# COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS PET PARA APLICAÇÃO EM BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE RESÍDUOS

Nayra Cardoso Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Maurício Ehrlich

Rio de Janeiro

Março de 2018

COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS PET PARA APLICAÇÃO EM BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE RESÍDUOS

Nayra Cardoso Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

_____

Prof. Maurício Ehrlich, D.Sc.

_____

Prof. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.

_____

Prof. Mário Vicente Riccio Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Gomes, Nayra Cardoso

Comportamento Hidromecânico de Solos Reforçados com Fibras PET para Aplicação em Barreiras de Contenção de Resíduos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 47 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Maurício Ehrlich

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 44-47.

1. Solo Reforçado com Fibras. 2. Comportamento Hidráulico e Mecânico do Solo. 3. Fibras PET reciclado. I. Ehrlich, Maurício. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“Quando abro a porta de uma nova descoberta já encontro Deus lá dentro.”*

*Albert Einstein*

Aos meus estimados pais Herval e Nilza Gomes, ao meu noivo Teko, e principalmente a Deus dedico esta conquista, os quais caminham sempre ao meu lado regando minha vida com amor.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar meus passos, ser meu guia, meu melhor amigo e a essência do meu ser. A Ele, a minha eterna gratidão;

Ao meu pai Herval Gomes, homem de fé e sabedoria. Por não medir esforços em me ver feliz e realizada. Pelo amor incondicional e investimento em me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

À minha mãe Nilza Gomes, pelo apoio e carinho de sempre. Com sua forma única de ser amiga, louvo a Deus por tê-la ao meu lado.

Ao Carlos Alberto Albertassi, noivo e grande amor da minha vida, por sua lealdade e terna compreensão. Por ser o melhor parceiro de vida que Deus poderia me presentear;

À minha família, pelo exemplo de fé e determinação. Graças dou por ter em meu lar pessoas honradas com valores insubstituíveis;

Aos amigos que fiz ao longo do caminho, desde a infância a fase adulta. Cada um com sua contribuição, trazendo alegria e brilho à minha vida.

Ao Centro Universitário de Volta Redonda e o curso de Engenharia Ambiental pela graduação tão enriquecedora;

Aos amigos da COPPE/UFRJ, em especial à família da Geotecnia. Pelo sorriso de todas as manhãs, parceria nos momentos de dificuldade, apoio e cumplicidade. Foi uma honra conviver convosco no decorrer do mestrado;

Em especial, ao Prof. Dr. Maurício Ehrlich, pelo incentivo, disponibilidade e atenção constante, principalmente a confiança em mim depositada, além das valiosas orientações que me fizeram crescer profissionalmente e estarão para sempre comigo;

Ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, pela oportunidade concedida de realizar a tão almejada pós-graduação stricto sensu em Geotecnia Ambiental;

A ETRURIA Indústria de Fibras e Fios Sintéticos Ltda, pelo fornecimento das fibras PET e parceria. Em Especial a Malu, sempre prestativa e colaboradora;

A todos que sonharam comigo esta conquista, fizeram e fazem parte da minha vida, o meu puro e amável, muito obrigada.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS PET PARA APLICAÇÃO EM BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE RESÍDUOS

Nayra Cardoso Gomes

Março/2018

Orientador: Maurício Ehrlich

Programa: Engenharia Civil

Por questões ambientais, em áreas destinadas à disposição de resíduos, são utilizadas barreiras físicas para controle de fluxos de gases e líquidos. Ressecamentos e recalques diferenciais podem propiciar a abertura de trincas no solo que compõem o liner, favorecendo o avanço do fluxo de contaminante. Os solos tem baixa ou quase nula resistência à tração. Assim para evitar a fissuração é pertinente a utilização de reforços, visando garantir ao material composto melhores características mecânicas. Este trabalho apresenta uma análise do comportamento hidráulico e mecânico de um solo compactado e reforçado com fibras de PET reciclado. De forma a avaliar o impacto da fissuração nos resultados, ensaios de condutividade hidráulica foram efetuados antes e em diferentes etapas de compressão diametral em amostras com e sem fibras. Os resultados mostraram que a adição das fibras, tornou o material compósito mais dúctil, potencializando a resistência do a tração, o que minimiza o surgimento de fissuras, podendo conferir melhor estanqueidade ao sistema de barreiras.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

HYDRAULIC AND MECHANIC BEHAVIOR OF REINFORCED SOILS WITH PET FIBERS FOR APPLICATION IN WASTE CONTAINER BARRIERS

Nayra Cardoso Gomes

March/2018

Advisor: Maurício Ehrlich

Department: Civil Engineering

For environmental reasons, in areas destined to waste disposal, physical barriers are used to control gas and liquid flows. Differential settlement and dryness may lead to cracking in the soil that composes the liner, favoring the advance of the contaminant flow. Soils have low or almost no tensile strength. The use of reinforcements may avoid cracking, ensuring better mechanical characteristics of the composite material. This work presents an analysis of the hydraulic and mechanical behavior of a soil compacted and reinforced with recycled PET fibers. In order to evaluate the impact of cracking on the results, hydraulic conductivity tests were performed before and at different stages of diametral compression in samples with and without fibers. The results showed that the addition of the fibers made the composite material more ductile, enhancing the tensile strength, which minimizes the appearance of cracks, which may impart better sealing to the system of barriers.

**SUMÁRIO**

**1. INTRODUÇÃO ..... 1**

**1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa ..... 1**

**1.2. Objetivos ..... 2**

1.2.1. Objetivo geral ..... 2

1.2.2. Objetivos específicos ..... 2

1.3. Organização da Dissertação ..... 2

**2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 4**

**2.1. Sistemas de Barreiras ..... 4**

**2.2. Solos Reforçados ..... 7**

**2.3. Comportamento Hidromecânico Solo-Reforço ..... 8**

**2.3.1. Condutividade Hidráulica ..... 8**

**2.3.2. Resistência Mecânica ..... 12**

**2.4. Problemática da Fissuração ..... 14**

**2.4.1. Compósito Solo - Fibra ..... 14**

**2.4.2. Utilização de fibras de PET reciclado ..... 16**

**3. METODOLOGIA ..... 18**

**3.1. Programa experimental ..... 18**

**3.2. Caracterização do Solo ..... 18**

**3.2.1. Caracterização física do solo ..... 18**

**3.2.2. Caracterização físico-química do solo ..... 19**

**3.2.3. Análise Mineralógica ..... 19**

**3.2.4. Ensaio de Sedimentação com diferentes pH ..... 19**

**3.3. Caracterização da Fibra ..... 20**

**3.4. Ensaios Hidromecânicos ..... 21**

**4. RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 28**

**4.1. Caracterização do Solo ..... 28**

**4.1.1. Caracterização física do solo ..... 28**

**4.1.2. Caracterização físico-química do solo ..... 29**

**4.1.3. Análise Mineralógica ..... 29**

**4.1.4. Ensaio de Sedimentação com diferentes pH ..... 30**

**4.2. Ensaios de compactação ..... 32**

5.3 Estudos Hidromecânicos ..... 33

**4.3. Ensaios de Adensamento ..... 34**

**4.4. Compressão diametral ..... 35**

**5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS ..... 42**

**5.1. Conclusões ..... 42**

**5.2. Sugestões para Futuras Pesquisas ..... 43**

**6. REFERÊNCIAS ..... 44**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura dos solos argilosos (MITCHELL, 1993) ..... 6
Figura 2: Três principais grupos de argilominerais (Adaptado de LAMBER e WHITMAN, 1969) ..... 10
Figura 3: Fluxo em barreira de solo compactado (Adaptado de Benson e Daniel, 1994) ..... 11
Figura 4: Representação do comportamento hidráulico da zona entre camadas (Adaptado de Benson e Daniel, 1994) ..... 11
Figura 5: Seção vertical aleatória de uma barreira (Benson e Daniel, 1994) ..... 11
Figura 6: Representação esquemática da associação solo-reforço numa condição de simetria de cargas. ..... 12
Figura 7: Mobilização de Tensões em uma Massa de Solo Reforçado (EHRLICH e MITCHELL, 1994) ..... 13
Figura 8: Vista frontal do local onde o Solo residual de coloração avermelhada foi coletado na pedreira Magé Mineração ..... 18
Figura 9: Fibras PET utilizadas no projeto ..... 21
Figura 10: Antes e depois, respectivamente, da compactação estática ..... 22
Figura 11: Corpo-de-prova moldado (sem fibras) ..... 23
Figura 12: Corpo de prova antes e após o encamisamento (CP4 1,5% de fibras) 23
Figura 13: Ensaio Hidromecânico sendo executado ..... 24
Figura 14: Ensaio Hidromecânico (Adptado de Curcio,2008) ..... 24
Figura 15: Esquema do ensaio de compressão diametral pelo método ME-138 (DNER,1994) ..... 25
Figura 16: Bureta utilizada para ensaio de permeabilidade de carga constante .. 26
Figura 17: Curva Granulométrica ..... 28
Figura 18: Análise mineralógica qualitativa proveniente da DRX ..... 30
Figura 19: Curvas Granulométricas provenientes do ensaio de sedimentação com quatro diferentes soluções ..... 31
Figura 20: Ensaios de sedimentação ..... 31
Figura 21: Curvas de Compactação para diferentes porcentagens de fibras ..... 33
Figura 22: Adensamento de corpos-de-prova sob diferentes teores de fibras ($\sigma_c$=100kPa) ..... 34

Figura 23: Adensamento de corpos-de-prova sob diferentes teores de fibras segunda etapa (primeiro com $\sigma_c$= 10 kPa e, posteriormente, $\sigma_c$= 100kPa)..... 35
Figura 24: Tensão de tração resultante nos CP's x Deformação radial – 1ª etapa ($\sigma_c$=100kPa) ..... 36
Figura 25: Condutividade Hidráulica x Deformação radial - 1ª etapa ($\sigma_c$=100kPa) ..... 36
Figura 26: Aberturas de trincas após ensaios de compressão diametral: (a) sem fibras, (b) 0,5% de fibras (c) 1,0% e (d) 1,5% de fibras PET ..... 37
Figura 27: Tensão de Tração x Deformação radial – CP1 (0,0%), CP2 (0,5%), CP3 (1,0%), CP4 (1,5%) ..... 38
Figura 28: Condutividade hidráulica x Deformação Radial com $\sigma_c$= 10kPa e posteriormente $\sigma_c$= 100kPa para os teores de 0,0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibra PET ..... 39
Figura 29: Corpos de Prova após a 2ª rodada dos ensaios: (a) CP1 (0,0%), (b) CP2 (0,5%), (c) CP3 (1,0%) e (d) CP4 (1,5%) ..... 40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas das Fibras PET ..... 21
Tabela 2: Análise granulométrica do solo utilizado ..... 28
Tabela 3: Índices físicos do solo utilizado ..... 28
Tabela 4: Análise do pH do solo utilizado ..... 29
Tabela 5: Análise química do solo..... 29
Tabela 6: Resultados do Ensaio de Compactação..... 33

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa

O aumento na demanda energética e tecnológica está diretamente ligado ao aumento do consumo e à consequente produção de resíduos. O incremento na taxa de crescimento populacional e o desenvolvimento contínuo promovem maior utilização dos recursos que, por sua vez, impulsionam uma crise ambiental com a poluição resultante desse processo (BRAGA et. al., 2010). Buscando minimizar esse impacto, é crescente a busca de alternativas para a redução do montante de resíduos dispostos no meio ambiente.

