



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DÉBORA SOARES ALVES

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DE SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA-PE COM ADIÇÃO DE FIBRA DE POLIPROPILENO, CASCA DE COCO
E PNEU**

Recife
2022

DÉBORA SOARES ALVES

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DE SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA-PE COM ADIÇÃO DE FIBRA DE POLIPROPILENO, CASCA DE COCO
E PNEU**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira.

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

A474a	Alves, Débora Soares. Análise comportamental de solo expansivo do município de Paulista-PE com adição de fibra de polipropileno, casca de coco e pneu / Débora Soares Alves. – 2022. 49 f.: il., fig., quad., gráf. Orientador: Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Recife, 2022. Inclui referências. 1. Engenharia civil. 2. Solo expansivo. 3. Caracterização. 4. Fibras. I. Ferreira, Sílvio Romero de Melo (Orientador). II. Título. UFPE 624 CDD (22. ed.) BCTG/2022-440
-------	--

DÉBORA SOARES ALVES

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DE SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA-PE COM ADIÇÃO DE FIBRA DE POLIPROPILENO, CASCA DE COCO
E PNEU**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociências, como requisito parcial para
a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 25/05/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Odete Mariano (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Pedro Eugênio Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem a permissão Dele nada disso teria acontecido. À toda minha família pelo apoio e incentivo em mais uma conquista acadêmica, em especial a meus pais Valdemir e Célia, minha avó Maria e ao meu noivo Alcinésio pelas orações e constante incentivo nessa trajetória. Ao prof. Dr. Silvio Romero pela orientação, dedicação, paciência e conhecimentos transmitidos desde 2018.2 quando o conheci na cadeira de Mecânica dos Solos 1. A todos os professores que influenciaram na minha trajetória acadêmica e de vida. À equipe técnica do Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, em especial a Gutemberg pela atenção e por toda a orientação durante a realização dos ensaios para esta pesquisa. A doutoranda Aline por toda paciência e dedicação no auxílio dos ensaios de laboratório e aos mestrandos Hítalo e Otávio pela parceria nesta pesquisa. Aos meus amigos Carlos, Clauber, Edinaldo, Tibérius, Yasmim e Wagner que estiveram comigo durante toda a trajetória universitária, me dando suporte e tornando o ambiente um local mais enriquecedor e agradável. E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Solos expansivos são solos coesivos que aumentam de volume quando umedecidos e se contraem quando ressecam. Eles são problemáticos para edificações e obras de infraestrutura, causando danos socioeconômicos e ambientais. O material estudado é uma argila siltosa expansiva do Município de Paulista/PE e o objetivo da pesquisa é identificar e caracterizar o solo de forma física e mecânica com a adição de três tipos de fibras: polipropileno, casca de coco e pneu. O processo adotado visa analisar as interações entre esses materiais, realizando ensaios reológicos e de resistência, além de se obter uma caracterização do solo natural. O solo expansivo de Paulista estudado é uma argila de alta compressibilidade com consistência de média a rija e com percentual de argila variando de 28% a 47%. A inserção das fibras de polipropileno ao solo praticamente não alterou os valores dos limites de consistência e do índice de plasticidade, estas fibras não absorvem água a partir do solo. A adição das fibras de pneu provocou uma diminuição nos valores do limite de liquidez e pequenas variações nos valores do limite de plasticidade (exceto para 0,25% de fibra), havendo uma diminuição do índice de plasticidade. Ao se adicionar das fibras de coco ao solo os limites de consistência e o índice de plasticidade cresceram, estas fibras absorvem água elevando os limites e índices. No ensaio reológico observou-se que as curvas do solo e das misturas fluíram de forma contínua, sem que houvesse alguma parada de carga ou de fluir, mostrando a homogeneidade das amostras, e verificando que não houve nenhuma oscilação de carga. Neste ensaio foi verificado que quanto maior a umidade, menor é a carga para que se atinja um certo deslocamento. No ensaio de compressão simples foi constatado que as fibras proporcionam um aumento significativo de resistência ao solo. Portanto, de acordo com os ensaios realizados pôde-se concluir que a adição das fibras de polipropileno, casca de coco e pneu proporcionou um ganho significativo ao solo, reduzindo a expansividade e agregando maior resistência ao solo estudado.

Palavras-chave: solo expansivo; caracterização; fibras.

ABSTRACT

Expansive soils are cohesive soils that increase the volume when they moistened and contract when they dry out. They are problematic for buildings and infrastructure works, causing socioeconomic and environmental damage. The material studied is an expansive silty clay from the city of Paulista/PE and the objective of the research is to identify and characterize the soil physically and mechanically with the addition of three types of fibers: polypropylene, coconut shell and tire. The adopted process aims to analyze the interactions between these materials, performing rheological and resistance tests, in addition to obtaining a characterization of the natural soil. The expansive soil of Paulista studied is a highly compressible clay with medium to hard consistency and clay percentage ranging from 28% to 47%. The insertion of polypropylene fibers into the soil practically did not change the values of the consistency limits and the plasticity index, these fibers do not absorb water from the soil. The addition of tire fibers caused a decrease in the liquidity limit values and small variations in the plasticity limit values (except for 0.25% fiber), with a decrease in the plasticity index. When adding coconut fibers to the soil, the consistency limits and the plasticity index increased, these fibers absorb water, raising the limits and indexes. In the rheological test, it was observed that the curves of the soil and of the mixtures flowed continuously, without any load or flow stop, showing the homogeneity of the samples, and verifying that there was no load oscillation. In this essay was verified that the higher the humidity, the lower the load to reach a certain displacement. In the simple compression test it was found that the fibers provide a significant increase in resistance to the soil. Therefore, according to the tests carried out, it was possible to conclude that the addition of polypropylene fibers, coconut shell and tire provided a significant gain to the soil, reducing the expansiveness and adding greater resistance to the studied soil.

Keywords: expansive soil; characterization; fibers.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	9
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1	SOLOS EXPANSIVOS.....	10
2.1.1	Identificação dos Solos Expansivos.....	11
2.1.2	Ocorrência de Solos Expansivos.....	11
2.2	FISSURAS POR DESSECAÇÃO.....	13
2.3	SQUEEZE - FLOW	13
2.4	MELHORAMENTO DO SOLO COM FIBRA.....	14
2.4.1	Fibra de Polipropileno	16
2.4.2	Fibra de Casca de Coco	16
2.4.3	Fibra de Pneu.....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO.....	19
3.2	ENSAIO REOLÓGICO – SQUEEZE FLOW.....	19
3.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO EDOMÉTRICA.....	21
3.4	ENSAIO DE EXPANSÃO LIVRE.....	21
3.5	ENSAIO DE TENSÃO DE EXPANSÃO.....	21
3.6	ENSAIO DE RESISTÊNCIA.....	22
3.6.1	Ensaio de Compressão Simples.....	22
3.6.2	Ensaio de Tração por Compressão Diametral.....	23
4	RESULTADOS.....	26
4.1	CLASSIFICAÇÃO FÍSICA DO SOLO NATURAL.....	26
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSIVIDADE.....	28
4.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SOLO COM FIBRA.....	32
4.3.1	Reologia - Squeeze Flow.....	34
4.3.2	Compressão Simples.....	39
4.3.3	Compressão Diametral.....	40
5	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos são problemáticos para edificações e obras de infraestrutura em todo o mundo, causando danos socioeconômicos e ambientais. Esses solos são a causa de diversas manifestações patológicas em obras assentadas sobre eles, podendo ocasionar trincas, fissuras e até mesmo ruptura das construções.

Embora as implicações econômicas acerca dos custos dos danos causados por solos expansivos sejam limitados em todo o mundo, estima-se que anualmente os prejuízos causados por esses solos no Reino Unido custam cerca de US \$ 150 milhões e pelo menos US \$ 4 milhões na África do Sul, enquanto que nos Estados Unidos as argilas expansivas já causaram danos que excedem US \$ 10 bilhões, sendo este valor maior do que o gasto com a recuperação dos danos ocasionados por desastres naturais como inundações, furacões e ciclones no país (GOURLEY et al., 1993; STEINBERG, 1998; MURTHY, 2003).

Frequentemente, são identificados em regiões áridas ou semiáridas, onde a variação de umidade é grande, ou seja, locais em que a evapotranspiração excede a precipitação volumétrica. Em Pernambuco, há registros de ocorrência nos municípios de: Afrânio, Petrolina, Cedro, Cabrobó, Salgueiro, Floresta, Serra Talhada, Petrolândia, Inajá, Ibimirim, Carnaíba, Nova Cruz, Paulista, Ipojuca, Olinda, Recife e Cabo de Santo Agostinho (FERREIRA et al., 2008).

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas pelo grupo de pesquisa de Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco (GÑsat/UFPE) com solos expansivos, visando compreender os fenômenos de expansão e contração, bem como melhorar o comportamento de fissuração desse tipo de solo para fins de aplicação geotécnica, a citar Ataíde e Ferreira (2016), Moraes e Ferreira (2018), Araújo (2019), Barbosa (2019) e Silva (2019). Mais recentemente vem sendo analisado o efeito de tração dos solos com adição de fibras no desenvolvimento da tese de Aline Cátia Silva e das dissertações de Hítalo José Tavares de Araújo e Otávio Wesley Cavalcanti Faustino. O TTC encontra-se inserido nesta abordagem de melhoramento do solo.

Portanto, como as argilas expansivas são consideradas problemáticas, este trabalho analisa o efeito da adição de fibras de polipropileno, fibras de casca de coco e fibras de pneu no comportamento de compressão e tração de um solo expansivo

de forma a agregar conhecimento na formulação de novos métodos para avaliar esse tipo de solo, aspectos sobre parâmetros de fratura e comportamento reológico do solo e das misturasformadas

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Devido à grande problemática que os solos expansivos causam em obras de engenharia civil assentados sobre eles achou-se necessário o desenvolvimento de melhorias mecânicas para este tipo de material uma vez que este tem alta susceptibilidade de ocorrência na região nordeste do Brasil sendo favorecido pela formação geológica.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento do solo expansivo não saturados, coletado no município de Paulista-PE e analisar suas características físicas e mecânicas com adição de fibras de polipropileno, fibra de casca de coco e fibra de pneu.

Como objetivos específicos, temos:

- Obter a caracterização física e mecânica do solo expansivo de Paulista-PE para contribuir com o banco de dados de solos expansivos do estado de Pernambuco;
- Analisar o efeito da interação solo fibra no comportamento reológico de um solo expansivo;
- Orientar no planejamento do uso e ocupação dos solos quanto ao risco à expansividadedos solos e redução do passivo ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

São abordados temas relacionados aos solos expansivos, como constituição, formas de identificação, ocorrências a nível nacional e internacional e fatores influentes nos mecanismos de expansão e contração. É discutido acerca do mecanismo de fissuração e da resistência à tração. Ainda é apresentada uma revisão sobre as técnicas de melhoria e reforço de solos, sobretudo os expansivos, sendo estas inseridas ao contexto de materiais compósitos.

2.1 SOLOS EXPANSIVOS

Os solos expansivos são solos não saturados que apresentam textura argilosa, baixa drenagem, alta atividade e sofrem deformações de expansão e contração com o surgimento de fissuras em sua superfície, em virtude da variação de umidade ou sucção, resultante de repetidos ciclos de molhagem e secagem, que por sua vez são decorrentes de condicionantes ambientais (CHEN, 1988; NELSON; MILLER, 1992; FERREIRA, 1995; STEINBERG, 1998).

As mudanças significativas de volume sofridas pelos solos expansivos associam-se principalmente as variações de umidade sazonais, isto é, em estações de alta umidade há o inchamento do solo expansivo, enquanto nas estações secas a água do solo evapora, fazendo com que este contraia e fissure (BEIXIAO et al., 2014).

Segundo Ferreira (1995) para que determinado tipo de solo seja expansivo deve apresentar as seguintes características mineralógicas: argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, combinação de duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica, principalmente do grupo esmectitas. Nas montmorilonita e vermiculitas verifica-se uma maior instabilidade volumétrica, além dos interestratificados de montmorilonita como a clorita, illita e vermiculita ou até mesmo de outros minerais, como a halosita também apresentam capacidade de expansão, porém mais limitada. Existem outros fatores condicionantes ligados ao solo, como: distribuição das partículas de argila, porosidade, orientação mineralógica, cimentação, entre outros; e estruturais: perfil estratigráfico, espessura do solo e descontinuidade, que influenciam igualmente o potencial expansivo do solo.

2.1.1 Identificação dos Solos Expansivos

A identificação dos solos expansivos pode ser realizada através de dois critérios. O primeiro é baseado em observações superficiais de dados prévios, tais como topografia, vegetação, sinais de contração do solo, fissuras nas edificações e informações com os moradores da região. O segundo critério consiste na interpretação de ensaios de laboratório dos métodos de identificação. Segundo Ferreira (1995), os métodos de identificação de um solo expansivo são divididos em métodos indiretos e diretos. Os métodos indiretos são divididos em identificativos, orientativos e qualitativos. Os métodos diretos consistem na avaliação em laboratório da expansão induzida ou do reconhecimento da tensão necessária para impedir a expansividade do solo, Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos métodos diretos e indiretos para identificação dos solos expansivos.

