

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EVELIN CAROLINA ROMAN

**AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DE SOLO LATERÍTICO COM ADIÇÃO DE
FIBRA DE POLIPROPILENO**

TOLEDO

2025

EVELIN CAROLINA ROMAN

**AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DE SOLO LATERÍTICO COM ADIÇÃO DE
FIBRA DE POLIPROPILENO**

**assessment of the consistency properties of a lateritic soil with polypropylene
fiber addition**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof^a. Dr^a Alana Dias de Oliveira.

**TOLEDO
2025**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

EVELIN CAROLINA ROMAN

**AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DE SOLO LATERÍTICO COM ADIÇÃO DE
FIBRA DE POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 18 de novembro de 2025

Prof^a. Dr^a. Alana Dias de Oliveira
Orientadora
Doutora em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Guilherme Alan Souza Costa
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^a. Dr^a. Narayana Saniele Massocco
Doutora em Geotecnia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TOLEDO
2025

Dedico este trabalho à minha família, que com apoio e amor, nunca mediram esforços para que eu seguisse meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre foi meu alicerce e guia em todos os momentos. Mesmo nos dias de dificuldade, me deu força, sabedoria e coragem para seguir em frente.

Aos meus pais e irmão, Vera e Gelcimar e Marlon, pelo apoio, carinho e amor incondicional em cada etapa. Obrigada por acreditarem em mim quando eu duvidei da minha capacidade, e por nunca me deixarem desistir dos meus sonhos. Por todo esforço para que nada me faltasse e para que eu pudesse chegar até aqui. Este trabalho não é apenas fruto do meu esforço, mas também de todo amor e exemplo de força que vocês me deram.

Ao meu companheiro, Douglas, pelo amor e paciência em todos os momentos, me apoiando, acreditando em mim e me dando força quando eu mais precisei. Sua paciência, compreensão e incentivo foram combustível para que eu conseguisse seguir firme.

Aos meus filhos, Benjamin e Joaquim, que vieram durante essa trajetória e se tornaram minha maior motivação. Foram meu maior incentivo para buscar sempre o melhor e este sonho realizado é, acima de tudo, por vocês e para vocês.

Aos meus amigos, que estiveram comigo durante essa jornada, dividindo risadas, desafios e conquistas. Agradeço pelas palavras de incentivo, pelos gestos de apoio e por tornarem esse processo mais leve. Em especial, minha amiga Sabrina, que sempre esteve ao meu lado e fez toda a diferença nessa jornada, saiba que essa vitória é sua também.

A minha orientadora, Prof^a Dr^a Alana Dias de Oliveira, expressei minha gratidão em me orientar durante o desenvolvimento desse trabalho. Sua paciência, compreensão e constante disposição em ajudar foram fundamentos para que esse trabalho se tornasse possível.

Agradeço a todos que, mesmo não sendo mencionados, fizeram parte dessa caminhada e contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

Os solos lateríticos, amplamente distribuídos no território brasileiro, são solos fundamentais para a infraestrutura civil, mas frequentemente apresentam elevada plasticidade e suscetibilidade à retração, o que compromete sua estabilidade volumétrica. A busca por alternativas sustentáveis de melhoramento tem incentivado o uso de fibras sintéticas em substituição a estabilizantes convencionais, como cimento e cal, que possuem alta emissão de carbono. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da adição de fibra de polipropileno nos limites de consistência de um solo laterítico do município de Toledo-PR, visando compreender seu comportamento físico frente à variação de umidade. Foram realizados ensaios de massa específica dos sólidos e limites de Atterberg: Liquidez (LL), Plasticidade (LP) e Contração (LC); em amostras de solo sem destorroamento e com teores de 0%, 0,5% e 1,0% de fibra, seguindo as respectivas normas da ABNT. Os resultados indicaram massa específica média de $2,65 \text{ g/cm}^3$, compatível com solos derivados de rochas basálticas. A adição de fibras de polipropileno promoveu aumento dos limites de liquidez e plasticidade, passando de 46,87% e 40,50% (solo natural) para 62,18% e 34,95% (solo com 1,0% de fibra), refletindo maior capacidade de retenção de umidade e deformabilidade. Embora o índice de consistência tenha diminuído de 2,02 para 1,03, o material apresentou comportamento mais dúctil e menos suscetível à fissuração, adequado a aplicações geotécnicas que exigem flexibilidade controlada, como reforço em camadas de pavimentos, aterros e taludes. Conclui-se que a incorporação de fibras de polipropileno representa uma alternativa técnica e ambientalmente sustentável para o melhoramento físico de solos lateríticos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções geotécnicas mais duráveis e responsáveis.

Palavras-chave: comportamento geotécnico; consistência do solo; reforço fibroso; materiais sustentáveis.

ABSTRACT

Lateritic soils, widely distributed throughout Brazil, are fundamental materials for civil infrastructure but often exhibit high plasticity and susceptibility to shrinkage, which compromise their volumetric stability. The search for sustainable improvement alternatives has encouraged the use of synthetic fibers as substitutes for conventional stabilizers such as cement and lime, which are associated with high carbon emissions. This study aimed to evaluate the influence of polypropylene fiber addition on the consistency limits of a lateritic soil from the municipality of Toledo, Paraná State, in order to understand its physical behavior under moisture variation. Tests of particle specific gravity and Atterberg limits—Liquid Limit (LL), Plastic Limit (PL), and Shrinkage Limit (SL)—were conducted on undisturbed soil samples containing fiber contents of 0%, 0.5%, and 1.0%, following the corresponding ABNT standards. The results indicated an average particle specific gravity of 2.65 g/cm^3 , consistent with soils derived from basaltic rocks. The addition of polypropylene fibers increased the liquid and plastic limits, from 46.87% and 40.50% (natural soil) to 62.18% and 34.95% (soil with 1.0% fiber), reflecting greater moisture retention capacity and deformability. Although the consistency index decreased from 2.02 to 1.03, the material exhibited more ductile behavior and reduced susceptibility to cracking, making it suitable for geotechnical applications that require controlled flexibility, such as reinforcement of pavement layers, embankments, and slopes. It is concluded that the incorporation of polypropylene fibers represents a technically and environmentally sustainable alternative for the physical improvement of lateritic soils, contributing to the development of more durable and environmentally responsible geotechnical solutions.

Keywords: geotechnical behavior, soil consistency, fiber reinforcement, sustainable materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de solos no Brasil	17
Figura 2 - Teoria de Lambe para explicar a forma da curva de compactação ..	18
Figura 3 - Fibra de polipropileno.....	22
Figura 4 – Relação entre o teor de umidade e limites de consistência do solo	23
Figura 5 - Representação gráfica dos resultados de limites de Atterbetg	25
Figura 6 - Efeito das fibras de polipropileno nos limites de Atterberg do solo	26
Figura 7 - Localização geográfica do local de coleta da amostra de solo	27
Figura 8 - Amostra retirada do Campo Geotécnico.....	28
Figura 9 - Mapa de solos do Paraná com destaque para a região Oeste em estudo	30
Figura 10 - Fibra de Polipropileno Maccaferri (24 mm).....	31
Figura 11 - Peneiramento das Amostras	32
Figura 12 - Amostras em processo de saturação.....	34
Figura 13 - Amostras no processo aplicação de vácuo.....	35
Figura 14 - Pesagem do picnômetro com a amostra	35
Figura 15 - Ranhura feita na amostra para ensaio	36
Figura 16 - a) Molde da amostra b) Amostra com 3mm de diâmetro c) Amostra fissurada d) Amostra rompida pela fissura.....	37
Figura 17 - Amostras preenchidas com solo para ensaio de contração.....	39
Figura 18 - Variação do limite de liquidez em função do teor de fibra de polipropileno.....	42
Figura 19 - Variação do limite de plasticidade em função do teor de fibra de polipropileno.....	43
Figura 20 - Variação do limite de contração em função do teor de fibra de polipropileno.....	43
Figura 21 - Amostra de solo com adição de 0,5% de fibra de polipropileno.....	44
Figura 22 - Amostra de solo com 1,0% de fibra de polipropileno	45
Figura 23 - Efeito da adição de fibras de polipropileno ao solo após secagem na estufa: A) 0% de fibra; B) 0,5% de fibra; C) 1% de fibra.....	47
Figura 24 - Comparação dos limites de consistência em função do teor de fibra	48
Figura 25 - Aspecto das amostras com teores de água de 43%, 45%, 47%, 49% e 51% respectivamente incorporadas a A)0% de fibra; B) 0,5% de fibra; C) 1% de fibra de polipropileno.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do solo estudado.....	29
Tabela 2 - Ensaio realizados e teores de fibra empregados.....	33
Tabela 3 - Resultado da Análise de Massa Específica (ρ_s).....	41
Tabela 4 - Valores de Limites de Consistência.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Atividade Coloidal
CEG	Campo Experimental de Geotecnia
IC	Índice de Consistência
IL	Índice de Liquidez
IP	Índice de Plasticidade
LC	Limite de Contração
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Normas Brasileiras
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de carbono
ρ_s	Massa específica do solo (g/cm^3)
γ_d	Peso específico aparente seco
w	Umidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Solos Tropicais.....	16
2.1.1	Solos lateríticos	17
2.1.2	Solos Compactados	18
2.2	Estabilização e reforço de solos	19
2.2.1	Polímeros	20
2.2.2	Geossintéticos.....	20
2.3	Solo reforçado com fibras	21
2.4	Limites de Atterberg.....	22
2.5	Estudos Relacionados	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Coleta das amostras de solo.....	27
3.2	Caracterização regional do solo	28
3.3	Fibras de Polipropileno.....	30
3.4	Preparação das Amostras	31
3.5	Ensaio laboratoriais	33
3.6	Massa Específica dos Sólidos.....	33
3.7	Limite de Liquidez	36
3.8	Limite de Plasticidade.....	37
3.9	Limite de Contração	39
3.10	Análise Microscópica por Lupa.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	Massa Específica do Sólidos.....	41
4.2	Limites de Consistência	42
4.3	Análise Microscópica por Lupa.....	48
4.4	Discussão sobre a Aplicação Geotécnica e Sustentável da Fibra de Polipropileno.....	50

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O solo constitui a base fundamental das obras civis, sendo responsável por garantir a resistência necessária para suportar as cargas durante a construção e ao longo da vida útil das estruturas. Desde a Antiguidade, técnicas de reforço de solo já eram aplicadas com a incorporação de elementos naturais, com o objetivo de aumentar a resistência e reduzir deformações (Benjamim, 2006). Com o avanço tecnológico, a indústria de materiais poliméricos passou a investir em novas alternativas para reforço e estabilização de solos, originando os geossintéticos (Gongóra, 2015).

Entre os diversos tipos de solo, destaca-se o solo laterítico, formado pelo intemperismo intenso de rochas ricas em ferro e alumínio, predominante em regiões tropicais e subtropicais. Apesar de amplamente empregado em obras de infraestrutura, esse tipo de solo apresenta estrutura agregada, elevada porosidade e coesão aparente dependente da umidade, podendo apresentar comportamento metaestável quando saturado (Camapum de Carvalho; Gitirana Jr., 2021). Diante dessas limitações, torna-se necessária a utilização de materiais estabilizantes para melhorar seu desempenho geotécnico.

Nos últimos anos, o uso de polímeros tem se mostrado uma alternativa promissora para o melhoramento físico de solos. A fibra de polipropileno, em particular, destaca-se por ser um material de baixo custo e amplamente disponível, capaz de reforçar o solo por meio da interação física entre as fibras e as partículas minerais (Liu *et al.*, 2023). Essa técnica contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento, à tração e a compressão, além de reduzir a formação de fissuras e o potencial de retração (Mariri *et al.*, 2019).

