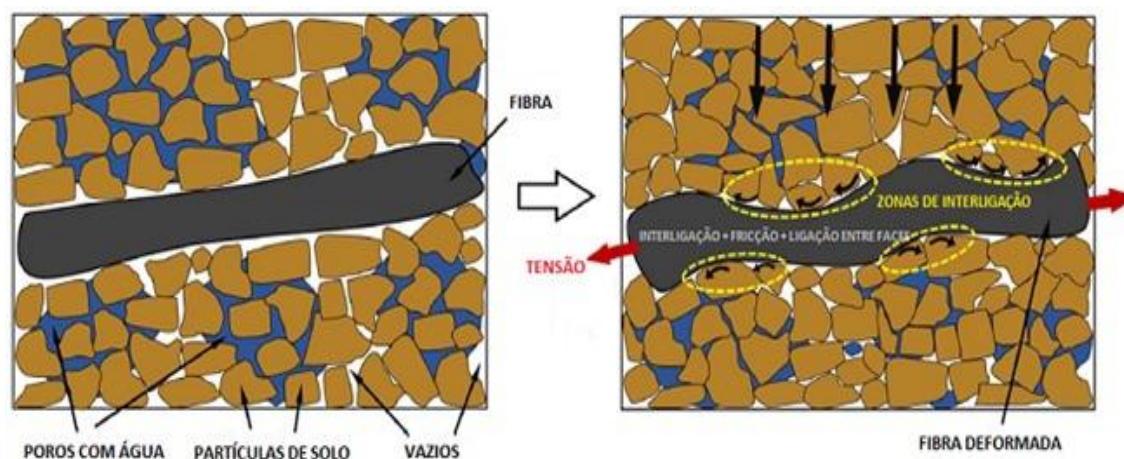


Fonte: modificado de Shukla (2017)

Gowthaman *et al.* (2018) explica que inicialmente, as partículas de solo submetidas a tensões tentam densificar, o que leva a deformação do material fibroso, sendo posteriormente geradas forças diretas na fibra no estágio de intertravamento fibra-solo devido à rotação e impacto direto das partículas do solo (Figura 6). Simultaneamente, as partículas do solo que estão em contato com a fibra induzem o desenvolvimento de forças de atrito nas fibras além das forças de intertravamento (ver Figura 6). Eventualmente, as forças de intertravamento acopladas a forças de atrito tendem a mobilizar a tensão de tração no material fibroso. Além disso, a distribuição aleatória de fibras mobiliza a ligação adesiva fibra-solo, que utiliza força compósita adicional e a

interação das fibras flexíveis se comporta como uma malha estrutural que mantém o solo unido aumentando a integridade estrutural do solo.

Figura 6 . Interação fibra no solo

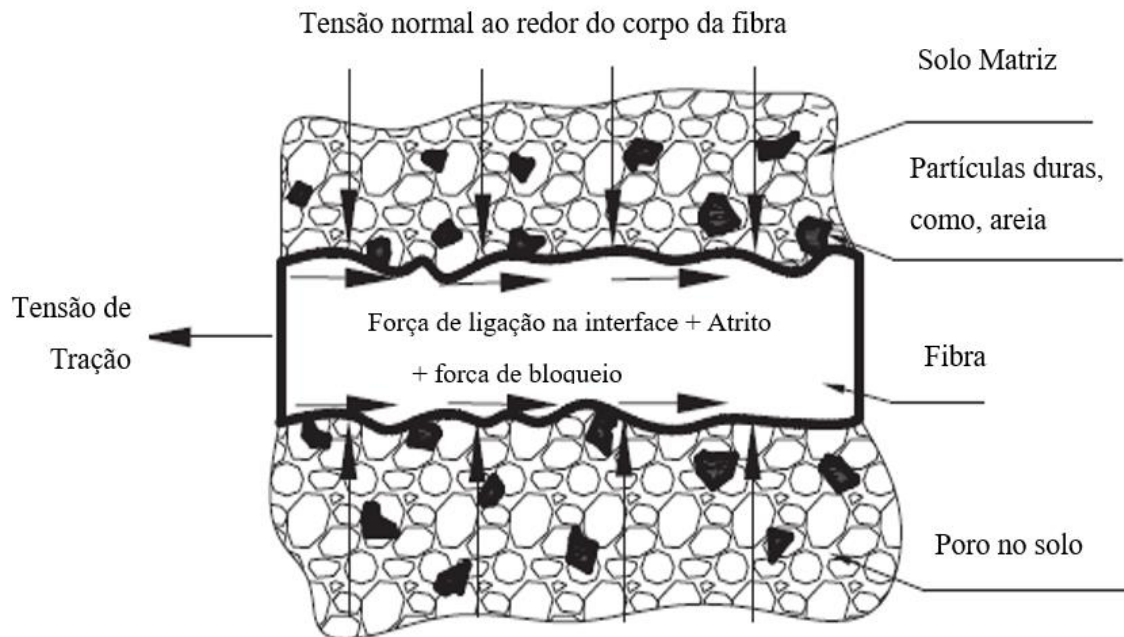


Fonte :Modificado de Gowthaman et al. (2018)

Tang et al. (2007) estudou o efeito de fibras de polipropileno em solos e em solo com adição de cimento, ele realizou imagens com microscopia eletrônica de varredura (Scanning Electron Microscopy -SEM) para analisar a interação da superfície da fibra com o solo matriz (Figura 8) e entender como essa adição influencia no ganho de resistência.

Assim como Gowthaman , Tang et al. (2007) descreveu os mesmos efeitos. Em sua pesquisa, a resistência ao estiramento entre partículas de argila e comportamento de força foi melhorado. Isso deveu-se a força interfacial que torna as fibras difíceis de deslizar e podem suportar tensão de tração, como o desenho de esboço mostrado na Figura 7. Quando as amostras estão sob carga, o efeito "ponte" da fibra pode eficientemente impedir o desenvolvimento de rachaduras por tensão e a deformação do solo.

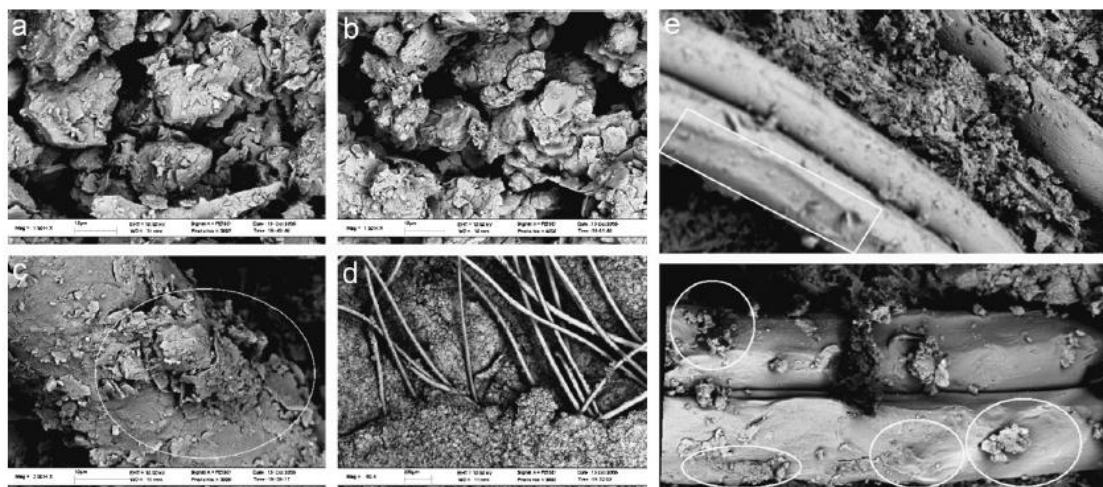
Figura 7. Efeito "Ponte" da fibra no solo



Fonte : Modificado de Tang et al. (2007)

Na Figura 8 (c), pode-se observar que a superfície da fibra é fixada por muitos minerais argilosos que contribuem para a união resistência e atrito entre a matriz da fibra e do solo. As fibras discretas distribuídas atuam como um espaço tridimensional (Figura 8(d)) para interligar os grãos do solo, ajudar os grãos a formar uma matriz coerente unitária e restringir

Figura 8 . Exemplo de um solo não cimentado reforçado com fibra de polipropileno (teor de 0,25% de fibra)



Fonte : Modificado de Tang et al. (2007)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo foi dividido em 3 etapas. A primeira etapa consistiu na caracterização do solo e da fibra de polipropileno. A segunda etapa consistiu na realização dos ensaios de compactação com adição de vários teores de fibra (F). Com os resultados dos ensaios de compactação foi possível determinar o peso específico seco aparente máximo e teor de umidade ótimo para cada teor de fibra. Com esses dados foi possível proceder à execução da última etapa que compreendeu a moldagem e rompimentos dos corpos de prova à compressão simples, tração e cisalhamento direto.

3.1 MATERIAIS

Os materiais usados nesta pesquisa foram 3: solo da Formação Guabirotuba, fibra de polipropileno e água destilada. As características dos materiais e suas propriedades são descritas a continuação.

3.1.1 Solo

O solo utilizado neste trabalho foi estudado previamente por Baldovino (2018). A amostra de solo foi coletada da terceira camada da Formação Guabirotuba, especificamente no Município de Fazenda Rio Grande, integrante da denominada Grande Curitiba (Município de Curitiba e Região Metropolitana), coordenadas geográficas 25°41'03,9"S e 49°18'325"O. O solo foi coletado manualmente, de maneira deformada e em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios. Foram usados tambores para armazenar o solo no Laboratório de Geotecnia no campus Curitiba da UTFPR, evitando possível contaminação.

De acordo com Baldovino (2018), o solo apresentava no momento da coleta características físicas de um solo de granulometria fina e cor avermelhada, típica da zona referida. Logo de armazenado no laboratório foi medida o teor de umidade hidrosférico do solo, sendo este valor de 40% do peso específico seco. Em seguida, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização do solo: limite de plasticidade segundo à norma brasileira 7180 (ABNT, 1984), Limite de liquidez segundo à NBR 6459 (NBR, 1984),

massa específica real dos grãos segundo a NBR 6508 (ABNT,2016), análise granulométrica segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984) e as propriedades de compactação do solo nas três energias de compactação (normal, intermediária e modifica) de acordo a norma Brasileira 7182 (ABNT, 2016). Também foi realizado um ensaio de Fluorescência de Raios-X na amostra de solo para determinar a sua composição química.

A Figura 9 apresenta a curva de distribuição granulométrica do solo, a Figura 10 mostra as curvas de compactação do solo nas três energias (acompanhadas das curvas de saturação 100, 90 e 80%) e a Figura 11 mostra os resultados da determinação do limite de liquidez do solo com o aparelho de Casagrande. Um resumo de todas as propriedades físicas do solo é mostrado na Tabela 2. De acordo com a Tabela 2, o solo apresenta um limite de liquidez de 53,1% e um índice de plasticidade médio de 21,3%. A massa específica real dos grãos é de 2,71 g/cm³. A curva de distribuição granulométrica demonstra que o solo é composto por 5,2% de areia grossa, 6,8% de areia média, 24,6% de areia fina, 53,6% de silte e 9,8% de argila; sendo a fração predominante a conformada por grãos de silte com 53,6% (0,002 < Diâmetro < 0,06 mm). Assim, segundo o Sistema Unificado de Classificação de solos, o solo é classificado como um silte elástico arenoso (MH).