Métodos	Sub-Divisão	Definição do critério	Referências Bibliográficas
Indiretos	Identificativos	Difração de Raio-X, Microscopia Eletrônica de Varredura, Análise termo-diferencial Físico-Químico	Carcedo et al. (1986), Fink et al. (1971)
	Qualitativos	Granulometria, geomorfologia, pedologia e identificação visual.	Prikonskij (1952), Skempton (1953), Seed et al. (1962), Van der Merwe (1964), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978).
	Orientativos	Geologia, geomorfologia, pedologia e identificação visual.	Patrick e Snethen (1976), Carcedo et al. (1986), Ferreira (1990c e 1993).
Diretos	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe	Lambe (1960)
	Quantitativos	Ensaio de expansão livre e tensão de expansão	Seed et al. (1962), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez e Ortiz (1975), Cuellar (1978), Jimenez Salas (1980), Escario (1967 e 1969), Aitchison et al. (1973), Johnson (1978), McKeen (1980), Ferreira (1995).
		Ensaio edométrico simples e duplos	
		Ensaio edométrico com sucção controlada	
		Expansocolapsômetro	
		Ensaio de placa	

Fonte: Araújo (2021).

2.1.2 Ocorrência de Solos Expansivos

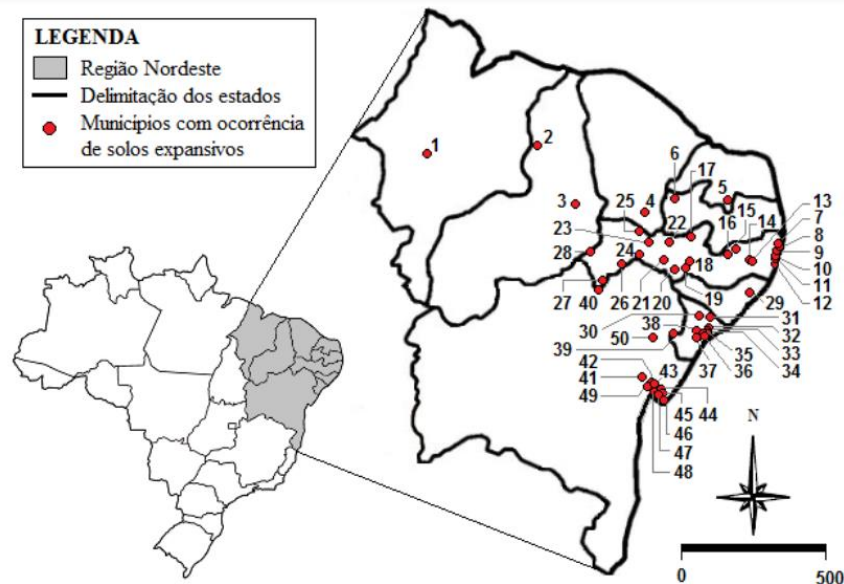
Solos expansivos são comumente identificados em regiões semiáridas de zonas climáticas tropicais e temperadas, com precipitações pluviométricas baixas e superadas pela evapotranspiração. Há registros da ocorrência deste tipo de solo em todos os continentes, especialmente entre os trópicos, porém não há ocorrências nas regiões árticas (MEEHAN; KARP, 1994; STEINBERG, 2000).

Solos expansivos já foram identificados na África do Sul, Arábia Saudita, Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, Chile, China, Cuba, Espanha, Estados Unidos, Etiópia, França, Gana, Índia, Israel, Irã, México, Marrocos, Mianmar, Nigéria, Turquia, Venezuela e Zimbábwe (DONALDSON, 1969; MAHLER, 1994). Problemas de engenharia associados a solos expansivos foram encontrados também nos seguintes países: Angola, Jordânia, Perú, Quênia, Reino Unido, Romênia e Tanzânia (SCHREINER, 1988).

Na Região Nordeste, as formações expansivas mais conhecidas estão localizadas no litoral (bacias sedimentares do Recôncavo Baiano, representadas pelo Grupo Santo Amaro e Formação São Sebastião, e nos arredores da cidade do Recife-PE pela Formação Maria Farinha) e no sertão (imediações da barragem Luiz Gonzaga, no Rio São Francisco).

Em Pernambuco, já foram registrados casos de solos expansivos em mais de 20 municípios, Figura 1, sendo as ocorrências situadas nas áreas com potenciais de expansão de médio a alto, segundo Amorim (2004), localizadas em Paulista, Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Carnaíba, Ibimirim, Inajá, Petrolândia, Floresta, Serra Talhada, Salgueiro, Cedro, Cabrobó, Santa Maria da Boa Vista e Afrânio.

Figura 1 - Localização de ocorrências registradas de solos expansivos na região nordeste



Fonte: Silva *et al.* (2022).

2.2 FISSURAS POR DESSECAÇÃO

Na Engenharia Civil o estudo da fissuração é mais empregado em materiais rígidos, tais como em pasta, argamassa e concreto. O estudo da fissuração em solos também é importante para o desempenho das obras de engenharia, na área agrícola e em aplicações ambientais, visto a influência direta da quantidade de água nas propriedades do solo e a fissuração ser o fenômeno natural mais comum a ocorrer em solos argilosos submetidos a condições de dessecação.

A formação e propagação de fissuras no solo é um processo natural devido ao ressecamento decorrente de variações sazonais no ambiente, o qual submete ao solo períodos secos e úmidos alternados. Ao longo dos períodos secos, o solo se retrai formando fissuras. A presença de fendas de dessecação no solo altera suas propriedades mecânicas e hidráulicas.

O desenvolvimento de fissuras no solo expansivo é facilitado pelo conteúdo de montmorilonita, pois este mineral forma uma espessa película hidratada que proporciona um maior espaço de contração durante o processo de secagem, aumentando a largura das fissuras. O grau de compactação também exerce uma influência sobre a fissuração, visto que sob um alto grau de compactação a estrutura do solo expansivo é compacta, com um baixo volume de água livre e reduzida capacidade de infiltração, dificultando o desenvolvimento de fissuras no solo (BEIXIAO et al., 2014; HUANG et al., 2019).

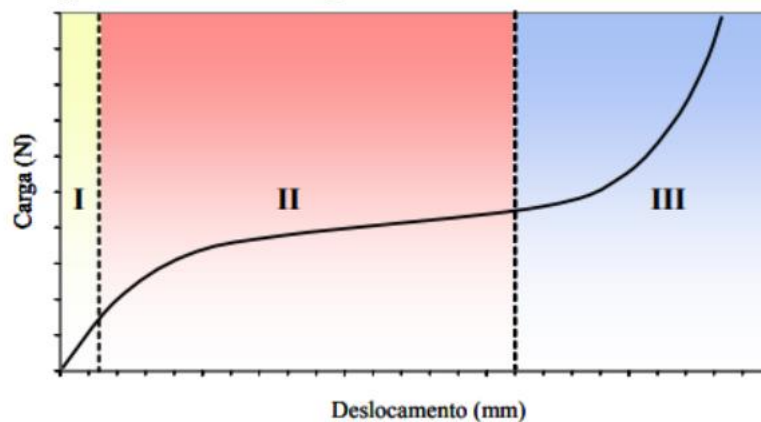
2.3 SQUEEZE – FLOW

No ensaio squeeze-flow a compressão pode se dar pela placa superior, pela placa inferior, ou por ambas, segundo Melo (2014). O ensaio pode ser realizado com controle de deslocamento ou controle de força e o diâmetro da placa superior pode ser menor, igual ou maior que o diâmetro da amostra. Cada uma das configurações é utilizada para especificar um determinado comportamento ou por ser mais adequada ao material ensaiado. Neste ensaio são gerados parâmetros reológicos fundamentais, a viscosidade e a tensão de escoamento. O ensaio squeeze-flow consiste em medir o esforço necessário para comprimir uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas. Este ensaio é realizado com controle por deslocamento em que o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante

enquanto a força é medida. É um método simples, capaz de avaliar com precisão uma ampla faixa de consistência.

Na Figura 2 é observado a curva de carga (N) versus deslocamento (mm), os resultados seguem um perfil reológico de três estágios. O estágio I equivale a um pequeno deslocamento, apresentando deformação elástica linear e está relacionado provavelmente à tensão de escoamento do material. O estágio II trata-se de um deslocamento intermediário, mostrando uma deformação plástica e/ou viscosa dependendo de suas características. Nesta etapa II o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento. Já no estágio III, ocorre um aumento expressivo da carga necessária para dar continuidade à deformação do material, influenciado pela aproximação dos agregados e o atrito entre eles (CARDOSO, 2009). A Figura 2 apresenta um perfil característico do ensaio squeeze-flow com deslocamento controlado expresso na forma de carga versus deslocamento.

Figura 2 – Perfil típico de uma curva carga versus deslocamento de um ensaio squeeze-flow,



Fonte: Cardoso (2009).

2.4 MELHORAMENTO DO SOLO COM FIBRAS

Estabilizar ou melhorar um solo consiste na utilização de processos de origem mecânica, química ou físico-química para modificar qualquer uma das propriedades do solo e melhorar o seu comportamento mediante solicitações externas e ações adversas de agentes naturais (BAPTISTA, 1976).

O processo mecânico compreende, por exemplo, a estabilização granulométrica e o rearranjo das partículas por compactação, enquanto o tratamento químico envolve a inclusão de aditivos no solo, tais como cal, cimento Portland,

betume, resinas, dentre outros (PHANIKUMAR; SREEDHARAN; ANIRUDDH, 2015; TATSUOKA; CORREIA, 2016).

A abordagem físico-química contempla a utilização simultânea dos métodos mecânico e químico, além de tratar da inserção de materiais para reforço do solo, que geralmente, estão na forma de geossintéticos ou fibras, de origem natural ou sintética (ESTABRAGH; RAFATJO; JAVADI, 2014; BHAVANI et al., 2019).

A inclusão de fibras aos solos pode ser de forma orientada, sendo indicadas direções preferenciais, ou de maneira aleatória. Esta última é a técnica mais utilizada quando se trata de misturas solo-fibra, pois este tipo de configuração proporciona a redução de ocorrência de pontos frágeis. Por outro lado, ao serem introduzidos os elementos de fibras com certa orientação no solo pode-se melhorar as suas características resistentes e reduzir a sua deformabilidade de forma específica (EDINÇLILER; AYHAN, 2010).

O reforço de solos com fibras naturais ou sintéticas tem sido investigado por muitos autores, contudo, devido aos problemas ambientais e custo-benefício da sua aquisição, a aplicação de outros materiais fibrosos não convencionais ou reciclados, tais como carpete reciclado, borracha e nylon tem sido incentivada (FATAHI et al., 2013; MIRZABABAEI et al., 2013; PHANIKUMAR; SINGLA, 2016; DIVYA; VISWANADHAM; GOURC, 2018).

Além disso, com o passar dos anos, foram incluídos na análise dos solos reforçados a Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, ensaios de arrancamento, análise de imagem, simulações numéricas, dentre outros (TANG et al., 2007; SIVAKUMAR BABU; VASUDEVAN; HALDAR, 2008; TANG; SHI; ZHAO, 2010; CHADUVULA; VISWANADHAM; KODIKARA, 2017).

Diante desse contexto, diversas pesquisas mostraram que a inclusão de fibras aleatórias tendem a aumentar a resistência à tração, à compressão e ao cisalhamento dos solos, bem como alterar o seu comportamento de frágil para mais dúctil, sendo o teor de fibra e o atrito na interface entre as fibras e a matriz do solo os fatores dominantes no mecanismo de reforço (KANIRAJ; HAVANAGI, 2001; TANG et al., 2007; HARIANTO et al., 2008b; HEJAZI et al., 2012; CORREIA; OLIVEIRA; CUSTÓDIO, 2015; MENEZES et al. 2019). É importante destacar que este cenário pode sofrer variações em função dos diferentes tipos de fibras empregados, tendo em vista que cada fibra apresenta particularidades

2.4.1 Fibra de Polipropileno

As fibras de polipropileno são constituídas por um tipo de plástico que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos de séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma que possam deslizar umas sobre as outras (HOLLAWAY, 1994).

Em função de sua constituição, as fibras de polipropileno possuem uma grande flexibilidade e tenacidade, seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis. Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma substancial resistência ao impacto (TAYLOR, 1994).

Figura 3 – Fibra de polipropileno.



Fonte: Neomatex (2022).

2.4.2 Fibra de Casca de Coco

Atualmente, um dos grandes agravantes na poluição ambiental é o descarte inadequado dos resíduos sólidos. Estes, jogados em lugares indevidos na zona urbana provocam enchentes e colabora na proliferação de agentes transmissores de doenças. O coco corresponde a uma quantidade significativa da matéria orgânica dos resíduos sólidos, principalmente no Nordeste. Segundo o IBGE, o Brasil produz anualmente mais de 1 bilhão desse fruto.