Diante desse contexto, este trabalho busca responder ao seguinte questionamento: a incorporação de fibra de polipropileno a um solo laterítico promove melhorias em seus limites de consistência?

1.1 Justificativa

Os solos classificados como latossolos, conhecidos também como lateríticos, nem sempre apresentam comportamento geotécnico adequado para obras de infraestrutura, especialmente de grande porte, como aterros, rodovias e barragens, devido à sua alta porosidade, estrutura agregada e sensibilidade à variação de

umidade (Camapum de Carvalho; Gitirana Jr., 2021). Considerando que grande parte do território brasileiro é composta por solos lateríticos, sobre os quais se assentam extensas redes rodoviárias, torna-se essencial buscar soluções que aprimorem o desempenho desses materiais em campo.

O uso de agentes estabilizantes tradicionais, como o cimento e a cal, embora eficiente, apresenta desvantagens relacionadas à sustentabilidade e à emissão de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂, durante os processos de produção e cura (Bremner, 2001; British Petroleum, 2007). Nesse cenário, a comunidade geotécnica tem direcionado esforços para o desenvolvimento de métodos de estabilização mais sustentáveis, baseados em materiais alternativos que causem menor impacto ambiental.

As fibras sintéticas, em especial as de polipropileno, têm se mostrado uma alternativa promissora para o melhoramento físico e mecânico dos solos, por proporcionarem reutilização, baixo custo, facilidade de incorporação e redução da retração. Além disso, o uso desse tipo de reforço se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, em especial aos ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao incentivar a inovação em materiais e o desenvolvimento de soluções geotécnicas ambientalmente responsáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da adição de fibra de polipropileno nos limites de consistência e no comportamento físico de um solo laterítico do município de Toledo-PR, com base em ensaios laboratoriais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência de diferentes proporções de fibra de polipropileno nos limites de consistência;
- Comparar os limites de consistência entre as amostras na constituição natural e com adições fibra, analisando o potencial de modificação das propriedades físicas;

- Avaliar a estrutura do solo em termos morfológicos a partir de análise fotográfica, visando identificar visualmente alterações em função da adição de fibra; e
- Discutir o potencial de aplicação da fibra de polipropileno como alternativa sustentável de melhoramento físico para solos lateríticos utilizados em obras geotécnicas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma revisão da literatura sobre os solos lateríticos e o uso de materiais alternativos para o seu melhoramento, com ênfase na aplicação de fibras de polipropileno como agente modificador.

2.1 Solos Tropicais

O Brasil, por situar-se em uma zona predominantemente tropical, apresenta solos fortemente influenciados pelos processos de intemperismo químico e pela elevada taxa de lixiviação. De acordo com Melfi e Pedro (1977), cerca de 56% dos solos brasileiros são ferrasols e 12,5% são acrisols, ambos formados sob condições de clima quente e úmido.

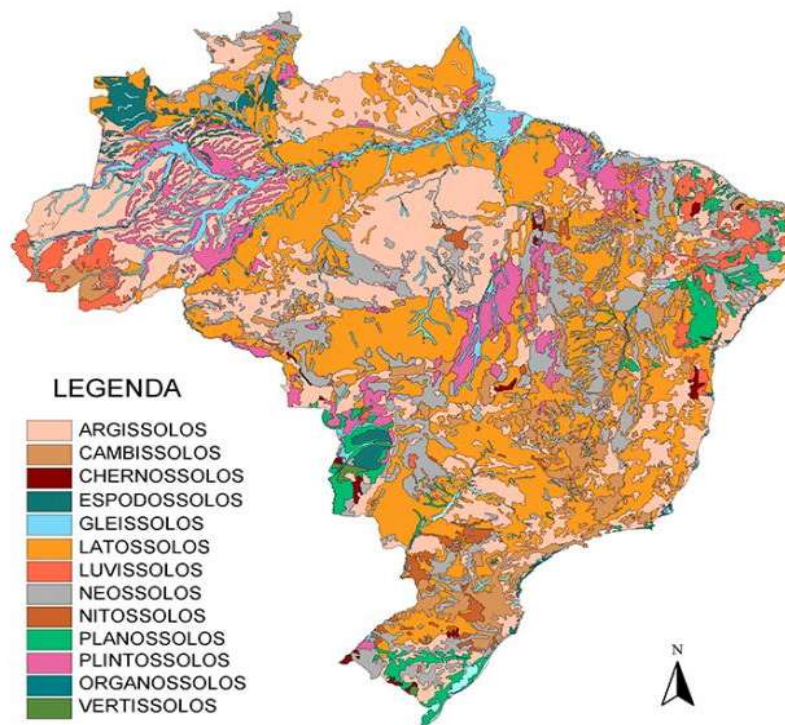
Os ferrasols correspondem aos latossolos, solos altamente evoluídos e profundamente intemperizados, com coloração variando do amarelo ao vermelho-escuro, ricos em óxidos de ferro e alumínio. Esses solos apresentam estrutura granular estável e predominância de minerais secundários, como caulinita e gibbsita, características típicas de regiões equatoriais e tropicais (EMBRAPA, 2006).

Os acrisols, por sua vez, equivalem aos argissolos, que apresentam profundidade variável, coloração avermelhada ou amarelada e teor significativo de argila. São solos moderada a fortemente ácidos, geralmente de natureza caulinitica, e menos evoluídos em relação aos latossolos (EMBRAPA, 2006).

A Figura 1 ilustra a distribuição dos principais tipos de solos no território brasileiro, destacando, em laranja, as regiões de predominância dos latossolos, típicos de ambientes de clima tropical úmido e diretamente relacionados à formação dos solos lateríticos estudados neste trabalho.

Típicos de regiões tropicais úmidas, esses solos apresentam propriedades e comportamentos influenciados por processos geológicos e pedológicos intensos. De acordo com Nogami e Villibor (1995), podem ser classificados em duas categorias principais: solos lateríticos, formados predominantemente por processos pedogenéticos, e solos saprolíticos, resultantes da decomposição direta da rocha de origem.

Figura 1 - Mapa de solos no Brasil



Fonte: Embrapa (2014)

2.1.1 Solos lateríticos

Os solos lateríticos são materiais altamente intemperizados, típicos de regiões tropicais úmidas e bem drenadas, que ocupam as camadas mais superficiais do perfil de intemperismo. Sua composição mineralógica caracteriza-se pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, além de minerais secundários como caulinita, gibbsita e hematita (Nogami e Villibor, 1983).

De acordo com Santos (2006), esses solos apresentam relativa estabilidade na presença de água, uma vez que os hidróxidos e óxidos hidratados revestem os argilominerais e atuam como cimentantes naturais entre as partículas, conferindo certa coesão e estrutura agregada.

Em regiões tropicais e subtropicais, os solos lateríticos são amplamente utilizados como materiais de pavimentação e base para fundações e contenções, devido à sua disponibilidade e facilidade de compactação. Contudo, o desempenho desses solos depende diretamente de seu estado de compactação e da energia aplicada, uma vez que apresentam comportamento metaestável, sensível à variação de umidade (Horpibulsuk et al., 2013).

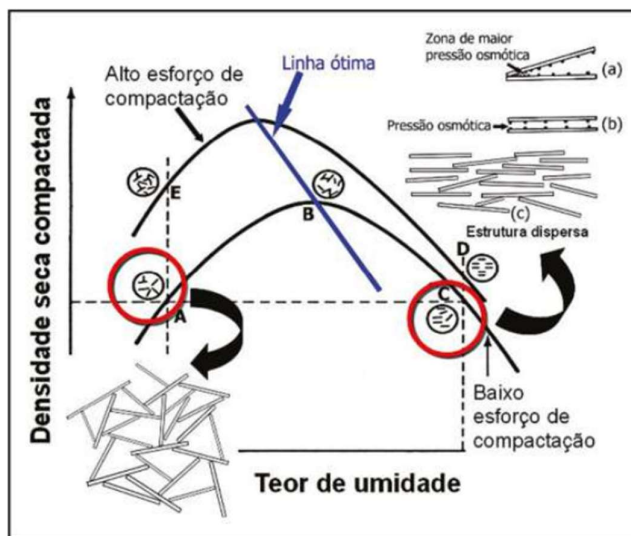
2.1.2 Solos Compactados

A técnica de compactação de solos teve origem com os estudos de Proctor (1933), que desenvolveram o método dinâmico para avaliar a relação entre o peso específico aparente seco (γ_d) e o teor de umidade (w). Esse ensaio demonstrou que a densidade obtida depende não apenas do tipo de solo e da umidade, mas também da energia de compactação aplicada.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2023), a estrutura do solo compactado está intimamente relacionada ao seu processo de formação. Em solos de regiões temperadas, o comportamento segue a teoria de Lambe (1958), posteriormente expandida por Mitchell e Soga (2005). Entretanto, para solos tropicais profundamente intemperizados, essa teoria não se aplica integralmente, uma vez que a estrutura é fortemente influenciada pela cimentação natural e pela distribuição de agregados.

Nos solos tropicais residuais jovens, a curva de compactação tende a seguir o formato proposto por Lambe (1958), variando conforme a textura e a energia de compactação aplicada. A distribuição dos poros pode variar de uniforme a bem graduada, dependendo da textura e da energia de compactação aplicada. A Figura 2 ilustra o comportamento típico da curva de compactação, evidenciando a variação do peso específico seco em função do teor de umidade.

Figura 2 - Teoria de Lambe para explicar a forma da curva de compactação



Fonte: Camapum de Carvalho *et al.* (2023).

O processo tem como objetivo reduzir o índice de vazios, aumentando a resistência ao cisalhamento, diminuindo a permeabilidade e a deformabilidade

(Crispim et al., 2011), e melhorando a estabilidade e durabilidade do solo compactado (Holtz e Kovacs, 1981).

A eficiência da compactação é influenciada por fatores como o teor de umidade, o tipo de solo, a energia aplicada por unidade de volume e condições operacionais, incluindo o tipo de equipamento, o número e espessura das camadas e a pressão aplicada (Pascoal, 2020).

2.2 Estabilização e reforço de solos

O melhoramento de solos envolve a aplicação de processos naturais ou artificiais destinados a aperfeiçoar suas propriedades geotécnicas, com o objetivo de aumentar a resistência e durabilidade, além de reduzir a compressibilidade e a permeabilidade.

De modo geral, o termo estabilização refere-se à modificação das propriedades do solo por meio de reações químicas, como a adição de cal, cimento ou outros agentes; enquanto o reforço está associado à inclusão de materiais que aumentam a capacidade resistente do solo, como fibras, geotêxteis ou outros elementos estruturais.

Segundo Kédzi (1979), os métodos de estabilização de solo podem ser classificados de acordo com a finalidade do processo, sendo os principais tipos: a estabilizações mecânica, química e física. Para o autor, o método mecânico consiste na alteração da densidade do solo por meio da combinação de diferentes técnicas, nas quais, na maioria das vezes, a compactação é necessária. Esse método pode ocorrer de formas distintas, sendo elas:

- i) Redução do volume de vazios através da compactação;
- ii) Drenagem e manutenção do teor de água a um nível constante; e
- iii) Mistura de diferentes tipos de solos.

No processo de estabilização de solos, é fundamental considerar as mudanças nas demais propriedades do material, decorrentes dos efeitos do teor de água, permeabilidade e grau de saturação, entre outros (Ahnberg, 2006). Para Kédzi (1979), as reações químicas presentes na estabilização são a troca de íons, a precipitação, a polimerização e a oxidação.