Atualmente, a crescente preocupação com a destinação final dos resíduos gerados propele a minimização dos impactos causados ao meio. É necessário um novo posicionamento referente ao gerenciamento do descarte desses materiais, a manutenção de aterros e a organização das frações de resíduos. A busca por soluções na área de resíduos reflete na demanda em que a sociedade pressiona por mudanças motivadas pelos elevados custos socioeconômicos e ambientais. Deve-se buscar destinações corretas, incentivando técnicas de reaproveitamento. Se manejados adequadamente, os resíduos sólidos adquirem valor comercial e podem ser utilizados em forma de novas matérias-primas ou como insumos.

No que diz respeito à manutenção e controle geomecânico de áreas destinadas à disposição de resíduos, são comumente utilizadas barreiras físicas para limitação de fluxo de gases e líquidos. Em linhas gerais, barreiras são construídas com solo de natureza argilosa, ou seja, de fina granulometria, compactados, reforçados ou não com outros tipos de materiais, como os geossintéticos. Sob o ponto de vista da engenharia geotécnica, os solos podem desempenhar várias funções como base de sustentação das obras, uso em pavimentos, barragens e aterros para cada aplicação desejada. Para projeto faz-se necessário o conhecimento de propriedades físicas e químicas dos materiais envolvidos de forma a se ter um desempenho satisfatório quando da sua aplicação.

No objetivo de reter a contaminação oriunda de lixiviados, aplicam-se sistemas de barreiras de contenção que devem resistir a esforços diversos. A escolha do tipo de contenção a ser adotado depende das solicitações que ocorrerão na vida útil da obra, das características dos solos envolvidos e recursos que se pretende disponibilizar.

O uso de técnicas de reforço de solo pode ser útil neste segmento da engenharia, trazendo novas perspectivas de aplicação. Os solos desde que adequadamente compactados, podem apresentar significativa resistência à compressão e ao cisalhamento. No entanto, a resistência à tração do solo é baixa ou nula. A utilização de reforços pode

suprir esta deficiência. A interação solo-reforço permite conferir ao material composto melhores características mecânicas (EHRLICH e BECKER, 2009).

O uso de materiais fibrosos tem potencial para melhorar o desempenho do solo aplicado na construção da barreira. A adição de fibras ao solo pode resultar em um material mais resistente e dúctil. As fibras atuam como elementos de reforço, melhorando seu comportamento mecânico, redundando em menores deformações e fissuração. O reforço dos *liners* de contenção de resíduos pode ter influência direta em sua condutividade hidráulica através de minimização de possíveis fissurações.

No presente trabalho, pretende-se, estudar o uso de fibras PET recicladas em barreiras de contenção de resíduos. Serão discutidas sua composição e quantidade disposta no meio ambiente, reaproveitamento e sua aplicação como reforço. É também apresentado um embasamento teórico focado no comportamento hidromecânico.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo geral

Avaliou-se em laboratório o comportamento hidromecânico de um solo residual reforçado com fibras PET reciclado para aplicação em barreiras de contenção. Buscou-se verificar, em amostras reforçadas e não reforçadas, a melhoria do comportamento, com ênfase na redução do fissuramento e no impacto na condutividade hidráulica do solo.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar o solo e a fibra PET reciclável utilizada no programa experimental;
- Executar ensaios laboratoriais de compressão diametral sob diferentes tensões confinantes, compatíveis às verificadas usualmente em campo, com e sem a presença das fibras;
- Avaliar a condutividade hidráulica através de ensaios de permeabilidade de carga constante com e sem a contribuição das fibras no processo;
- Verificar o comportamento do material antes e após o fissuramento;
- Analisar a contribuição do reforço das fibras no comportamento hidromecânico do solo.

## 1.3. Organização da Dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo aborda a relevância e objetivos da presente pesquisa. No capítulo 2 apresenta-se a revisão

bibliográfica que inclui análises sobre sistemas de barreiras e da problemática da fissuração, conceitos sobre reforço de solo e dos compósitos solo-fibra e aspectos relacionados ao comportamento hidromecânico de compósitos solo-fibra. No capítulo 3 descreve-se a metodologia utilizada na presente pesquisa, enquanto no capítulo 4 são expostos os resultados encontrados e as discussões dos mesmos. No capítulo 5 relacionam-se as conclusões e sugestões para pesquisas futuras. No capítulo 6 encontram-se as referências bibliográficas.

# 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1. Sistemas de Barreiras

Em depósitos de rejeitos os materiais necessitam ser adequadamente contidos. Tem-se que atentar para a drenagem dos fluxos internos e garantir eficientes barreiras de contenção, visto seu elevado potencial de impacto ambiental negativo. Estes materiais se distinguem pelo ar e fração líquida contidos nos vazios, e a matéria sólida, que pode ser orgânica ou inorgânica. Alguns destes resíduos têm potencial reciclável (SCHULER, 2010).

Visando a contenção de plumas de contaminação, utilizam-se, muitas vezes, barreiras físicas. Historicamente, pode compreender como uma das primeiras formas de remediação, consistindo em uma alternativa de interceptar o avanço de contaminantes, assegurando que não haja progresso da contaminação além do limite estabelecido pela barreira. A execução de tal técnica é parte importante na remediação, uma vez que a retenção da frente contaminante auxilia na aplicação do tratamento específico.

Na construção das camadas impermeabilizantes, o solo mais indicado é o argiloso, especificamente classificado pela Cetesb (1993) com granulometria de no mínimo 30% de partículas com diâmetro inferior a 0,075mm, passantes na peneira nº 200, uma vez que a percentagem de finos tem papel preponderante na permeabilidade do solo. É requerido um coeficiente de permeabilidade inferior a $10^{-7}$ cm/s, Limite de Liquidez maior ou igual a 30%, Índice de Plasticidade mínimo de 15% e pH neutro. A US.EPA (2004), sugere uma especificação análoga para tais camadas, pontuando um percentual máximo retido na peneira nº 4 (4,76 mm de abertura), em torno de de 20 a 50%.

É importante estudar a interação dos fluxos de massa e seus reflexos no comportamento do solo utilizado como barreira. Os processos naturais possibilitam a migração de elementos químicos mas, um aumento na concentração destes elementos por intermédio de algum fluxo percolante, pode levar a alterações físico-químicas na barreira, permitindo a passagem de contaminantes (MITCHELL, 1976).

Contaminantes têm características particulares, que envolvem a solubilidade de íons em água, capacidade oxiredutora, interferência do pH, entre outras. A percolação de um contaminante pode refletir no arranjo estrutural, composição química e mineral, na alteração das propriedades do solo. Esse conjunto de mecanismos e reações internas decorrentes da passagem química através dos horizontes do solo representa um aspecto importante para avaliação geotécnica ambiental.

Os processos de transporte e interação entre contaminantes e solo estão diretamente ligados a fatores característicos do meio. As espécies químicas se

movimentam através dos poros do solo e, se estes estiverem completamente saturados, só a parcela solúvel poderá avançar. Importante ressaltar que além da particularidade do contaminante, o caminho a ser percorrido será determinado pela porosidade do meio, a granulometria, arranjo das partículas, estrutura e composição mineralógica, bem como o teor de umidade do solo (MITCHELL, 1976).

Os argilominerais presentes no solo podem influenciar no transporte de contaminantes, num processo de interação física e química. O comportamento resultante da interação solo-contaminante varia com a constituição mineralógica do solo e com o contaminante presente. Por exemplo, a presença de bentonita proporciona um aumento na capacidade de sorção de contaminantes, principalmente cátions, auxiliando uma diminuição do fluxo por difusão em camadas selantes basais de aterros sanitários.

A interação resultante entre as partículas de argilominerais se dá através de ligações elétricas e o contato feito através da camada de água absorvida, potencialmente reativa no complexo trocável. A teoria da Dupla Camada Difusa (Gouy-Chapman) fundamenta a resposta do solo na presença de cátions trocáveis, que é influenciada por diversos fatores, como apresentado na Eq. (1). O efeito do pH do meio também pode refletir na estrutura do solo, mesmo não estando explicitamente refletida na equação, pois em meios ácidos podem gerar flocos, pela dissolução dos minerais presentes no solo e, em reações básicas, sua dispersão (MITCHELL, 1993).

$$x = \frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\varepsilon.k.T}{4.\pi.e^2.\sum n_{i0}.\ z_i^2}} \qquad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

$x$ = Espessura da Dupla Camada

$K$ – centro de gravidade da DC

$\varepsilon$ - constante dielétrica da solução intersticial

$k$ – constante de Boltzmann = 1,38 x $10^{-16}$ ergs/K

$T$ – temperatura (K)

$e$ – carga elementar = 16 x $10^{-20}$ Coulombs

$n_{iO}$ – concentração de íons na solução

$z_i$ – valência dos íons em solução

Pode-se afirmar que, de acordo com a variação de parâmetros desta equação, relações como a diminuição da espessura da dupla camada com o aumento da valência dos cátions adsorvidos ou a concentração dos íons na solução ou salinidade, as partículas se aproximam formando grumos (floculação), aumentando o tamanho dos poros e consequentemente, aumentando a permeabilidade. O mesmo ocorre se há uma diminuição na constante dielétrica (e), a espessura também diminui e há floculação.

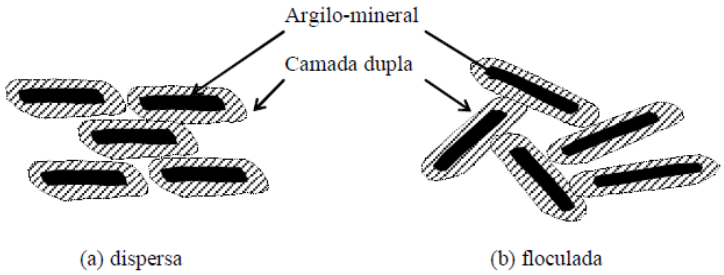



**Figura 1: Estrutura dos solos argilosos (MITCHELL, 1993)**

Como ilustra a Figura 1, o comportamento do solo com a presença de íons na solução percolante influencia diretamente na capacidade de avanço do fluxo, visto a interferência na permeabilidade. É valido ressaltar que a adsorção está entrelaçada ao processo de troca iônica que por sua vez, também reflete no avanço ou retração da pluma contaminante.

O ponto de carga zero (PCZ) é uma outra propriedade importante para o entendimento de fenômenos no solo decorrentes da dupla camada. O ponto isoelétrico referente ao PCZ é particular na atividade dos íons presentes na matriz do solo. O ponto de carga zero indica o valor de pH no qual um sólido apresenta carga eletricamente nula em sua superfície, ou seja, o número de cargas positivas igual ao número de cargas negativas. Assim, o PCZ possibilita relacionar a carga na superfície do adsorvente em função do pH. Os grãos do solo ao entrarem em contato com uma solução aquosa de pH abaixo do pH do PCZ, apresentam carga resultante positiva na superfície, de modo que ânions são adsorvidos em maior quantidade, se comparados aos cátions, para que haja balanceamento. Por outro lado, em soluções com um pH mais alto do que o pH do PCZ, a superfície é carregada negativamente adsorvendo, preferencialmente, cátions (RAIJ, 1973).