Por conseguinte, com base nessas informações, é plausível investir em medidas que permita um destino ecológico para os sólidos e simultaneamente econômica. Cerca de 85% do peso bruto do coco corresponde a resíduo. Portanto, o seu descarte causa impactos ambientais. Em contrapartida, o resíduo do coco pode ter várias aplicações comerciais, industriais e agrícolas, tais como utilização, por exemplo, na produção de couro, biotecnologia, papel e utilização em engenharia de alimentos, automobilismo, engenharia civil (SENHORAS, 2003), bem como a possibilidade da aplicação como reforço de solo visando fundações superficiais como Casagrande (2001) fez com fibra polimérica.

A fibra de coco pertence à família das fibras duras, esta é extraída do mesocarpo do coco. Ela é uma fibra lignocelulósica, isto é, composta por celulose, o que permite altos índices de rigidez e dureza, além de possuir alta quantidade de lignina. Baixa condutividade ao calor e resistência ao impacto, às bactérias e a água (SENHORAS, 2003). A sua densidade é muito baixa e seu diâmetro varia bastante, entre 0,05 e 0,4 mm. (CASTILHO, 2011).

Figura 4 – Fibra de casca de coco.



Fonte: Terral (2016).

2.4.3 Fibra de Pneu

A composição química da borracha de pneu é basicamente composta por polímero elastomérico que foi submetido a diversos processos termoquímicos até adquirir as características desejáveis de resistência e durabilidade requerida para sua aplicação final. Uma característica obrigatória para um comportamento elastomérico é que a estrutura molecular seja provida de ligações cruzadas, onde esse processo de formação de ligações cruzadas nos elastômeros que formam a

borracha é conhecido como vulcanização, tratamento através do qual compostos de enxofres se ligam com as cadeias principais do polímero que se encontram adjacentes, formando pontes entre elas (ALBURQUERQUE, 2009).

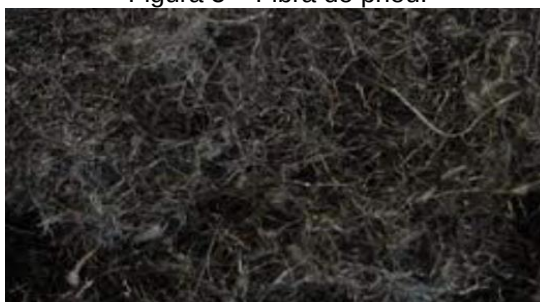
Os pneus são constituídos por estruturas difíceis de serem eliminadas naturalmente. Na grande maioria das vezes este material é abandonado em locais impróprios, causando consequentemente danos à saúde e principalmente ao meio ambiente. Este material tem um longo período de degradação, aproximadamente de 400 a 800 anos, tornando-se assim um grande problema para o meio ambiente (GRANZOTTO, 2010).

A disposição dos pneus em aterros sanitários vem em segundo lugar. Descartados inteiros, os pneus ocupam mais espaço, dificultam a compactação e acumulam gases (metano) da decomposição do material orgânico, vindo à tona mesmo depois de aterrados (ANDRIETTA, 2011).

Uma forma encontrada para amenizar esse impacto foi a utilização das metodologias de reciclagem e reaproveitamento. Entre elas, a recauchutagem tem sido um mecanismo bastante utilizado para conter o descarte de pneus usados.

No processo de reforma dos pneus, ao ser removida a superfície de borracha antiga e posta uma nova, resíduos em forma de fibras – filamentos em que o tamanho de uma das dimensões é superior ao das demais – podem ser produzidos, sendo chamados de desbastes. Estes resíduos, subprodutos da indústria de recauchutagem, que é uma possibilidade de reaproveitamento de pneus considerada como a melhor alternativa para o consumidor, são apontados como ideais para a formação de compósitos com o solo e serem aplicados em obras geotécnicas por possuírem pequenos diâmetros e forma fibrilar (CASAGRANDE, 2005; EDINÇLILER; AYHAN, 2010; EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010; CHRUSCIK, 2013).

Figura 5 – Fibra de pneu.



Fonte: Tiresspa (2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O local da pesquisa escolhido está situado na Estação de Tratamento de Esgoto do Janga (ETE-Janga), situado no bairro Maranguape II, no Município de Paulista/PE. De acordo com Amorim (2004), a região do Município de Paulista apresentou uma susceptibilidade de média à alta para ocorrência de solos expansivos, quanto ao quesito geológico analisado. Este valor elevado de susceptibilidade encontrado é devido a área estar inserida na Bacia Paraíba, mais exatamente na Formação Maria Farinha.

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Os ensaios de caracterização Física dos solos foram executados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. Todos realizados de acordo com as normas brasileiras: NBR 7181/2016 para análise granulométrica conjunta; NBR 6508/1984 para densidade real dos grãos; NBR 7183/1982 para o limite de contração; NBR 7180/2016 para o limite de plasticidade; NBR 6459/2016 para o limite de liquidez e NBR 7182/2016 para a compactação dos solos.

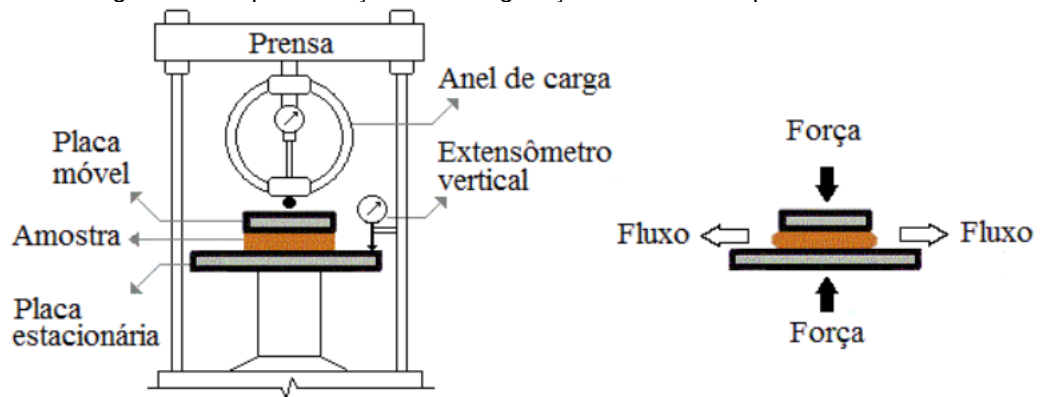
3.2 ENSAIO REOLÓGICO – SQUEEZE FLOW

O ensaio consistiu na utilização de solo e fibra, divididos em cinco amostras. As porcentagens das fibras foram de 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1,00% e 2,00% e para cada porcentagem de fibra foi realizado o ensaio de limite de liquidez para a obtenção da curva de fluidez. Para a preparação, o solo e as misturas solo-fibra foram manipuladas acrescentando-se gradualmente água destilada até atingir uma mistura homogênea na umidade dos pontos da curva de fluidez. As amostras foram moldadas sobre um prato de aço, utilizando um gabarito plástico para moldagem, a fim de garantir a centralização, retirando-o antes da execução do ensaio. Foi utilizado também uma base de acrílico, que foi apoiado sobre a amostra, em contato com anel de carga. O prato de aço e a base de acrílico são chamados de placa estacionária e placa móvel, respectivamente. Toda a moldagem foi realizada com auxílio de espátula, no qual também serviu para o nivelamento da superfície da amostra. O equipamento utilizado no ensaio foi a prensa universal com controle de deslocamento e com o anel dinamométrico de capacidade de 1000 N e constante de

0,505 kg/div, Figura 6. A velocidade do ensaio foi de 2,457 mm/min e deslocamento máximo de 8 mm. Esta metodologia é sugerida por Bezerra et al., 2020.

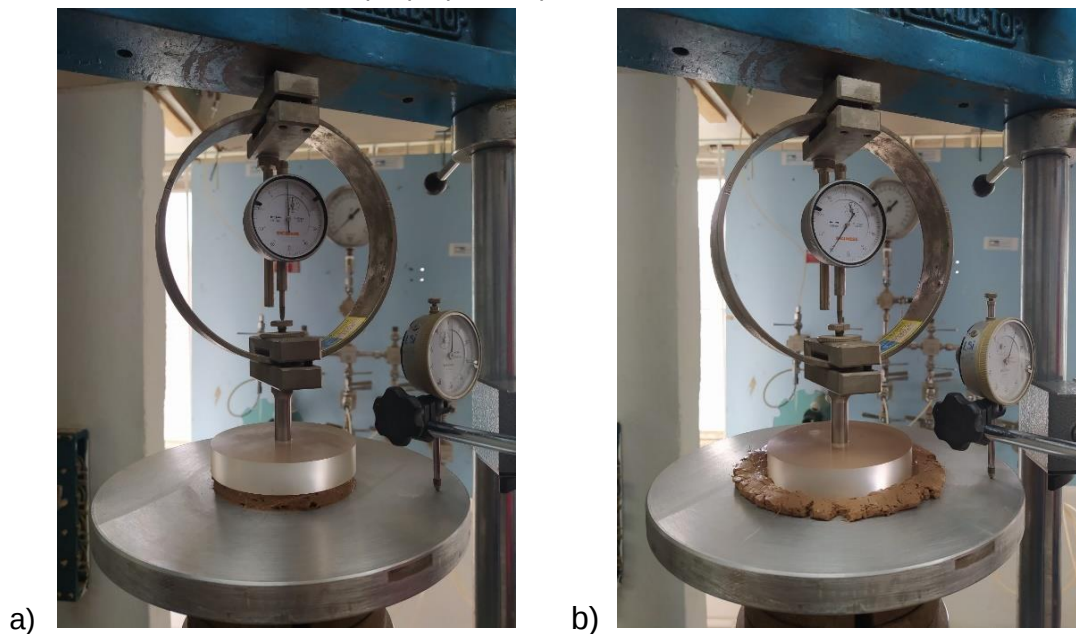
Na Figura 7 tem-se a amostra antes e na finalização do ensaio com o material ainda na prensa.

Figura 6 – Representação da configuração do ensaio Squeeze – Flow



Fonte: Silva (2022, no prelo).

Figura 7 – a) Amostra de solo + fibra de polipropileno antes do ensaio iniciar; b) Amostra de solo + fibra de polipropileno após término do ensaio.



Fonte: A Autora (2022)

3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO EDMÉTRICA

Os ensaios de compressão edométrica foram executados segundo a NBR 16853/2020, em células convencionais e prensas tipo Bishop, com relação de braço de alavanca de 10:1. As variações de altura dos corpos-de-prova foram medidas com o uso de extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm. Todos os ensaios foram executados com anéis metálicos com dimensões igual a 82,5 mm de diâmetro e 20 mm de altura, ou seja, os corpos-de-prova tinham relação diâmetro/altura superior a 2,5. Foram executados o total de 6 ensaios de compressão edométrica simples unidimensional. A série de carregamento e descarregamento seguiu a seguinte sequência: 10 kPa; 20 kPa; 40 kPa; 80 kPa; 160 kPa; 320 kPa; 640 kPa; 320 kPa; 80 kPa; 20 kPa; sem carga. Foram executados ensaios edométricos simples com tensões de inundação em 10 kPa; 40 kPa; 80 kPa; 160 kPa; 320 kPa; e sem inundação prévia.

3.4 ENSAIO DE EXPANSÃO LIVRE

Os ensaios de expansão livre foram realizados seguindo as recomendações da ASTM D4829/1995 e da ABNT NBR 16853/2020. Estes ensaios medem a variação de altura da amostra, em percentual, de acordo com a relação entre a altura inicial e final, após inundação e posterior expansão, em células de adensamento convencionais. A moldagem das amostras foi feita em anel metálico, com dimensões iguais a 20 mm de altura e 60 mm de diâmetro, no bloco indeformado. Assim que foi finalizada a moldagem, as amostras foram pesadas e, em paralelo, determinada a umidade. Foram executados dois ensaios de expansão livre: o primeiro foi feito com aplicação prévia de tensão igual a 10 kPa já o segundo ensaio foi feito com tensão igual a 1 kPa.

3.5 ENSAIO DE TENSÃO DE EXPANSÃO

Neste trabalho foram ensaiadas amostras na umidade natural (bloco indeformado) e amostras com diferentes valores de sucção. Há diferentes métodos para avaliar a tensão de expansão de um solo, mas nesta pesquisa foram utilizados quatro métodos: a) Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de

consolidação; b) Expansão e colapso sob tensão; c) Volume constante; d) Adensamento duplo natural e inundado.

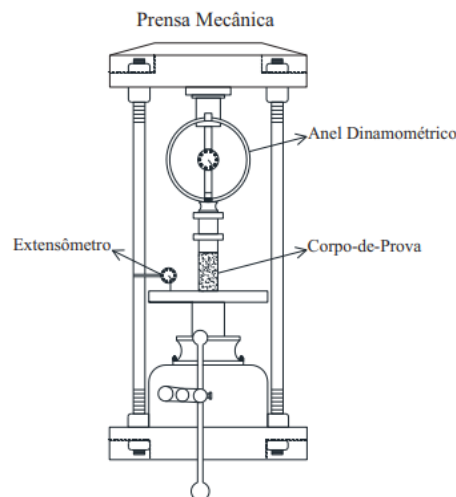
3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA

Neste trabalho foram realizados dois tipos de ensaios à resistência: compressão simples e compressão diametral, detalhados a seguir.