Figura 9. Curva granulométrica do solo estudado

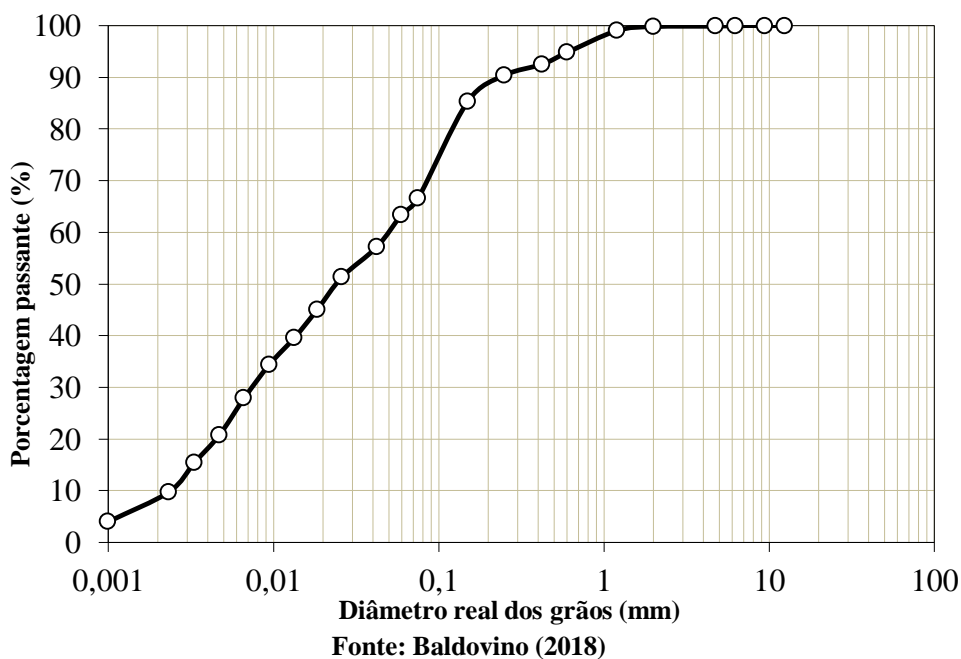
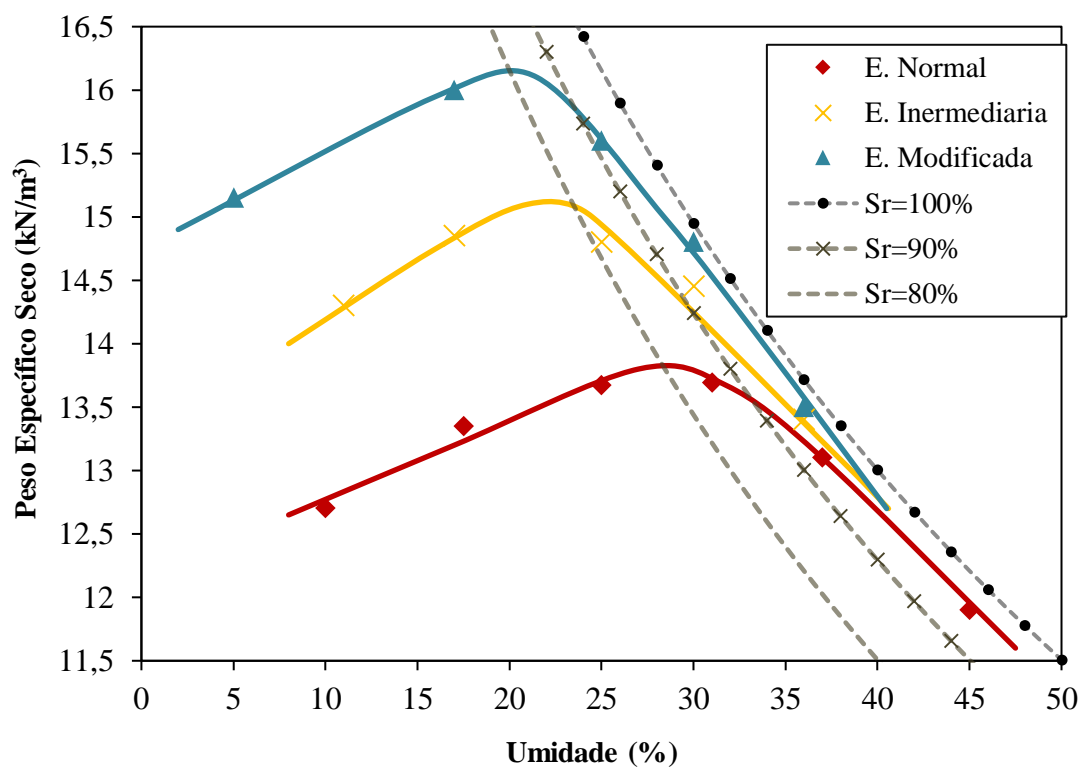
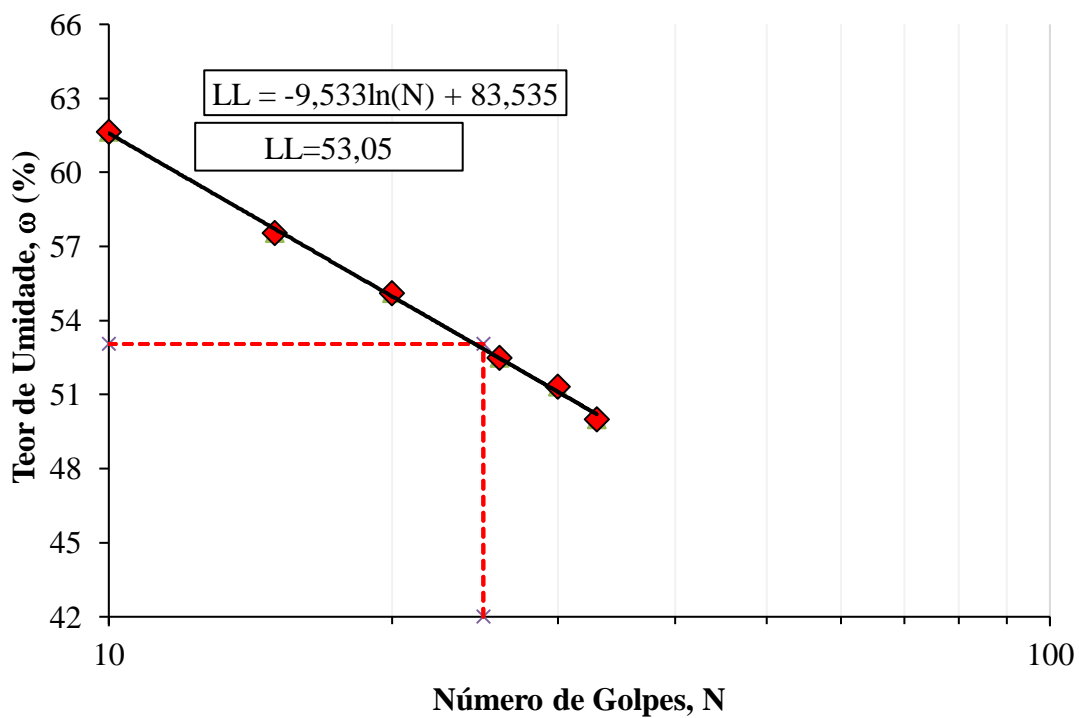


Figura 10. Curvas de compactação do solo



Fonte: Baldovino, 2018

Figura 11. Gráfico de Limite de Liquidez



Fonte: Baldovino, 2018

A Tabela 3, obtida por Baldovino (2018) exibe a composição química do solo. Nota-se que o solo é composto principalmente por sílica e alumina, sendo estas porcentagens de 53 e 24%, respectivamente. Outros compostos encontrados durante a Fluorescência foi a presença de ferro em uma porcentagem de 10% o que indica a cor avermelhada do solo.

Tabela 2. Propriedades do solo

Propriedades	Valor	Norma
Limite de Liquidez (%)	53,1	
Limite de Plasticidade (%)	31,8	ASTM 4318 (ASTM, 2010)
Índice de Plasticidade, %	21,3	
Densidade específica	2,71	ASTM D854 (ASTM, 2014)
Areia grossa (0,6 < Diâmetro < 0,2 mm), %	5,2	
Areia média (0,2 < Diâmetro < 0,6 mm), %	6,8	
Areia fina (0,06 < Diâmetro < 0,2 mm), %	24,6	NBR 6502 (ABNT, 1995)
Silte (0,002 < Diâmetro < 0,06 mm), %	53,6	
Argila (Diâmetro \leq 0,002 mm), %	9,8	
Diâmetro médio (D ₅₀), mm	0,025	
Coefficiente de uniformidade (C _u)	21,7	

Fonte: Baldovino, 2018

Tabela 3 . Composição química do solo com fluorescência de raio x

Composto	Concentração (%)
Dióxido de Silício (SiO ₂)	53,12
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	24,30
Óxido de Ferro (III) (Fe ₂ O ₃)	10,46
Óxido de Cálcio (CaO)	0,03
Óxido de Magnésio (MgO)	0,28
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,39
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,02
Dióxido de Titânio (TiO ₂)	1,37
Óxido de Manganês (MnO)	0,17
Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	0,22
Perda ao fogo	9,64

Fonte: Baldovino et al. 2018

3.1.2 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas nos ensaios que ensejaram o presente estudo foram fornecidas por uma empresa de Curitiba, o material é acondicionado em sacos hidrossolúveis, com peso de 600 (seiscentos) gramas cada um.

A fibra de polipropileno produzida a partir de multifilamentos, sendo usualmente indicada para o reforço de concreto e argamassas, com a finalidade de formar um composto homogêneo, com a finalidade de controlar a fissuração por retração. A Tabela 4 apresenta as propriedades físicas da amostra de fibra fornecida pela empresa fornecedora. Segundo a Tabela 4 o diâmetro da fibra é de 18 μm , com seção circular e comprimento de 24 mm. A massa específica das fibras de polipropileno (pp) é de 0,91 g/cm^3 , menor que a densidade da água o que significa que pode existir flotação da fibra em uma mistura com grande teor de umidade no solo.

A Tabela 5 mostra as propriedades mecânicas da fibra de polipropileno. Observa-se as excelentes propriedades mecânicas da fibra sobretudo na resistência à tração de 300 MPa.

Por último a Tabela 6 mostra as potenciais aplicações da fibra de pp, indo desde aplicações para reforço de concreto projetado até pavimentos e revestimentos. A dosagem recomendada para a fibra é de 600 g/m^3 .

A Figura 12 mostra uma fotografia da fibra após ser desfiada manualmente e a Figura 13 mostra a fibra aglomerada, estado em que é armazenado pela e distribuído pela empresa fornecedora utilizada neste estudo.

Tabela 4. Propriedades físicas da fibra de polipropileno

Característica	Valores
Diâmetro (μm)	18
Seção transversal	Circular
Comprimento (mm)	24
Alongamento (%)	80
Matéria-prima	Polipropileno
Peso Específico (g/cm^3)	0,91

Fonte: Fornecedor

Tabela 5. Propriedades mecânicas da fibra de polipropileno

Propriedades	Valores
Temperatura de fusão (°C)	160
Temperatura de ignição (°C)	365
Resistência à tração (MPa) (N/mm ²)	300
Módulo de Young (MPa)	3000

Fonte: Fornecedor

Tabela 6. Aplicações da Fibra de Polipropileno

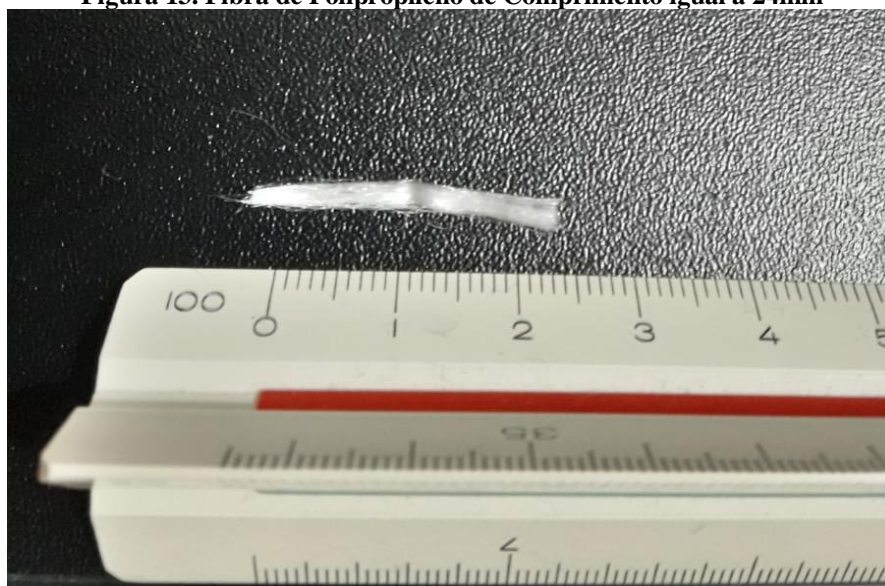
	Aplicações e características
Campos de aplicação indicados	Concreto projetado, pré-fabricados, pavimentos, pisos, revestimentos.
Frequência de fibras por quilo	180 000 000
Área superficial específica (m ² /kg)	244
Dosagem (recomendação mínima) (g/m ³)	600

Fonte: Fornecedor

Figura 12. Fibra de polipropileno após desfiada

Fonte: O autor

Figura 13. Fibra de Polipropileno de Comprimento igual a 24mm



Fonte: O autor

3.1.3 Água

A água utilizada neste estudo será a destilada, sendo obtida a partir do destilador pertencente ao laboratório de geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

O emprego da água destilada decorre do objetivo de impossibilitar a reação do solo e do material empregado com substâncias diluídas nela, como sais e outras impurezas, para fins de obtenção dos melhores resultados.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Dosagens

O teor de fibra está justificada na literatura, na qual são apresentados ensaios com taxas variáveis entres 0,05 à 1% (Tang et al. 2007 , Consoli et al. 2010). A partir disso, e em se considerando o comportamento do solo durante os ensaios de compactação realizados, foram arbitrados teores de fibra iguais a 0%, 0,10%, 0,25%, 0,35% e 0,50% em relação ao peso de solo seco.

3.2.2 Ensaio de compactação das misturas solo-fibra de polipropileno

Os ensaios de compactação foram realizados usando a energia Proctor normal detalhada na norma brasileira NBR 7182 (ABNT, 2016). Para traçar cada curva foram necessários 5 pontos experimentais de teores de umidade (desde 24% até 40%, aproximadamente). Cada ponto experimental consistiu num corpo de prova (um exemplo é mostrado na Figura 13) compactado com a energia normal, para isso foram necessários 26 golpes x 3 camadas usando o soquete e molde pequeno especificados na norma NBR 7182 (ABNT, 2016). A Figura 16 mostra as curvas de compactação do solo e das misturas :Solo+0,10% de fibra, Solo+0,25% de fibra, Solo+0,35% de Fibra e Solo+0,50% de fibra.

A Figura 14 apresenta um corpo de prova moldado para a definição das curvas de compactação. É possível observar a disposição das fibras de polipropileno na superfície do corpo de prova.

Figura 14. Corpo de Prova do Ensaio de Compactação



Fonte: O autor

3.2.3 Preparação dos corpos de prova para ensaios de resistência à tração e compressão simples

Para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, foram moldados corpos de prova de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Depois da coleta em campo, o solo foi secado, em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, e colocado em porções uniformemente distribuídas para ser misturados com a fibra de pp. Em seguida, foi adicionada uma porcentagem de água em peso, sendo esta porcentagem referente ao teor de umidade ótimo dos pontos de moldagem resultantes dos ensaios de compactação. Adicionou-se a quantidade de fibra de polipropileno seca com referência ao peso seco da amostra. Realizou-se a mistura do solo úmido com a fibra de modo que a mistura ficasse a mais homogênea possível.

As amostras foram compactadas estaticamente em três camadas com um molde de aço inox com diâmetro interno de 50 mm, altura de 100 mm e espessura de 5 mm, nas condições de compactação ótimas. Para assegurar o peso específico seco aparente de moldagem, foi realizado o cálculo do volume do molde e do peso de mistura úmida necessários para cada corpo de prova. Após esses cálculos, foi pesada a quantidade necessária de material para cada corpo de prova. A moldagem foi feita com a ajuda de uma prensa hidráulica manual. Depois de cada processo de moldagem, três amostras da mistura foram tomadas para medir o teor de umidade em estufa durante 24 horas para assegurar o valor de umidade desejado.

Os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão de 0,01 g e as dimensões do mesmo eram medidas com o uso de um paquímetro de 0,1 mm de erro. Os corpos de provas extraídos do molde foram envolvidos com plástico filme transparente para manter o teor de umidade. As amostras tinham que respeitar os seguintes erros máximos para serem usadas nos ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral: dimensões das amostras com diâmetro de $\pm 0,5$ mm e altura de ± 1 mm, peso específico aparente seco (γ_d) de $\pm 1\%$ e teor de umidade (ω) de $\pm 0,5\%$.

Para cada ponto de moldagem e teor de fibra de pp, foram moldados 8 corpos de prova (4 para compressão simples e 4 para tração por compressão diametral). Os corpos de prova foram armazenados em caixa de isopor até o momento do rompimento na prensa.

3.2.4 Ensaio de Compressão Simples

O ensaio de compressão simples foi feito seguindo a norma 12770 da NBR (ABNT, 1992). Foi utilizada uma prensa hidráulica automática WILLE GEOTECHNIK UL60 (Figura 15) com capacidade máxima de 5 KN e anéis calibrados para carga axial com capacidade de 4,5 KN e 10 KN.