A adsorção envolve geralmente o contato entre uma fase fluida e uma sólida, no qual há transferência de massa presente na fase fluida para a superfície do sólido, favorecendo o acúmulo dessa substância no grão do solo. A capacidade de adsorção do solo é determinada, principalmente, pelas suas propriedades texturais, bem como sua estrutura química.

O comportamento de contaminantes orgânicos passa a ser mais complexo visto as três fases o caracterizam. Além da solubilidade, podendo ou não serem miscíveis, a densidade, viscosidade e a volatilidade vão interferir diretamente no transporte através do solo. A capacidade da fração sólida do sistema reter um contaminante orgânico por sorção é influenciada pelas propriedades peculiares dos compostos presentes na solução percolante.

Três mecanismos básicos de transporte que regem a percolação contaminante são, para solutos: advecção, a dispersão mecânica e a difusão molecular. Para fins de controle de concentração e tempo estimado, aplicam-se equações matemáticas características levando em consideração fatores referentes aos fenômenos como a espécie presente na água, o solo e sua porosidade, a direção do fluxo, velocidade e tortuosidade.

A advecção é um fenômeno físico independente, onde o avanço do soluto tem seu transporte passivo pela água em movimento remetendo à ideia de uma “onda quadrada” e possuindo fluxo unidimensional químico controlado pelo gradiente hidráulico nos vazios do solo. A dispersão mecânica é relativa à tortuosidade do solo vista interferência na concentração devidos caminhos percorridos, ou seja, é um fenômeno de espalhamento do soluto por entre o fluxo entre os grãos do solo. A difusão molecular é uma regularização dos níveis de concentração pelo qual o avanço da espécie no meio aquoso é governado pela diferença de concentração ao longo da trajetória e isso ocorre mesmo que a água não esteja em movimento. Em linhas gerais, a representação do avanço de uma espécie de caráter contaminante em um meio poroso saturado se dá pela combinação destes mecanismos, que se verificam simultaneamente.

Para isolar uma possível contaminação e até mesmo minimizar o avanço em uma região já impactada, estabelecendo limites, tem-se a técnica de contenção por barreiras físicas para limitação de fluxo de gases e líquidos. Barreiras podem ser utilizadas emergencialmente, como solução temporária, ou em projetos definitivos. Existem elementos indispensáveis para projetos de engenharia que têm por função garantir a segurança da contenção dos contaminantes.

## 2.2. Solos Reforçados

Têm-se registros de uso de reforço em solos desde os grandes templos religiosos mesopotâmicos, chamados Ziggurats, com datação entre 5000 e 2500 anos atrás, os quais utilizavam em sua construção mantas horizontais de junco e bambu no intuito de reforço e estabilidade. Esta técnica também foi adotada em habitações primitivas, edificadas com argila e galhos, como elementos de reforço, em grandes barragens de terra edificadas na China, reforçadas com galhos, a própria Muralha da China, na qual também se adotou, em alguns trechos, solo-reforçado, dentre outras obras construídas na antiguidade.

Os solos, desde que bem compactados, apresentam boa resistência à compressão e ao cisalhamento. Entretanto, sua resistência à tração é baixa, próxima à nula. A inclusão de reforços supre tal deficiência e garante maior resistência aos esforços (EHRLICH, BECKER, 2009). A inclusão de fibras no solo pode levar à melhoria nas suas características. As fibras conferem ao solo maior rigidez e resistência, controlando a

abertura e o espaçamento de possíveis fissuras que favoreceriam o fluxo de água no caso de barreiras de contenção.

## 2.3. Comportamento Hidromecânico Solo-Reforço

### 2.3.1. Condutividade Hidráulica

Os mecanismos de fluxo se baseiam nas condições estudadas por Henry Darcy, em meados do século 19. Tal princípio partiu de um experimento com colunas de areia de diferentes alturas e diferentes cargas hidráulicas e concluiu que a variação do fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico. Em linhas gerais, é um dos princípios fundamentais da mecânica dos solos para condições de percolação de fluidos (LAMBE, WHITMAN, 1969). O princípio adotado por Darcy analisa a velocidade aparente de percolação devido ao caminho tortuoso seguido pela água em um fluxo contínuo laminar pelos vazios do solo correlacionando-o com o comprimento da amostra, L, e a carga hidráulica, para uma dada vazão Q, através do solo. Especificamente, em seu experimento, Darcy provou que a vazão de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico sendo expresso pela Equação (2):

$$Q = k.\frac{\Delta H}{L}.A = k.i.A \qquad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$Q$ = Vazão do fluxo ($cm^3/s$)

$k$ = Coeficiente de permeabilidade (cm/s)

$\Delta H$ = Carga Hidráulica (cm)

$L$ = Comprimento da amostra (cm)

$A$ = área da seção transversal da amostra de solo ($cm^2$)

$i$ = Gradiente hidráulico, sendo este a taxa de variação da carga hidráulica total em relação ao comprimento percorrido pelo fluxo

Ao dividir a vazão $Q$ pela área transversal da amostra $A$ é possível obter a velocidade aparente com que a água percola pelo solo. Admitindo-se que a relação entre a área transversal de vazios e a área transversal total seja dada pela porosidade $n$. Desse modo, em meios saturados, a velocidade de percolação real da água no solo pode ser calculada pela Equação (3):

$$v_{real} = \frac{v_{aparente}}{n} \qquad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$v_{real}$ = Velocidade real de percolação (cm/s)

$v_{aparente}$ = Velocidade aparente de percolação (cm/s)

$n$ = Porosidade

O fluido líquido adota caminhos preferenciais na passagem da água. A permeabilidade de um solo depende necessariamente das três fases que o constituem: os grãos, a água e o ar, presentes nos vazios deixados no encontro da parte sólida. A permeabilidade (ou condutividade hidráulica) e o gradiente hidráulico, promovido pela diferença de carga hidráulica no solo, comanda este processo. O coeficiente de permeabilidade (k), é uma propriedade do solo para com o líquido em questão, e representa a velocidade de escoamento média do fluxo de água em um solo sob a ação de um gradiente hidráulico unitário.

A permeabilidade é influenciada por fatores como composição e estrutura da matriz do solo, distribuição e tamanho das partículas, textura, índice de vazios e graus de saturação. Não somente as características do solo, o escoamento pelo meio poroso também é relativo ao tipo de fluxo, viscosidade e densidade do fluido, além da temperatura (LAMBE, WHITMAN, 1969). O avanço de uma pluma de contaminação, por exemplo, vai estar diretamente ligado as reações físico-quimicas dos minerais presentes no solo e nas propriedades características do fluido tendo em vista a interação solo-contaminante.

Solos são materiais com características distintas uns dos outros onde a trajetória do fluxo varia de acordo com a textura e forma da partícula pois, grãos alongados criam um fluxo mais tortuoso se comparado aos grãos esféricos devido ao atrito na superfície. Como a condutividade hidráulica é relativa aos vazios deixados pela distribuição das partículas, grãos mais finos levam a um solo de menor permeabilidade. Consequentemente, com menor número e dimensão de vazios entre os grãos, a resistência ao fluxo de água se apresenta maior.

Além disso, a composição mineralógica dos solos finos interfere no processo hidráulico. Os diferentes constituintes levam a diferentes espessuras de água adsorvida nas partículas de argila, variando o diâmetro efetivo dos poros. Por esta razão, o tipo de argilomineral presente no solo influencia na condutividade hidráulica. No ambiente, são encontrados três grupos de argilo-minerais mais comuns: a caulinita, ilita e a montmorilonita ilustrados na Figura 5, os quais apresentam comportamentos bem distintos, principalmente na presença de água.

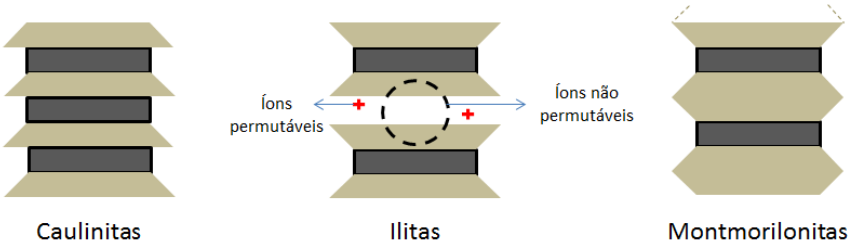



**Figura 2: Três principais grupos de argilominerais (Adaptado de LAMBER e WHITMAN, 1969)**

A caulinita é um argilomineral encontrado predominantemente em solos ácidos, de regiões tropicais e subtropicais, como por exemplo o Cerrado brasileiro. De estrutura 1:1 com cristais lamelares, fisicamente, dá aos solos boa agregação, aeração e permeabilidade. Quimicamente, não é expansivo, pois apresenta reduzido espaço entre as camadas para penetração de moléculas de água e íons, e isso reflete em sua baixa capacidade de troca catiônica. Possui uma baixa plasticidade e densidade real de 2,62 g/cm$^3$ a 2,66 g/cm$^3$ (LAMBE, WHITMAN, 1969).

Ilita é comumente encontrada em solos originários de rochas graníticas, resultante da fase inicial de intemperismo químico das micas. Esse argilomineral 2:1 possui cristais lamelares, baixa expansão e plasticidade, com ligações rígidas entre as camadas, dificultando assim, a penetração e absorção de água e íons. Importante ressaltar a presença de íon de potássio (K) em sua estrutura, porém, os íons não permutáveis presentes, fazem com que a união entre as camadas seja mais estável e não muito afetada pela água. A montmorilonita, assim como a Ilita, é do grupo dos argilominerais 2:1, porém com elevada capacidade expansão e retenção de íons. De elevada plasticidade, densidade de 2,75 a 2,78, possui pequenos cristais (com possibilidade de quebra dos grãos no cisalhamento). Estão presentes nas regiões temperadas e áridas, em solos onde ocorreu pouca ação do intemperismo (SANTOS,1989).

O fluxo através de uma matriz argilosa é caracterizado por um comportamento não totalmente contínuo. O líquido que se move através do solo compactado por caminhos preferenciais controlados por macroporos, que facilitam o fluxo. As Figuras 2 e 3 mostram o esquema adotado por Benson e Daniel (1994-a) onde é possível observar zonas de maior permeabilidade, onde o fluxo se verifica mais rapidamente, e outras nas quais se observam maiores dificuldades.