3.6.1 Ensaio de Compressão Simples

O ensaio de compressão simples visa à determinação da resistência à compressão não confinada (ou simples) de corpos de prova cilíndricos (geralmente $h = 2.\phi$) constituídos por solos natural ou artificialmente coesivos, mediante aplicação de carga axial com controle de velocidade e registro das deformações sofridas, Figura 8.

Figura 8 – Representação da configuração do ensaio de resistência à compressão simples



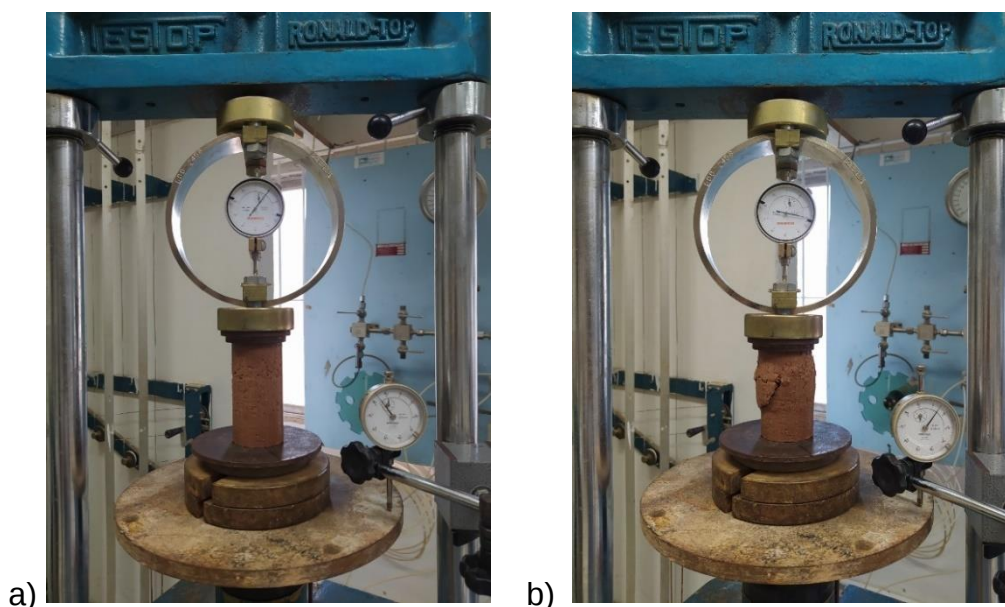
Fonte: Guedes (2013).

Os ensaios de compressão simples seguem as prescrições da norma NBR 12770 (ABNT,1992). No ensaio de resistência a compressão simples foram moldados corpos de prova estaticamente em cilindros metálicos de altura 10 cm e diâmetro 5 cm na umidade ótima, esse dado foi obtido através do ensaio de compactação, e com o peso específico seco máximo. Foram realizados dois ensaios

para cada amostra solo-fibra, nas porcentagens de fibra de 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00%, bem como o ensaio para solo natural.

O equipamento utilizado no ensaio foi a prensa universal com controle de deslocamento e com o anel dinamométrico de capacidade de 5000 N e constante de 2,173 kg/div para o ensaio com fibra de polipropileno e 0,12 kg/div para os ensaios com fibra de casca de coco e pneu. A velocidade do ensaio foi de 0,48 mm/min para o ensaio com fibra de polipropileno e 0,49 mm/min para os ensaios com fibra de casca de coco e pneu e o deslocamento máximo para ambos os ensaios foi de 13 mm. Na Figura 9 tem-se a finalização do ensaio com o material ainda na prensa.

Figura 9 – a) Amostra de corpo de prova solo + fibra de polipropileno antes do ensaio iniciar;
b) Amostra de corpo de prova solo + fibra de polipropileno após término do ensaio.



Fonte: A Autora (2022).

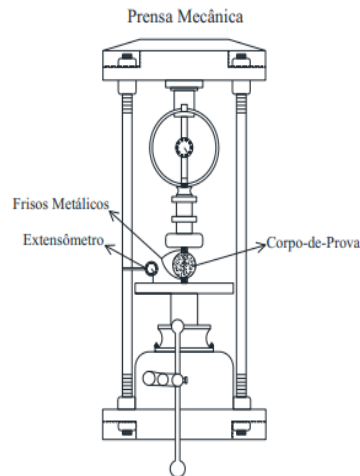
3.6.2 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

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, Figura 10.

O ensaio de tração por compressão diametral não é normatizado para aplicação em solos, porém os procedimentos são adaptados conforme as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011). No ensaio de resistência a compressão diametral foram moldados corpos de prova estaticamente em cilindros

metálicos de altura 10 cm e diâmetro 5 cm na umidade ótima, esse dado foi obtido através do ensaio de compactação, e com o peso específico seco máximo. Foram realizados dois ensaios para cada amostra solo-fibra, nas porcentagens de fibra de 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00%, bem como o ensaio para solo natural.

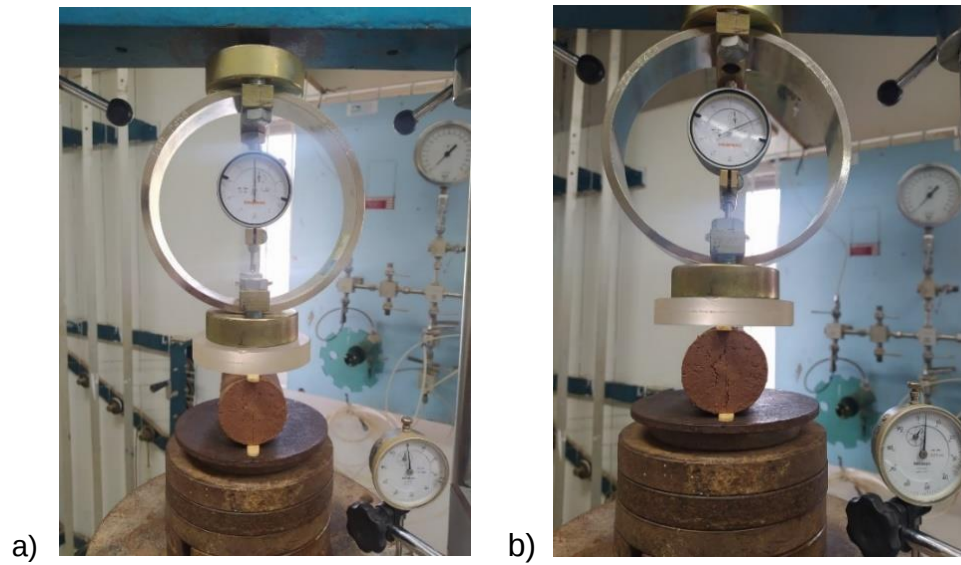
Figura 10 – Representação da configuração do ensaio de resistência à compressão diametral



Fonte: Guedes (2013).

O equipamento utilizado no ensaio foi a prensa universal com controle de deslocamento e com o anel dinamométrico de capacidade de 5000 N e constante de 2,173 kg/div para o ensaio com fibra de polipropileno e 0,12 kg/div para os ensaios com fibra de casca de coco e pneu. A velocidade do ensaio foi de 0,48 mm/min para o ensaio com fibra de polipropileno e 0,49 mm/min para os ensaios com fibra de casca de coco e pneu e o deslocamento máximo para o ensaio com fibra de polipropileno foi de 3 mm e para as demais fibras foi de 4mm. Na Figura 11 tem-se a finalização do ensaio com o material ainda na prensa.

Figura 11 – a) Amostra de corpo de prova solo + fibra de polipropileno antes do ensaio iniciar;
b) Amostra de corpo de prova solo + fibra de polipropileno após término do ensaio.



Fonte: A Autora (2022)

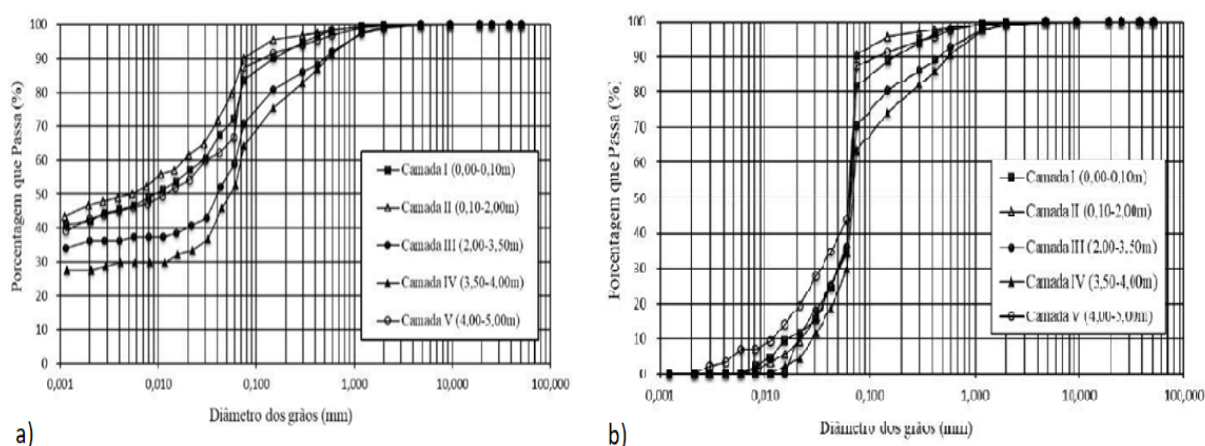
4 RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios realizados.

4.1 CLASSIFICAÇÃO FÍSICA DO SOLO NATURAL

A Figura 12 apresenta as curvas granulométricas do solo natural obtidas com defloculante e sem defloculante, respectivamente. O Quadro 2 apresenta a composição granulométrica, de acordo com a ABNT NBR 6502/1995, apenas para os ensaios com o uso de defloculante.

Figura 12 – a) Curva Granulométrica com defloculante; b) Curva Granulométrica sem defloculante.



Fonte: Alves *et al.* (2020)

Quadro 2 – Composição Granulométrica das camadas do perfil geotécnico.

Solo	Camadas				
	I	II	III	IV	V
Argila	42%	47%	36%	28%	43%
Silte	30%	36%	23%	24%	24%
Areia Fina	21%	13%	24%	26%	26%
Areia Média	5%	3%	9%	14%	4%
Areia Grossa	2%	1%	7%	7%	3%
Pedregulho	-	-	1%	1%	-

Fonte: Alves *et al.* (2020)

Os ensaios de granulometria conjunta com o uso de defloculante apresentam composição granulométrica das camadas com variação de argila de 28% a 47%, silte de 23% a 36%, areia fina de 13% a 26%, areia média de 3% a 14%, areia

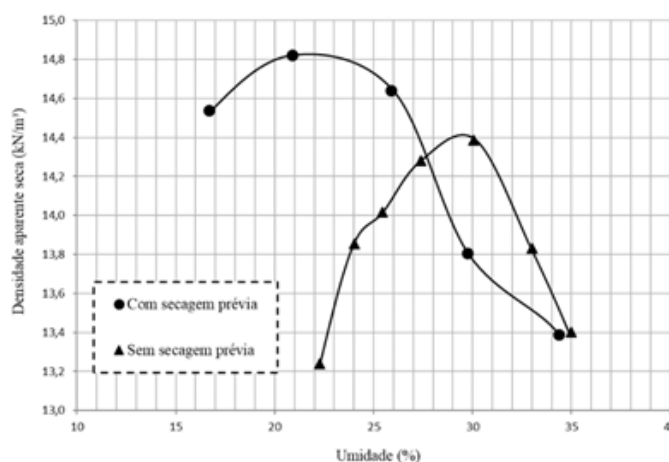
grossa de 1% a 7% e pedregulho de 0 a 1%. O Quadro 3 apresenta os valores dos limites de consistência. A Figura 13 apresenta as curvas de compactação do solo natural da camada II, com e sem secagem prévia, Alves et al. (2020).

Quadro 3 – Valores dos limites de liquidez, de plasticidade e de contração, índice de plasticidade e índice de consistência.