A resistência à compressão simples é o valor da carga máxima de ruptura do material, ou o valor de pressão correspondente à carga na qual ocorre deformação específica do cilindro. Adota-se a resistência à compressão não confinada ou simples (q_u) em KPa, de acordo com a seguinte equação:

Figura 15. Máquina de Utilizada no Ensaio de compressão Direta e Exemplo de ensaio



Fonte: Baldovino (2018)

$$q_u = \frac{P_r}{A_t} \quad (2)$$

Onde:

P_r = carga de ruptura no pico de curva

A_t = Área Transversal corrigida

3.2.5 Ensaio de Tração por compressão diametral

Os procedimentos dos ensaios de resistência tração por compressão diametral seguiram a norma brasileira NBR 7222 (ABNT, 2011). Adotou-se a resistência à tração

por compressão diametral (q_t) de acordo com a seguinte expressão:

$$q_t = \frac{2P_{Rd}}{\pi \times D \times H} \quad (3)$$

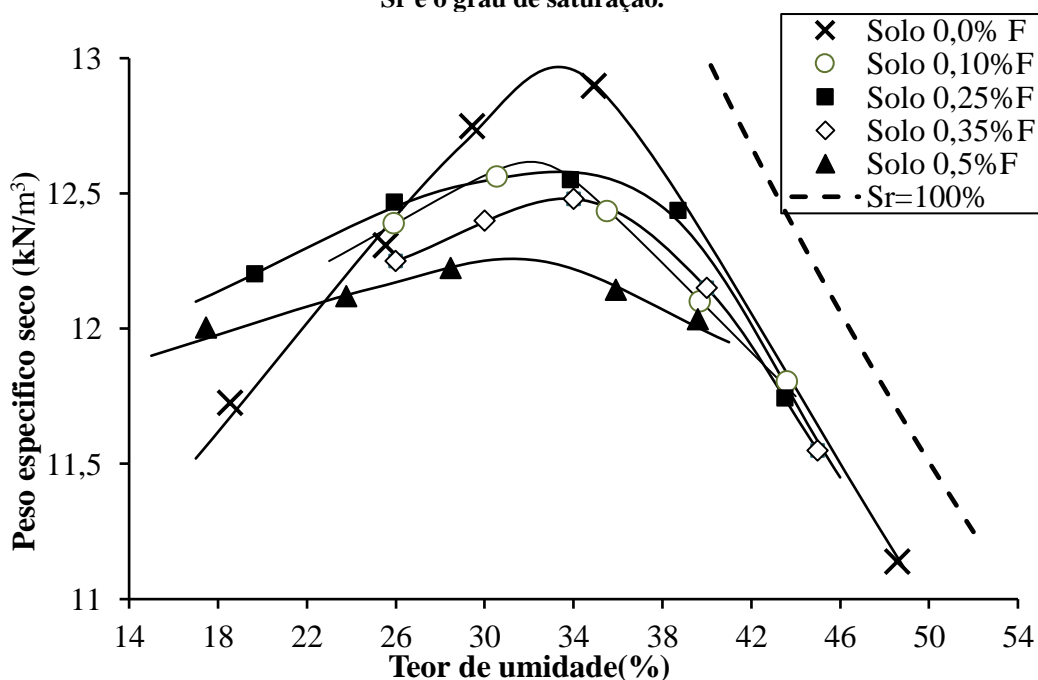
Onde P_{Rd} é a carga de ruptura no pico da curva tensão-deformação do corpo de prova. O ensaio de tração por compressão diametral, também chamado de ensaio de tração indireta ou ensaio brasileiro, foi desenvolvido de maneira independente no Brasil e no Japão em 1943. O ensaio é realizado por meio da aplicação de uma carga de compressão em um corpo de prova cilíndrico que se encontra entre duas peças retangulares, com dimensões em função do diâmetro do corpo de prova, localizadas de maneira diametralmente opostas.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 PROPRIEDADES DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E DAS MISTURAS SOLO-FIBRA

Os pontos de moldagem dos corpos de prova para ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral foram obtidos a partir dos pontos ótimos das curvas de compactação das misturas de fibra-solo e da compactação solo natural. Os ensaios de compactação realizados na energia normal de Proctor foram feitos com as porcentagens de 0,10%, 0,25%, 0,35% e 0,50% de fibra de polipropileno em referência à massa seca do solo. A partir desses teores, foram obtidas as curvas de compactação da Figura 16.

Figura 16. Curva de compactação do solo e misturas com 0,10%, 0,25%, 0,35%, e 0,50% de fibra. S_r é o grau de saturação.



É possível notar que o peso específico seco máximo (γ_{d-max}) e a umidade ótima (ω_o) são respectivamente, 12,95 KN/m³ e 33,5% para o solo sem adição de fibra de polipropileno. Quando adicionou-se um teor de fibra 0,10% relativo ao peso seco do solo, obteve-se ω_o igual 33% e γ_{d-max} igual a 12,55 KN/m³; quando adicionado 0,25% de fibra, o γ_{d-max} pouco se alterou, permanecendo com 12,57 KN/m³ e a ω_o de 35%. O γ_{d-max} para 0,35% de fibra reduziu para 12,48 KN/m³ e a ω_o diminuiu para 34%. Para 0,50% de fibra,

o γ_{d-max} diminuiu para 12,27 KN/m³ e a ω_o recuou para 31,5%. A Tabela 7 sintetiza tais valores.

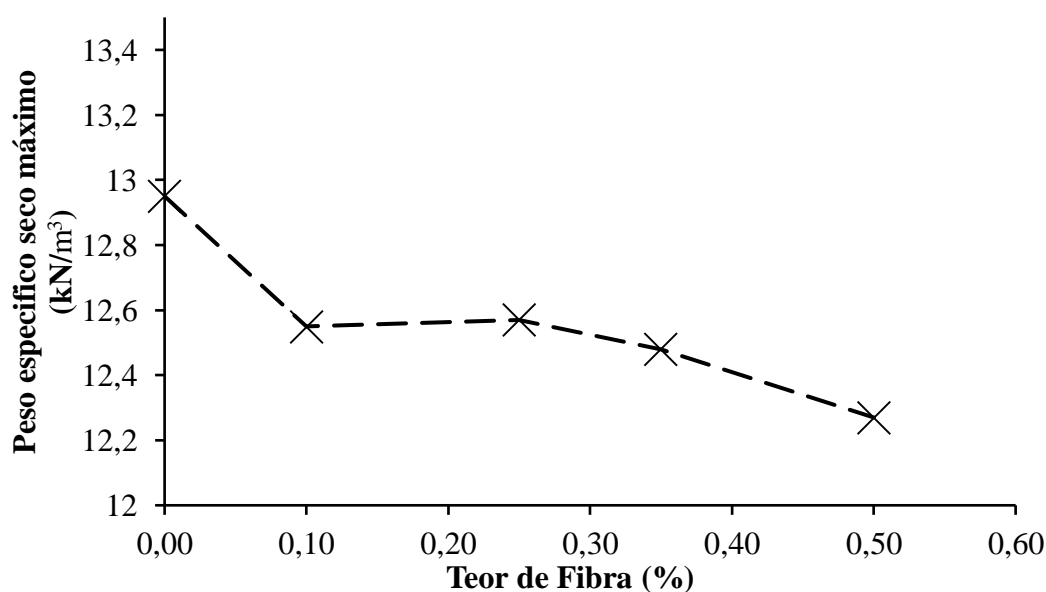
Tabela 7. Valores ótimos da curva de compactação

Teor de fibra (%)	Peso específico seco máximo	
	(KN/m ³)	Teor de umidade ótima (%)
0	12,95	33,5
0,10	12,55	33
0,25	12,57	35
0,35	12,48	34
0,50	12,27	31,5

Na Figura 17, foram plotados os valores ótimos das curvas de compactação normal de Proctor realizada, permitindo observar a diminuição do peso específico seco (γ_{d-max}) com o aumento do teor de fibra no solo. A influência do teor de fibra está apresentada na Tabela 8, onde pode-se concluir que houve uma pequena diminuição do peso específico do solo, aproximadamente 5% até a mistura 0,50%, com a adição de fibra.

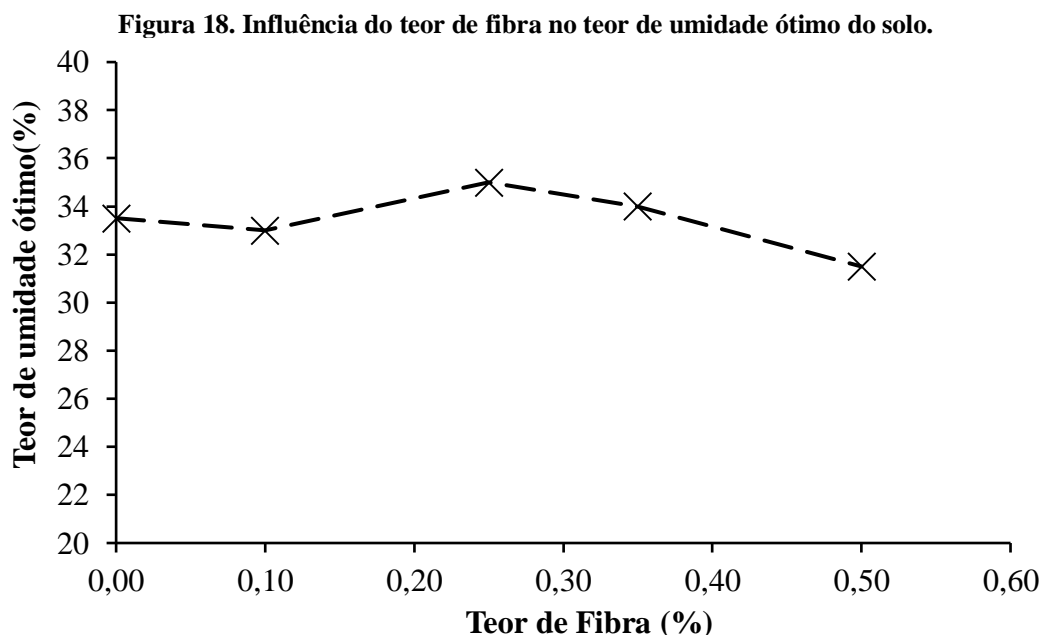
Neste contexto, menciona-se que tal fato foi observado também por Mirzababaei et al. (2013), que argumentaram que esse comportamento acontece porque a densidade específica da fibra (0,91 g/cm³) é menor que a densidade específica dos sólidos que compõem o solo (2,71 g/cm³), ao passo que a área superficial ocupada pelas fibras também é maior. Dessa forma, quando as fibras ocupam o lugar do material original, elas acabam por diminuir o peso específico do solo.

Figura 17. Influência do teor de fibra no peso específico seco máximo do solo.



Da mesma forma, observa-se na Figura 18 uma pequena variação do teor de umidade ótima (ω_o), sendo possível comparar a variação de umidade ótima com o solo

original na Tabela 8. O comportamento este também apontado Soltani et al. (2018) em misturas argila-fibras de polipropileno, que atribui esse comportamento a característica hidrófoba da fibras, ou seja, não absorvem quantidade considerável de água.



A partir da Tabela 8 é possível perceber como o peso específico apresenta leve queda enquanto a umidade ótima varia pouco em torno da úmida ótima do solo natural.

Tabela 8. Influência do teor de fibra no peso específico seco e na umidade ótima

Teor de fibra	Variação no Peso específico Seco	Variação na umidade ótima
0,00%	-	-
0,10%	-3%	-1%
0,25%	-3%	4%
0,35%	-4%	1%
0,50%	-5%	-6%

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de compressão simples de cinco corpos de prova com medição de tensão no sentido longitudinal sobre amostra de solo, e solo com teores anteriormente estabelecidos de fibra de polipropileno. Todos os gráficos foram plotados com auxílio do *Microsoft Excel 2019*.

A Figura 19 apresenta as curvas de tensão alcançada pela deformação específica dos corpos de prova do solo em seu estado puro. As curvas dos 4 corpos de prova foram

plotadas e analisadas. É possível analisar no gráfico, uma resistência crescente em função do deslocamento específico até alcançar a resistência a compressão simples máxima (q_u), onde ocorre a ruptura estrutural do solo. Também se constata que, apesar de serem encontrados valores pós-rompimento, estes valores não podem ser considerados como resistência residual, visto que, caso o ensaio continuasse, a queda de resistência iria para zero. Os valores de q_u podem ser analisados na Tabela 9, bem como os valores de resistência residual (q_{u-r}), médias, variâncias e desvios-padrão.

Figura 19. Curva tensão-deformação do solo natural

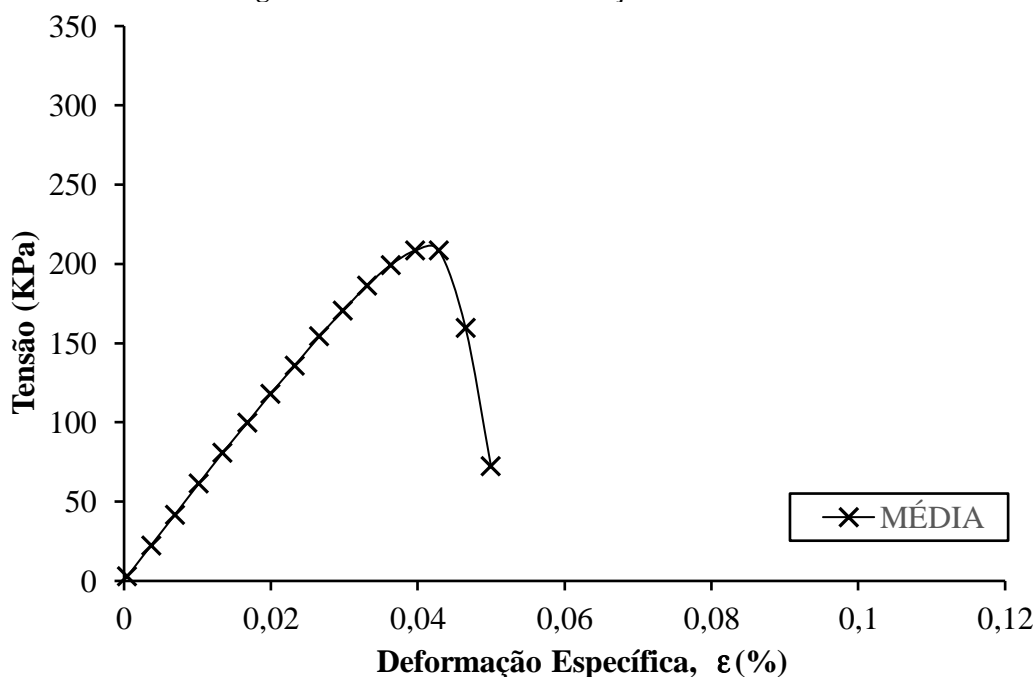


Tabela 9. Valores de resistência e dados estatísticos do solo natural.