**Figura 3: Fluxo em barreira de solo compactado (Adaptado de Benson e Daniel, 1994)**

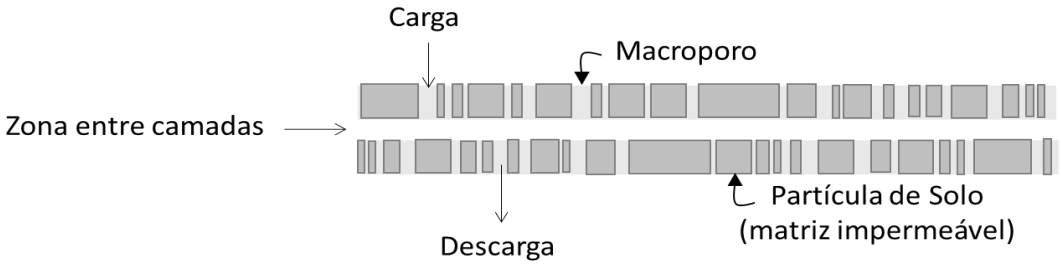



**Figura 4: Representação do comportamento hidráulico da zona entre camadas (Adaptado de Benson e Daniel, 1994)**

O líquido segue verticalmente através dos macroporos dentro das camadas e horizontalmente nas interfaces entre as camadas. Assim, a natureza do fluxo descontínuo requer uma análise multi-dimensional. O modelo apresentado por Benson e Daniel (1994-a) é, respectivamente, um fluxo uni-dimensional em um meio contínuo e outro modelo de fluxo multi-dimensional através dos poros. Tal fluxo, ao ser interceptado pela barreira poderia ser simulado conforme ilustra a Figura 5. A seção vertical de um ponto qualquer de uma barreira receptando líquido a uma profundidade $H_L$, composta de $N$ camadas de espessura $L_i$, apresenta a condutividade hidráulica $k_i$ como a variável aleatória e independente dentro de cada camada.

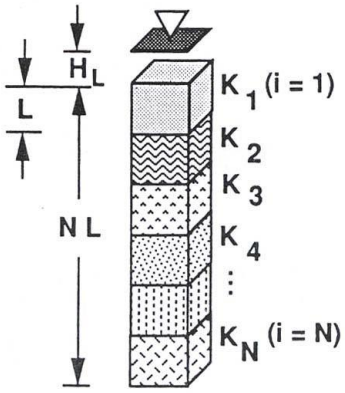



**Figura 5: Seção vertical aleatória de uma barreira (Benson e Daniel, 1994)**

Para aplicação, considera-se o solo saturado não apresentando sucção, com uma condutividade hidráulica saturada equivalente ($k_{eq}$), fluxo constante colocado sobre a barreira instantaneamente, sem afetar a condutividade hidráulica do solo. Admite-se barreiras com solo compactado na umidade ótima tendo o grau de saturação na ordem de 80 a 95% e, neste caso, a consideração de fluxo constante e saturado pode ser considerado aceitável.

### 2.3.2. Resistência Mecânica

O desempenho dos solos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, orientação e distribuição da fibra na matriz, pelas propriedades físicas da fibra e do solo, incluindo a aderência ao unir por compactação as duas fases (JOHNSTON, 1994)

A resistência ao arrancamento das fibras é controlada pelo tipo e comprimento das fibras, pela aderência, atrito e tensão efetiva na interface. A maior eficiência ocorre quando seu comprimento se apresenta suficiente para desenvolver uma tensão de arrancamento igual à sua resistência à tração. Assim, quanto maior for o comprimento das fibras, menor será a possibilidade de serem arrancadas (HEINECK, 2002).

Na Figura 6, apresenta-se esquematicamente esta associação. O atrito mobilizado na interface solo-reforço impede a livre movimentação do solo. As deformações laterais da massa reforçada tracionam o reforço e, numa condição de simetria de cargas, a tração máxima mobilizada no reforço ocorreria no centro do material.

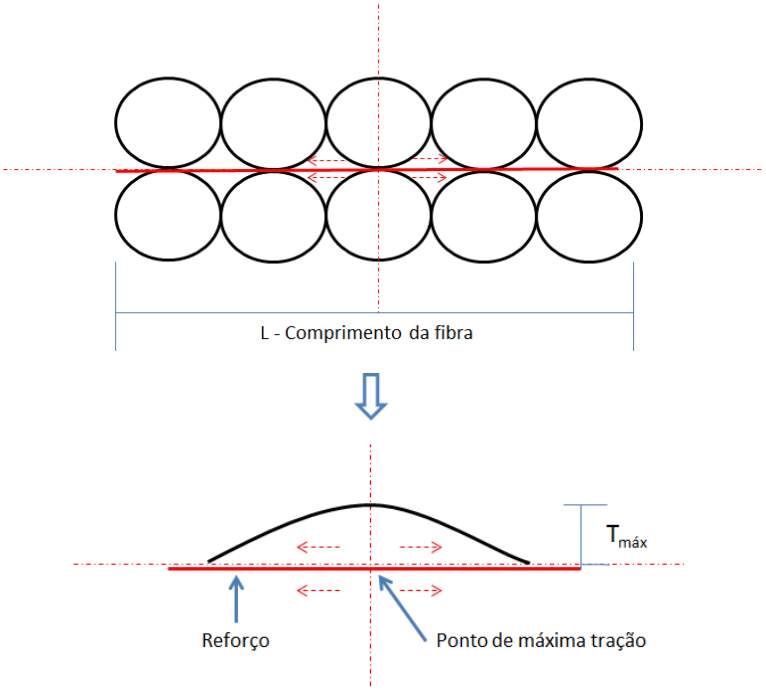



**Figura 6: Representação esquemática da associação solo-reforço numa condição de simetria de cargas.**

A deformação resultante depende da rigidez do reforço à tração. Quando mobilizado, o mecanismo de tensões em uma massa de solo resulta na passagem do estado de repouso ao estado de empuxo ativo, usualmente representado por $K_0$ e $K_a$, respectivamente. Se reforçado, as tensões que simultaneamente atuarão no solo e nas fibras são equilibradas de forma que interrompem a chegada à condição ativa. Dessa forma, estruturas reforçadas tendem melhor resistir forças de tração ocasionando menores deformações, conforme indicado na Figura 7.

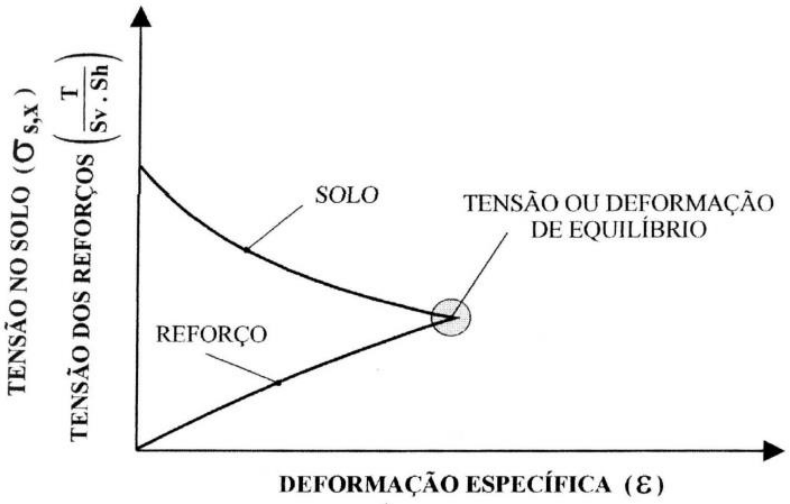



**Figura 7: Mobilização de Tensões em uma Massa de Solo Reforçado (EHRLICH e MITCHELL, 1994)**

Na Figura 7, tem-se que sob condição de deformação horizontal nula o solo se encontra no estado de repouso. À medida que ocorrem deformações laterais, as tensões horizontais no solo ($\sigma_{s,x}$) diminuem, tendendo ao estado ativo. Conjuntamente, as tensões nos reforços crescem até que o equilíbrio seja satisfeito. Quanto maior for a rigidez do reforço, menores serão as deformações necessárias para que o equilíbrio seja atendido. O comportamento tensão-deformação da massa reforçada é controlada pela rigidez do solo e dos reforços. Tal comportamento é controlado pelo índice de rigidez relativa (Si) (Ehrlich e Mitchell 1994):

$$Si = \frac{Jr}{K \,.\, Pa \,.\, Sv} \qquad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

$Jr$ = módulo de rigidez do reforço à tração;

$K$ = módulo tangente inicial do solo do modelo hiperbólico (Duncan et al, 1980);

$Pa$ = pressão atmosférica;

$Sv$ = espaçamento vertical dos reforços;

No controle geomecânico de aterros, há necessidade de camadas impermeabilizantes para minimizar a entrada e saída de fluidos no depósito, buscando evitar a contaminação do entorno do mesmo. Fissuras são eventos indesejáveis e podem ocorrer por ressecamento da camada de cobertura, bem como por diferentes tipos de solicitação na base. De forma a controlar este tipo de problema, busca-se obter um material resistente a diferentes tipos de solicitação, conferindo maior ductilidade e aumento na resistência à compressão e à tração, permitindo redução da abertura de trincas e fissuras no revestimento superior e, principalmente, na camada de contenção situada na base (*liner*).

## 2.4. Problemática da Fissuração

### 2.4.1. Compósito Solo - Fibra

A utilização de compósitos reforçados com fibras tem um histórico vasto no setor dos materiais, tendo por objetivo melhorar a ductilidade da matriz frágil. Desde 1930 o petróleo se apresenta como uma das principais matérias-primas, a partir do qual são fabricados plásticos, fibras, borrachas e adesivos e todo esse material disposto no meio, necessitando de uma destinação após seu uso (ILLSTON,1994). Atualmente, há no mercado uma grande quantidade de polímeros de variadas propriedades e formas.

Um material compósito é constituído de duas fases ou mais que, ao se combinarrem, apresentam propriedades as quais isoladamente não apresentariam. Baseia-se em uma matriz e o elemento de reforço, os quais são desenvolvidos para otimizar ambos materiais e compreender melhorias comportamentais (BUDINSKI, 1996). Os materiais compósitos são geralmente pautados em combinações de polímeros e materiais diversos que, sob a ótica da ciência dos materiais, apresentam características de alta relevância física, como por exemplo, melhoria da rigidez, da plasticidade, da resistência ao cisalhamento, da tendência de fissuração, entre outros.

O emprego dos compósitos é geralmente constituído por matriz e fibra. No caso abordado neste trabalho, a associação é realizada por solo mais fibra PET reciclado. Na construção civil, os compósitos são tipicamente constituídos por matriz frágil reforçada com fibra dúctil (MONTARDO, 2010). Para condições reais de campo, a aplicabilidade de materiais compósitos para fins de reforço é variável, pois, para cada tipo de situação encontrada há uma dosagem eficaz. A eficiência do sistema é diretamente relacionada ao tipo de solo, especificação da fibra e as demais variáveis.

Os polímeros, em sua grande maioria, apresentam baixo módulo de elasticidade, ductilidade variável e considerável resistência à tração, além de serem extremamente versáteis adaptando-se as necessidades específicas do projeto (TAYLOR, 1994). Os materiais compósitos, originados muitas vezes na combinação de polímeros, compreendem características que potencializam rigidez, ductilidade, fragilidade, capacidade de absorção de energia de deformação e tais propriedades mecânicas são necessárias para a aplicação em reforço de solo.

Um dos fatores principais de influência no comportamento é o teor de fibra na matriz. Quando maior for a quantidade utilizada, maior será a resistência à fissuração e menor a dimensão das fissuras, considerando que as fibras são capazes de absorver as tensões de tração induzidas pelo carregamento e retardam o fissuramento. Importante ressaltar que existe um teor limite de forma que as fibras não ofusquem a característica do solo que está recebendo este reforço.