A estabilização física ocorre quando as propriedades do solo são modificadas em razão de alterações em sua textura, temperatura, evaporação ou hidratação. Algumas técnicas de estabilização incluem a correção granulométrica ou a adição de fibras metálicas, minerais, vegetais ou sintéticas (Pinto, 2008).

Historicamente, materiais como cimento e cal têm sido amplamente utilizados na estabilização de solos. Contudo, a busca por alternativas mais econômicas e sustentáveis tem impulsionado o uso de novos estabilizantes e reforços, como polímeros e fibras, que oferecem vantagens ambientais e reduzem as emissões de CO₂ associadas à produção de materiais convencionais (Huang *et al.*, 2021).

2.2.1 Polímeros

De acordo com Huang (2021), polímeros são grandes moléculas formadas pela repetição de unidades menores chamadas monômeros. Essas moléculas são resultantes do processo de polimerização e apresentam propriedades físicas e químicas distintas das substâncias que lhes deram origem.

O uso de polímeros em engenharia civil teve início durante a Segunda Guerra Mundial, quando um polímero solúvel em água foi utilizado para estabilizar solos empregados na construção de estradas e pistas de pouso para veículos militares (Wilson, 1975).

Em suas aplicações, os polímeros mostram-se mais ecológicos que agentes convencionais como cimento e cal, pois reduzem a emissão de gases de efeito estufa e o consumo de recursos naturais e energia. Entretanto, seu uso ainda é limitado em razão do custo relativamente elevado (Huang, 2021).

2.2.2 Geossintéticos

Os geossintéticos são materiais constituídos por uma estrutura tridimensional ou manta filtrante, contendo pelo menos um componente formado por polímero natural ou sintético. São geralmente fabricados a partir de fibras sintéticas compostas por polímeros como polipropileno, poliéster, poliamida e polietileno (Suresh *et al.*, 2023).

Esses materiais são amplamente empregados para melhorar o comportamento mecânico dos solos, principalmente na construção de pavimentos, onde contribuem para o aumento da capacidade de carga, redução de recalques diferenciais e ampliação da vida útil das estruturas (Flutcher, 2013).

O desempenho de cada tipo de geossintético depende diretamente de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, as quais são determinadas pelo tipo de polímero e pelo processo de fabricação.

2.3 Solo reforçado com fibras

No reforço de solos, é possível empregar diferentes tipos de fibras, cujas características influenciam diretamente o comportamento do material reforçado. Essa influência está relacionada tanto ao material de origem da fibra quanto ao seu processo de fabricação. A escolha do tipo de fibra a ser incorporado ao solo requer o entendimento da interação entre a matriz (solo) e o reforço (fibra), bem como da contribuição de cada um para o comportamento final do compósito (Feuerharmel, 2000).

Amplamente utilizada em obras geotécnicas, a técnica de reforço com fibras continua sendo aplicada para o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas dos solos. O método tem sido empregado em estruturas de contenção, camadas de subleito e sub-base de pavimentos, estabilidade de taludes, aterros sobre solos moles, controle de condutividade hidráulica, mitigação de erosão, prevenção de fissuras e *piping* (Shukla, 2017; Ehrlich *et al.*, 2019).

A incorporação de fibras distribuídas aleatoriamente no solo contribui para impedir a formação de superfícies preferenciais de ruptura, uma vez que as fibras atuam absorvendo parte das tensões de tração. Dessa forma, o reforço promove melhor comportamento tensão-deformação, aumento da ductilidade e capacidade de deformação do solo (Consoli *et al.*, 2012).

Em um contexto de engenharia sustentável, o uso de fibras também representa uma alternativa promissora à substituição de agentes estabilizantes convencionais, como cimento e cal, reduzindo o impacto ambiental e o custo energético de produção.

Entre as fibras sintéticas mais utilizadas, destaca-se a fibra de polipropileno (Figura 3), constituída de um termoplástico que adquire consistência plástica com o aumento da temperatura. Esse polímero é formado por longas cadeias moleculares polimerizadas, separadas entre si e capazes de deslizar umas sobre as outras (Feuerharmel, 2000).

A fibra de polipropileno apresenta elevada flexibilidade e tenacidade, com módulo de elasticidade em torno de 8 GPa e resistência à tração de aproximadamente 400 MPa, características que justificam seu uso como reforço em misturas de solo,

contribuindo para o aumento da resistência e da deformabilidade.

Figura 3 - Fibra de polipropileno



Fonte: Maccafferi (2013)

2.4 Limites de Atterberg

No início do século XX, o químico sueco Albert Atterberg realizou estudos sobre as propriedades dos solos finos, observando que esses materiais apresentavam variações em seu estado de consistência conforme o teor de umidade. Com base nessas observações, definiu os limites de consistência, inicialmente voltados ao estudo de cerâmicas, e posteriormente aplicados à engenharia geotécnica.

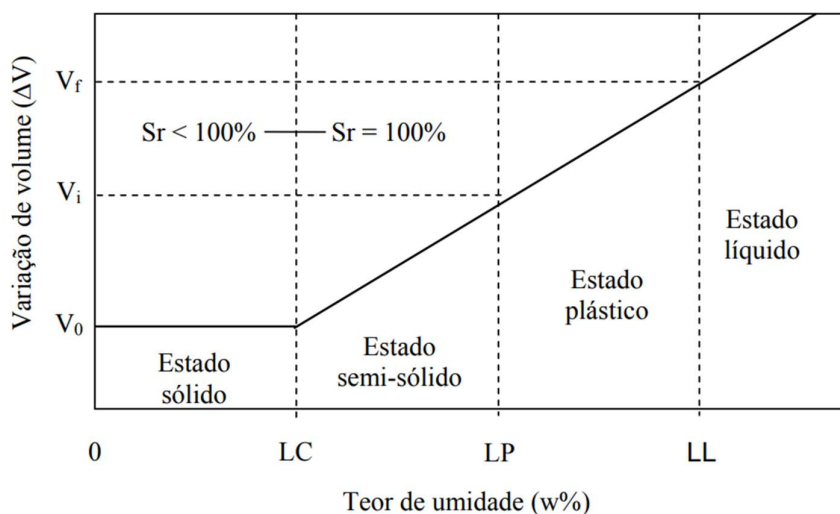
Segundo Burgos e Conciani (2023), os solos argilosos podem apresentar comportamento semelhante ao de um líquido ou de um sólido, dependendo da quantidade de água presente em sua estrutura. Esse comportamento é descrito pelos estados de consistência, que expressam o grau de plasticidade do solo e resultam das interações físico-químicas entre as partículas da fração fina.

Solos coesivos apresentam comportamento plástico dentro de determinados intervalos de umidade. Abaixo desse intervalo, o solo se comporta como um material sólido, e acima, como um líquido. Entre esses estados há uma faixa intermediária, denominada semissólida (Burgos e Conciani, 2023).

A Figura 4 apresenta a variação do volume do solo em função do teor de umidade, evidenciando as transições entre os estados líquido, plástico, semissólido e

sólido. O limite de liquidez (LL) corresponde à passagem do estado líquido para o plástico; o limite de plasticidade (LP) marca a transição entre o estado plástico e o semissólido; e o limite de contração (LC) define o ponto a partir do qual o solo praticamente não sofre variação volumétrica.

Figura 4 – Relação entre o teor de umidade e limites de consistência do solo



Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

Anos mais tarde, Arthur Casagrande padronizou os ensaios de determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, estabelecendo procedimentos amplamente utilizados até hoje. Em contrapartida, o limite de contração nem sempre representa com fidelidade as variações volumétricas de solos tropicais, o que limita seu uso prático (Camapum de Carvalho & Gitirana, 2021; Burgos e Conciani, 2023).

Esses limites são definidos pelas normas da ABNT (NBR 6459:2025 – Limite de Liquidez; NBR 7180:2025 – Limite de Plasticidade; NBR 7183:1982 – Limite de Contração) e constituem parâmetros fundamentais na classificação e avaliação do comportamento físico dos solos finos.

2.5 Estudos Relacionados

Diversos estudos têm investigado os efeitos da adição de fibras sintéticas e naturais em solos tropicais e argilosos, especialmente quanto às variações nos limites de consistência. O Quadro 01 apresenta um resumo de trabalhos recentes que abordam essa temática, destacando o tipo de fibra utilizada, os ensaios realizados e os principais resultados obtidos.

Quadro 1 - Estudos relacionados

Autor/Ano	Tipo de fibra e solo	Ensaio realizado	Principais resultados	Conclusão principal
Aishwarya e Rachel (2023)	Fibra de basalto em solo argilo-arenoso	Limites de Atterberg (LL, LP, IP)	LL ↓ ligeiramente; LP ↑; IP ↓	Fibras reduziram plasticidade, tornando o solo mais estável
Ojefia, Eberemu e Ajiboye (2024)	Fibra de coco em solo argiloso	Limites de Atterberg (LL, LP, IP)	LL ↑; LP ↑ até 2,5% de fibra; IP máximo em 1,5%	Fibras aumentaram a plasticidade e ductibilidade
Taha, Feng e Ahmed (2020)	Fibra de polipropileno em solo argiloso de alta plasticidade (CH)	Limites de Atterberg (LL, LP, IP)	LL ↓ ligeiramente; LP ↑; IP ↓	Fibras reduziram a plasticidade, tornando o solo mais estável

Fonte: Autoria própria (2025)

O estudo conduzido por Aishwarya e Rachel (2023) avaliou os limites de Atterberg de um solo argilo-arenoso em sua condição natural e com adição de fibras de basalto. Foram ensaiadas 36 amostras, sendo 18 do solo natural e 18 com a fibra incorporada. O valor médio do limite de liquidez (LL) obtido para solo argilo-arenoso foi de 12,85 %, enquanto o solo reforçado com fibras apresentou um LL de 12,07 %. O limite de plasticidade apresentou valores médios de 8,30 % para o solo natural e 9,98 % para o solo reforçado.

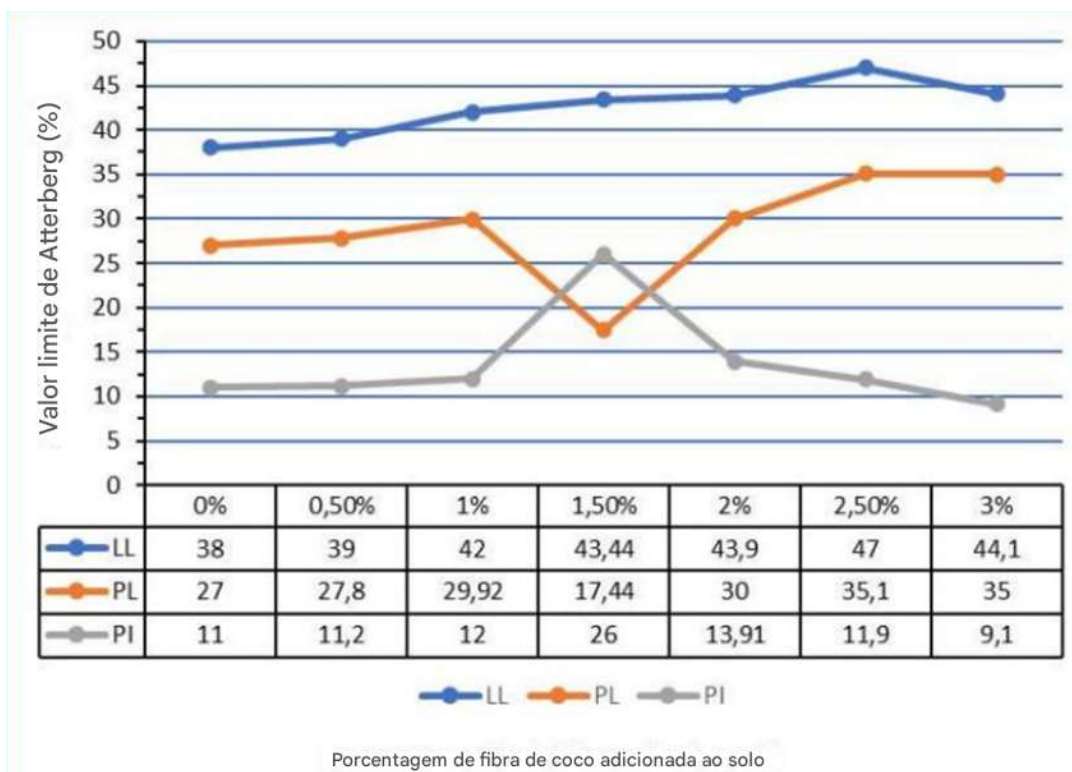
Com isso, o índice de plasticidade (IP) obtido para o solo argilo-arenoso foi de 4,55%, enquanto o solo reforçado com fibras apresentou 2,09%. A adição de fibras resultou em um menor índice de plasticidade, indicando uma mistura mais estável e resistente, embora ligeiramente mais sensível à variação de umidade. Esse comportamento é atribuído à interação física entre as fibras e as partículas de solo, que limita o deslocamento relativo entre os grãos e aumenta a capacidade de dissipação de tensões.