Camadas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	W (%)	IC (%)
I - 0,0 - 0,1m	52	25	27	14	16,5	1,31
II - 0,1 - 2,0m	73	27	46	16	21,7	1,11
II* - 0,1 - 2,0m	74	26	48	15	21,7	1,09
III - 2,0 - 3,5m	48	28	20	17	26,2	1,09
IV - 3,5 - 4,0m	35	20	15	17	27,0	0,53
V - 4,0 - 5,0m	72	25	47	13	29,0	0,92

Fonte: Alves et al. (2020)

Figura 13 – Curvas de compactação do solo natural da camada II, com e sem secagem prévia ALVES et al. (2020)



Fonte: Alves et al. (2020)

Quanto ao índice de plasticidade, os solos das camadas II e V apresentam plasticidade muito alta ($IP > 40\%$); o solo da camada I apresenta alta plasticidade ($20\% < IP < 40\%$); e os solos das camadas III e IV apresentam média plasticidade ($10\% < IP < 20\%$). A consistência das argilas, das camadas I, II e III, é dura, da camada IV é média e a da camada V é rija. Pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) as Camadas I, II e V são classificadas como Argilas

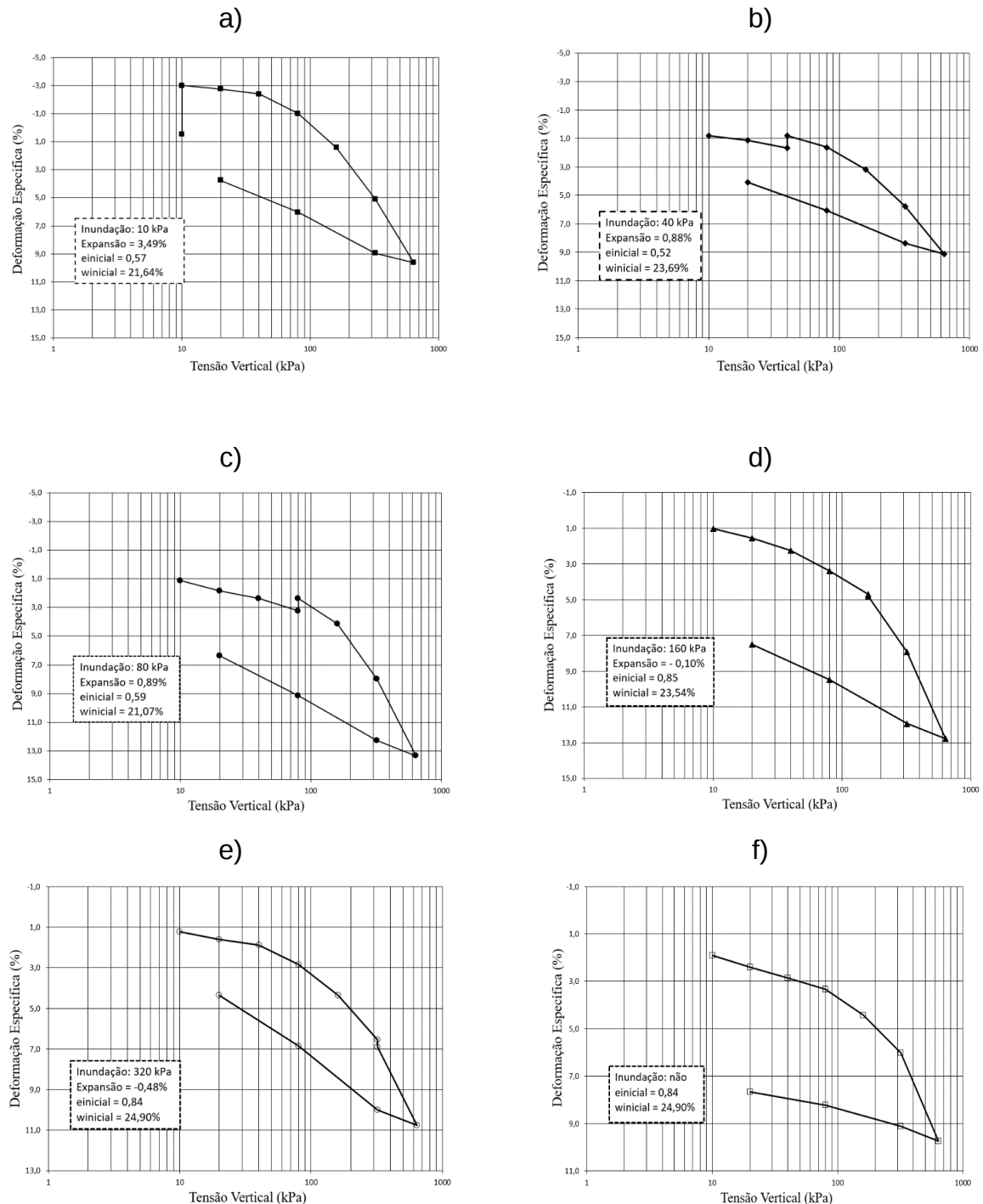
de Alta Compressibilidade (CH) e as Camada III e IV como Argilas de Baixa Compressibilidade (CL). Pela classificação rodoviária (HRB – Highway Research Board) todas as camadas são classificadas como Solos Argilosos (A-7-6 e A-6), ruins para uso em estradas.

De acordo com os dados do ensaio de compactação percebe-se que a secagem prévia leva o solo expansivo a contrair formando grumos (aglomerados), com baixa umidade (7,5%) e alta resistência ao esforço mecânico com dimensões maiores que as partículas individualizadas do solo na umidade natural (22,3%). Quando é adicionado água ao solo seco previamente, no ramo seco da curva de compactação, não há uma distribuição uniforme da água a todas as partículas e os grumos ainda continuam com arranjos de partículas aglomeradas com maiores dimensões e com maior resistência do que no solo sem secagem prévia. Isto explica o fato do Peso Específico Aparente Seco Máximo obtido, com secagem prévia, ser maior e a Umidade Ótima ser menor quando comparado com o solo sem secagem prévia.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSIVIDADE

A Figura 14 apresenta os resultados dos ensaios de compressão edométrica inundados com tensão vertical igual a 10 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa, 320 kPa e sem inundação prévia, respectivamente.

Figura 14 – Resultados dos ensaios de compressão edométrica inundados com tensão vertical igual a: a) 10 kPa; b) 40 kPa; c) 80 kPa; d) 160 kPa; e) 320 kPa e f) sem inundação prévia.



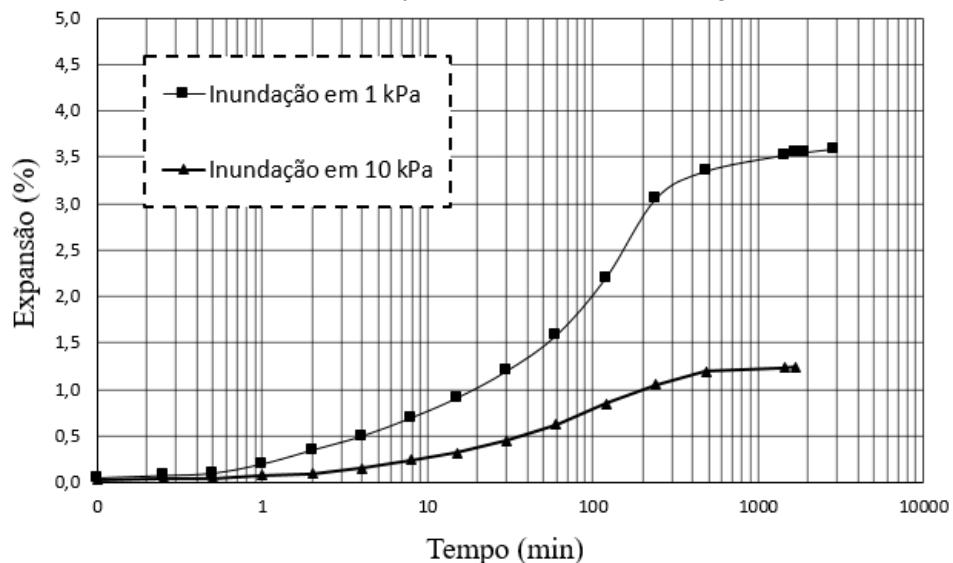
Fonte: Alves *et al.* (2020)

O valor máximo de expansão obtido é igual a 3,49% no ensaio inundado em 10 kPa. O ensaio inundado em 320 kPa sofreu colapso igual a 0,48%. A expansão

do solo apresenta valores baixos, pois a umidade inicial da amostra está elevada, entre 21,07% e 24,90%.

A Figura 15 mostra os resultados de expansão livre obtidos, eles são iguais a 3,59% e 1,25% para os ensaios executados com sobrecarga de 1 kPa e 10 kPa, respectivamente. De acordo com o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), o grau de expansividade é médio ($1\% < \text{expansão livre} < 4\%$).

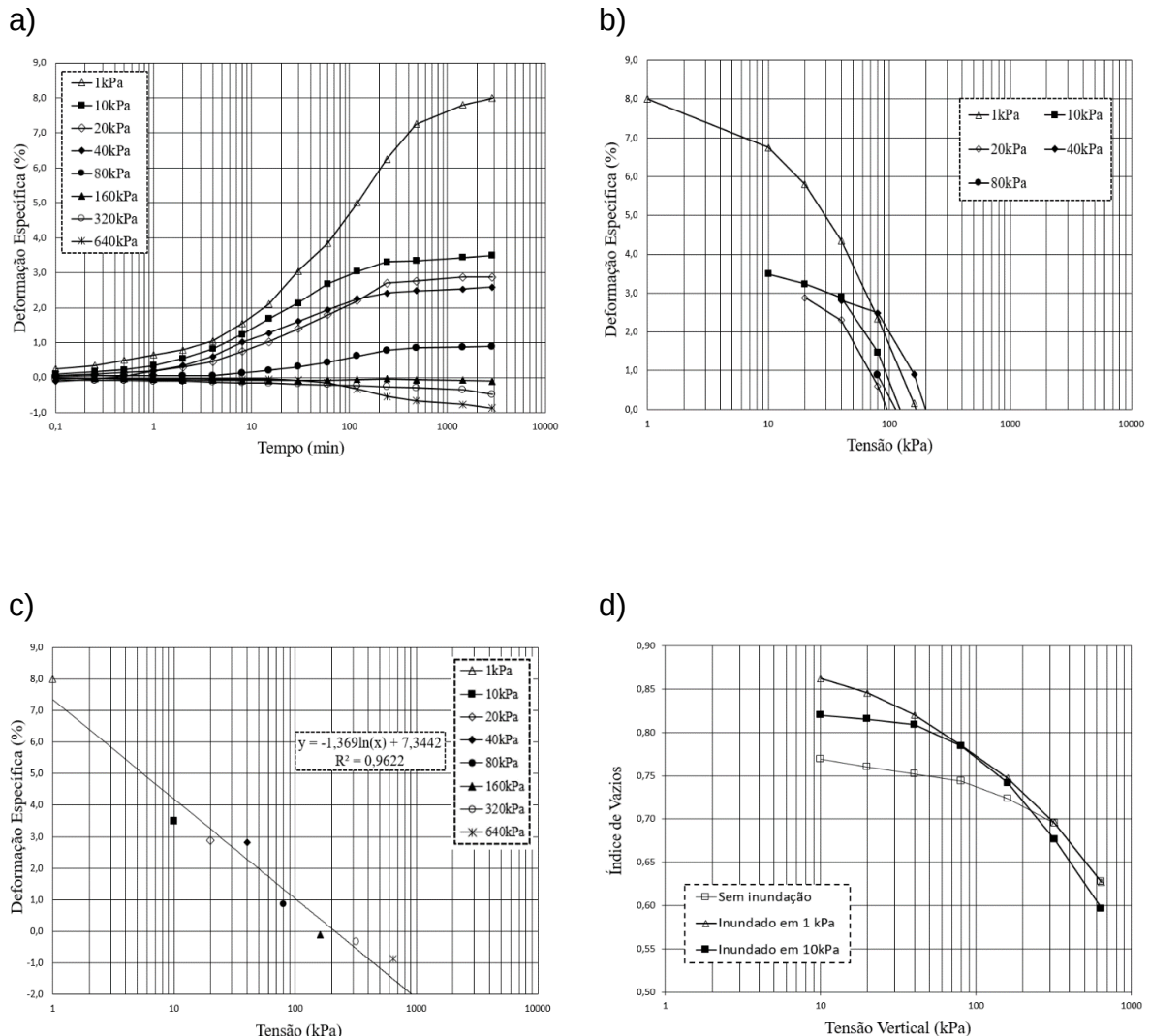
Figura 15 – Resultado dos ensaios de expansão livre com sobrecarga de 1 kPa e 10 kPa.



Fonte: Alves *et al.* (2020)

A Figura 16 apresenta as curvas Tempo x Deformação Específica para as tensões de inundação de 1 kPa, 10kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa, 160kPa, 320kPa e 640kPa (Figura 16a), o método do carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação (Figura 16b), o método da expansão e colapso sob tensão (Figura 16c) e o método edométrico duplo (Figura 16d).

Figura 16 – Resultado dos ensaios de tensão de expansão: a) tensões de inundação de 1 kPa, 10kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa, 160kPa, 320kPa e 640kPa; b) método do carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação; c) método da expansão e colapso sob tensão e d) método edométrico duplo.



Fonte: Araújo (2019).

O método do carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação conduz a uma tensão de expansão de 145 kPa. Enquanto os métodos de expansão e colapso sob tensão e do edométrico duplo apresentam tensão de expansão iguais a 213 kPa e 210 kPa, respectivamente. Já o método a volume constante apresenta tensão de expansão igual a 190 kPa. O valor da tensão média para os ensaios de tensão de expansão foi 190 kPa. De acordo com o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), valores médios de tensão de expansão entre 120 kPa e 300 kPa, apresenta um grau de expansividade alta (ARAÚJO, 2019).