O Módulo de elasticidade da fibra impacta a ductilidade do compósito. Um alto valor de módulo de elasticidade (E), potencialmente, tem efeito similar ao aumento da resistência das fibras. Quanto maior a razão entre o módulo de deformação da fibra e da matriz, maior será a transferência de tração da componente matricial para o elemento de reforço (CALLISTER, WILLIAM, 2012). Por outro lado, fibras com elevados valores de deformação na ruptura resistem a maiores deformações sem romper, o que implica em um material condescendente com elevada deformabilidade.

Em relação à resistência da interface fibra/matriz, tem-se que o tamanho das fissuras pode ser reduzido com maior entrosamento solo-reforço. A resistência, deformação e padrões de ruptura dos compósitos dependem fundamentalmente da resistência dessa interface, se houver uma alta aderência entre ambos, tem-se reduzidas a quantidade e o tamanho das fissuras (MONTARDO, 2010). A compatibilidade química e física fibra/matriz também é um fator importante.

A adesão no reforço-matriz é dependente da orientação, arranjo tanto geométrico das fibras quanto atômico, constituição e propriedades químicas do reforço e da matriz. (CURCIO, 2008). O ancoramento mecânico na interface é impactada pela porosidade e rugosidade superficial do material e as tensões de acoplamento atuantes na fibra.

Fibras resistentes são essenciais para conferir maior tração e maleabilidade ao compósito. Sua dimensão é fundamental, em menores tamanhos, há a possibilidade de serem arrancadas ou romperem à tração. Idealmente, o comprimento precisa ser suficientemente de forma que o atrito entre os grãos do solo e estas possibilitem desenvolver tensão de tração igual a sua resistência à tração.

A orientação de uma fibra é relativa ao plano de ruptura e influencia diretamente na transmissão de cargas. Estudos mostram que uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, enquanto que perpendicular tem efeito máximo (TAYLOR, 1994). Por outro lado, a orientação das fibras influencia no plano de ruptura, uma distribuição aleatória leva a uma resistência isotrópica do compósito, limitando os planos potenciais de fragilidade que, por sua vez, podem se intensificar paralelamente ao reforço orientado. Idealmente, os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo, para uma maior contribuição de reforço.

### 2.4.2. Utilização de fibras de PET reciclado

Em geral, solos compactados apresentam considerável resistência à compressão e ao cisalhamento, porém sua resistência à fissuração é baixa. Tem-se assim a vantagem da inclusão de fibras a fim de melhorar suas características mecânicas. Num solo reforçado com fibras, a transferência dos esforços ocorre de uma fibra à outra e entre elas e à superfície adjacente, uma vez que as fibras são responsáveis pela resistência e rigidez do controlando a abertura de trincas e o espaçamento entre as fissuras (CALLISTER, 2011).

Utilizam-se fibras naturais, como fibras de juta, bambu, coco, etc., fibras poliméricas como as de polipropileno, polietileno e poliéster, as fibras minerais (carbono, vidro e amianto) e as fibras metálicas (HEINECK, 2002). O tipo de fibra impacta a abertura de fissuras, a capacidade de suporte do material, capacidade de absorver deformações entre outros aspectos relevantes.

Considerando as características ideais que um material compósito deve apresentar, fibras poliméricas são consideradas mais promissoras para o reforço de solos. Em concreto, argamassa e solo, por exemplo, as mais usadas atualmente são as fibras de polipropileno. O polipropileno tem a vantagem de uma grande estabilidade química, não sendo atacado durante a hidratação do cimento. Porém, outro polímero que merece destaque é o poliéster em especial o Polietileno Tereftalato de Etileno (PET) por apresentar alta densidade, rigidez e resistência.

O PET, como a grande maioria dos plásticos, é um resíduo de relevante impacto e disposição no meio ambiente. Além do longo processo de decomposição, são várias possibilidades de reaproveitamento desse material. Dados da Associação Brasileira da Indústria do PET publicados em 2016 no décimo censo da reciclagem de PET indicam que cerca de 51% do bruto produzido anualmente de PET, é reciclado. Desses 51%, 6% são referentes à fabricação de fibras.

Fibras PET encontram-se como uma alternativa promissora no reforço não somente pelas características físicas importantes como alongamento na ruptura de 7 a 50%,

densidade relativa e temperatura de fusão na ordem de 270ºC (MANO, 1991) como sua vasta disposição no meio ambiente. Tal aplicação, além de plausível para fins geotécnicos, possui valor sustentável agregado.

Na bibliografia verificam-se trabalhos referentes ao tema em questão que comprovam sua aplicabilidade. Em 2008, Curcio desenvolveu estudo sobre o comportamento hidromecânico de um compósito solo-fibra utilizando fibras PET. Em corpos-de-prova cilíndricos, promoveu-se o fissuramento através de solicitação de compressão diametral e avaliou-se o seu impacto na condutividade hidráulica. Os ensaios foram desenvolvidos utilizando-se uma célula triaxial especialmente adaptada para tal, associando medidas de permeabilidade com carga variável. Os ensaios foram realizados com e sem fissuras, sob diferentes tensões confinantes buscando representar possíveis condições observadas no campo.

Na presente pesquisa utilizou em linhas gerais a mesma abordagem adotada por Curcio (2008). Foi mantido o mesmo elemento de reforço (fibras), no entanto, o solo utilizado no presente estudo tinha maior presença de finos na fração granulométrica. Algumas alterações metodológicas dos ensaios foram necessárias, em vista da maior presença de finos e seu esperado impacto no comportamento do compósito. Os finos podem aumentar a compressibilidade e diminuir a condutividade hidráulica dos solos. Além disso, os argilominerais existentes na fração fina dos solos controlam as propriedades químicas e podem alterara a resposta do solo quanto à floculação/dispersão em contato com o percolado.

# 3. METODOLOGIA

## 3.1. Programa experimental

O programa experimental buscou investigar o efeito da adição de fibras de PET reciclado na redução da fissuração e o impacto desta na permeabilidade do compósito. Foram efetuados ensaios de caracterização do solo e da fibra e ensaios de compactação da mistura solo-fibras. O comportamento hidráulico e mecânico do solo foi avaliado através de ensaios de compressão diametral e permeabilidade de carga constante. Os ensaios foram realizados em uma célula de ensaios triaxiais especialmente adaptada e conduzidos sob diferentes tensões confinantes.

## 3.2. Caracterização do Solo

O solo utilizado no estudo foi coletado na Rodovia Rio Teresópolis Km 119, no Estado do Rio de Janeiro, em terreno da Magé Mineração (Figura 8). Foram destinados a essa pesquisa 50 kg referentes ao horizonte superior do subsolo. Os ensaios de caracterização foram conduzidos seguindo a NBR 6457 (ABNT 1984). Após seco ao ar e destorroado, o material foi quarteado, reservando uma porção de 1,5kg para caracterização física sequencial. O restante já ensacado foi mantido em condições frescas e livres de umidade.

**Figura 8: Vista frontal do local onde o Solo residual de coloração avermelhada foi coletado na pedreira Magé Mineração**

### 3.2.1. Caracterização física do solo

Os ensaios de granulometria e densidade real dos grãos que foram realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE, segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984) – Análise granulométrica e a NBR 6508 (ABNT, 1984) – Determinação da massa específica. Os

métodos de peneiramento e de sedimentação foram combinados e é importante destacar a utilização da solução de hexametafosfato de sódio como defloculante.

Para a determinação dos Limites de Atterberg, adotou-se a metodologia pautada na norma NBR 6459 (ABNT, 1984) – Determinação do limite de liquidez (LL) e norma NBR 7180 (ABNT, 1984) – Determinação do limite de plasticidade (LP). Em seguida, com limites encontrados, calcula-se o índice de plasticidade pela diferença do LL para com o LP. Posteriormente, com resultados da fração argila e índice de plasticidade, pode-se calcular o índice de atividade da fração argila (As) ou atividade de Skempton com base na Equação 4.

$$As = \frac{(Ip\ \%)}{(\%\ menor\ que\ 2\mu m)} \qquad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$As$ = valor menor que 0,75 é inativa;

$As$ = valor de 0,75 a 1,25 é normal;

$As$ = valor maior que 1,25 é ativa;

Tal atividade indica o fenômeno em que a fração de argila presente no solo consegue transmitir a este um comportamento argiloso.

### 3.2.2. Caracterização físico-química do solo

Na análise físico-química do solo determinou-se a capacidade de troca catiônica e outras propriedades químicas no Laboratório de Análise de Solo, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. O pH em água e em KCl 1N foi indicado pelo pHmetro de modelo mPA-210PA no setor de química do Laboratório de Geotecnia da COPPE segundo o manual da EMBRAPA Solos (1997).

### 3.2.3. Análise Mineralógica

A Análise Mineralógica do Solo realizou-se no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). O ensaio de difração de Raio-X foi efetuado no material passante na peneira 10, inicialmente umedecido com água destilada. Tal método compreende lâmina orientada em um equipamento Bruker-D4 Endeavor com tubo de Cobalto, radiação Co Kα (40 kV/40 mA), velocidade e tempo de contagem relativos a angulação e detector sensível à posição LynxEye. Qualitativamente, as interpretações do espectro podem ser efetuadas por comparação aos padrões do banco de dados do Software DiffracPlus.

### 3.2.4. Ensaio de Sedimentação com diferentes pH

As cargas elétricas presentes na camada que envolve as partículas tem influência no comportamento dos argilominerais presentes no solo. Solos Brasileiros, em geral, são

caracterizados pela presença de óxidos de alumínio (gibbsita), e óxidos de ferro (hematita, goethita, lepidocrocita) os quais colorem os Latossolos diferentemente). Tais óxidos, em sua grande maioria, apresentam cargas elétricas negativas e são capazes de reagir com ácidos ou bases. A floculação e a dispersão têm grande relação com o balanço de cargas elétricas superficiais dos argilominerais. Tais cargas elétricas negativas contrabalanceadas por cátions trocáveis, em suspensão coloidal estável, repelem-se ou formam grumos (LEINZ, V. & AMARAL, S. E.,1989; TEIXEIRA *et. al., 2000*).

Cada solo possui quantidades diferentes de óxidos de ferro e de alumínio, além de diferente teor de matéria orgânica. Assim, a floculação e dispersão da fração argila não apresenta um mesmo padrão para todos os solos, uma vez que é dependente do pH e das cargas variáveis. Quando os valores de pH superam ou são inferiores ao ponto de carga zero (PCZ) o solo tende a se dispersar ou flocular, respectivamente (LEINZ, V. & AMARAL, S. E.,1989).

Calculou-se o ponto de carga zero do solo em questão para se comparar com o pH encontrado. O PCZ pode ser calculado utilizando-se a Equação (5), tal valor é uma aproximação razoável do PCZ real do solo. No cálculo se utiliza os valores medidos de pH em água e em solução 1N de KCL (Embrapa, 1997).

$$PCZ \cong (2 \times pH(\text{em H2O})) - pH(\text{em KCl}) \qquad \text{Equação (5)}$$

Ensaios de sedimentação com o defloculante usual, o Hexametafosfato (pH 8,5), e em água com diferentes valores de pH, foram efetuados buscando verificar os efeitos resultantes no solo sob condições mais ácidas ou básicas.