O estudo de Ojefia, Eberemu e Ajiboye (2024) teve como objetivo avaliar o efeito da adição de fibra de coco sobre as propriedades de um solo argiloso da região de Wudilm, na Nigéria. As amostras de solo foram preparadas com diferentes teores de fibra (0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% e 3%).

Entre os ensaios realizados, destacou-se os de limites de Atterberg, utilizado para avaliar o comportamento do solo e sua sensibilidade às variações de umidade em função do teor de fibras incorporado na mistura. Em comparação ao solo natural, a amostra com 2,5% de fibras apresentou os melhores resultados, com aumento do limite de liquidez (LL) de 38% para 47% e do limite de plasticidade (LP) de 27% para 35,1%, indicando uma mistura mais estável e menos sensível às variações de umidade.

O maior índice de plasticidade (IP = 26%) foi obtido para o teor de 1,5% de fibras, evidenciando que essa proporção proporcionou maior capacidade de deformação e um comportamento mais plástico e dúctil ao solo reforçado, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Representação gráfica dos resultados de limites de Atterbetg

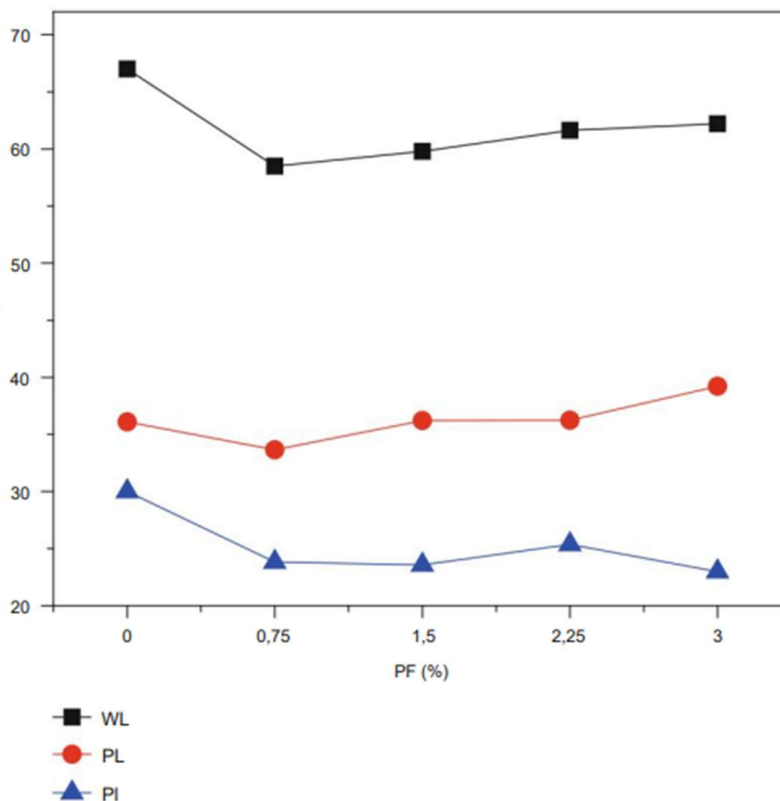


Fonte: Ojefia, Eberemu e Ajiboye (2024)

Taha, Feng e Ahmed (2020) investigaram o comportamento mecânico de solo argiloso classificado como de alta plasticidade (CH), reforçado com fibras de polipropileno em diferentes teores (0%, 0,75%, 1,5%, 2,25% e 3%).

Nos ensaios de limites de Atterberg, o limite de liquidez (LL) reduziu de 67% para 62,2%, enquanto o limite de plasticidade (LP) apresentou uma leve diminuição inicial, seguida de discreto aumento com o acréscimo de fibras. O índice de plasticidade (IP) diminuiu de 30,91% para 22,98%, correspondendo a uma redução de cerca de 26%, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Efeito das fibras de polipropileno nos limites de Atterberg do solo



Fonte: Taha, Feng e Ahmed (2020).

A redução dos valores de LL e IP indica menor plasticidade e maior estabilidade volumétrica do solo reforçado. Segundo Taha, Feng e Ahmed (2020), esse comportamento é atribuído ao efeito de intertravamento e atrito entre as fibras e as partículas de solo, que limitam o deslocamento relativo entre os grãos e reduzem a mobilidade da água nos vazios, tornando o material mais estável e menos propenso às variações de umidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento físico de um solo laterítico reforçado com fibras de polipropileno, analisando a influência de diferentes teores de fibra nos limites de consistência do material. Para isso, foram realizados ensaios em amostras de solo natural e em misturas contendo diferentes proporções de fibra, a fim de comparar o desempenho do material e verificar a eficiência do reforço.

3.1 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas no Campo Experimental de Geotecnia (CEG) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, localizado nas proximidades da Avenida Adão Gesis e à Rua Antônio Borilli, conforme mostra a Figura 7. A área de coleta está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, pertencente ao Grupo São Bento, mais especificamente à Formação Serra Geral, composta predominantemente por rochas basálticas.

Figura 7 - Localização geográfica do local de coleta da amostra de solo



Fonte: Autoria própria (2025)

Foram coletadas amostras deformadas, seguindo as diretrizes da NBR 9604:2024 – Abertura de poço e coleta de amostras de solo em poço de inspeção e coletadas a aproximadamente 1,0m de profundidade, garantindo que o material representasse a camada de solo utilizada em aplicações geotécnicas. As amostras foram acondicionadas em tambores e posteriormente armazenadas em sacos plásticos vedados, de modo a preservar suas características de umidade e estrutura até a realização dos ensaios, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Amostra retirada do Campo Geotécnico



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2 Caracterização regional do solo

A caracterização regional do solo, parâmetros típicos da região em estudo, foi elaborada com base nos estudos de Weisheimer *et al.* (2023) e Oldra (2022). Esses autores realizaram ensaios em solos residuais e maduros do Oeste do Paraná, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Weisheimer *et al.* (2023), por meio da análise tátil-visual e da observação direta das amostras, identificaram características típicas de solos tropicais finos. Além disso, seguindo as normas NBR 9604 (ABNT, 2016a) e NBR 7181 (ABNT, 2016b), realizaram ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação.

Por sua vez, Oldra (2022) determinou a massa específica dos grãos (ρ_s) de amostras coletadas a aproximadamente 2 m de profundidade, utilizando o ensaio do picnômetro, conforme descrito na NBR 6458 (ABNT, 2016c – Anexo B). O autor também realizou os ensaios de limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade), com o aparelho de Casagrande, conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016d).

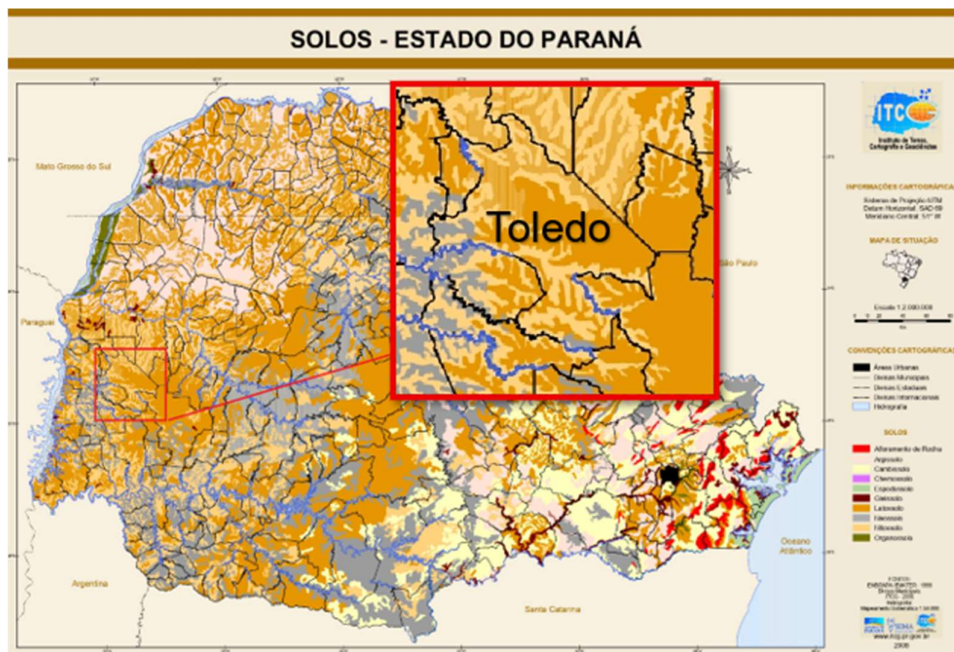
Tabela 1 - Caracterização do solo estudado

Parâmetro	Solo Residual Jovem	Solo Residual Maduro
Argila (<0,002 mm)	55%	67%
Silte (0,002 – 0,075 mm)	29%	19%
Areia Fina (0,075 – 0,42 mm)	9%	11%
Areia Grossa (0,42 – 2 mm)	7%	3%
Classificação SCU (Casagrande)	Granulometria fina	Granulometria fina
Classificação Granulométrica	Argila siltosa	Argila siltosa
Limite de Liquidez (LL)	58%	105%
Limite de Plasticidade (LP)	30%	82%
Índice de Plasticidade (IP)	28%	23%
Massa Específica dos Grãos (ρ_s)	2,638 g/cm ³	2,892 g/cm ³

Fonte: Adaptado Weisheimer et al. (2023) e Oldra (2022)

Os solos analisados por esses autores foram classificados como lateríticos (Figura 9), apresentando comportamento plástico característico de solos argilosos siltosos, boa capacidade de absorção de água quando umedecidos, torrões resistentes à quebra e partículas finas perceptíveis ao toque, características típicas de solos residuais derivados de rochas basálticas. De acordo com o Mapa de Solos do Paraná, nota-se que o município de Toledo é predominantemente composto por latossolos, representados pela coloração marrom-claro, e em menor proporção, podem ser identificados áreas com argilossolos, representados por amarelo.