Corpo de Prova	q_u (KPa)	q_{u-r} (KPa)
1	202,79	24,08
2	226,87	67,18
3	205,33	63,37
4	212,94	68,44
Média	211,98	55,77
Variância	117,10	450,90
Desvio padrão	10,83	21,23

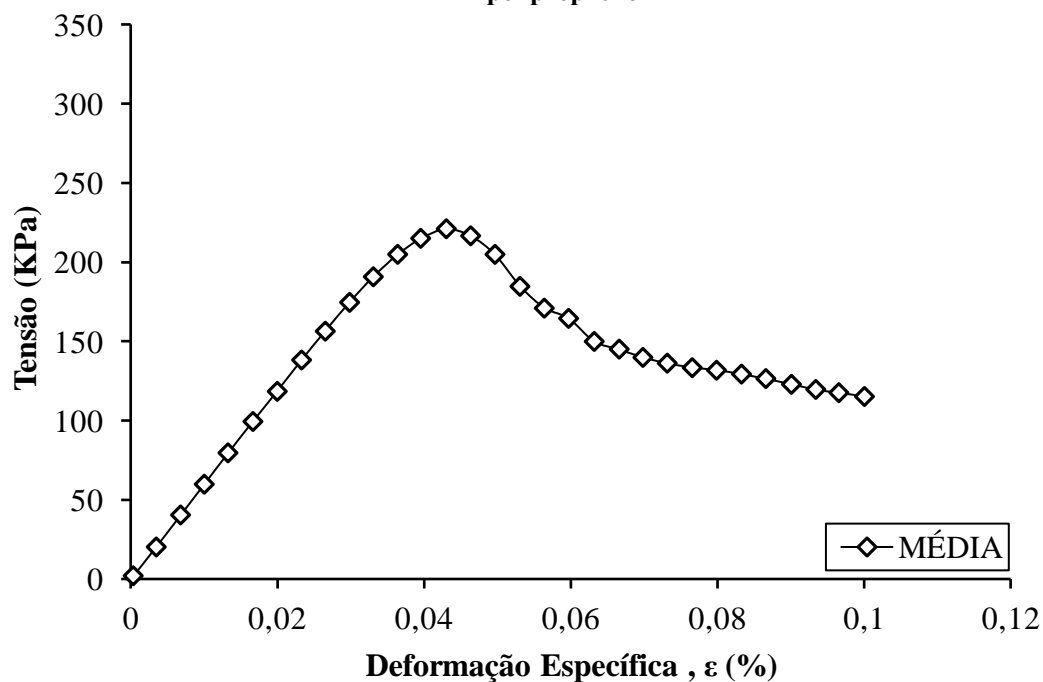
A Figura 20 exibe curvas de mistura solo-fibra com a adição de 0,10% de fibra em relação ao peso do solo seco, obtendo-se o gráfico abaixo. Assim como no comportamento do solo sem fibra, existe um crescimento linear da tensão absorvida, alcançando um ponto máximo de resistência à compressão (q_u). Após alcançar esse ponto,

o corpo de prova rompe, havendo queda de resistência até se estabilizar em uma resistência residual (q_{u-r}). Isso implica em um aumento de q_u de apenas 3% na resistência a compressão do solo natural. Os dados estatísticos encontrados nos ensaios estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Valores de resistência e dados de estatística em mistura-solo de 0,10%.

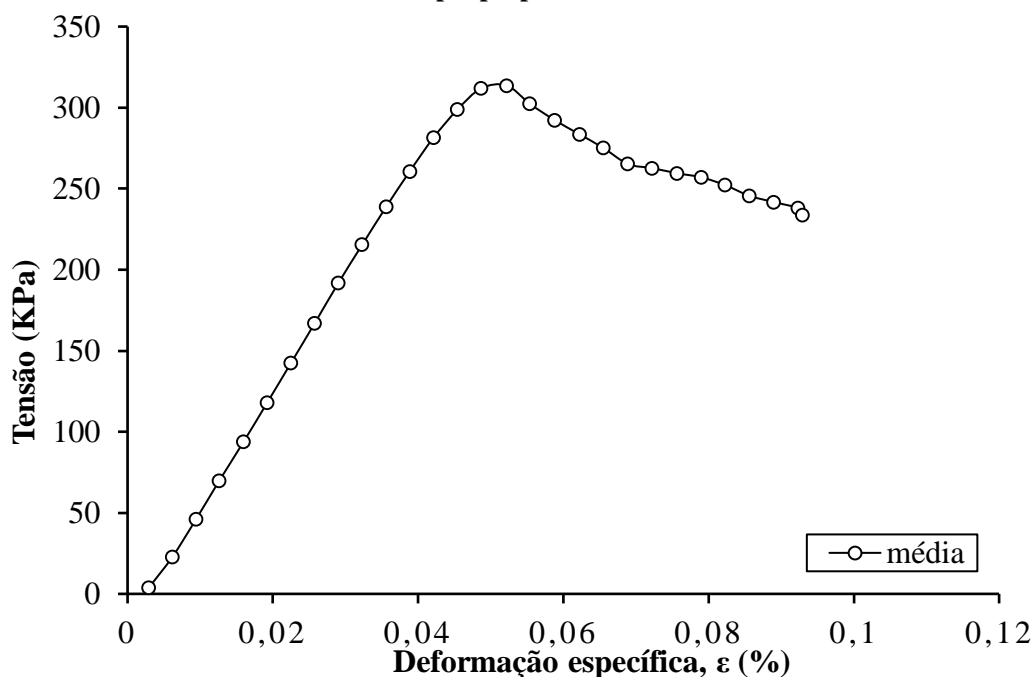
Corpo de Prova	q_u (KPa)	q_{u-r} (KPa)
1	186,32	87,46
2	204,06	140,69
3	245,9	117,88
4	237,01	187,59
Média	218,32	133,40
Variância	779,11	1780,42
Desvio padrão	27,91	42,20

Figura 20. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,10% de fibra de polipropileno



As curvas da Figura 21, referente ao ensaio de compressão simples para mistura solo-fibra com teor de 0,25%, apresentaram um aumento ainda maior na resistência à compressão simples e resistência residual quando comparado à mistura para 0,10% de fibra.

Figura 21. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,25% de fibra de polipropileno .



Logo, houve um acréscimo de q_u significativo, 50,37% da resistência q_u do solo. Os corpos de prova ainda apresentaram uma tensão máxima residual de 275,04 KPa e uma média de resistência residual igual a 229,73 KPa.

Também é possível observar que a queda de tensão, após resistência a compressão (q_u), é mais suave do que na mistura anterior. Uma possível afirmação para este comportamento é que para o teor de 0,25% melhora-se a interação solo-fibra assim como o intertravamento entre as fibras, criando uma malha que sustenta matriz do corpo de prova. Na Tabela 11 estão os valores obtidos dos ensaios de compressão simples para os quatro corpos de prova.

Tabela 11. Valores de resistência e dados de estatística em mistura-solo de 0,25%.

Corpo de Prova	q_u (KPa)	q_{u-r} (KPa)
1	327	275,04
2	306	235,75
3	318,14	219,27
4	323,21	188,85
Média	318,59	229,73
Variância	83,59	1289,88
Desvio padrão	9,14	35,91

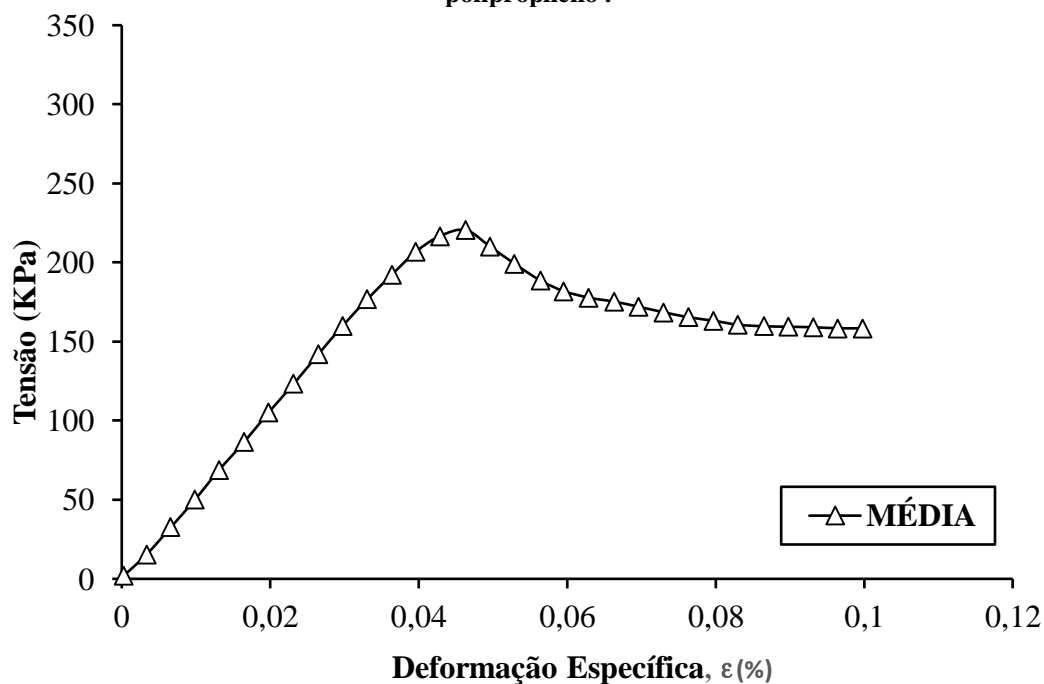
Quando observado o gráfico para a mistura de 0,35% de fibra no solo (Figura 22), nota-se uma resistência q_u seguida de queda. Cabe também observar que a diferença entre estas tensões q_u e tensão residual (q_{u-r}) é menor que a observada entre todas as misturas de 0,25%, como é encontrado na Tabela 12 ou notado na Figura 22.

Tabela 12. Valores de resistência e dados de estatística em mistura-solo de 0,35%

Corpo de Prova	q_u (KPa)	q_{u-r} (KPa)
1	211,67	135,62
2	235,75	190,12
3	211,67	155,90
4	187,59	150,83
Média	211,67	158,12
Variância	386,56	529,48
Desvio padrão	19,66	23,01

Logo, houve uma diminuição da resistência à compressão simples quando comparado com os teores de fibra anteriores, assim, a mistura solo-fibra perde o efeito obtido pela adição de fibra.

Figura 22. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,35% de fibra de polipropileno .



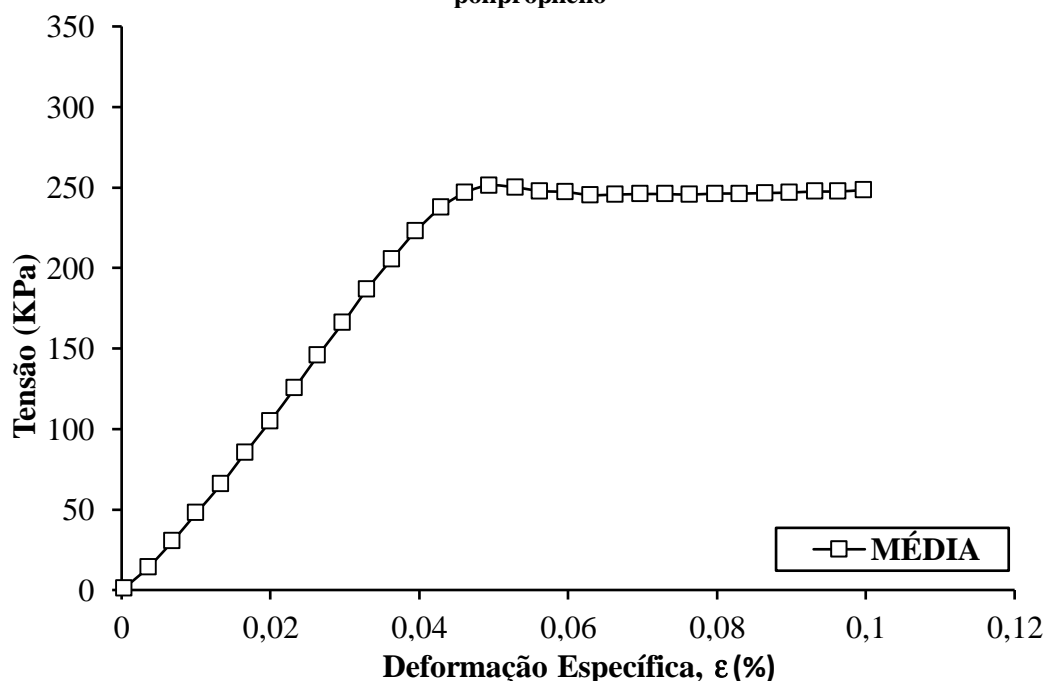
Na Figura 23 nota-se que q_u voltou a subir para o teor de 0,50% de fibra, obtendo-se valores iguais. Desse modo, o teor de 0,50% de fibra aumentou a resistência máxima em 21,10 %.

Tabela 13. Valores de resistência e dados de estatística em mistura-solo de 0,50%.

Corpo de Prova	q_u (KPa)	q_{u-r} (KPa)
1	226,87	226,88
2	261,1	261,10
3	269,98	239,55
4	268,67	268,71
Média	256,66	249,06
Variância	409,61	371,10
Desvio padrão	20,24	19,26

A Figura 23 também permite observar que para o teor de 0,50%, a tensão pós pico teve a menor queda entre as misturas, ao passo que para alguns corpos de prova, não houve diminuição de tensão. Quanto à resistência residual, a média foi igual a 249,06 KPa, ou seja, uma queda pós pico de apenas 3%.

Era esperado que a q_u continua-se decrescendo conforme mostrado em misturas de 0,35% de fibra. Contudo, o comportamento foi o inverso e a resistência à compressão simples aumentou para 0,50% de teor de fibra. Buscando-se na literatura, Skuklar (2017) cita Zaimoglu e Yetimoglu (2012) que apresentaram ensaios que levaram ao mesmo comportamento.

Figura 23. Curva tensão-deformação da mistura de solo com teor de 0,50% de fibra de polipropileno

A Figura 24 mostra a imagem de um corpo de prova de mistura fibra-solo com teor de fibra igual a 0,50% recém moldado e pronto para ser armazenado, aguardando ensaio de compressão simples.

É possível notar que logo após a moldagem, o corpo de prova apresentou fissuras por grande parte de sua superfície. Possivelmente, isso ocorreu pela grande quantidade de fibra presente na mistura que exerceu uma força elástica transversal a direção do filamento, comportando-se como uma mola.