Segundo Bacelar (2010), lixiviados brasileiros tem como característica pH oscilando entre 5,7 a 8,5. Na série de ensaios executados, foram adotadas as seguintes condições: (a) água coletada diretamente na torneira, pH de 6,2; (b) água destilada com pH de 5,7; (c) uma ainda mais ácida com pH de 4,7 ou seja, próximo ao PCZ calculado e; (d) solução de água com NaOH, apresentando pH de 8,5.

### 3.3. Caracterização da Fibra

Na Tabela 1, apresentam-se características da fibra PET reciclada da ETRUIA (PINTO JR., 2001), comparadas com valores encontrados na bibliografia (Mano 1991; Bonelli 1993). As fibras que foram utilizadas têm 10 mm de comprimento ilustradas na Figura 9. Se fundem dentro dos limites de 250ºC a 270ºC (Mano, 1991), portanto, não se trata de variável a preocupar, considerando as condições usualmente encontradas em aterros de contenção de resíduos.

**Figura 9: Fibras PET utilizadas no projeto**

**Tabela 1: Propriedades mecânicas das Fibras PET**

| Dados Técnicos | Poliester utilizado | Bibliografia |
|---|---|---|
| Peso específico (gf/cm3) | 1,38 | 1,33 – 1,45 |
| Tensão de ruptura (MPa) | 670 | 130 – 880 |
| Alongamento (%) | 30-45 | 7 – 50 |
| Absorção de água | - | - |

### 3.4. Ensaios Hidromecânicos

Buscou-se simular condições encontradas em liners situados na base de aterros e em camadas de cobertura, para tal, foram conduzidos ensaios com tensão confinante de 100KPa e 10 KPa, respectivamente. Cada rodada de ensaios hidromecânicos compreendeu quatro corpos-de-prova. Um sem fibra, um com 0,5%, outro com 1,0% e outro com 1,5%. A quantidade de fibras adicionada à mistura foi determinada em relação ao peso de solo seco para posteriormente adicionar a quantidade de água referente à umidade ótima. Para evitar a formação de grumos, foi necessária a homogeneização dos componentes secos da mistura antes do acréscimo da água. Os corpos-de-prova foram preparados manualmente um a um, ou seja, para cada corpo-de-prova foi realizada uma mistura de solo, fibras e água preparada separadamente. A temperatura ambiente foi controlada em 24º C. Os ensaios hidromecânicos foram desenvolvidos como a seguir.

1- Preparação do corpo de prova

Foram efetuados ensaios de compactação Proctor Normal (NBR 7182/1986), considerando as diferentes proporções de adotadas de misturas de fibras PET, visando a determinação da umidade ótima e respectiva massa específica aparente seca.

Em sequência, para preparação dos corpos de prova para os ensaios hidromecânicos, porções de solo na umidade ótima, foram misturadas às fibras. As amostras de solo foram armazenadas em câmara úmida por período de 24horas, de forma a garantir melhor homogeneização da umidade. Uma vez que a umidade ótima não é tão alterada pela presença de fibra, procurou-se no preparo das amostras manter a umidade próxima à ótima obtida para a condição sem fibra, de forma a não se ter, quando da análise dos resultados, mais uma variável a considerar.

O solo foi compactado estaticamente em molde tri-partido, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 65 mm de altura (Figuras 10 e 11). Em seguida, os corpos-de-prova eram pesados e encamisados com membrana de látex (Figura 12). As extremidades eram vedadas por uma tampa em acrílico e, entre base/topo, colocavam-se pedras porosas. Tais tampas de acrílico superior e inferior tornavam-se laterais conectadas a tubos para percolação do fluido visando saturação e, posteriormente, ensaio de permeabilidade.

**Figura 10: Antes e depois, respectivamente, da compactação estática**

**Figura 11: Corpo-de-prova moldado (sem fibras)**

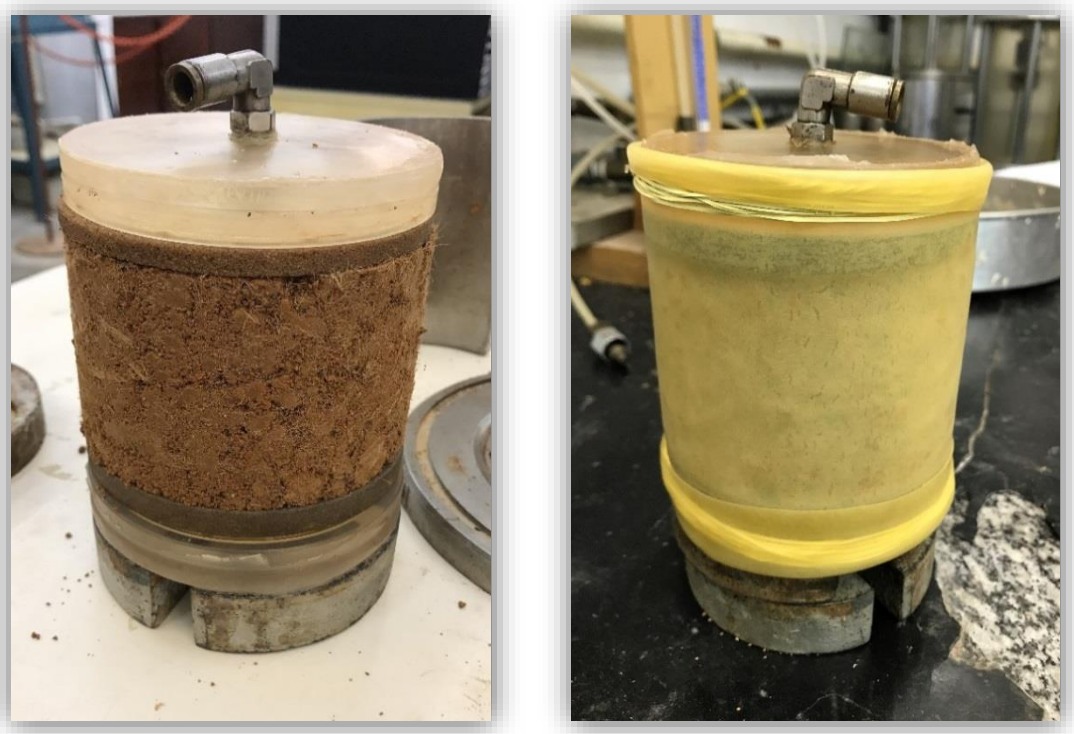


**Figura 12: Corpo de prova antes e após o encamisamento (CP4 1,5% de fibras)**

2- Ensaios de compressão diametral e de permeabilidade

Os ensaios de compressão diametral e de permeabilidade foram efetuados em uma célula triaxial adaptada (Figuras 13 e 14). O corpo de prova era posicionado longitudinalmente sobre um berço metálico e após confinamento e saturação por contrapressão foram carregados radialmente utilizando o pistão da célula, que se

encontrava solidário a um elemento metálico similar ao berço da base (Figura 15). Medidas de permeabilidade de carga constante foram efetuados antes e após os ensaios de compressão diametral. Detalhes sobre os ensaios efetuados são apresentados a seguir.

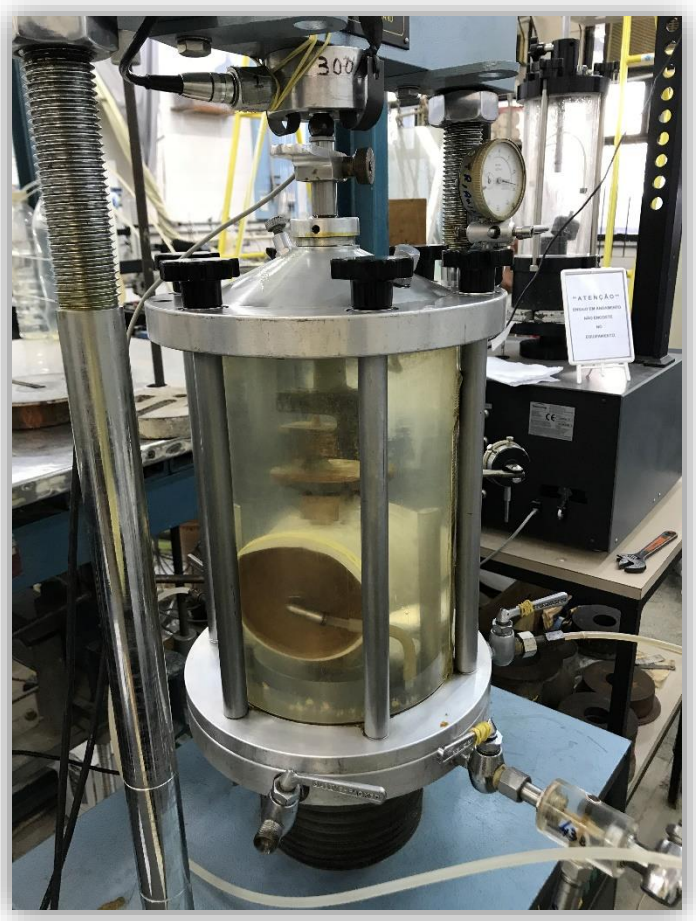


**Figura 13: Ensaio Hidromecânico sendo executado**

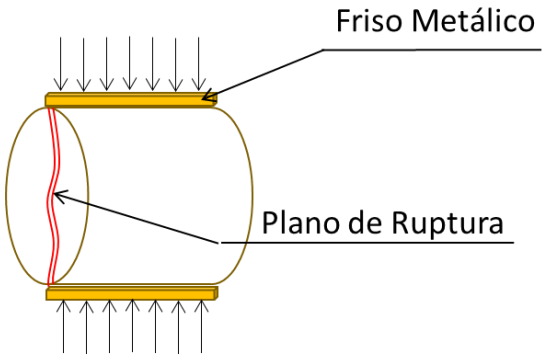



**Figura 14: Ensaio Hidromecânico (Adptado de Curcio,2008)**

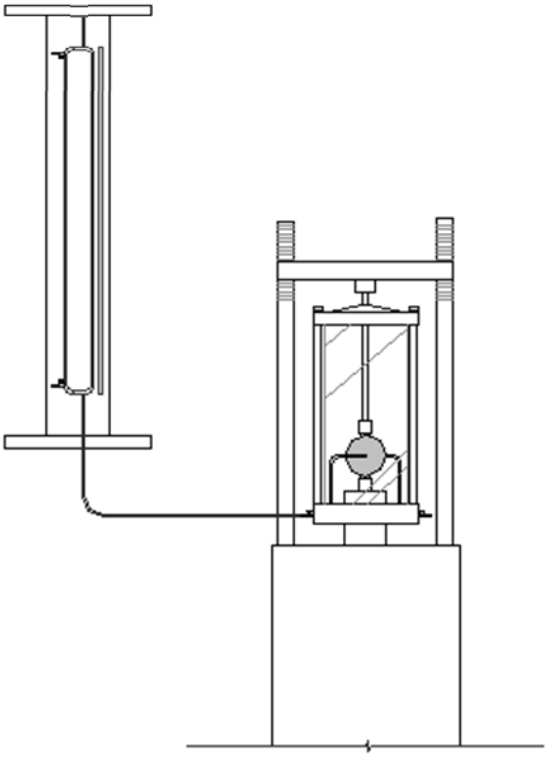


**Figura 15: Esquema do ensaio de compressão diametral pelo método ME-138 (DNER,1994)**

3- Saturação por Contrapressão

Antes de aplicar a contrapressão, se percolou dois volumes de vazios, cerca 400 ml, sob carga constante e gradiente hidráulico igual a 5. A saturação por contrapressão foi conduzida da seguinte forma. Primeiro um incremento de 50 KPa foi aplicado dentro e fora do corpo de prova. Passados 30 minutos, a pressão foi elevada a 100 KPa. Após outros 30 minutos, a saturação do corpo-de-prova foi aferida com a medição do parâmetro B. As pressões foram aplicadas por potes de mercúrio, e controladas por um módulo de aquisição de dados, tipo Vishay.