Figura 9 - Mapa de solos do Paraná com destaque para a região Oeste em estudo



Fonte: Adaptado ITCG (2007)

3.3 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas neste trabalho são compostas por filamentos extremamente finos, produzidos por meio de processo de extrusão, e são comercializadas sob o nome FibroMac, fabricadas pela empresa Maccaferri do Brasil.

Essas fibras apresentam diâmetro médio (df) de 18 μm e comprimento (Lf) de 24 mm (Figura 10). Sua massa específica é de aproximadamente 0,91 g/cm^3 , conforme ficha técnica do fabricante Maccaferri.

De acordo com o fabricante, seu uso é indicado em concretos e argamassas, pois contribui para reduzir a fissuração causada por retração plástica e assentamento, além de melhorar a resistência da mistura ao desgaste, impacto e fogo.

Figura 10 - Fibra de Polipropileno Maccaferri (24 mm)



Fonte: Autoria própria (2025)

3.4 Preparação das Amostras

As amostras foram retiradas do CEG da UTFPR, Campus Toledo, e transportadas até o Laboratório de Solos, onde os ensaios foram conduzidos. Conforme a NBR 6458:2025, o material foi peneirado em malha de abertura de 2,0 mm, de modo a separar as partículas mais grossas e obter a fração representativa do solo para os ensaios (Figura 11). Neste trabalho, optou-se por não realizar o destorroamento, a fim de preservar a estrutura e a umidade natural do solo, mantendo suas condições o mais próximas possível das verificadas em campo.

Figura 11 - Peneiramento das Amostras



Fonte: Autoria própria (2025)

De acordo com Ferreira, Oliveira e González (2023), a preparação de amostras para caracterização física deve ser conduzida cuidadosamente para preservar as propriedades naturais do solo, evitando alterações que possam gerar erros nos resultados. Assim, optou-se por evitar a secagem prévia e realizar os ensaios com o solo em umidade natural.

Ainda, em relação à preparação das amostras, inicialmente, três amostras foram utilizadas para a determinação da umidade natural, conforme a NBR 6457:2024, utilizando-se a Equação (1):

$$w = \frac{M1-M2}{M2-M3} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

w é o teor de umidade (%); $M1$ é a massa de solo úmido mais a massa do recipiente (g); $M2$ é a massa do solo seco mais a massa do recipiente (g); $M3$ é a massa do recipiente (g).

Após a determinação da umidade, 100 g de solo seco foram separados para cada ensaio, repetindo-se o procedimento para todos os teores de fibra.

3.5 Ensaio laboratoriais

Foram moldadas três séries de amostras variando-se o teor de fibra de polipropileno (0,0%, 0,5% e 1,0%), conforme apresentado na Tabela 2. Todas as amostras foram preparadas utilizando a umidade natural do solo, determinada em laboratório como sendo 2,61%. Em todas as condições, foram realizados os mesmos tipos de ensaios, seguindo as normas técnicas da ABNT correspondentes.

Tabela 2 - Ensaio realizados e teores de fibra empregados

Teor de Fibra de Polipropileno (%)	Identificação da Amostra	Ensaio Realizados
0,0	SN – Solo natural	Massa específica dos sólidos
		LL
		LP
		LC
		Análise fotográfica
0,5	SF-0,5 – Solo com 0,5% de fibra	LL
		LP
		LC
		Análise fotográfica
1,0	SF-1,0 – Solo com 1,0% de fibra	LL
		LP
		LC
		Análise fotográfica

Fonte: Autoria própria (2025)

Para as amostras com teores de fibra de 0,5 e 1,0%, a concentração da mistura solo-fibra foi definida a partir da Equação (2):

$$Cf = \frac{Mf}{Ms} * 100 \quad (2)$$

Em que: Cf = concentração de fibra (%); Mf = massa de fibra (g); Ms = massa do solo seco (g).

3.6 Massa Específica dos Sólidos

O ensaio de massa específica dos sólidos foi conduzido de acordo com as recomendações da NBR 6458:2025. Após o peneiramento do solo, foram separados béqueres com aproximadamente 100 g de material, os quais foram submersos em

água destilada e mantidos tampados por 24 horas à temperatura ambiente, a fim de garantir a completa saturação das amostras (Figura 12).

Figura 12 - Amostras em processo de saturação



Fonte: Autoria própria (2025)

Decorrido esse período, o conteúdo de cada béquer foi transferido para o copo metálico com auxílio de água destilada, evitando qualquer perda de material. Em seguida, o copo foi colocado no agitador mecânico por cerca de 15 minutos, assegurando a homogeneização da suspensão.

O material resultante foi então vertido em picnômetros previamente calibrados, utilizando funil e água destilada até cerca da metade do volume. Os picnômetros foram submetidos à aplicação de vácuo por 15 minutos, com o objetivo de remover o ar aprisionado entre as partículas (Figura 13). Após esse processo, completou-se o volume com água destilada até aproximadamente 1 cm abaixo da linha de referência e aplicou-se novo vácuo por mais 15 minutos, assegurando a retirada de bolhas de ar residuais.

Em seguida, os picnômetros foram completos até a marca de referência e submetidos a ebulição por cerca de 15 minutos, com o intuito de eliminar o ar remanescente na mistura. Após 24 horas do término da ebulição, registrou-se a

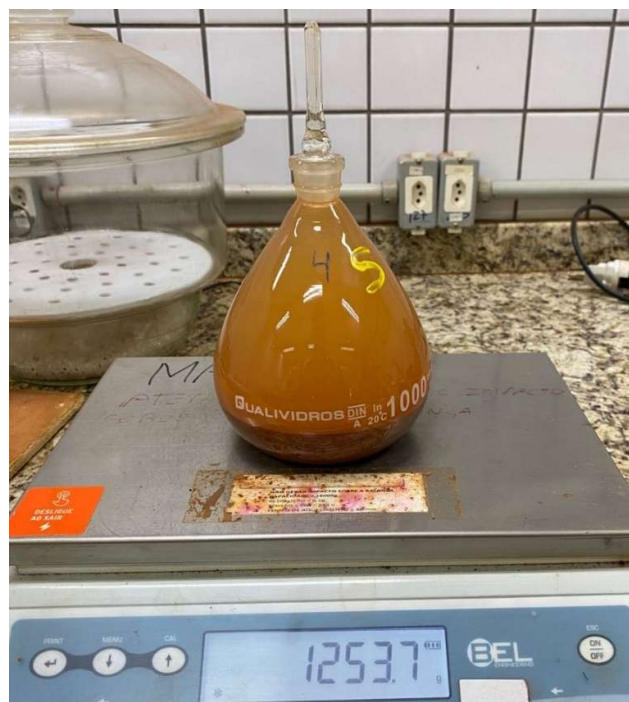
temperatura da amostra e realizou-se a pesagem do picnômetro, conforme preconiza a norma, para o cálculo da massa específica dos sólidos (Figura 14).

Figura 13 - Amostras no processo aplicação de vácuo



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 14 - Pesagem do picnômetro com a amostra



Fonte: Autoria própria (2025)

3.7 Limite de Liquidez

O ensaio de limite de liquidez (LL) foi realizado de acordo com a NBR 6459:2025, utilizando o aparelho de Casagrande. As amostras foram misturadas com água destilada até a obtenção de uma massa pastosa homogênea.

A pasta foi então colocada na concha do aparelho, sendo nivelada com uma espátula até atingir espessura aproximada de 10 mm. Em seguida, com o auxílio de um cinzel padronizado, a amostra foi dividida ao meio, formando uma ranhura central conforme especificado na norma (Figura 15).

Figura 15 - Ranhura feita na amostra para ensaio



Fonte: Autoria própria (2025)

A concha foi recolocada no aparelho de Casagrande, e aplicou-se impacto por meio da manivela, girada a uma velocidade de duas voltas por segundo. Foi anotado o número de golpes necessários para que as bordas da ranhura se unissem em uma extensão de aproximadamente 13 mm.

Após essa etapa, o material que se uniu na região central foi coletado e acondicionado em cápsulas metálicas, para determinação do teor de umidade. As cápsulas foram pesadas e levadas à estufa por 24 horas.

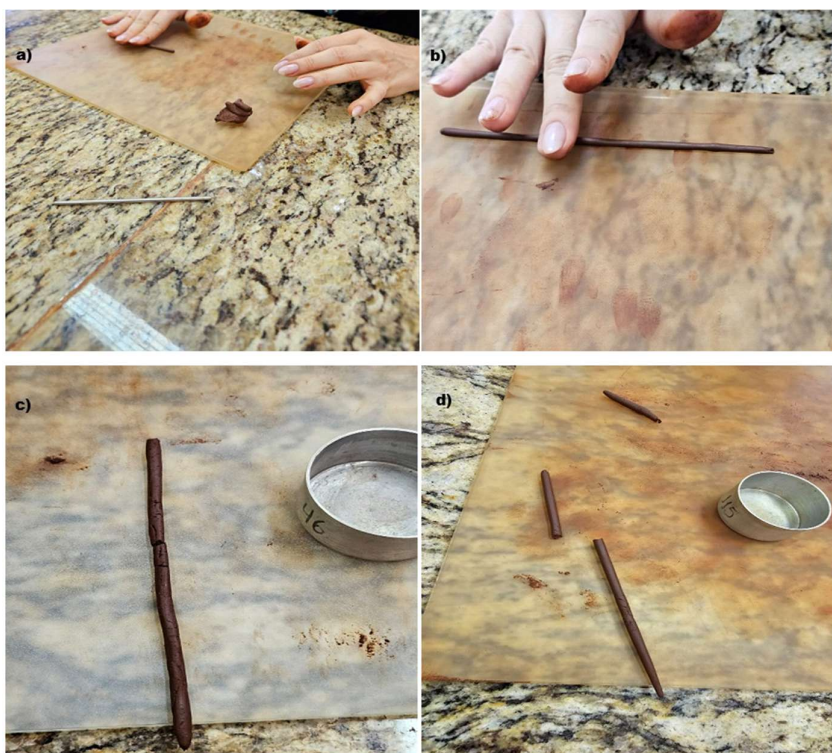
O ensaio foi repetido com diferentes teores de umidade, adicionando-se progressivamente pequenas quantidades de água destilada à mistura. Dessa forma, obteve-se um conjunto de resultados de número de golpes \times umidade, permitindo traçar a curva característica do limite de liquidez.

3.8 Limite de Plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade (LP) foi conduzido conforme a NBR 7180:2025. A amostra, previamente pesada e colocada em cápsula de porcelana, recebeu pequenos incrementos de água destilada, sendo amassada e homogeneizada com espátula até adquirir uma consistência plástica uniforme.

De acordo com o procedimento normativo, foram moldadas pequenas porções de aproximadamente 10 g e roladas sobre uma placa de vidro esmerilhado, aplicando-se pressão contínua com a palma da mão até a formação de cilindros com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, verificados com o gabarito de referência (Figura 16).

Figura 16 - a) Molde da amostra b) Amostra com 3mm de diâmetro c) Amostra fissurada d) Amostra rompida pela fissura



Autor: Aatoria própria (2025)

Quando os fios atingiam a espessura de ruptura próxima a 3 mm, o material era imediatamente acondicionado em cápsulas metálicas e levado à estufa por 24 horas para determinação do teor de umidade correspondente. As cápsulas foram previamente pesadas antes de serem levadas à estufa. Foram realizados três ensaios de limite de plasticidade para cada teor de fibra de polipropileno, permitindo obter um valor médio representativo para cada condição analisada.