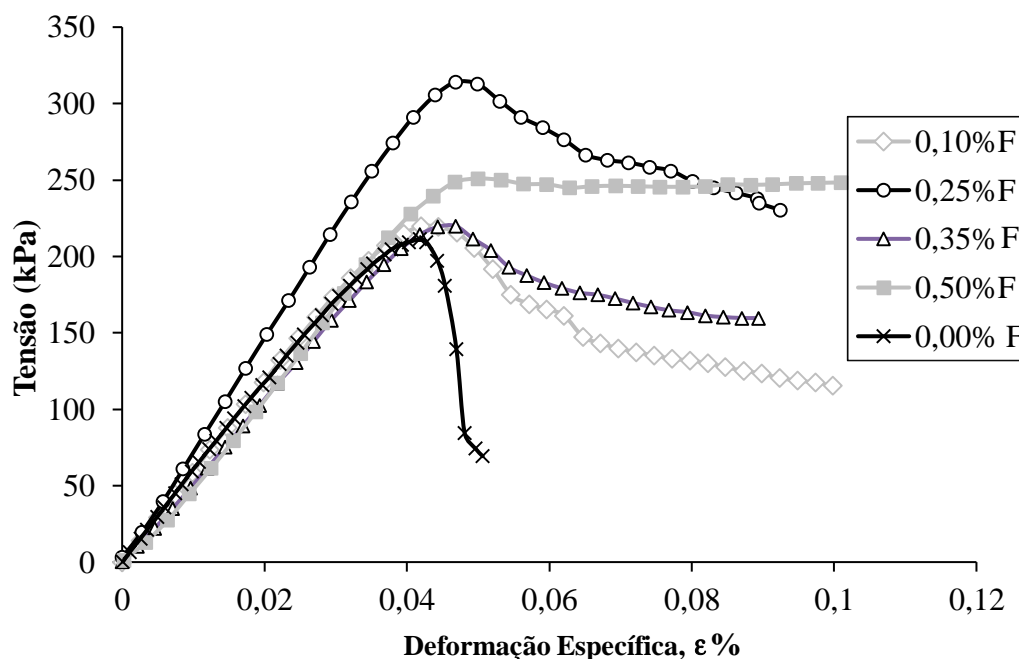
Figura 24. Fissuras formadas após moldagem em um corpo de prova com 0,50% de fibra.



A Figura 25 apresenta gráfico com médias para solo sem fibra e todas as misturas utilizadas, permitindo comparar e avaliar a influência dos diferentes teores de fibra nas misturas de solo. Dentre essas observações, pode-se perceber que o teor ótimo de fibra é de 0,25% com uma tensão de pico média igual a 318,77 KPa. Contudo, a mistura que apresenta melhor tensão residual é a com 0,50% do peso de amostra com fibra de polipropileno, com 249,06 KPa de média.

Neste gráfico também é possível perceber que a mistura com 0,35% de fibra mostrou um ganho de resistência fora do padrão esperado. Esta mistura está com uma resistência a compressão simples similar a mistura de 0,10%, mostrando apenas um ganho melhor na resistência residual.

Figura 25. Comparação das curvas médias das misturas solo-fibra ensaiadas.



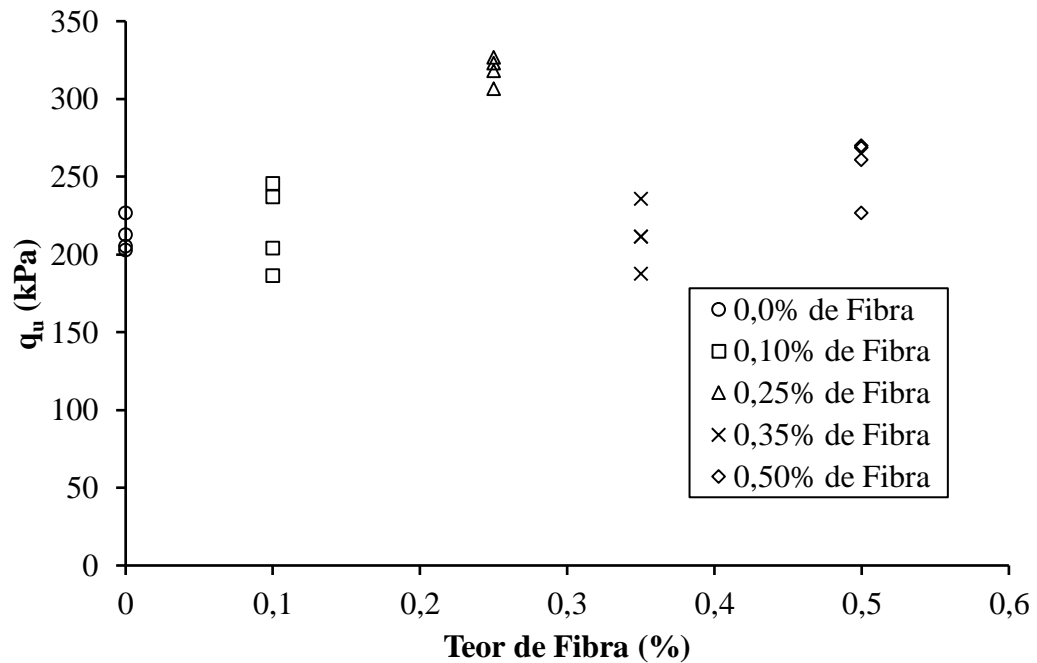
Desta forma, a Figura 26 é capaz de demonstrar a falta de uniformidade do comportamento das misturas realizadas. Consoante demonstra a Figura 26, a adição de fibra tende a aumentar a resistência à compressão (q_u) até o teor de 0,25% de fibra, quando comparado com a do solo original. A partir desse teor, resistência à compressão simples (q_u) tende a abaixar com o aumento de fibra. Os acréscimos de resistência podem ser melhor observados na Tabela 14. Visto que como não há resistência residual para o solo natural, o valor quantitativo de acréscimo de q_{u-r} é em relação ao teor de 0,10%.

Tabela 14 - Valores médios de q_u e q_{u-r} , e aumento de resistência em comparação ao solo natural

Teor de Fibra (%)	Média q_u	Média (c)	Acréscimo em q_u do solo (%)	Acréscimo em q_{u-r} (%)
0,0	211,98	-	-	-
0,10	218,32	133,40	2,99	-
0,25	318,59	229,73	50,29	72,21
0,35	211,67	158,12	-0,15	18,53
0,50	256,66	249,06	21,07	86,70

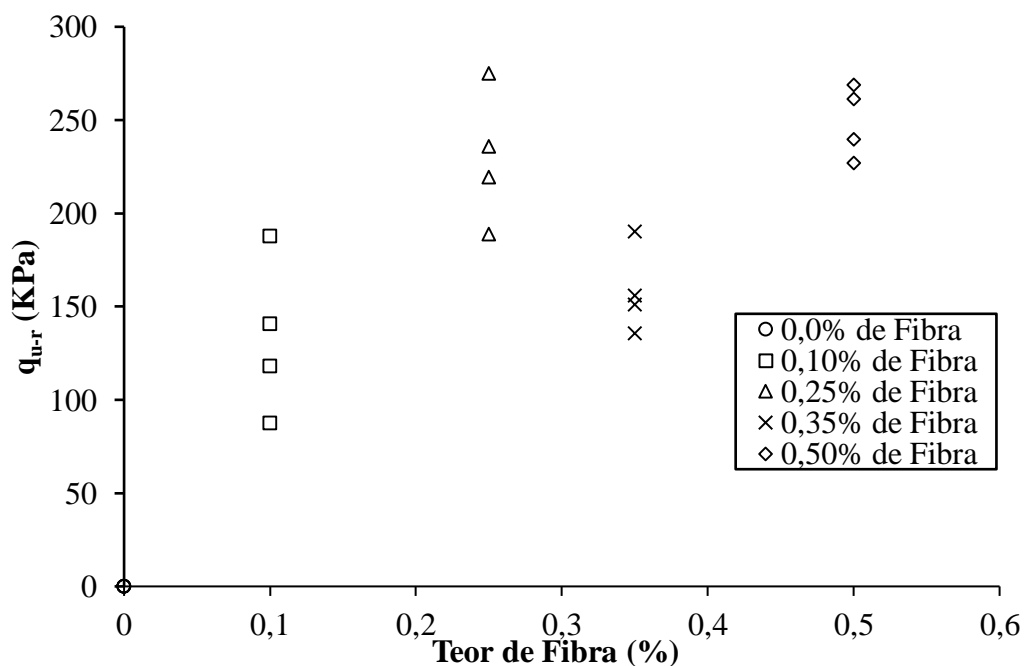
Tang et al. (2007) ao estudar os efeitos das fibras no comportamento mecânico do solo argiloso, observou uma melhora ligeiramente crescente da resistência à compressão simples do solo, mas não significativa. As resistências q_u variaram de valores próximos a 200 KPa a 300 KPa, condizendo com os resultados verificados na Figura 26.

Figura 26. Relação teor de fibra e resistência à compressão simples q_u



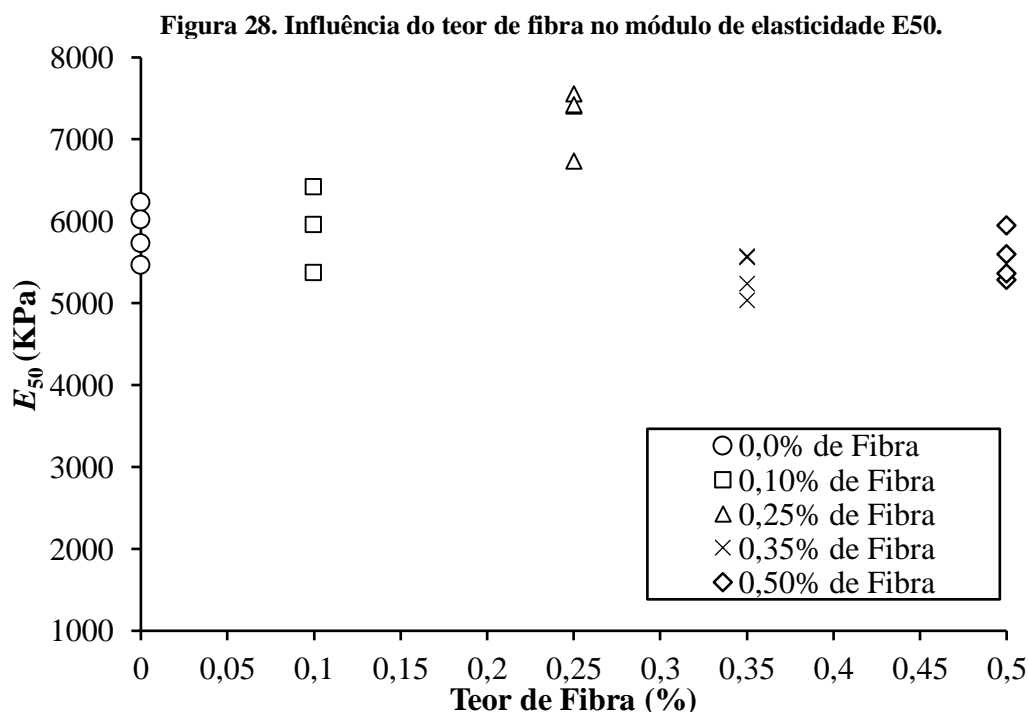
Assim como a Figura 26, a Figura 27 também exprime uma melhora na resistência residual do solo (q_r) após adição de fibras de polipropileno. No gráfico da Figura 27, é possível notar que a adição fibra permite ao solo o surgimento de uma resistência residual não observada para o solo sem fibra. Desse mesmo modo, também apresenta como a adição de fibra tem impacto maior nos ganhos de resistência residual do que na própria resistência a tração.

Figura 27. Relação do ganho de resistência residual q_{u-r} e teor de fibra.



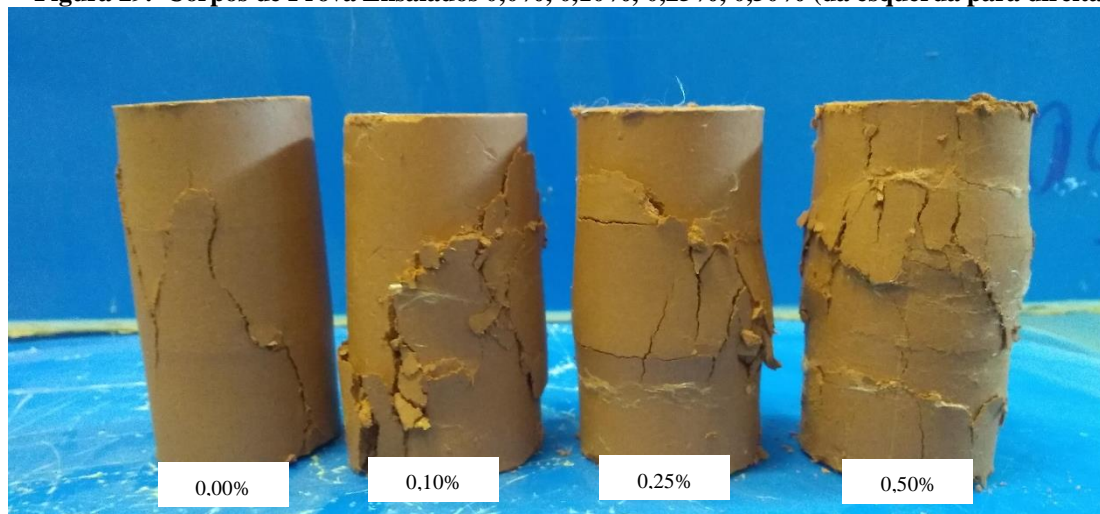
4.2.1 Influência da adição de fibra no módulo secante E_{50} em ensaio de compressão simples

A partir dos ensaios de compressão realizados, observa-se um aumento na elasticidade do material, ou seja, o solo apresentou uma melhora no comportamento dúctil quando misturados com fibra de polipropileno. A Figura 28 é referente ao gráfico do módulo de rigidez secante para quando a tensão está em 50% de q_u . Esse comportamento já estudado por Tang et al. (2007). Seus resultados permitiram concluir que o solo reforçado se transforma de um solo frágil para um solo mais dúctil.



A Figura 29 apresenta os corpos de prova do solo isento de fibra (mais à esquerda) e os corpos de prova para as misturas solo-fibra com teores de 0,10%, 0,25% e 0,50%. É possível observar que com o aumento de fibra existe um abaulamento do corpo de prova maior quando submetido a compressão.

Figura 29. Corpos de Prova Ensaaiados 0,0%, 0,10%, 0,25%, 0,50% (da esquerda para direita).



A Figura 30 apresenta o corpo de prova com o teor de 0,35%, que foi moldado após a realização dos ensaios com os teores da figura anterior.