4- Adensamento

Buscando verificar o comportamento do solo sob condições usualmente encontradas no campo, ensaios foram conduzidos sob confinamento de 10 KPa, buscando representar camadas de cobertura, e 100KPa, para representar os liners inferiores. Nos ensaios de 10 KPa, após a finalização dos mesmos, aumentou-se a tensão confinante para 100KPa e se repetiram os mesmos. Com esse procedimento buscou-se verificar se seria possível minimizar um fissuramento já ocorrido através de um incremento de tensões.

5- Medida de Permeabilidade sem deformação

Antes da realização dos ensaios de compressão diametral, sob carga constante (Figura 16), mediu-se a condutividade hidráulica de amostras preparadas com diferentes teores de fibras (zero, 0,5%, 1,0% e 1,5%).

**Figura 16: Bureta utilizada para ensaio de permeabilidade de carga constante**

6- Compressão diametral e medidas de permeabilidade

Após confinamento e medida da permeabilidade na condição intacta, os corpos-de-prova eram submetidos à compressão diametral até a ruptura por tração. Os ensaios de compressão diametral foram efetuados com controle da deformação radial (vertical em relação ao diâmetro do corpo-de-prova), a cada estágio de 1% de deformação, media-se a permeabilidade do material. Os ensaios com carga constante foram conduzidos sob gradiente hidráulico igual a cinco. Um aumento considerável no valor de k, pode ser subentendido como a fissuração do corpo-de-prova. O ensaio foi conduzido até uma deformação vertical máxima igual a 10% ou até apresentar mudança significativa da condutividade hidráulica do material. Este valor limite foi definido por ensaios preliminares de compressão diametral tomados como base para este estudo.

A tensão de tração (σt) foi calculada de acordo com a norma ME-138 (DNER, 1994) e com os estudos de Curcio (2008) pela Equação 6.

$$\sigma_t = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H}$$ Equação (6)

Onde:

σt – Tensão de tração (MPa)

$F$ – Força aplicada (N)

$D$ – Diâmetro do corpo-de-prova (cm)

$H$ – Altura do corpo-de-prova (cm)

Válido ressaltar que a tração de fato ocorre quando a tensão confinante se apresenta inferior ao alívio de tensão ($\sigma_t$). Logo, tomou-se o cuidado para que as solicitações de tensões favorecessem a resposta do solo com tração, sem a interferência do confinamento.

Durante a solicitação de compressão diametral, a deformação radial ($\varepsilon_v$) pode ser determinada através do deslocamento vertical medido no pistão ($\Delta D$) e o diâmetro do corpo de prova *(D)*, conforme a Equação 7.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta D}{D}$$ Equação (7)

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1. Caracterização do Solo

### 4.1.1. Caracterização física do solo

Na figura 14, verifica-se que o solo em questão é composto por 29% de argila (<0,002mm), 24% de silte (entre 0,002 e 0,06mm), 40% de areia, compreendo 22% de areia fina, 11% de areia média e 7% de areia grossa e 7% de pedregulho, conforme escala granulométrica brasileira (ABNT). A Densidade Real dos Grãos encontrada foi de 2,703 g/cm$^3$.

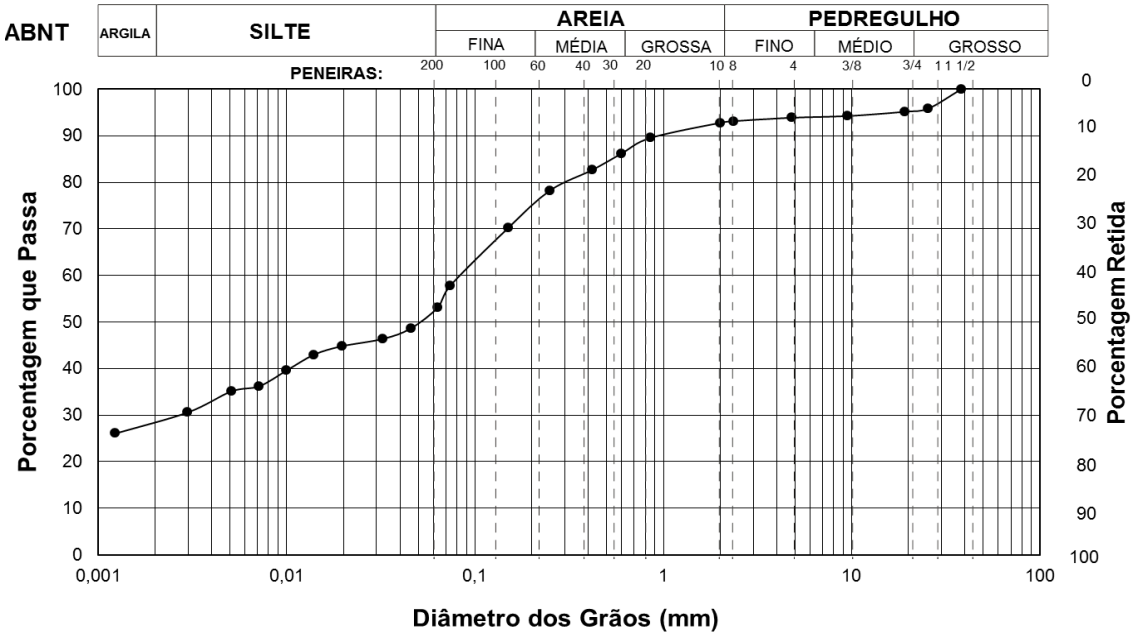



**Figura 17: Curva Granulométrica**

Na Tabela 2, apresenta-se as dimensões granulométricas do material utilizado no programa experimental. Nos ensaios, não foi usada a fração de pedregulho, assim foram recalculadas as porcentagens dos constituintes do solo considerando somente os 93% restantes do material. Os índices físicos estão listados na Tabela 3.

**Tabela 2: Análise granulométrica do solo utilizado**

| Composição Granulométrica ( % ) ( Escala ABNT ) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Argila | Silte | Areia | | | Pedregulho |
| | | Fina | Média | Grossa | |
| 31 | 26 | 24 | 12 | 7 | 0,0 |

**Tabela 3: Índices físicos do solo utilizado**

| | |
|---|---|
| Densidade Real dos Grãos, $\rho_s$ (g/cm$^3$) | 2,70 |
| Limite de Liquidez, $w_L$ (%) | 57 |
| Limite de Plasticidade, $w_p$ (%) | 21 |
| Índice de Plasticidade, $I_p$ (%) | 36 |
| Atividade de Skempton, $A_s$ | 1,25 (Normal/Ativo) |

### 4.1.2. Caracterização físico-química do solo

Na Tabela 4, apresentam-se resultados de pH no solo em água e sob 1N de KCL. As análises indicam um solo ácido (pH em água 4,27). Com base na Equação 5 o ponto de carga zero desse solo pode ser estimado em 4,75.

**Tabela 4: Análise do pH do solo utilizado**

| | | |
|---|---|---|
| pH | $H_2O$ | 4,27 |
| | KCl 1N | 3,79 |

Os resultados para a análise química para fins complementares (Tabela 5) indicam que o material em questão se trata de um solo alumínico. Visto que o índice de saturação por alumínio (***m***) se apresenta superior a 50% e capacidade de troca catiônica (***t***) inferior a 20 centimol de carga por decímetro cúbico de solo (EMBRAPA, 1999; PEREIRA, L. C., NETO, F. L.,2004)

**Tabela 5: Análise química do solo**

| Caracterização Química do Solo | Unidade de medida | Valor referente |
|---|---|---|
| P | mg/dm$^3$ | 3,1 |
| K | mg/dm$^3$ | 10 |
| Na | mg/dm$^3$ | - |
| $Ca^{+2}$ | cmol$_c$/dm$^3$ | 0,34 |
| $Mg^{+2}$ | cmol$_c$/dm$^3$ | 0,4 |
| $Al^{+3}$ | cmol$_c$/dm$^3$ | 1,48 |
| ***V*** (Índice de Saturação por Bases) | % | 12,9 |
| ***m*** (Índice de Saturação por Alumínio) | % | 65,8 |
| ***SB*** (Soma de Bases Trocáveis) | cmol$_c$/dm$^3$ | 0,77 |
| ***t*** (Capacidade de Troca Catiônica) | cmol$_c$/dm$^3$ | 2,25 |
| ***T*** (Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0) | cmol$_c$/dm$^3$ | 5,97 |

### 4.1.3. Análise Mineralógica

De acordo com o difratograma obtido através da Difração de Raio-X, o solo tem predominância dos argilominerais caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e montmorilonita ($AlSi_2O_5(OH)_2$, quartzo ($SiO_2$) e feldspato de microlina ou de potássio ($KAlSi_3O_8$). Na Figura 15, observa-

se uma identificação muito evidente, devido à intensidade das suas reflexões características, conforme orientações estabelecidas em SANTOS (1989).