Os resultados obtidos nos ensaios de limites de Atterberg permitem calcular parâmetros complementares de consistência e plasticidade do solo. O Índice de Plasticidade (IP) indica a faixa de umidade em que o solo apresenta comportamento plástico, sendo calculado pela Equação (3):

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Em que: LL = Limite de liquidez (%); LP = Limite de plasticidade (%).

O Índice de Consistência (IC) expressa o grau de rigidez do solo na condição natural de umidade e é determinado pela Equação (4):

$$IC = \frac{LL-w}{IP} \quad (4)$$

Em que: w = Umidade natural do solo (%).

A interpretação do IC segue a classificação de Caputo (2019), que indicam:

- IC < 0 = Consistência muito mole;
- 0 < IC < 0,50 = Consistência mole;
- 0,50 < IC < 0,75 = Consistência média;
- 0,75 < IC < 1,00 = Consistência rija;
- IC > 1,00 = Consistência dura.

O Índice de Liquidez (IL) representa o estado de consistência do solo, sendo dado pela Equação (5):

$$IL = \frac{w-LP}{IP} \quad (5)$$

Das e Sobhan (2019) classificam o estado de adensamento do solo com base no IL da seguinte forma:

- IL = 1 = Normalmente adensada;
- IL ≈ 0 = Pré adensada;
- IL > 1 = Extra sensível;
- IL < 0 = Excessivamente pré adensada.

A Atividade Coloidal (AC) expressa a influência da fração argilosa no comportamento plástico do solo e é calculada pela Equação (6):

$$AC = \frac{IP}{\% \text{ de argila}} \quad (6)$$

Em que: % de argila = Percentual de fração de partículas menores que 0,002mm.

O solo foi classificado seguindo os limites:

- $AC < 0,75$ = Solos inativos;
- $0,75 < AC < 1,25$ = Solos de atividade normal;
- $AC > 1,25$ = Solos ativos.

Para o solo estudado, considerou-se uma fração argilosa de 67% conforme Weisheimer *et al.* (2023).

3.9 Limite de Contração

O ensaio de limite de contração (LC) foi realizado com base na NBR 7183:1982 – Determinação do limite de relação de contração de solos, atualmente cancelada, mas utilizada neste trabalho apenas para fins de pesquisa e comparação de resultados.

Para a execução do ensaio, o solo foi misturado com água destilada até a obtenção de uma pasta fluida, homogênea e facilmente trabalhável.

Inicialmente, determinou-se o volume de cada cápsula de inox utilizada, por meio de medições com paquímetro digital. As paredes internas das cápsulas foram lubrificadas com uma fina camada de vaselina, com o objetivo de evitar a aderência do solo às superfícies metálicas.

Em seguida, adicionou-se aproximadamente 1/3 do volume total da mistura de solo em cada cápsula, aplicando-se batidas leves para garantir o preenchimento completo do fundo e evitar a formação de bolhas de ar. O processo foi repetido até o enchimento total da cápsula, como mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Amostras preenchidas com solo para ensaio de contração



Fonte: Autoria própria (2025)

As amostras foram mantidas sobre bancada até observação de mudança na coloração, indicando o início do processo de secagem. Posteriormente, foram levadas à estufa até a estabilização da massa, ou seja, até que não houvesse variação significativa de peso entre duas pesagens consecutivas.

O limite de contração (LC) foi calculado conforme a Equação (7), estabelecida pela NBR 7183:

$$LC = \left(\frac{V_s}{M_s} - \frac{1}{\rho_s} \right) * 100 \quad (7)$$

Em que: V_s = Volume Seco (cm^3); M_s = Massa de Solo Seco (g); ρ_s = Massa específica dos sólidos.

Na sequência, foi calculada a relação de contração (RC), expressa pela Equação (8), que permite avaliar a variação volumétrica do solo durante o processo de secagem.

$$RC = \frac{M_s}{V_s} \quad (8)$$

3.10 Análise Microscópica por Lupa

A análise fotográfica foi realizada com o objetivo de observar as alterações visuais e estruturais do solo laterítico em função da adição de diferentes teores de fibra de polipropileno e variações no teor de umidade.

Durante o preparo do ensaio, a cada incremento de água adicionado ao solo para compor os diferentes pontos da curva característica de liquidez, foram registradas imagens das amostras, permitindo acompanhar as alterações na textura, coloração, brilho superficial e interação entre as partículas.

As fotografias foram feitas para os três teores de fibra avaliados (0%, 0,5% e 1,0%), utilizando microscópio zoom digital com ampliação de 1600×, acoplado a uma câmera de 2,0 MP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios de consistência realizados com o solo laterítico em sua condição natural e com adição de fibras de polipropileno nos teores de 0,5% e 1,0%.

Os resultados são analisados de forma comparativa, a fim de avaliar a influência da adição de fibras sobre os limites de consistência e as propriedades físicas do solo, discutindo também as implicações geotécnicas observadas.

4.1 Massa Específica dos Sólidos

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de massa específica dos sólidos (ρ_s) obtidos para o solo analisado.

Tabela 3 - Resultado da Análise de Massa Específica (ρ_s)

Identificação	w media (%)	Ms (g)	ρ_s (g/cm ³)
1	31,59	76,15	2,8463
2	31,54	76,33	2,7195
3	2,61	97,51	2,3905
Média			2,6519

Fonte: Autoria própria (2025)

O valor médio de $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ é característico de solos derivados de rochas basálticas, o que está de acordo com a geologia predominante da região de Toledo-PR, pertencente à Formação Serra Geral. Esse comportamento está associado à presença de óxidos hidróxidos de ferro e alumínio, responsáveis pela coloração vermelho-escura típica dos solos lateríticos e pela maior densidade mineralógica observada.

De acordo com Borges e Conciani (2023), solos de regiões tropicais intensamente intemperizadas apresentam massa específica dos sólidos próxima de $3,00 \text{ g/cm}^3$, devido ao elevado teor de oxi-hidróxidos de ferro. No entanto, a ocorrência de poros isolados no interior dos agregados lateríticos pode reduzir levemente o valor obtido experimentalmente, justificando o resultado encontrado neste estudo.

4.2 Limites de Consistência

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de limites de Atterberg, LL, LP e LC, realizados para o solo em sua condição natural e com adição de fibras de polipropileno nos teores de 0,5% e 1,0%.

Esses parâmetros permitem avaliar o comportamento do solo em diferentes condições de umidade, representando transições entre os estados de consistência (líquido, plástico e semissólido) e refletindo diretamente na suscetibilidade à deformação e à retração volumétrica.

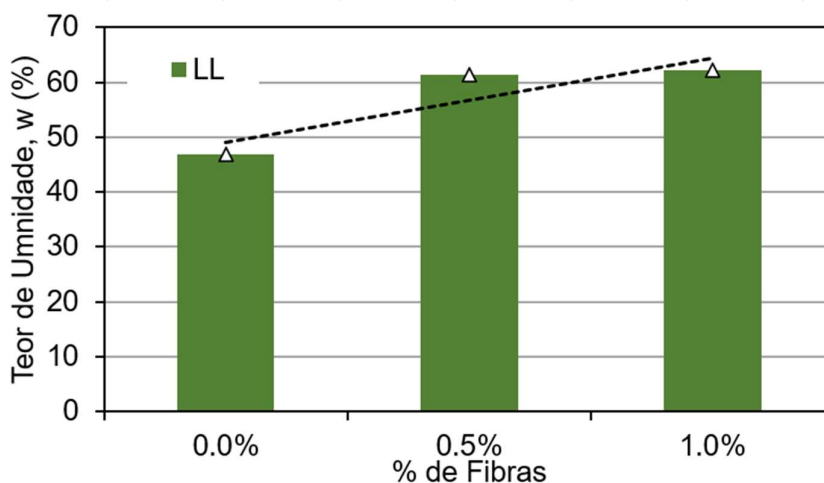
Complementando os dados numéricos, os gráficos comparativos apresentados nas Figuras 18, 19 e 20 ilustram a variação dos limites em função do teor de fibras, possibilitando uma visualização clara das tendências de variação e da influência do reforço nas propriedades físicas do solo.

Tabela 4 - Valores de Limites de Consistência

Teor de Fibra de Polipropileno (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IC	IL	AC
0,0	46,87	40,50	23,70	6,36	2,02	-1,02	0,09
0,5	61,32	39,40	24,43	21,91	1,25	-0,25	0,33
1,0	62,18	34,95	29,64	27,24	1,03	-0,03	0,41

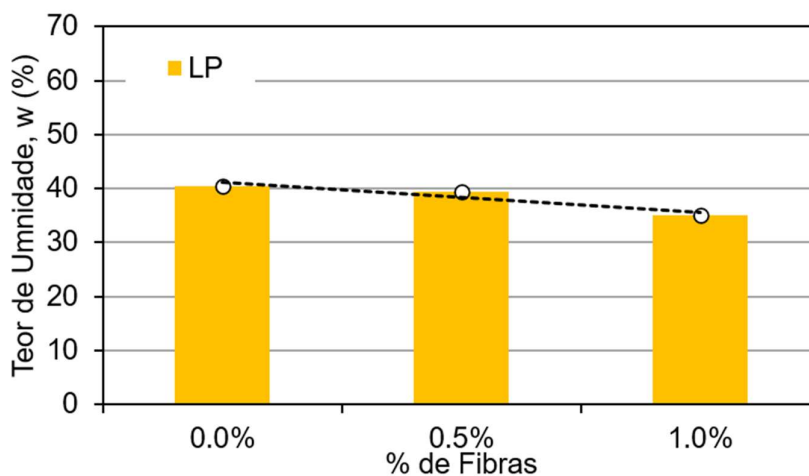
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 18 - Variação do limite de liquidez em função do teor de fibra de polipropileno



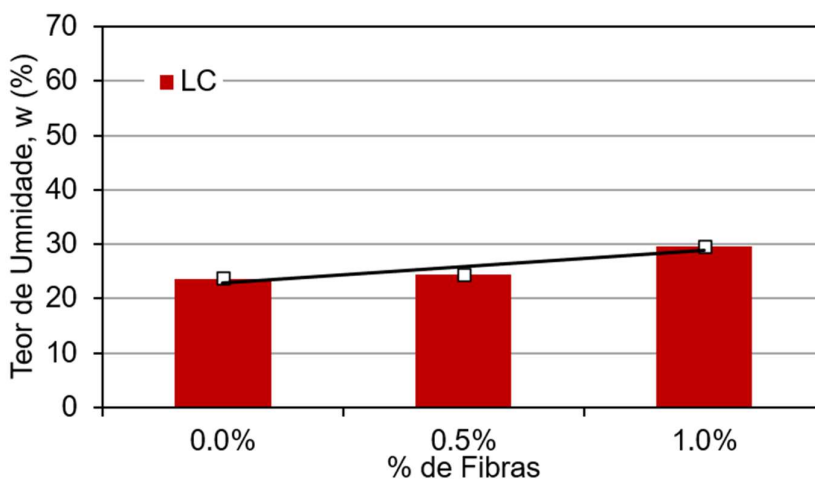
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 19 - Variação do limite de plasticidade em função do teor de fibra de polipropileno



Autoria própria (2025)

Figura 20 - Variação do limite de contração em função do teor de fibra de polipropileno



Fonte: Autoria própria (2025)

Para o solo natural (0% de fibra), o limite de liquidez ($LL = 46,87\%$) é inferior a 50%, e o limite de plasticidade ($LP = 40,50\%$) resulta em um índice de plasticidade ($IP = 6,36\%$), classificando-o como pouco plástico. O índice de consistência ($IC = 2,02$) indica que o solo apresenta comportamento rígido a semissólido, com baixa deformabilidade, enquanto o índice de liquidez ($IL = -1,02$) confirma que o solo se encontra abaixo do limite plástico, ou seja, entre os estados sólido e semissólido.