Figura 30. Corpo de prova com 0,35% de fibra após ensaio de compressão simples



4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

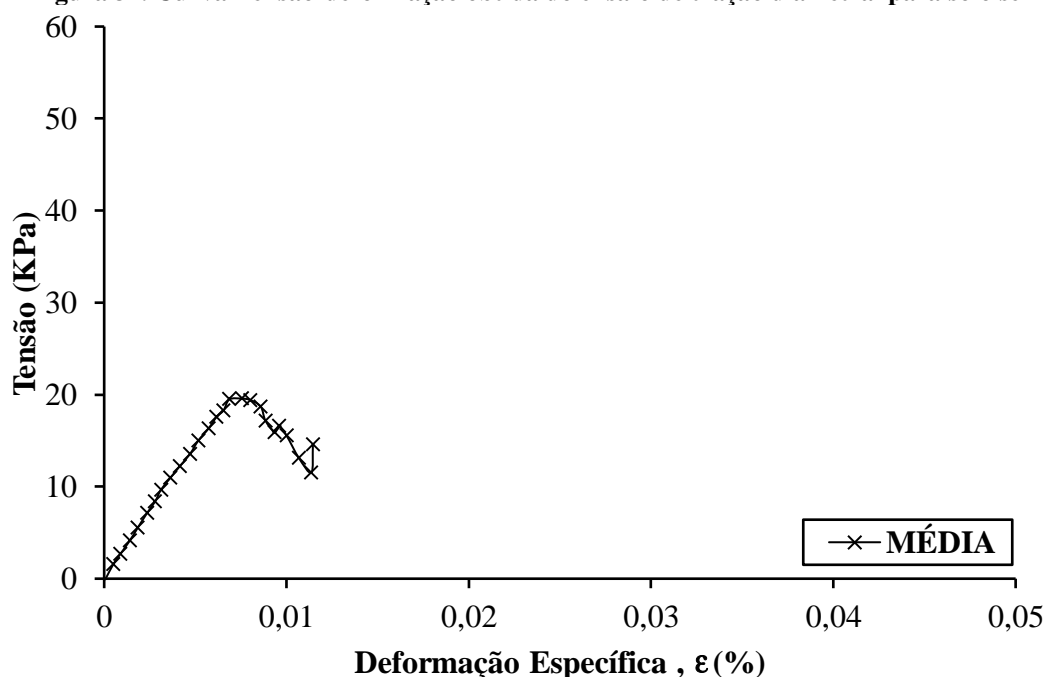
Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de tração diametral por compressão simples dos quatro corpos prova com medição de tensão no sentido transversal, e solo com teores anteriormente estabelecidos de fibra de polipropileno.

A Figura 31 apresenta as trajetórias de tensão em relação a deformação específica do corpo de prova com solo sem fibra. Os corpos de prova foram analisados e apresentaram uma resistência a tração (q_t) seguida de drástica queda de tensão, demonstrando que não existe tensão residual. As resistências a tração encontradas foram de: 22,18 KPa para o CP-1; 19,96 KPa para o CP-2; 21,23 KPa para o CP-3; e 22,50 KPa para CP-4. A média da resistência a tração (q_t) foi de 21,46 KPa. Os valores estatísticos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 -Dados estatísticos para mistura de solo natural

Corpo de Prova	q_t (KPa)	q_{t-r} (KPa)
1	22,18	14,58
2	19,96	10,77
3	21,23	12,36
4	22,50	8,87
Média	21,47	11,65
Variância	1,30	5,85
Desvio padrão	1,14	2,42

Figura 31. Curva Tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para solo sem fibra

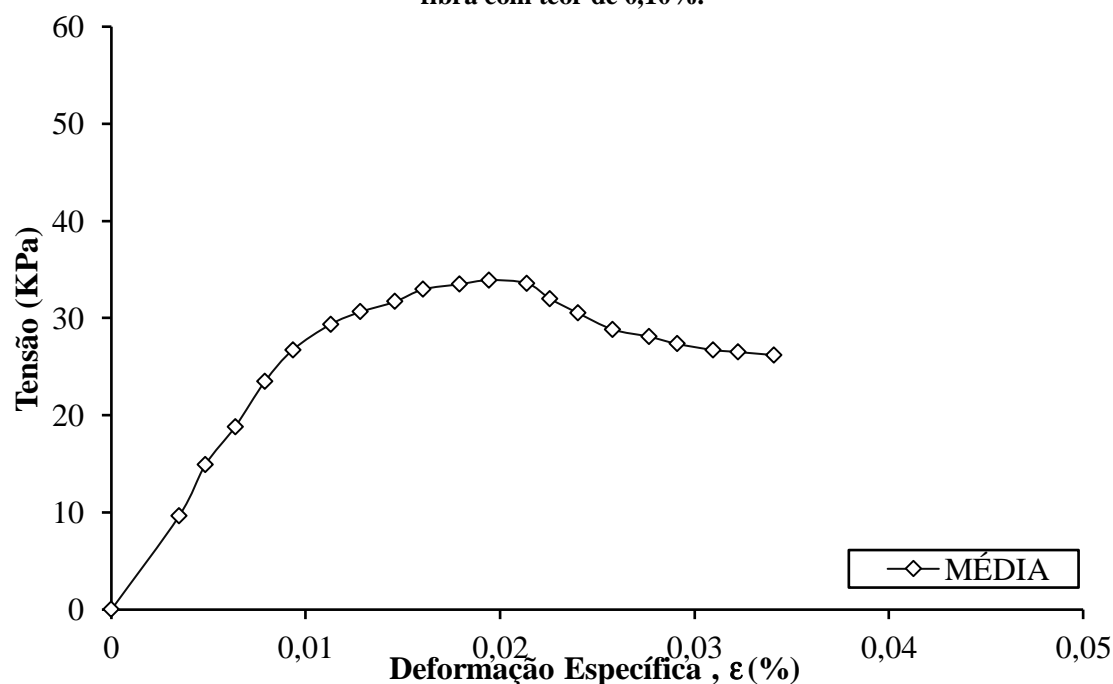


A Figura 32 apresenta os dados para a mistura fibra-solo com teor de 0,10% de fibra de polipropileno, sendo possível observar que a tensão q_t está muito próximo da tensão residual, apesar de uma ligeira queda deste último. As tensões q_t foram de: 32,00 KPa para o CP-5; 22,81 KPa para o CP-7; e 25,66 KPa para o CP-8. A resistência q_t média foi de 26,83 KPa, o que equivale a um aumento de 25 % na resistência à tração do solo. A resistência residual média foi de 25,25 KPa. A Tabela 16 apresenta tais resultados.

Tabela 16. Dados estatísticos para mistura de solo com 0,10% de fibra

Corpo de Prova	q_t (KPa)	q_{t-r} (KPa)
1	32,00	29,79
2	-	-
3	22,82	21,86
4	25,67	24,08
Média	26,83	25,24
Variância	22,12	16,70
Desvio padrão	4,70	4,09

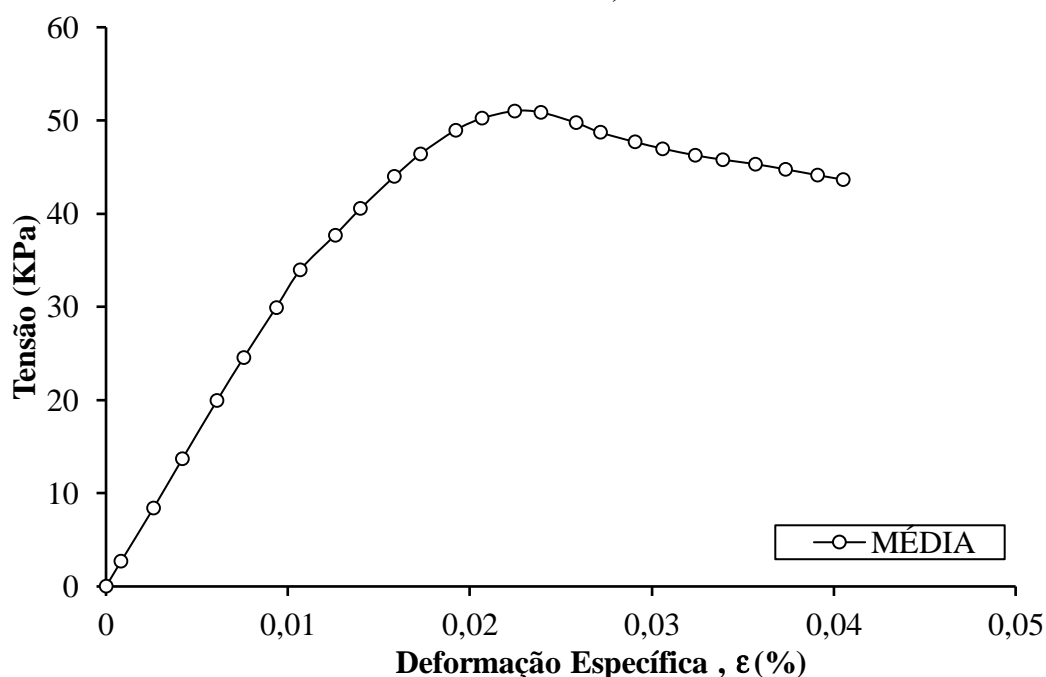
Figura 32. Curva Tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura de solo-fibra com teor de 0,10%.



A seguir, os dados para o teor de 0,25% evidenciaram que este teor seria o teor ótimo, tendo a maior resistência de pico com valores iguais a: 56,09 KPa para o CP-1; 54,19 KPa para o CP-2; 48,17 KPa para o CP-3; e 45,94 KPa para CP-4. Foi obtido uma resistência média a tração de 51,10 KPa, havendo assim um aumento de 138% da resistência do solo sem fibra. A média das resistências residuais foram de 43,41 KPa.

Tabela 17. Dados estatísticos para mistura de solo com 0,25% de fibra

Corpo de Prova	q_t (KPa)	q_{t-r} (KPa)
1	56,09	50,70
2	54,19	45,31
3	48,17	39,29
4	45,95	38,34
Média	51,10	43,41
Variância	23,19	33,14
Desvio padrão	4,82	5,76

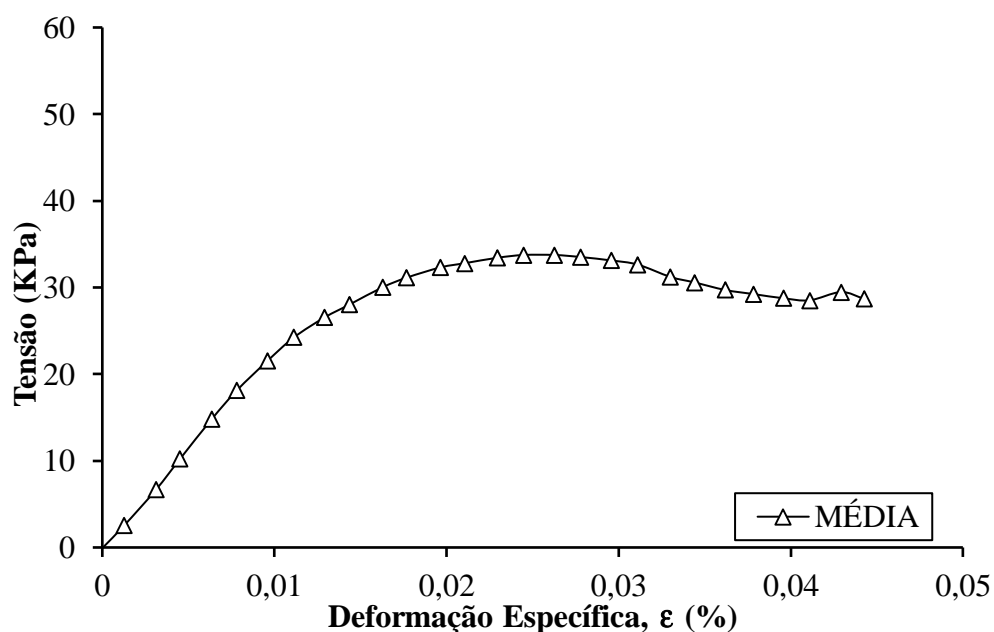
Figura 33. Curva tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura solo-fibra com teor de 0,25%.

Os dados obtidos para o teor de 0,35% (Figura 34) evidenciaram que este teor seria o teor ótimo, tendo a maior resistência de pico com valores iguais a: 31,69 KPa para o CP-5; 39,29 KPa para o CP-6; 35,17 KPa para o CP-7; e 30,42 KPa para o CP-8. Foi encontrado, dessa forma, uma média de resistência a tração de 34,14 KPa, logo, um aumento de 59% na resistência do solo. Isso mostra que assim como para o comportamento em compressão simples, o aumento de fibra levou a uma diminuição na melhora da resistência q_t . A Tabela 18 apresenta os valores residuais e dados estatísticos.

Tabela 18. Dados estatísticos para mistura de solo com 0,35% de fibra

Corpo de Prova	q_t (KPa)	q_{t-r} (KPa)
1	31,69	27,89
2	39,29	29,47
3	35,17	30,74
4	30,42	24,40
Média	34,14	28,12
Variância	15,82	7,52
Desvio padrão	3,98	2,74

Figura 34. Curva tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura solo-fibra com teor de 0,35%.

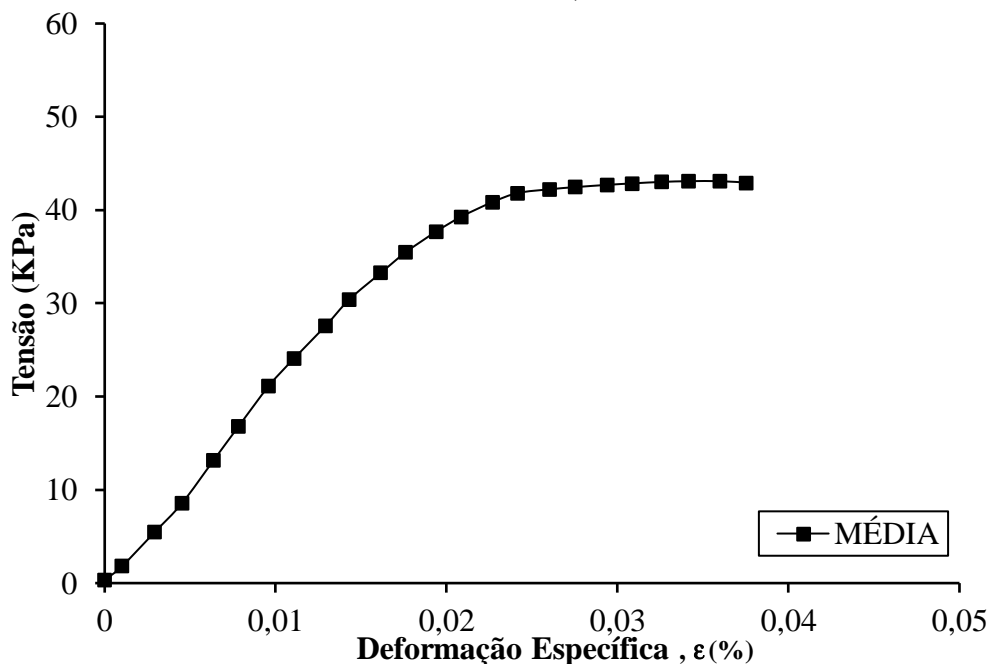


Os dados obtidos para o teor de 0,50% (Figura 35) apresentaram comportamento diferente dos demais teores. Com valores iguais a: 37,08 KPa para o CP-5; 43,41 KPa para o CP-6; 52,60 KPa para o CP-7; e 48,89 KPa para o CP-8. A média de q_t foi de 45,47, portanto uma melhora de 119% no solo sem fibra. A média das resistências residuais foram de 28,12 KPa.