4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO SOLO COM FIBRA

O Quadro 4 apresenta os valores dos limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade do solo com fibra de polipropileno para as porcentagens de 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1,00% e 2,00%. O Quadro 5 mostra os valores dos limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade do solo com fibra de pneu para as porcentagens solos naturais, 0,25% 0,50% 1,00% e 2,00%. O Quadro 6 apresenta os valores dos limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade do solo com fibra de casca de coco para as porcentagens de solo natural, 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00%. A inserção das fibras de polipropileno ao solo praticamente não altera os valores dos limites de consistência e do índice de plasticidade, estas fibras não absorvem água a partir do solo. A adição das fibras de pneu provoca uma diminuição nos valores do limite de liquidez e pequenas variações nos valores do limite de plasticidade (exceto para 0,25% de fibra), havendo uma diminuição do índice de plasticidade. Ao se adicionar das fibras de coco ao solo os limites de consistência e o índice de plasticidade crescem, estas fibras absorvem água elevando os limites e índices.

Quadro 4 – Valores dos limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade do solo com fibra de polipropileno.

Porcentagem de Fibra de Polipropileno	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0,25%	67,71	26,01	41,70
0,50%	69,02	23,48	45,54
0,75%	66,47	23,90	42, 57
1,00%	69, 67	22,10	47,57
2,00%	65, 76	21,96	43,80

Fonte: Silva (2022, no prelo)

Quadro 5 – Valores dos limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade do solo com fibra de pneu

Porcentagem de Fibra de Pneu	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo natural	63,40	21,80	41,60
0,25%	56,22	27,90	28,32
0,50%	54, 34	23,99	30,35
1,00%	52,67	20,94	31,73
2,00%	49,70	26,14	23,56

Fonte: Araújo (2022)

Quadro 6 – Valores dos limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade do solo com fibra de Casca de Coco

Porcentagem de Fibra de casca de coco	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo natural	52,56	21,81	30,75
0,25%	58,70	25,11	33,59
0,50%	59,00	24,94	34,06
1,00%	64,50	25,92	38,58
2,00%	69,40	27,63	41,77

Fonte: Faustino (2022)

O Quadro 7 apresenta os valores do peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com as misturas das fibras. Na mistura solo-fibra de polipropileno o peso específico seco máximo e a umidade ótima sofrem uma variação pouco significativa até a adição de 0,50% de fibra, ultrapassada essa porcentagem percebe-se que esses dois parâmetros decrescem, isto se deve ao fato das fibras não absorverem água e ao peso da fibra por unidade de volume ser menor que o do solo. Na mistura solo-fibra de pneu o peso específico seco máximo cresce e a umidade ótima decresce com a adição das fibras, isto se deve ao peso da fibra por unidade de volume ser menor que o do solo. Na mistura solo-fibra casca de coco o peso específico seco máximo decresce e a umidade ótima cresce com a adição das

fibras, isto se deve a dois fatores: ao peso das fibras de coco por unidade de volume ser inferior ao do solo e a capacidade das fibras de absorver água.

Quadro 7 – Valores do peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com as misturas das fibras.

% de Fibra	Mistura solo + fibra de Polipropileno*		Mistura solo + fibra de Pneu **		Mistura solo + fibra de casca de coco***	
	Wot %	$\gamma_{sec\ max}$ kN/m ³	Wot %	$\gamma_{sec\ max}$ kN/m ³	Wot %	$\gamma_{sec\ max}$ kN/m ³
0,00	25,40	15,11	23,00	15,50	21,30	16,04
0,25%	25,40	15,13	23,50	15,70	22,80	15,80
0,50%	25,50	15,17	23,38	15,80	23,20	15,70
1,00%	23,70	14,98	22,60	15,90	23,90	15,50
2,00%	23,30	14,69	22,10	15,70	24,10	15,10

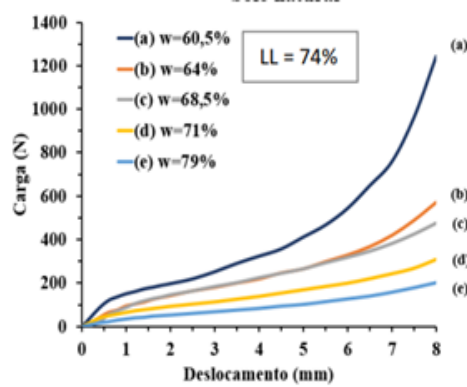
Fonte: * Silva (2022), ** Araujo, (2022) *** Faustino (2022)

4.3.1 Reologia - Squeeze Flow

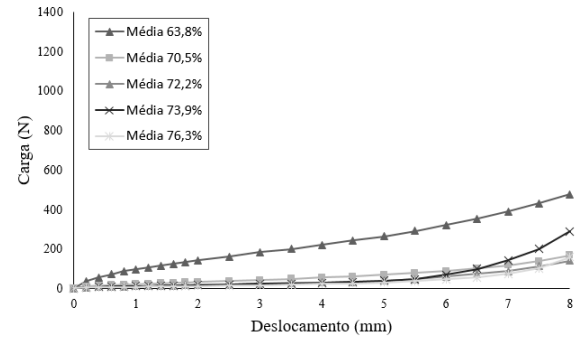
O ensaio de squeeze-flow é capaz de aferir a variação e a forma da curva carga versus deslocamento do solo em várias umidades, BEZERRA et al 2020. A Figura 17 apresenta as curvas carga versus deslocamento do solo natural Bezerra (2020) e do solo + fibra de polipropileno em várias umidades. A Figura 18 mostra uma sequência de fotos no ensaio squeeze-flow no final do ensaio para diferentes umidade e teores de fibra de polipropileno.

Figura 17 – Curvas carga x deslocamento em amostras de solo e solo + fibra de polipropileno

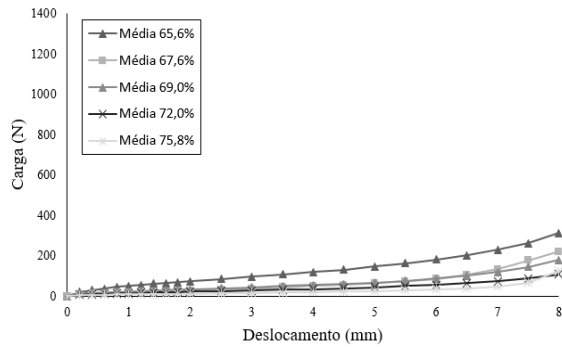
a) Solo Natural (Bezerra, 2020)*



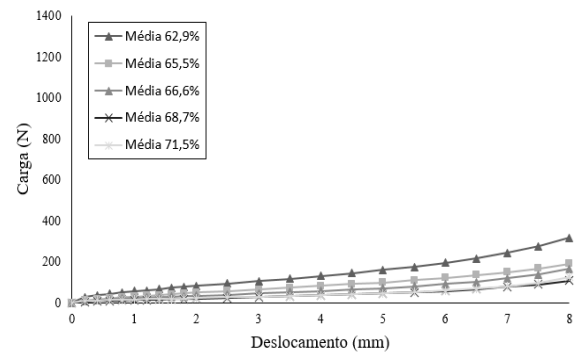
b) Solo+0,25% de fibra de polipropileno**



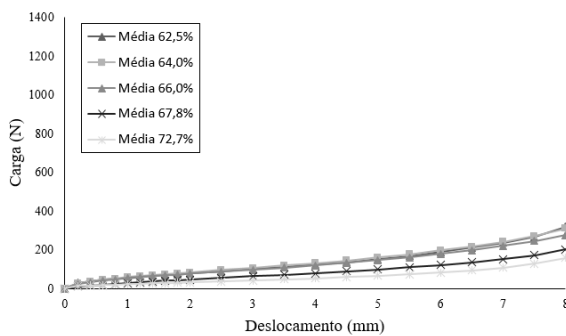
c) Solo+ 0,50% de fibra de polipropileno**



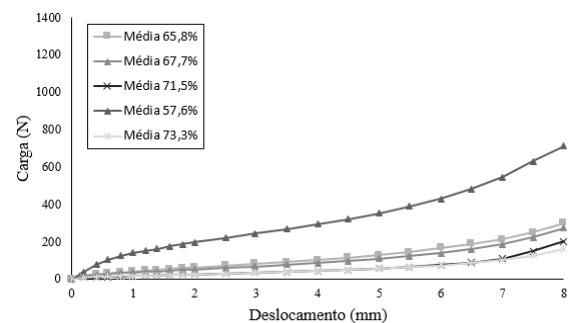
d) Solo+0,75% de fibra de polipropileno**



e) Solo+ 1,00% de fibra de polipropileno**



f) Solo+2,00% de fibra de polipropileno**



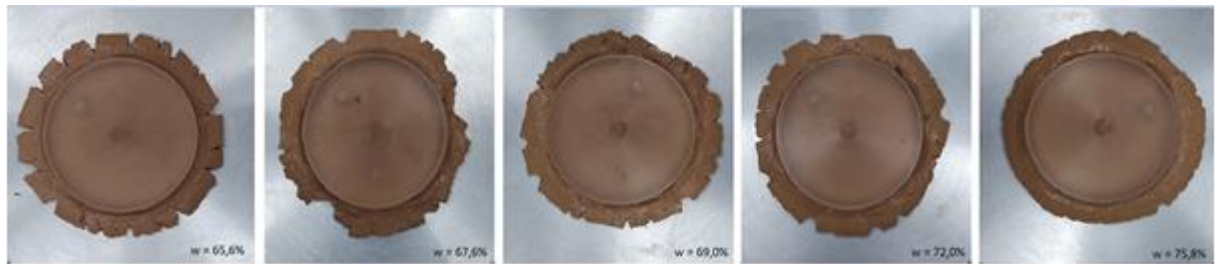
Fonte: *Bezerra (2020), **A Autora (2022)

Figura 18 – Sequência de fotos do solo + fibra polipropileno em vários teores e diferentes umidades.

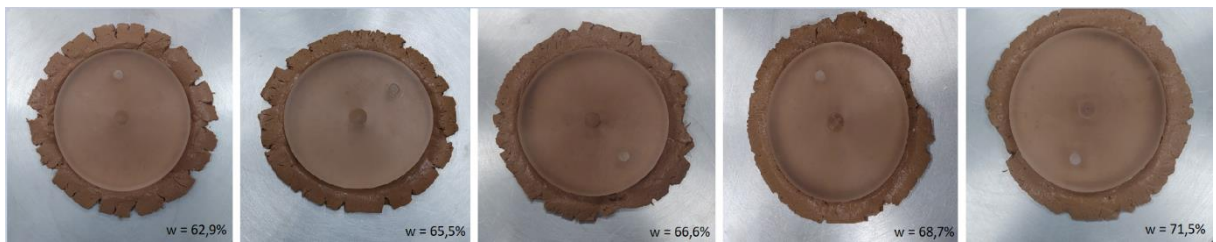
a) Solo + 0,25% de fibra de Polipropileno



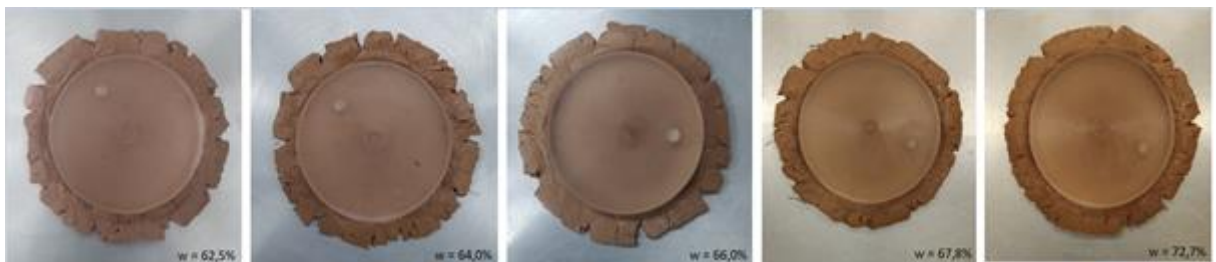
b) Solo + 0,50% de fibra de Polipropileno



c) Solo + 0,75% de fibra de polipropileno



d) Solo + 1,0 % de fibra de polipropileno



e) Solo + 1,0 % de fibra de polipropileno

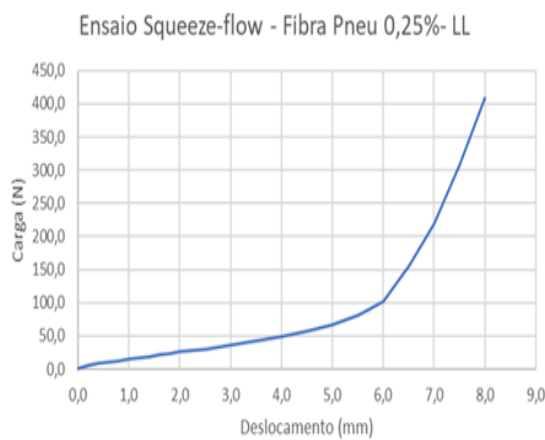


Fonte: A Autora (2022)

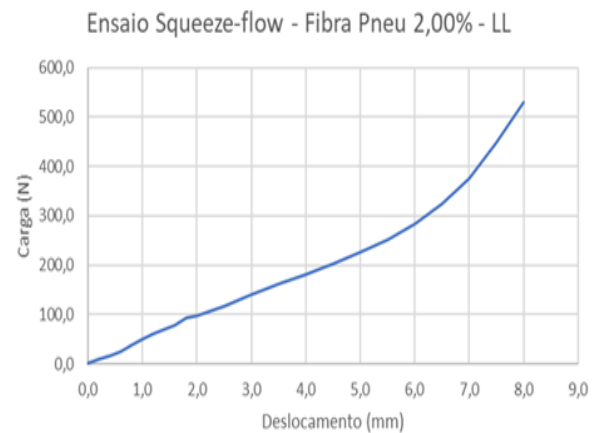
A Figura 19 apresenta as curvas carga versus deslocamento do solo-fibra na umidade do limite de liquidez (LL) para 0,25% e 2,0% de fibra de pneu (ARAÚJO, 2022). A Figura 20 apresenta as curvas carga versus deslocamento do solo-fibra na umidade do limite de liquidez (LL) para 0,25% e 2,0% de fibra de casca de coco (FAUSTINO, 2022).