Além disso, o baixo valor da atividade coloidal ($AC = 0,09$) reforça a predominância de partículas caulínicas, típicas de solos lateríticos, indicando baixa expansividade e limitada capacidade de adsorção de água.

Com a adição de 0,5% de fibra, observou-se aumento significativo do LL (61,32%), indicando maior capacidade de retenção de umidade. O LP manteve-se próximo (39,40%), mas o IP aumentou para 21,91.

O do IP indica que o solo reforçado apresenta maior capacidade de deformação e comportamento mais dúctil, sendo capaz de suportar maiores deformações sem ruptura.

Contudo, é importante destacar que o aumento da plasticidade nem sempre é benéfico em todas as aplicações geotécnicas. Em obras como camadas de pavimento ou fundações superficiais, plasticidades elevadas podem levar ao aumento da deformabilidade e à redução da capacidade de suporte.

Assim, o comportamento mais plástico observado neste estudo deve ser interpretado como um indicativo de maior flexibilidade e retenção de umidade, características que podem ser vantajosas em obras que demandem controle de retração ou resistência à fissuração.

A atividade coloidal ($AC = 0,33$) também aumentou, indicando maior interação entre as partículas finas do solo e as fibras de polipropileno, o que potencializa a interação entre as partículas, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Amostra de solo com adição de 0,5% de fibra de polipropileno



Fonte: Autoria própria (2025)

Para o teor de 1,0% de fibra, Figura 22, o LL (62,18%) manteve-se praticamente constante em relação ao teor anterior, enquanto o LP reduziu para

34,95%, ampliando o IP para 27,24%.

O IC (1,03) e o IL (-0,03) indicam que o solo tem menor rigidez, mais deformável, mas ainda dentro do comportamento semissólido, atingindo um estado de equilíbrio ideal entre rigidez e deformabilidade.

Esse comportamento demonstra que o solo reforçado com 1,0% de fibra de polipropileno se torna mais deformável e maleável, com menor suscetibilidade à formação de fissuras durante a secagem e maior resistência à tração, resultante da melhor distribuição das tensões internas promovida pelas fibras.

Figura 22 - Amostra de solo com 1,0% de fibra de polipropileno



Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados obtidos neste estudo diferem parcialmente dos apresentados por Aishwarya e Rachel (2023), que observaram leve redução do LL e do IP em um solo argilo-arenoso reforçado com fibras de basalto, indicando diminuição da plasticidade e maior estabilidade volumétrica. Nesse caso, o comportamento foi atribuído à rigidez do basalto, que atua restringindo a deformação e a movimentação das partículas finas.

Por outro lado, o presente estudo, apresentou resultados semelhantes aos de Ojefia, Eberemu e Ajiboye (2024), que verificaram aumento dos limites de liquidez e de plasticidade em um solo argiloso reforçado com fibras de coco, atingindo o maior IP (26%) com 1,5% de fibra. Esse comportamento foi associado à capacidade das

fibras naturais de reter água e de formar uma estrutura mais dúctil e deformável, fenômeno também observado nas amostras de solo laterítico com polipropileno.

Em contraste, Taha, Feng e Ahmed (2020), embora também tenha sido utilizada a fibra de polipropileno, observou-se comportamento oposto em um solo argiloso de alta plasticidade (CH), no qual os valores de LL e IP diminuíram. Essa diferença se deve às características intrínsecas do solo, uma vez que solos altamente plásticos já possuem elevada capacidade de deformação, de modo que a inclusão de fibras atua reduzindo a plasticidade e aumentando a estabilidade volumétrica: comportamento que não contradiz o observado neste estudo, mas reflete o efeito do tipo de solo sobre a resposta mecânica do reforço.

De forma geral, os resultados demonstram que o efeito das fibras nos limites de consistência depende fortemente do tipo de solo, da mineralogia e da rigidez do reforço utilizado. Nos solos lateríticos estudados, a presença das fibras de polipropileno promoveu maior retenção de umidade e aumento da plasticidade, comportamento que pode ser vantajoso em obras geotécnicas sujeitas a variações de umidade, por reduzir a formação de fissuras e aumentar a deformabilidade controlada do maciço.

Em relação ao limite de contração (LC), observa-se aumento dos valores com a adição de fibras, indicando que o solo reforçado mantém maior volume após o processo de secagem. Esse comportamento demonstra que as fibras de polipropileno atuam como elementos de reforço, restringindo a movimentação das partículas finas e reduzindo a retração volumétrica do solo.

Dessa forma, as fibras impedem a formação de fissuras e minimizam o colapso estrutural durante a perda de umidade, contribuindo para uma maior estabilidade e integridade física do material. É importante ressaltar que o reforço com fibras de polipropileno não altera quimicamente o solo, mas modifica sua resposta física, sendo especialmente eficaz em situações que exigem controle de retração, redução de fissuração e melhor desempenho pós-fissura, conforme ilustrado na Figura 23.

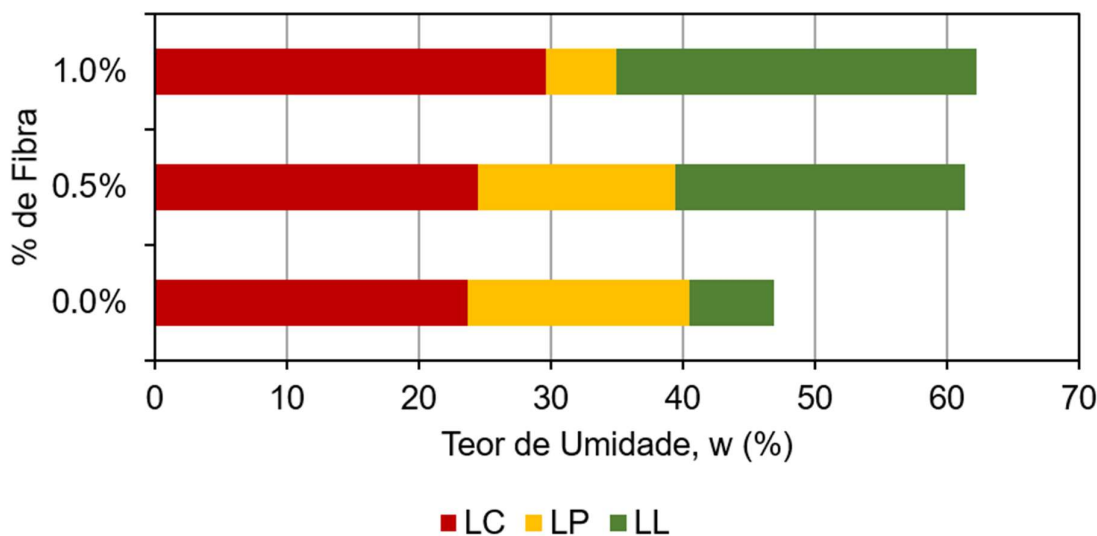
Figura 23 - Efeito da adição de fibras de polipropileno ao solo após secagem na estufa: A) 0% de fibra; B) 0,5% de fibra; C) 1% de fibra



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 24 apresenta de forma comparativa a variação dos limites de consistência (LL, LP e LC) em função do teor de fibras de polipropileno incorporadas ao solo. Observa-se que o aumento do teor de fibra promoveu elevação progressiva do LL e do LC, enquanto o LP apresentou tendência de redução com 1,0% de fibra. Esse comportamento confirma que a incorporação das fibras favorece maior retenção de umidade e reduz a retração volumétrica, uma vez que as fibras atuam restringindo o deslocamento das partículas finas e retardando a perda de água durante o processo de secagem.

Figura 24 - Comparação dos limites de consistência em função do teor de fibra



Fonte: Autoria própria (2025)

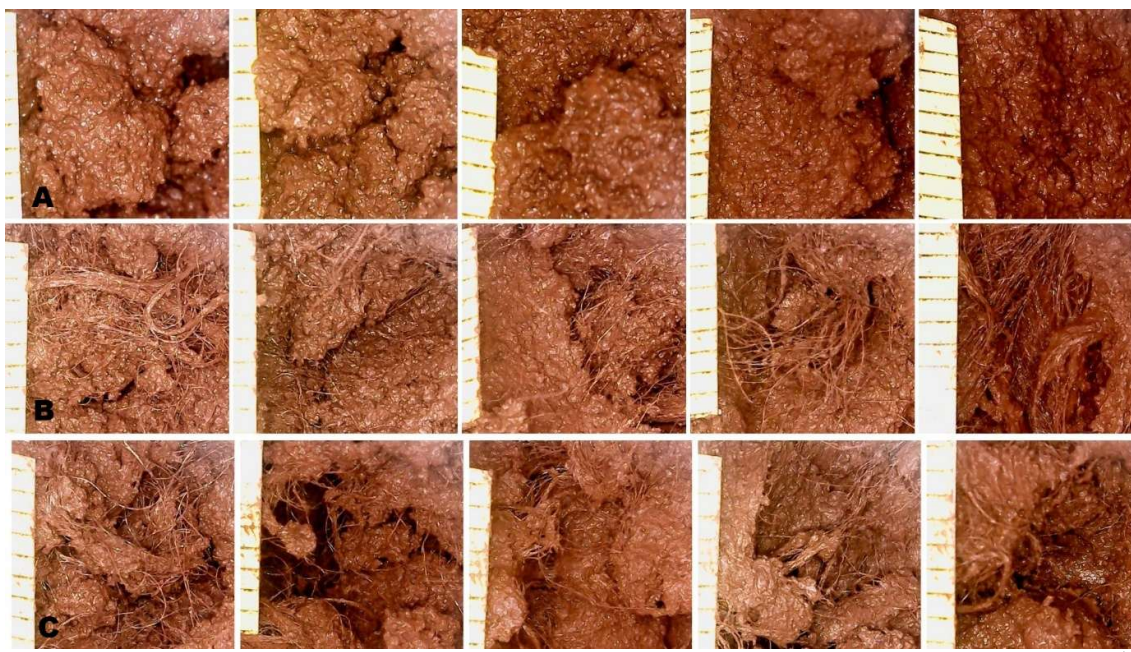
Além disso, a ampliação da faixa entre LC e LL indica aumento da plasticidade total do solo reforçado, o que está de acordo com os resultados numéricos obtidos (Tabela 4) e com as observações fotográficas das amostras moldadas. Esse comportamento é desejável em aplicações geotécnicas, pois resulta em materiais mais deformáveis e menos suscetíveis à fissuração sob variações de umidade.

4.3 Análise Microscópica por Lupa

As imagens obtidas por meio da análise fotográfica permitem compreender como as fibras interagem com a matriz do solo e influenciam sua estrutura durante o processo de umedecimento, conforme apresentado na Figura 25.

Nas amostras sem adição de fibras (0%), observa-se que o solo apresenta superfície mais lisa e homogênea, mas também maior tendência à fissuração e retração com a redução da umidade.

Figura 25 - Aspecto das amostras com teores de água de 43%, 45%, 47%, 49% e 51% respectivamente incorporadas a A) 0% de fibra; B) 0,5% de fibra; C) 1% de fibra de polipropileno



Fonte: Autoria própria (2025)

w (%)

Durante o preparo das amostras, observou-se que a homogeneização do solo com as fibras foi consideravelmente mais difícil, principalmente para os teores de 0,5% e 1,0%.

As fibras de polipropileno tendem a se agrupar devido à sua baixa densidade e alta flexibilidade, o que dificulta sua dispersão uniforme na matriz do solo. Esse comportamento é visível nas imagens, nas quais as fibras aparecem distribuídas de forma irregular em algumas regiões.