Tabela 19. Dados estatísticos para mistura de solo com 0,50% de fibra

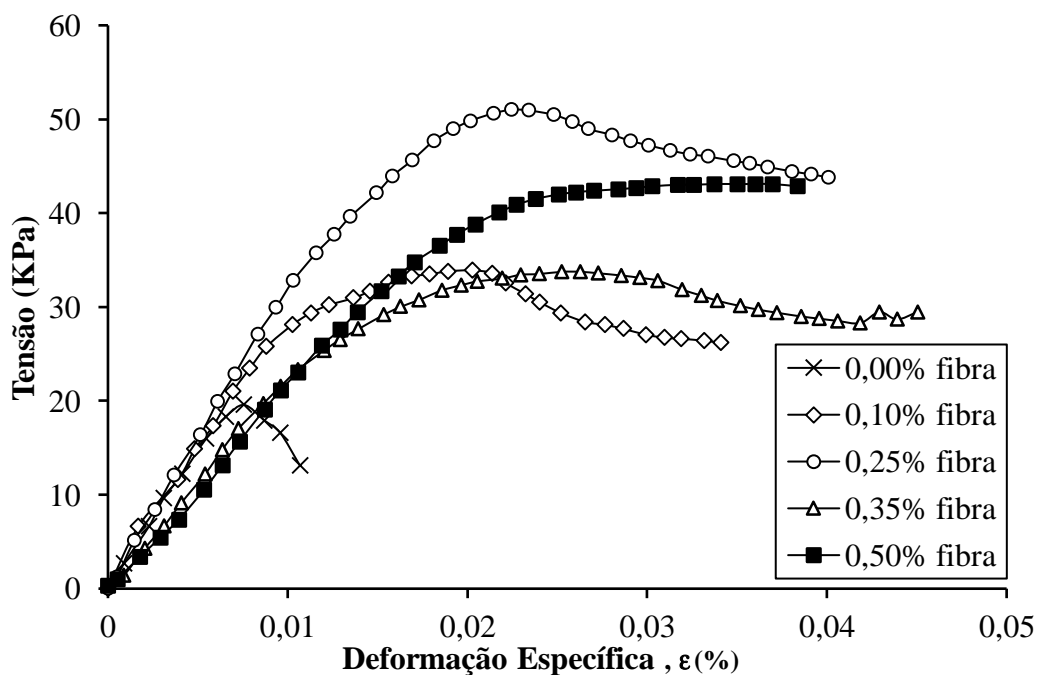
Corpo de Prova	q_t (KPa)	q_{t-r} (KPa)
1	37,08	33,91
2	43,41	29,47
3	52,60	30,74
4	48,80	24,40
Média	45,47	29,63
Variância	45,55	15,63
Desvio padrão	6,75	3,95

Figura 35. Curva tensão-deformação obtida do ensaio de tração diametral para mistura solo-fibra com teor de 0,50%.



O gráfico da Figura 36 permite comparar as médias de todos dos teores ensaiado. Ele permite observar assim como para o comportamento sob compressão simples, o teor ótimo para o ensaio de tração diametral foi de 0,25%, havendo expressiva queda para 0,35% e retorno na elevação de tensão de pico para 0,50%. Há importante comportamento na curva para teor de 0,50% pois esta tem a tensão de pico igual a tensão residual, evidenciando o comportamento dúctil do corpo de obra bem como a melhor na plasticidade do material.

Figura 36. Comparação das curvas médias das misturas solo-fibra ensaiadas.



A Figura 37 apresenta o comportamento da tensão de pico dos corpos de prova para o ensaio de tração diametral por compressão simples. É possível notar que uma curva linear crescente de 0,0% a 0,25% de fibra que passa a cair deste ponto até 0,50% de fibra., Pradhan et al. (2012) mostrou resultados semelhantes, com uma linearidade de q_t .

Tabela 20. Valores médios de q_t e q_{t-r} , e aumento de resistência em comparação ao solo natural.

Teor de Fibra	Média q_t	Média (q_{t-r})	Acréscimo do q_t do solo	
			(%)	Acréscimo em q_{t-r} (%)
0	21,47	11,65	-	-
0,1	26,83	25,24	24,97	-
0,25	51,10	43,41	138,01	71,97
0,35	34,14	28,12	59,04	11,40
0,5	45,47	29,63	111,81	17,36

A Figura 32 que exibe a trajetória de tensões residuais do corpo de prova apresenta o mesmo comportamento da tensão de pico, logo o aumento de fibra no solo aumenta essa tensão residual.

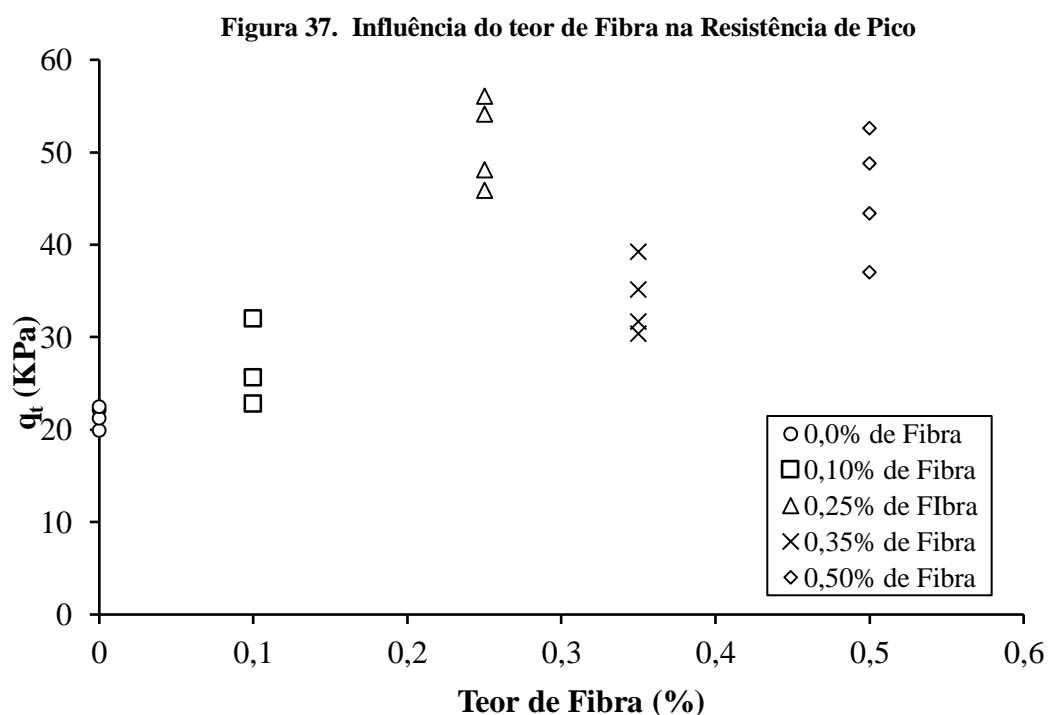
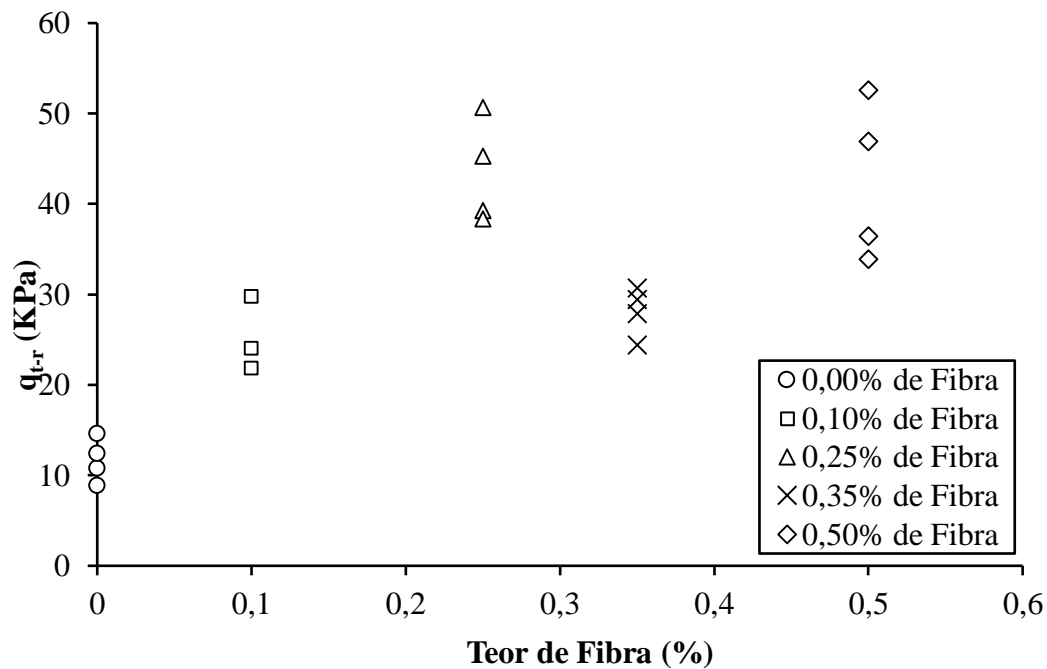


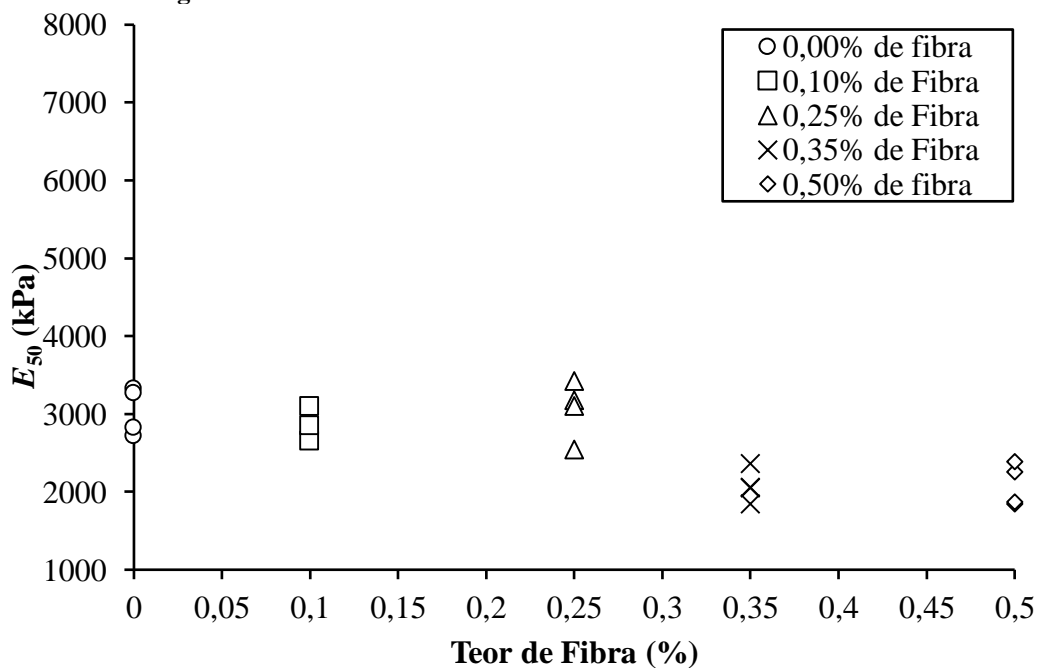
Figura 38. Influência do teor de Fibra na Resistência à tração residual



4.3.1 Influência da adição de fibra no módulo secante E_{50} em ensaio de tração por compressão diametral

O comportamento de E_{50} , presente na Figura 39, apresenta uma queda que significa o aumento do módulo de elasticidade do solo quando comparados com o solo sem fibra, ou seja, a adição de fibra torna o solo mais dúctil, assim como observado por Tang et al. (2007).

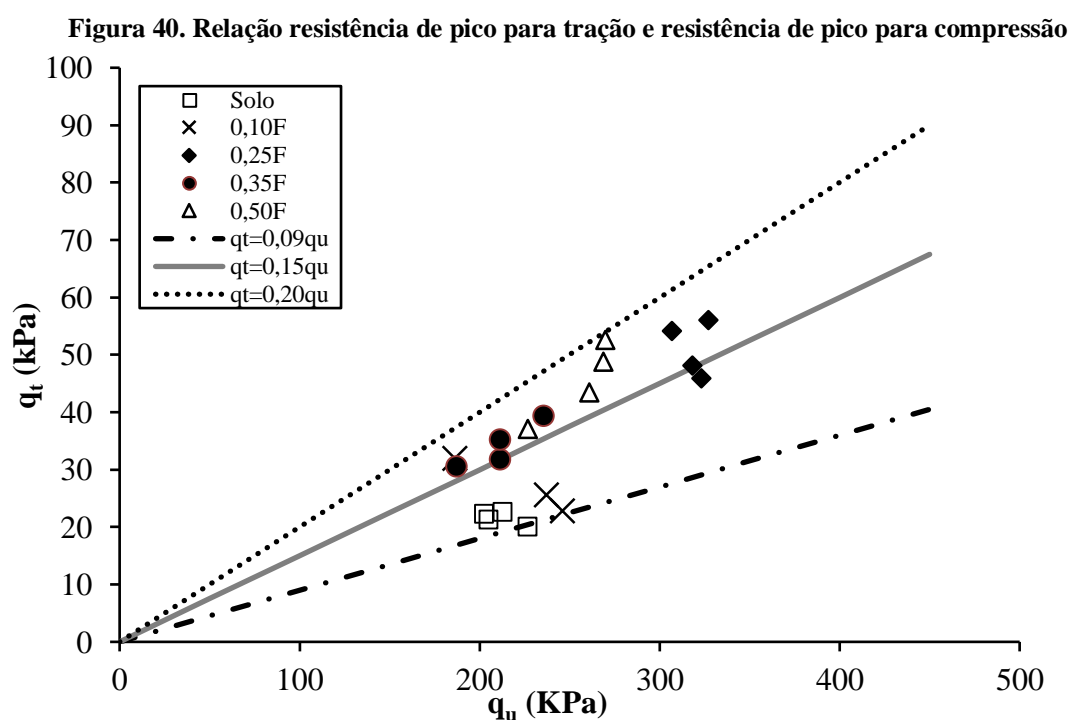
Figura 39. Influência do teor de Fibra no módulo de elasticidade.