Figura 19 – Curvas carga versus deslocamento do solo-fibra pneu na umidade do limite de liquidez (LL) para 0,25% e 2,00% de fibra de pneu (ARAÚJO, 2022).

a) Solo+ 0,25% de fibra de pneu



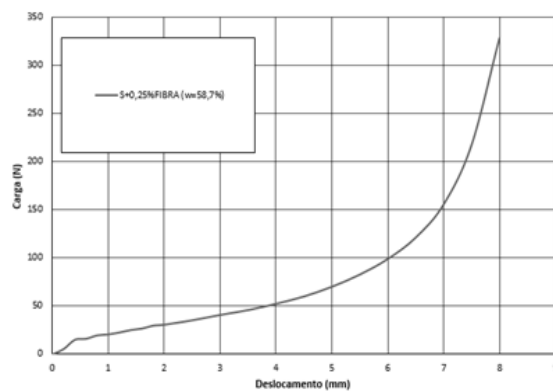
b) Solo+ 2,00% de fibra de pneu



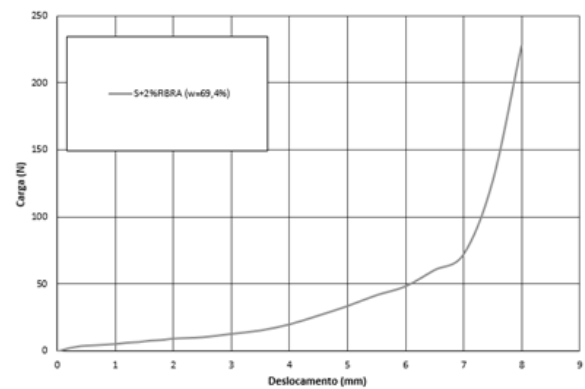
Fonte: Araújo (2022).

Figura 20 – Curvas carga versus deslocamento do solo-fibra casca de coco na umidade do limite de liquidez (LL) para 0,25% e 2,00% de fibra de casca de coco FAUSTINO (2022).

a) Solo + 0,25% de fibra de casca de coco.



b) Solo + 2,00% de fibra de casca de coco



Fonte: Faustino (2022).

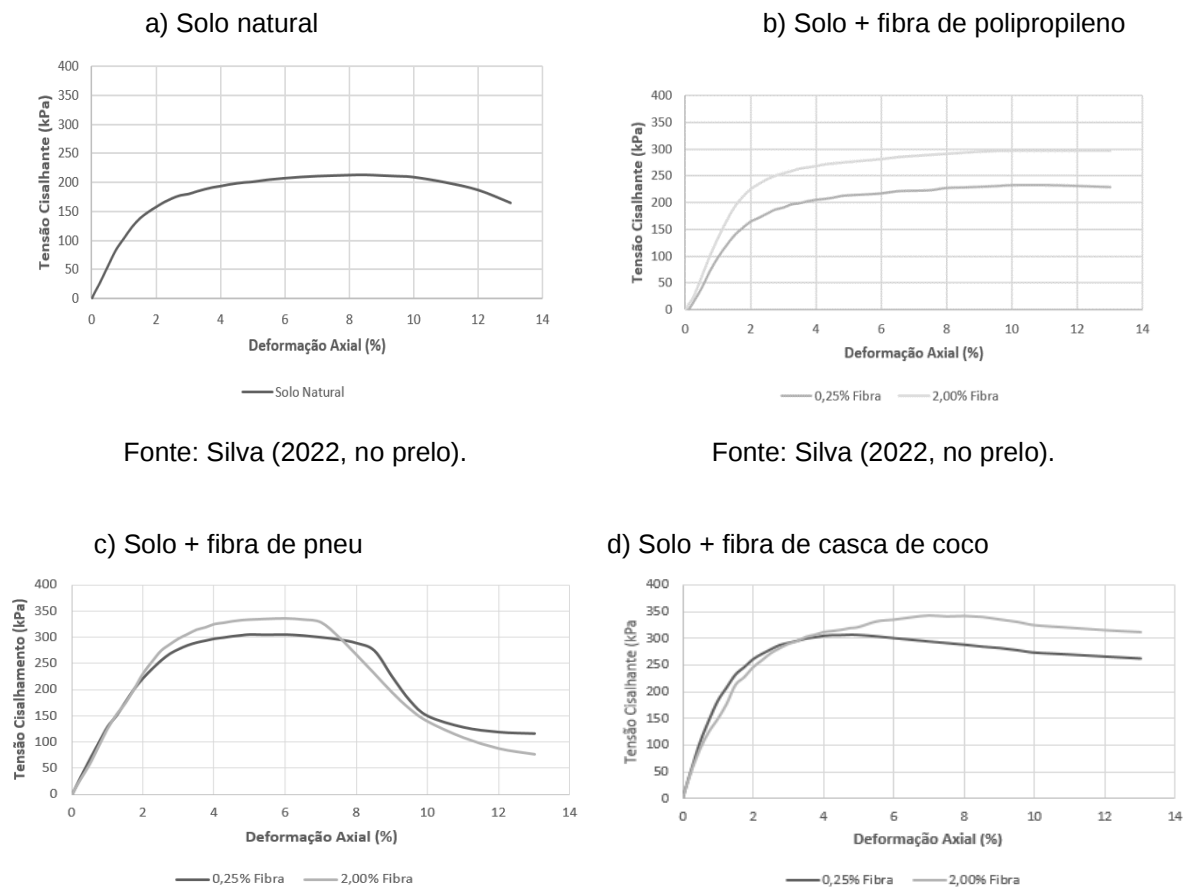
As Figuras 17, 19 e 20 apresentam as curvas carga versus deslocamento obtidas do ensaio squeeze-flow correspondentes às umidades utilizadas no ensaio para determinação do limite de liquidez. Observa-se que as curvas do solo e das misturas fluem de forma contínua, sem que haja alguma parada de carga ou de fluir, mostrando a homogeneidade das amostras, e verificando que não houve nenhuma oscilação de carga. É verificado que quanto maior a umidade, menor é a carga para que se atinja um certo deslocamento, logo, se comparado as umidades do limite de liquidez nos Quadros de 4 a 6 nota-se que apenas para a fibra de casca de coco a umidade aumentou com a adição de fibra, por isso no gráfico de solo + 2,00% fibra de casca de coco, Figura 20b, temos que a carga para provocar um dado deslocamento é menor do que a de solo + 0,25% fibra de casca de coco, Figura 20a. Para os gráficos com adição de fibra de polipropileno e pneu nota-se que a carga para provocar um dado deslocamento aumentou com a adição de fibras e a diminuição da umidade. Nos gráficos de solo com adição da fibra de polipropileno foi notado que o aumento da fibra proporcionou um deslocamento maior, com uma menor quantidade de carga aplicada para umidades semelhantes, com exceção da adição de 2,00%. Para a fibra de pneu o aumento deste material causou um acréscimo de carga para provocar o mesmo deslocamento. Nas fibras de casca de coco o aumento de fibra proporciona uma baixa na carga, para provocar o mesmo deslocamento.

As curvas de carga versus deslocamento obtidas do ensaio squeeze-flow no solo-fibra de polipropileno e solo-fibra de casca de coco com adição de 0,25% apresentam praticamente para todas as umidades dos três estágios. O estágio I equivale a um pequeno deslocamento, apresentando deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do material. O estágio II trata-se de um deslocamento intermediário, mostrando uma deformação plástica e/ou viscosa dependendo de suas características. Já no estágio III, ocorre um aumento expressivo da carga necessária para dar continuidade à deformação do material, influenciado pela aproximação dos agregados e o atrito entre eles (CARDOSO et al., 2010). Já as referidas curvas no solo-fibra pneu e solo+ 2,0% de fibra de casca de coco são observados os estágios II e III.

4.3.2 Compressão Simples

A Figura 21 apresenta curvas de tensão versus deformação axial do ensaio resistência a compressão simples para as fibras de polipropileno, pneu e casca de coco para percentuais de fibra de 0,25% e 2,00%. É observado que a amostra com 2,00% de fibra apresenta uma maior resistência a compressão simples. A curva tensão versus deformação no solo fibra de pneu apresenta comportamento de pico (material friável) enquanto no solo com casca de coco apresenta comportamento plástico para 0,25% de fibra de casca de coco e para 2% comportamento plástico com pequena tendência de amolecimento durante o cisalhamento. A Figura 22 mostra fotografias do formato das rupturas dos corpos de prova com adição de fibras de polipropileno.

Figura 21 – Curvas de tensão versus deformação axial do ensaio resistência a compressão simples para o solo natural e as fibras de polipropileno, pneu e casca de coco para percentuais de fibra de 0,25% e 2,00%.



Fonte: Silva (2022, no prelo).

Fonte: Silva (2022, no prelo).

Fonte: Araújo (2022).

Fonte: Faustino (2022).

Figura 22 – Fotografias do formato das rupturas dos corpos de prova com adição de diferentes percentuais de fibras de polipropileno.



Fonte: A Autora (2022).

4.3.3 Compressão Diametral

A Figura 23 apresenta as curvas de resistência a tração por compressão diametral versus deformação axial com fibras de polipropileno, pneu e casca de coco nos percentuais 0,25% e 2,00% para o solo na umidade ótima das misturas. As curvas apresentam comportamento de pico e o acréscimo de fibra aumenta a resistência e a deformação para atingir o valor máximo. A Figura 24 mostra fotografias do formato das rupturas dos corpos de prova com adição de fibras de polipropileno. Observa que a superfície de ruptura a tração fica bem definida para solo natural e para as adições de 0,25%; 0,5% e para 1,0% e 2,0% a espessura da fissura por tração é menor do que nas demais misturas.

Figura 23 – Curvas de resistência a tração por compressão diametral versus deformação axial para solo natural e fibras de polipropileno, pneu e casca de coco para percentuais de fibra de 0,25% e 2,00%.

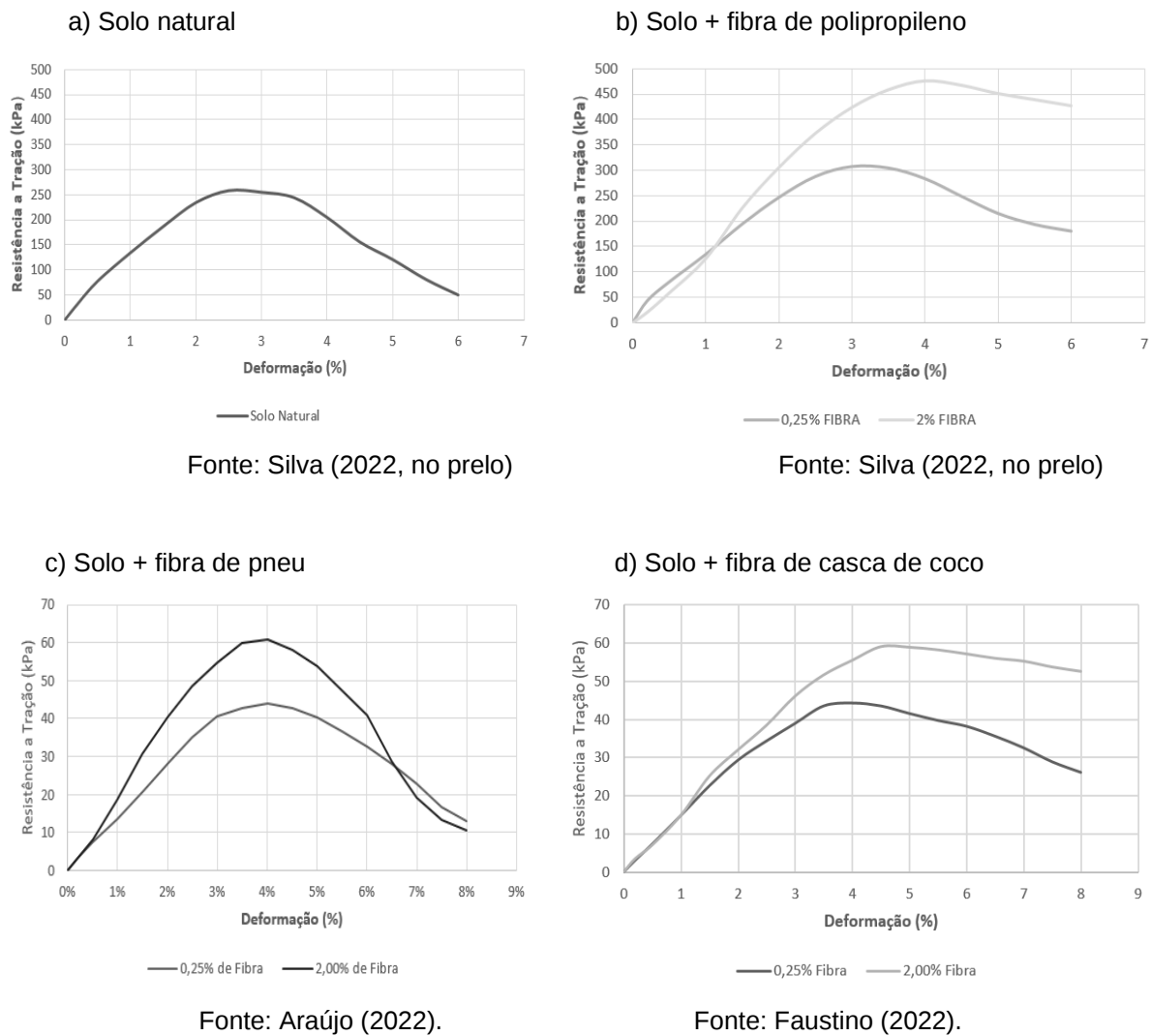


Figura 24 – Fotografias do formato das rupturas dos corpos de prova com adição de fibras de polipropileno.