Com a adição de 0,5% de fibra de polipropileno, nota-se melhor interação entre as partículas, e maior continuidade superficial do solo. As fibras atuam como ponte de ligação entre os grãos, auxiliando na retenção de umidade e proporcionando uma estrutura mais estável. O solo apresenta aspecto mais uniforme e leve aumento na plasticidade aparente.

Nas amostras com 1,0% de fibra, o efeito de reforço é ainda mais perceptível: o solo mantém estrutura mais integrada e resistente à desagregação, mesmo com variação da umidade.

4.4 Discussão sobre a Aplicação Geotécnica e Sustentável da Fibra de Polipropileno

Os resultados obtidos demonstram que a adição de fibras de polipropileno promoveu alterações significativas nas propriedades físicas e de consistência do solo laterítico estudado. O aumento do limite de liquidez e da atividade coloidal, aliado à redução da rigidez, indica que o material reforçado se torna mais deformável, menos suscetível à fissuração e mais resistente à tração.

Essas características são particularmente desejáveis em obras de pavimentação, aterros compactados e estruturas de contenção, onde o solo está sujeito a variações de umidade e tensões cíclicas.

A fibra de polipropileno, por ser um material sintético leve, inerte e não higroscópico, atua como um reforço físico disperso, estabilizando o solo sem recorrer a processos químicos que alterem sua mineralogia. Essa forma de melhoramento reduz a necessidade do uso de agentes cimentantes convencionais, como cimento e cal, que embora eficazes, possuem alto impacto ambiental devido às emissões de CO₂ durante sua produção.

Nesse contexto, o uso de fibras representa uma alternativa sustentável e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao incentivar o desenvolvimento de técnicas mais limpas e materiais reutilizáveis. Além disso, as fibras de polipropileno são facilmente obtidas no mercado nacional, o que viabiliza sua aplicação em larga escala, com baixo custo e simplicidade de execução em campo.

Entretanto, durante a fase experimental, verificou-se que a mistura solo-fibra apresenta maior dificuldade de homogeneização, principalmente para teores acima de 0,5%, devido à tendência de aglomeração das fibras. Essa limitação indica a necessidade de aperfeiçoar os métodos de mistura e compactação, buscando melhor dispersão do reforço no solo e maior uniformidade de resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que a adição de fibras de polipropileno modificou significativamente o comportamento físico e de consistência do solo laterítico, indicando potencial técnico para sua utilização como material de reforço em obras geotécnicas.

O solo natural apresentou baixa plasticidade e alta rigidez, características típicas de solos derivados de rochas basálticas. Com a incorporação de fibras, observou-se aumento expressivo dos limites de liquidez e plasticidade, acompanhado de redução do índice de consistência, o que revela maior capacidade de retenção de umidade e maior deformabilidade antes da ruptura. Esses resultados indicam que o material reforçado apresenta comportamento mais dúctil e menos suscetível à fissuração, propriedades desejáveis em camadas de pavimentos, aterros compactados e estruturas de contenção.

A análise fotográfica confirmou visualmente o efeito das fibras, evidenciando melhor interação entre partículas e redução da retração volumétrica durante a secagem. Contudo, verificou-se maior dificuldade na preparação das amostras, principalmente na etapa de homogeneização, devido à dificuldade de mistura das fibras com o solo, especialmente para teores acima de 0,5%, devido à tendência de aglomeração das fibras, aspecto que deve ser aprimorado em trabalhos futuros.

Em termos de sustentabilidade, o uso de fibras de polipropileno representa uma alternativa viável aos estabilizantes convencionais, como cimento e cal, contribuindo para a redução de emissões de CO₂ e para o desenvolvimento de soluções mais ambientalmente responsáveis no contexto geotécnico.

Assim, conclui-se que a incorporação de fibras de polipropileno constitui uma opção técnica e sustentável para o melhoramento físico de solos lateríticos, apresentando potencial de aplicação prática em obras onde se busca maior estabilidade, ductilidade e durabilidade do maciço de solo.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

- Avaliar o comportamento laterítico a partir da classificação MCT expedita;
- Avaliar a microestrutura a partir de ensaios com maior ampliação: MEV (microscopia eletrônica de varredura), MIP (microscopia de intrusão de mercúrio);

- Avaliar o comportamento quanto o desenvolvimento de fissuras quanto a contração em frente a secagem;
- Como continuidade deste estudo, sugere-se a realização de novos ensaios em amostras preparadas com secagem prévia a diferentes temperaturas (60 °C e 100 °C), de modo a avaliar se o processo de secagem influencia o comportamento de consistência do solo reforçado. Essa análise permitiria compreender eventuais variações nas interações entre as fibras e a matriz do solo, especialmente no que se refere à retenção de umidade, retração e estabilidade volumétrica.

REFERÊNCIAS

AHNBERG, H. **Strength of stabilised soils: A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder**. Thesis (Doutorado) - Department of construction Sciences, Lund University. Lund, 2006.

AISHWARYA R.; RACHEL P.P.; **Comparative study on Atterberg limits of soil and basalt fiber composite as an eco-friendly construction material**. Mater Today Proc 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.212>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457:2024 – Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0mm. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solos – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solos – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7183**: Solo – Determinação do limite de contração. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9604**: Abertura de poço ou trincheira de inspeção, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9604**: Abertura de poço ou trincheira de inspeção, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BENJAMIM, C. V. S. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. Tese de Doutorado. EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos, 294p., 2006.

BREMNER, T.W. **Environmental aspects of concrete: problem and solutions**. All Russian Conference On Concrete And Reinforced Concrete, 1. Rússia, 2001. P. 1-14.

BRITISH PETROLEUM. **BP statistical review of world energy: June 2007**. Londres: BP, 2007. 48 p.

BURGOS, A. C. P.; CONCIANI, W. [*Índices físicos, textura, consistência e classificação de solos*]. In: CARVALHO, J. C. de; PEREIRA, J. C.; FERNANDES, R. B. (orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2023. p. [265-294].

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G. **Unsaturated soils in the context of tropical soils**. Soils and Rocks. An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 44 (3). 2021. p. [2-15]. Disponível em: doi.org/10.28927/SR.2021.068121.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; VILLAR, L. F. de S.; GUIMARÃES, R. C.; RODRIGUES, J. K. G.; AZEVEDO, R. F. [*Compactação dos solos: laboratório e campo*]. In: CARVALHO, J. C. de; PEREIRA, J. C.; FERNANDES, R. B. (orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2023. p. [353-402].

CAPUTO, H. V. **Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

CONSOLI, N.C., THOMÉ, A., GIRARDELLO, V., & Ruver, C.A. **Comportamento de elevação de placas embutidas em aterro estabilizado com cimento reforçado com fibras**. *Geotêxteis e Geomembranas*, 35, 107-111. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.09.002>.

CRISPIM, F. A.; LIMA, D. C.; SHAEFER, C. E. G.R.; SILVA, C. H. C.; CARVALHO, C. C. B.; BARBOSA, P. S. A.; BRANDÃO, E. H. **The influence of laboratory compaction methods on soil structure: mechanical and micromorphological analysis**. *Soils and Rocks*, p. 91-98, 2011.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 4. ed. Porto Alegre: +A Educação - Cengage Learning Brasil, 2019.

EHRlich, M.; ALMEIDA, S.; CURCIO, D. **Hydro-mechanical behavior of a lateritic fiber-soil composite as a waste containment liner**. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(1), 42-47. 2019.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.09.005>

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Rio de Janeiro). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 306 p., 2006.

FERREIRA, S. R. de M.; OLIVEIRA, J. T. R.; GONZÁLEZ Y.V. *[Técnicas de amostragem e preparação de amostras]*. In: CARVALHO, J. C. de; PEREIRA, J. C.; FERNANDES, R. B. (orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2023. p. [215-264].

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

FLUTCHER, S.; WU, J.T. H. **A state-of-the-art review on geosynthetics in low-volume asphalt roadway pavements**. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 7, n. 4, p. 411-419, 2013.

GONGÓRA, I. A. M. G. **Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: Influência de Propriedades Físicas e Mecânicas do Reforço.** Tese (Doutorado), Publicação G.TD-105/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p., 2015.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering.** Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, 34 p, 1981.

HORPIBULSUK S.; SUDDEEPONG A.; CHAMKET P.; CHINKULKIJNIWAT A. **Compaction behavior of fine-grained soils, lateritic soils and crushed rocks.** *Soils And Foundations*, [S.L.], v. 53, n. 1, p. 166-172, fev. 2013.

HUANG, J.; KOGBARA, R. B.; HARIHARAN, N.; MASAD, Eyad A.; LITTLE, D. N. **A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization.** *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 305, p. 124685, out. 2021.

KÉDZI, A. **Stabilized Earth Roads.** 1. ed. New York: Elsevier scientific publishing company, 1979.

LAMBE, T.W. (1958). **The Structure of Compacted Clay.** *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, American Society of Civil Engineers, v. 84, pp. 1-34.

LIU, X.; YAN, S.; LIU, L. **Reinforcement of Silty Soil via Regenerated Fiber Polymer: A Study on Microscopic Mechanisms.** *Materials* 2023, 16, 6741. 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16206741>

MARIRI M.; ZIAIE MOAYED, R.; KORDNAEIJ, A. **Comportamento tensão-deformação de solo de loess estabilizado com cimento, zeólita e fibra de poliéster reciclada.** *J. Mater. Civ. Eng.* 2019, 31, 04019291.

MELFI, A. J.; PEDRO, G. **Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil.** *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 7, p.271-286, 1977.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Os Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação**. In: 18ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1983, Porto Alegre. Anais... p. 463-484.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

OJEFIA, F. E.; EBEREMU, A. O.; AJIBOYE, S. T. **The Effect of Coir Fiber on the Geotechnical Properties of Clayey Soil, in Wudil, Northwest, Nigeria**. International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications, v. 6, n. 2, p. 203–212, 2024.

OLDRA, L. F. D. C. **Contribuição para a caracterização do subsolo do município de Toledo - PR para fins de geotecnia**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2022.

PARANÁ. **Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG)**. Mapa de Solos do Estado do Paraná. Curitiba, 2007.

PASCOAL, P. T. **Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e de deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2020.

PINTO, A.R.A.G. **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, PUC Rio de Janeiro, Brasil, 103p, 2008.

PROCTOR, R. R. **Fundamental principles of soil compaction**. Engineering News-Record, v. 111, n. 9, p. 245-248, 1933.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SHUKLA, S.K. **Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering** (Developments in Geotechnical Engineering). Switzerland: Springer. 2017.

SILVA, E. R. **Comportamento mecânico de solo reforçado com fibra de Curauá (Ananas erectifolius)**: 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

SURESH K.; SITESH K. S. **Subgrade soil stabilization using geosynthetics: A critical review**. Materials Today: Proceedings, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.266>.

TAHA, M. M. M.; FENG, C. P.; AHMED, S. H. S. **Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil**. Advances in Polymer Technology, v. 2020, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/9512839>.

WEISHEIMER, S. I.; BARRETO, Y. S. L., COSTA, G.A.S.; OLIVEIRA, P .C.; Ito, W .H. **Amostragem e caracterização preliminar de um solo residual de basalto do oeste do Paraná – práticas de campo e laboratório**. In: XIII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul - GEOSUL, Ponta Grossa. Anais... ABMS. v. 1, p. 317-324. 2023.

WILSON, A. D. **Rigid highly carboxylated ionic polymers**. Ionic Polymers. Chapman and Hall, New York, 1975.