4.4 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA MÁXIMA DE COMPRESSÃO E RESISTÊNCIA MÁXIMA DE TRAÇÃO

Uma das formas de encontrar a relação entre a tração por compressão diametral e a compressão simples é de forma direta colocando os valores correspondentes em um plano cartesiano para q_u e q_t . Dessa forma, na Figura 40 observa-se uma relação global entre tração e compressão para todos os teores de polipropileno.

A relação global de q_u e q_t é de 0,15. A relação compressão/tração fornece um parâmetro de grande utilidade pois permite estimar os valores destes partindo-se de um valor real único entre eles. Assim, também pode ser estabelecido a resistência mecânica empírica de compressão e tração de maneira mais rápida em campo.



Como apresentado pelo gráfico (Figura 40) é possível observar que a razão entre tração e compressão do solo sem fibra é de 0,10. Conforme é adicionado fibra no solo, essa relação se aproxima de 0,15, onde está o teor ótimo de fibra para a mistura. Para teor de 0,50% de fibra, essa relação se aproxima de 0,20.

Autores como Festugato et al. (2018) fizeram estudos para criar um modelo teórico que previsse a resistência de tração e compressão em misturas de solo-fibra cimentados. Eles observaram que o modelo produziu uma taxa constante de resistência à

tração e à compressão (q_t/q_u), estando esta relação entre 0,156 e 0,136, que é bastante próximo do que foi observado experimentalmente, sendo esta relação dependente do ângulo de atrito do solo-fibra, do coeficiente de Poisson do solo-fibra e módulo elástico da fibra e da mistura solo-fibra. Assim, essa relação está de acordo com o que foi encontrado no presente trabalho.

5 POSSÍVEIS APLICAÇÕES DO SOLO-FIBRA

Tendo em vista os ganhos mecânicos fornecidos pela adição de microfibras de polipropileno no solo, este item visa abordar os possíveis campos de aplicação do solo reforçado, retomando algumas das vantagens de seu uso.

Abaixo seguem algumas das vantagens listadas por Shukla (2017):

- a) A preparação da mistura aleatória de solo-fibra é igual as técnicas de estabilização mais tradicionais, logo os procedimentos para essa mistura devem ser similares.
- b) Como mostrado nos dados acima, a adição de reforço de fibra em solo aumenta a rigidez e resistência do solo, bem como há um aumento de ductilidade do material, com menores quedas de tensão pós-pico.
- c) Antes da falha da estrutura do solo aparecer, graças aos ganhos na elasticidade, é possível notar as deformações do solo e assim, atuar com mais rapidez para resolver o problema.

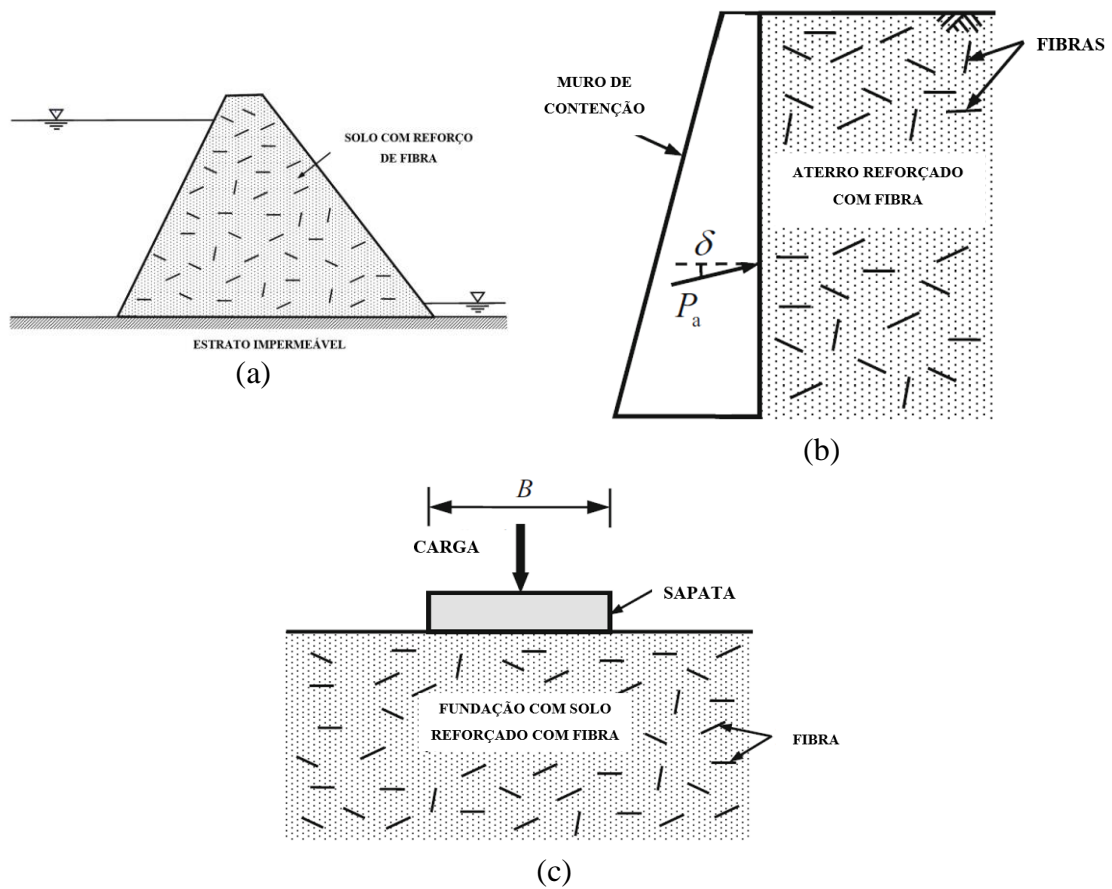
Sendo assim, Shukla (2017) divide a finalidade do material em três aplicações chave:

- a) Aplicações geotécnicas: aterros atrás das estruturas de retenção; estabilização de solos sob os fundamentos e balsas; estabilização de encostas com falha do solo; construção aterros usando solos marginais e sobre solos fracos, como solo macio orgânico depósitos; materiais de preenchimento leve; misturas em areias finas e sedimentos para aumentar a resistência à liquefação; e fortalecimento das estacas e trincheiras granulares.
- b) Aplicações hidráulicas e geoambientais: misturas no solo para controlar a condutividade hidráulica; melhorando a resistência do solo contra a água e o vento erosão; estabilização de facetas finas de solo, revestimentos de aterros sanitário e coberturas finais; misturas para mitigar a formação de trincas por contração / dessecação em argilas; controlar a infiltração e impedir a erosão da tubulação em barragens e outras estruturas de retenção de água (diques de rios, diques de contorno, obras de desvio de canais, verificar barragens, etc.); sistemas de coleta de lixiviados; e desidratação de tubos geotêxteis.

c) Aplicações de transporte: sub-bases e bases de pavimentos, especialmente para estradas de baixo volume; camadas de drenagem para estradas, pistas, playgrounds, etc.; isolador térmico para limitar a penetração de gelo; amortecimento de vibrações camadas sob trilhos.

Alguns exemplos de sua utilização podem ser observados na Figura 41.

Figura 41. Possíveis aplicações de fibras de polipropileno em obras de engenharia civil. (a) Em barragens. (b) Reforço de Aterros e (c) Reforço de fundações



6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A partir do programa experimental, da apresentação, da análise e da discussão dos resultados apresentados foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- i. A adição de fibra de polipropileno no solo diminuiu peso específico seco máximo (γ_{d-max}), por outro lado, essa adição de fibra não interfere na umidade ótima (ω_o), que variou ligeiramente.
Conforme já discutido por outros autores, o peso específico seco máximo diminui devido à densidade específica da fibra de polipropileno ($0,91 \text{ g/cm}^3$) ser menor que a do solo ($2,71 \text{ g/cm}^3$). Dessa forma, quando as fibras ocupam o lugar do material original, elas acabam por diminuir o peso específico do solo. Enquanto a umidade ótima não modificou devido a fibra ser hidrófoba e, portanto, não absorver água
- ii. Foi observado que os valores de resistência à compressão (q_u), resistência à tração por compressão diametral (q_t), e o módulo de elasticidade para tensão em 50% da tensão máxima (E_{50}) aumentaram com a adição de fibras até teores de 0,25%. Após este teor, os valores desses parâmetros caíram quando adicionado 0,35% e 0,50% de fibra. Uma das suposições para este comportamento é que uma grande quantidade de fibra na mistura diminui a resistência q_u porque a superfície que se atritava e se ligava com a fibra não é suficiente para gerar o chamado efeito “ponte”. Após 0,35%, as fibras de polipropileno passaram a fazer o papel do solo e se prenderam umas às outras gerando intertravamentos e atrito entre as fibras. O aumento de q_u para o teor ótimo de fibra ótimo foi de 50% em comparação com o solo sem fibra, ao passo que houve um aumento de 138% de q_t .
- iii. A relação tração/compressão média encontrada foi de 0,15 influenciada principalmente pela interação fibra-solo como relatado na literatura. É possível observar que a razão entre tração e compressão do solo sem fibra é

de 0,10. Conforme é adicionado fibra no solo, essa relação se aproxima de 0,15, onde está o teor ótimo de fibra para a mistura. Para teor de 0,50% de fibra, essa relação se aproxima de 0,20.

6.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- i. Estudar outros comprimentos de fibra no solo como 6 mm e 12 mm, observando o comportamento mecânico, e a partir desses dados, e apontar como o comprimento do filamento está relacionado aos ganhos de resistência;
- ii. Adicionar agentes cimentantes (cimento, cal) junto com a fibra e observar o efeito da fibra na ductilidade, rigidez e aumento de resistências;
- iii. Realizar ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais para encontrar o efeito da fibra na coesão do solo, e no ângulo de atrito do mesmo;
- iv. Estudar o comportamento mecânico para outras energias de compactação (Energia modificada e Energia intermediária).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4, 8 mm: determinação da massa específica: método de ensaio**. ABNT, 1984.

_____. **NBR 12770: Determinação da resistência à compressão não confinada**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182: Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7222: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ALHOZAIMY, A. M.; SOROUSHIAN, P.; MIRZA, F. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, n. 2, p. 85–92, 1996.

BALDOVINO, Jair de Jesús Arrieta et al. **Comportamento mecânico de um solo siltoso da formação geológica Guabirotuba tratado com cal em diferentes tempos de cura**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; TEIXEIRA, W.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 188–194, 2018. Elsevier Ltd.

BODO, BELA; JONES, COLIN. **Introduction to soil mechanics**. John Wiley & Sons, 2013.

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

CONSOLI, N. C.; ARCARI BASSANI, M. A.; FESTUGATO, L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 4, p. 344–351, 2010.

DALL’AQUA, G. P.; GHATAORA, G. S.; LING, U. K. Behaviour of Fibre-Reinforced and Stabilized Clayey Soils Subjected To Cyclic Loading. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 32, n. 3, p. 14, 2010.

DAS. Principles of Geotechnical Engineering. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013. Cengage Learning.

FELIPE, R. S. Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirota. Mineropar, Curitiba, 2011.

FESTUGATO, L.; PECCIN DA SILVA, A.; DIAMBRA, A.; CONSOLI, N. C.; IBRAIM, E. Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 2, p. 155–165, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2017.11.003>>.

FREITAG, D.R., 1986. Soil randomly reinforced with fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE 112 (8), 823–826.

GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions. **Materials**, v. 11, n. 4, 2018.

GRAY, DONALD H.; OHASHI, HARUKAZU. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of geotechnical engineering**, v. 109, n. 3, p. 335-353, 1983.

HOLLAWAY, L. Polymers and polymers composites. In: J. M. Illston. **Construction Materials**; their nature and behavior...2ed., London: J.M Illston & FN Spon, 1994. P321-358.

KORMANN, ALESSANDER C. MORALES. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirota: estudos de campo e laboratório. 2002.** Tese de Doutorado. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MAHER H, HO C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. **J Geotech Eng** 1994;120: 1381–93.

McGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z ; AL-HASANI, M.M Effect of inclusion properties on the behavior of sand. **Géotechnique**, London, v.28, n.3, p.327,346,1978.

MIRZABABAEI, M.; MIRAFTAB, M.; MOHAMED, M.; MCMAHON, P. Unconfined

compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 139, n. 3, p. 483–493, 2013.

OLA, S. A. Stabilization of lateritic soils by extensible fibre reinforcement. **Engineering Geology**, v. 26, n. 2, p. 125–140, 1989.

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

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

PRADHAN, P. K.; KAR, R. K.; NAIK, A. Effect of Random Inclusion of Polypropylene Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 15–25, 2012.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R. Contexto Geológico da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba. In: Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba, Curitiba, 1999, Anais, Curitiba: ABMS/UFPR,1999, p. 7-15.

SALAMUNI, EDUARDO; STELLFELD, MARIA CAROLINA. Banco de dados geológicos georeferenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG).B, Paranaense Geoci, 2001, v. 49, p. 21-32.

SHEWBRIDGE, E; SITAR, N. deformation-based model for reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.116, n.7, p. 1153-1170, 1990.

SHUKLA, S. K. (2017). **Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering**. Springer Singapore.

SOLTANI, A.; DENG, A.; TAHERI, A. Swell–compression characteristics of a fiber–reinforced expansive soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 2, p. 183–189, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.11.009>>. .

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando à pavimentação**. 2000. 130p. 2000. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRRS, Porto Alegre.

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

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

TEODORO, J. M. (1999). **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais. 2003. 224 p.** 2003. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VIDAL, H. The principle of reinforced earth. **Geotechnical Special Publication**, , n. 118 II, p. 1331–1346, 2002.

ZAIMOGLU, A. S. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. **Cold Regions Science and Technology**, 2010.

ZAIMOGLU, A. S.; YETIMOGLU, T. Strength Behavior of Fine Grained Soil Reinforced with Randomly Distributed Polypropylene Fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 197–203, 2012.