Fonte: A Autora (2022)

5 CONCLUSÃO

Na avaliação de granulometria conjunta constatou-se na amostra de solo um elevado percentual de partículas com diâmetros menores que 0,075 mm. Na camada II a porcentagem é de 90% e de acordo com Chen (1988) o solo apresenta grande susceptibilidade a ser expansivo. Quanto ao índice de plasticidade, a camada II apresenta plasticidade muita alta e sua consistência é classificada como dura. Pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) a camada II é classificada como Argila de Alta Compressibilidade (CH) e pela classificação rodoviária (HRB – Highway Research Board) a camada é classificada como Solo Argiloso (A-7-6 e A- 6), ruim para uso em estradas.

No ensaio de compressão edométrico realizado com amostras da camada II foi verificado uma expansão máxima de 3,49% do volume do solo que estava em condição de inundação e com um carregamento de 10kPa. Nesse ensaio constatou-se uma elevada umidade inicial no material ensaiado, levando a uma baixa expansão do solo.

Para o ensaio de expansão livre o resultado obtido, de acordo com o critério adotado, é um grau de expansividade médio.

A análise da curva carga *versus* deslocamento possibilita a compreensão do comportamento reológico do solo em diferentes situações, partindo do repouso, até um elevado nível de deformação. O ensaio de squeeze-flow é capaz de aferir a variação e a forma da curva carga *versus* deslocamento do solo em umidades relacionadas às obtidas através dos limites de consistência.

A inserção das fibras de polipropileno ao solo praticamente não alterou os valores dos limites de consistência e do índice de plasticidade, estas fibras não absorvem água a partir do solo. A adição das fibras de pneu provocou uma diminuição nos valores do limite de liquidez e pequenas variações nos valores do limite de plasticidade (exceto para 0,25% de fibra), havendo uma diminuição do índice de plasticidade. Ao se adicionar das fibras de coco ao solo os limites de consistência e o índice de plasticidade cresceram, estas fibras absorvem água elevando os limites e índices. Para os ensaios de compressão simples e diametral a adição de fibras aumentou a resistência a deformação.

O solo de Paulista/PE é um material que apresenta grande susceptibilidade a ser expansivo, sendo uma argila siltosa e que a adição de fibras trouxe melhorias nas características mecânicas, principalmente no ganho de resistência.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. S.; ARAUJO, A. G. D.; FERREIRA, S. R. M.; Variação de Volume Devido ao Umedecimento em Solo Expansivo. **Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia**, v. 4, p. 62-69, 2020.

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco**. 2004. 244f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

ARAÚJO, A. G. D. **Análise do processo de fissuras e do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a secagem e umedecimento em solo expansivo**. 2019. Exame de qualificação (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ARAÚJO, J. T. Influência de fibras de pneu no comportamento de variação de volume e de propagação de fissuras em solos expansivos In: **Seminário Interno de Pesquisa do Grupo de Solos Não Saturados**, 2022.

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

_____. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - **Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7180: Solo – **Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7181: Solo – **Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7182: Solo – **Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

ATAIDE, S. O. F. Estudos da estabilização de um solo expansivo de Ipojuca-PE utilizado em aterros compactados. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 18., 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 2016.

BAPTISTA, C. F. N. **Ensaio fundamentais para a pavimentação e dimensionamento dos pavimentos flexíveis**. v. 1, 2. ed. Porto Alegre: Globo. 1976.

BARBOSA, F. A. S. **Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo**. 2019. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BASSON, M. S.; AYOTHIRAMAN, R.; Effect of human hair fiber reinforcement on shrinkage cracking potential of expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, p. 2159–2168, 2020.

BEZERRA, M. L.; BARBOSA, F. A. S.; ARAÚJO, A. G. D.; FERREIRA, S. R. M. Análise da Interação entre as Partículas em um Solo Expansivo Tratado com Areia, Cal e Cinza de Casca de Arroz, In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 20., 2020, Campina - SP Anais. 2020.(No prelo).

BEZERRA, I. M. L. **Análise da interação interpartícula e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

BHAVANI, B.; RAJU, C. K.; MOUNIKA, C.; VINAY KUMAR, S. L.; MANESH, H.; ANILKUMAR, M. The effect of polypropylene fibers on properties of expansive soil. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 7, n. 18, Mar. 2019, p.14-18.

BEIXIAO, S.; SHENGSHUI, C.; HUAQIANG, H.; CHENGFENG Z. Expansive soil crack depth under cumulative damage. **The Scientific World Journal**, v. 14, p. 1-9, Mar. 2014.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. (2010) **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: manual de utilização**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. EPUSP.

CASAGRANDE, Michéle D. T. **Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado Com Fibras de Polipropileno Visando o Uso Como Base de Fundações Superficiais**. 2001. 94 f. Dissertação, Mestre em Engenharia – UFRGS, Porto Alegre.

CASTILHOS, L. F.F. **Aproveitamento da fibra de coco Instituto de Tecnologia do Paraná (dossiê técnico)** – TECPAR, 2011

CHADUVULA, U.; VISWANADHAM, B. V. S.; KODIKARA, J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced. **Applied Clay Science**, v. 142, p. 163-172, Feb. 2017.

CHEN, F. H. **Foundations on expansive soils**. 2 ed. London: Elsevier Science Publishers B. V., 1988. 463 p.

CORREIA, A. A. S.; OLIVEIRA, P. J. V.; CUSTÓDIO, D. G. Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, 2015. p. 97-106.

DIVYA, P. V.; VISWANADHAM, B. V. S.; GOURC, J. P. Hydraulic conductivity behaviour of soil blended with geofiber inclusions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 2, Apr. 2018. p. 121-130.

DONALDSON, G. W. The occurrence of problems of heave and the factors affecting its nature. In: **International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils**, 2, 1969, Texas. Proceedings... Texas: Texas A&M University Press, 1969. p. 25-36.

EDINÇLILER, A.; AYHAN, V. Influence of tire fiber inclusions on shear strength of sand. **Geosynthetics International**, v. 17, n. 4, p. 183-192, Aug. 2010.

ESTABRAGH, A. R.; RAFATJO, H.; JAVADI, A. A. Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 3, May 2014. p. 233-243.

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

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação**. 1995. 379 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M. Solos colapsáveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil. In: **ñSAT**, 6., 2007, Salvador. Anais... Salvador: EDUFBA, v. 2, 2008. p. 593-619.

FAUSTINO, O. W. C. Análise do comportamento hidromecânico e processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde. In: **Seminário Interno de Pesquisa do Grupo de Solos Não Saturados**, 2022.

GOURLEY, C. S.; NEWILL, D.; SCHREINER, H. D. Expansive soils – TRL's research strategy. In: **International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils**, 1, 1993, London, United Kingdom. Proceedings... London, 1993.

HARIANTO, T.; HAYASHI, S.; DU, Y. J.; SUETSUGU, D. **Experimental investigation on strength and mechanical behavior of compacted soil-fiber mixtures**. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*, 2008b. p. 392-397.

HEJAZI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, v. 30, n. 1, 2012. p. 100-116.

HOLLAWAY, L. Polymers and polymers composites. In: J.M. ILLSTON. **Construction Materials**; their nature and behavior. Aed, London: J.M. Illston/E & FN Spon, 1994. P. 321-38.

HUANG, Z.; WEI, B.; ZHANG, L.; CHEN, W.; PENG, Z. Surface crack development rules and shear strength of compacted expansive soil due to dry-wet cycles. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 37, n. 4, p. 2647-2657. Aug. 2019.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. G. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced flyash- soil mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, v. 127, n. 7, 2011. p. 574-584.

MAHLER, C. F. **Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos**. 255f. 1994. Tese (Doutorado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

MALEKZADEH, M.; BILSEL, H. Hydro-mechanical behavior of polypropylene fiber reinforced expansive soils. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 7, Nov. 2014. p. 2028-2033.

MEEHAN, R. L.; KARP, L. B. California housing damage related to expansive soils. **Journal of Performance and Construction Facilities, ASCE**, v. 8, n. 2, 1994. p. 139-157.

MELO, D. F. M. **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MENEZES, L. C. P.; SOUSA, D. B.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Analysis of the physical- mechanical behavior of clayey sand soil improved with coir fiber. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 1, Apr. 2019. p. 31-42.

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, Mar. 2013. p. 483-493.

MORAIS, J. J. O; FERREIRA, S. R. M. Identification and classification of an expansive soil of Paulista in Pernambuco, Brazil. In: **International Conference on Unsaturated Soils(UNSAT2018)**, 7., 2018, Hong Kong, China. Proceedings... Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), 2018.

MURTHY, V. N. S. Foundations on collapsible and expansive soils. In: **Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering**. New York: Marcel Dekker, Inc., Chapter 18, 2003. p. 791-832.

MUTHUKUMAR, M.; SHUKLA, S. K. Influence of fibres on volume change attributes of expansive soil blended with lime. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement**, v. 172, v. 1, Feb. 2019. p. 37-43.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering**, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 259 p

NOTARO, C. C. (2012) **Comportamento reológico dos solos em umidades próximas aos limites de Atterberg, utilizando o Squeeze-flow**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE.

PHANIKUMAR, B. R.; SREEDHARAN, R.; ANIRUDDH, C. Swell-compressibility characteristics of lime-blended and cement-blended expansive clays – A comparative study. **Geomechanics and Geoengineering – An International Journal**, v. 10, n. 2, 2015. p. 153- 162.

PHANIKUMAR, B. R.; SINGLA, R. Swell-consolidation characteristics of fibre-reinforced expansive soils. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 1, Feb. 2016. p. 138-143.

SCHREINER, H. D. **Volume change of compacted highly plastic African clays**. 1988. 313f. Tese (Doutorado), Imperial College of Science and Technology, University of London, London, England, 1988.

SENHORAS, E.M. **Estratégias de uma Agenda para a Cadeia Agroindustrial do Coco: transformando a ameaça dos resíduos em oportunidades eco-eficientes**. Instituto de Economia – Unicamp, Campinas. 2003.

SILVA, A. C.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. **Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno- argiloso**. *Matéria*, v. 24, n. 2, 2019. 12 p.

SILVA, A. C.; **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. Recife: UPE, 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, A. C.; AQUINO, A. S. B. ALVES, D.S. .; FERREIRA, S. R. M. Avaliação do Potencial Colapsível e Expansivo de Solos do Nordeste Brasileiro por meio de Métodos Qualitativos e Quantitativos. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 20., 2020, Campina - SP Anais. 20. (No prelo). SIVAKUMAR BABU, G. L.; VASUDEVAN, A. K.; HALDAR, S. Numerical simulation of fiber- reinforced sand behavior. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 26, n. 2, 2008. p. 181- 188.

SOLTANI, A.; DENG, A.; TAHERI, A. Swell–compression characteristics of a fiber–reinforced expansive soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 2, Apr. 2018. p. 183- 189. STEINBERG, M. L. **Geomembranes and the control of expansive soils in construction**. New York: McGraw-Hill, 1998. 222 p.

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

TANG, C. S.; SHI, B.; ZHAO, L. Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 1, 2010. p. 54-62.

TATSUOKA, F.; CORREIA, A. G. Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction. **Procedia Engineering**, v. 143, 2016. p. 556-565.

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

TIWARI, N; SATYAM, N. Experimental study on the influence of polypropylene fiber on the swelling pressure expansion attributes of silica fume stabilized clayey soil. **Geosciences**, v. 9, n. 9, Aug. 2019