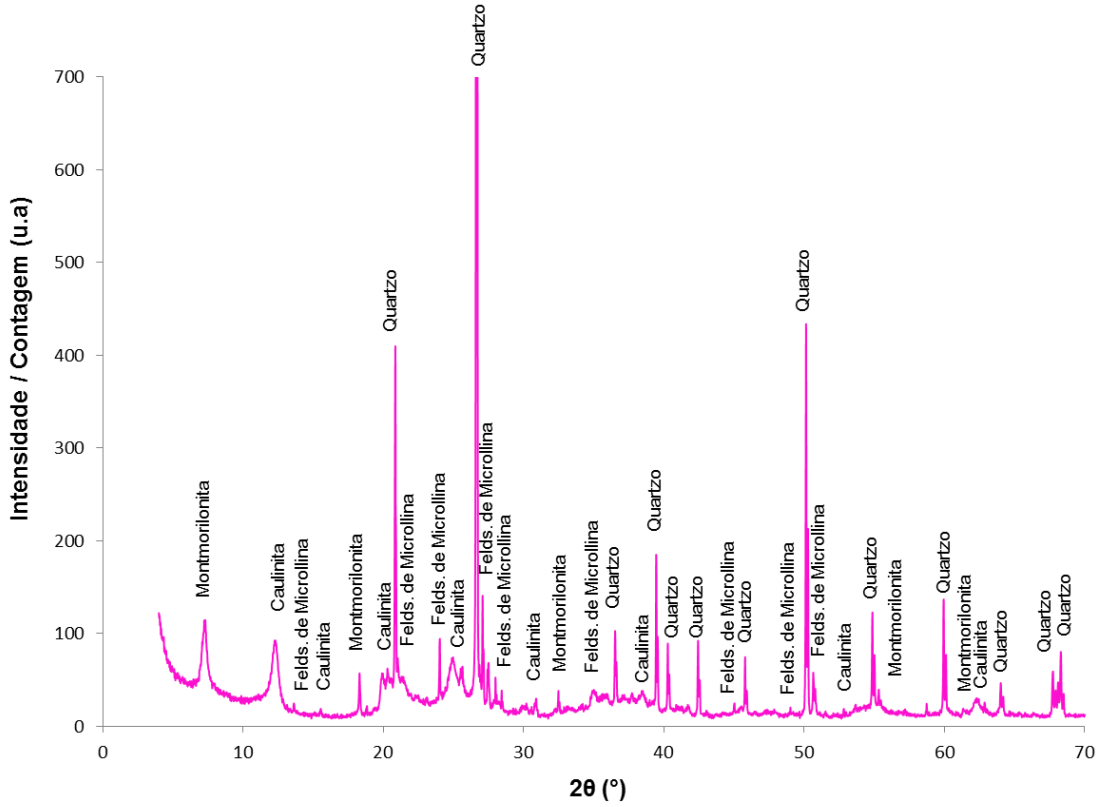



**Figura 18: Análise mineralógica qualitativa proveniente da DRX**

### 4.1.4. Ensaio de Sedimentação com diferentes pH

Na Figura 16, apresentam-se os resultados dos ensaios de sedimentação, tanto com água coletada direto da distribuição municipal (pH 6,2), quanto com as soluções de caráter ácido (pH 5,2) e básico (pH 8,5) e a solução com o pH correspondente ao valor calculado do PCZ do solo utilizado neste estudo (pH 4,7). Nas Figuras 19 e 20, apresentam-se fotos ilustrativas dos ensaios.

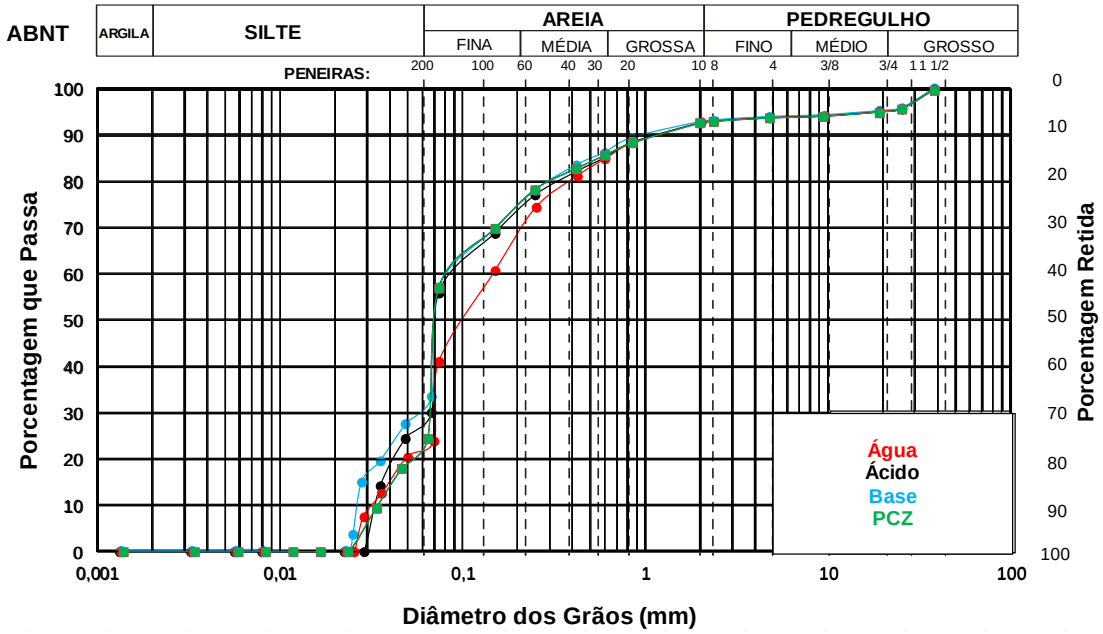



**Figura 19: Curvas Granulométricas provenientes do ensaio de sedimentação com quatro diferentes soluções**

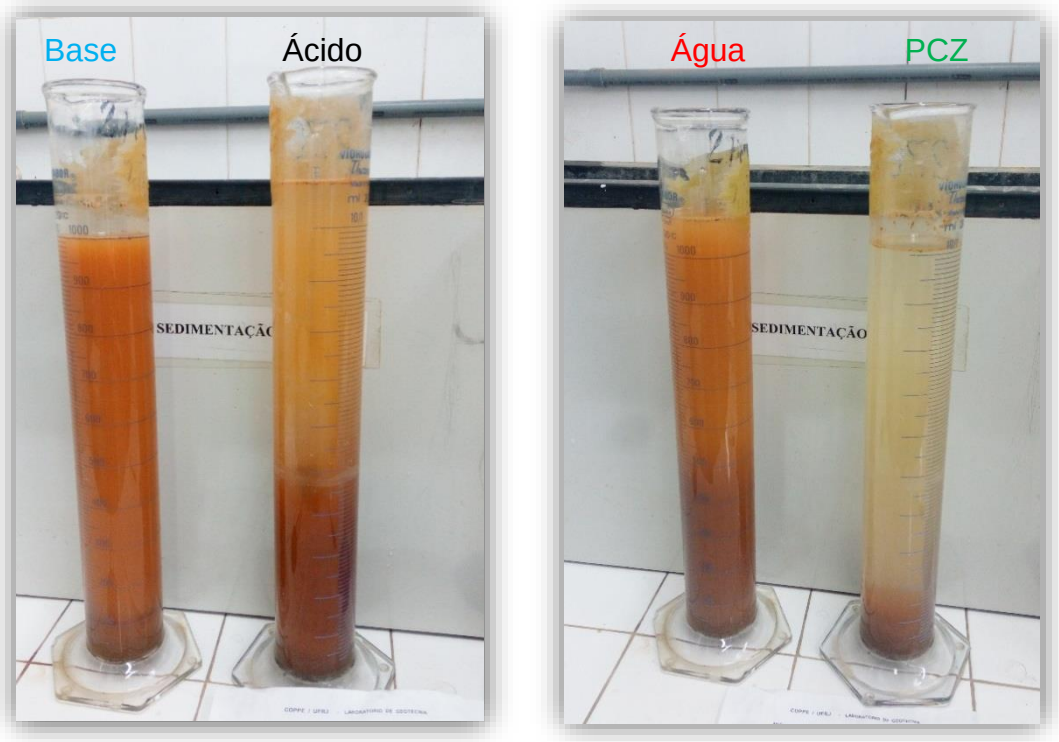



**Figura 20: Ensaios de sedimentação**

O ponto de carga zero é o valor de pH em que a adsorção de íons determinantes de potencial (H+ e OH) é igual e isto refere-se à quantidade igual de cargas elétricas negativas e positivas (PARKS & BRUYN, 1962). Segundo Embrapa Solos (2017), se o pH do solo for superior ao PCZ, o solo estará carregado negativamente, apresentando, então,

capacidade de troca catiônica (CTC). Analogamente, se o pH for menor que o PCZ, o solo terá carga positiva e apresentará capacidade de troca aniônica (CTA). De acordo com as análises feitas, o solo estudado neste projeto possui pH de 4,27 e seu PCZ aproxima-se de 4,75. Entende-se assim que sua capacidade de troca catiônica é muito baixa. Tal fato foi comprovado com a análise química realizada e indicada anteriormente na Tabela 5.

Usualmente, em solos ricos em matéria orgânica, os ácidos orgânicos adsorvidos pelos coloides minerais provocam um aumento de cargas negativas e um abaixamento do PCZ. O solo em questão teve sua amostragem realizada no horizonte B, cujo teor de matéria orgânica não fora encontrado e apresentara relevante presença de óxidos. Deve-se destacar que óxidos e hidróxidos geram cargas negativas e positivas dependendo do pH do solo. Ademais, considera-se ainda a formação, diferenciação e estrutura mineralógica do solo para uma precisa resposta quanto a floculação/dispersão, ou seja, na gênese dos solos, cada combinação tem efeito diferenciado na fração coloidal.

Sabe-se que O H+ e os cátions trocáveis ($Ca^{2}+$, $Mg^{2}+$, $Al^{3}+$) são mais efetivos na dinâmica existente, sendo dependentes do pH (PARKS & BRUYN, 1962). Cabe ressaltar que para solos altamente intemperizados das regiões tropicais, como o solo laterítico em questão, as propriedades eletroquímicas peculiares, apresentam principalmente, cargas dependentes de pH. Ao afastar do ponto onde a diferença é zero entre o pH do solo para com o pH de neutralização das cargas, a argila tende a dispersar tanto nos valores de pH mais ácidos, quanto nos valores de pH mais básicos. Em análises granulométricas de solos brasileiros, costuma-se utilizar hidróxido de sódio, NaOH 1mol.L-1, como dispersante exatamente pela característica típica dos solos tropicais. Por outro lado, com a presença de argilominerais 2:1 na fração argila, como as esmectitas, o dispersante mais indicado é o hexametafosfato de sódio (EMBRAPA, 1997).

Como é possível notar na Figura 19, todos os quatro testes flocularam. Só houve dispersão no ensaio no qual o hexametafostato foi empregado (vide item 5.1.1). Observou-se a floculação da fração argila, incluindo o ensaio efetuado em solução de NaOH 1mol.L-1, apontando que tal comportamento pode ter origem na composição mineralógica. Considera-se ainda a predominância da caulinita e seu o PCZ de 3,5 (PARKS & BRUYN, 1962). Tais fatores combinados às cargas variáveis do solo implicaram na floculação encontrada.

### 4.2. Ensaios de compactação

Na Tabela 6, apresentam-se resultados de ensaios de compactação Proctor-Normal efetuados em amostras de solo com diferentes percentagens de fibras. Na Figura 21, observa-se que a presença das fibras não alterou significantemente os valores de

umidade ótima da amostra (2,2%; variação: 10%) e massa específica aparente seca máxima (0,15 g/cm$^3$; variação: 9%), consistente com o reportado na literatura (Al Wahab e El-Kedrah, 1995; Miller e Rifai, 2000; Curcio,2008). Para o solo sem adição de fibras, os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima foram semelhantes aos obtidos por CURCIO (2008).

**Tabela 6: Resultados do Ensaio de Compactação**

| Quantidade de Fibras (%) | 0 | 0,50 | 1,00 | 1,50 |
|---|---|---|---|---|
| Massa Específica Aparente Seca (g/cm$^3$) | 1,68 | 1,55 | 1,59 | 1,53 |
| Umidade Ótima (%) | 19,8 | 22,0 | 20,7 | 21,1 |

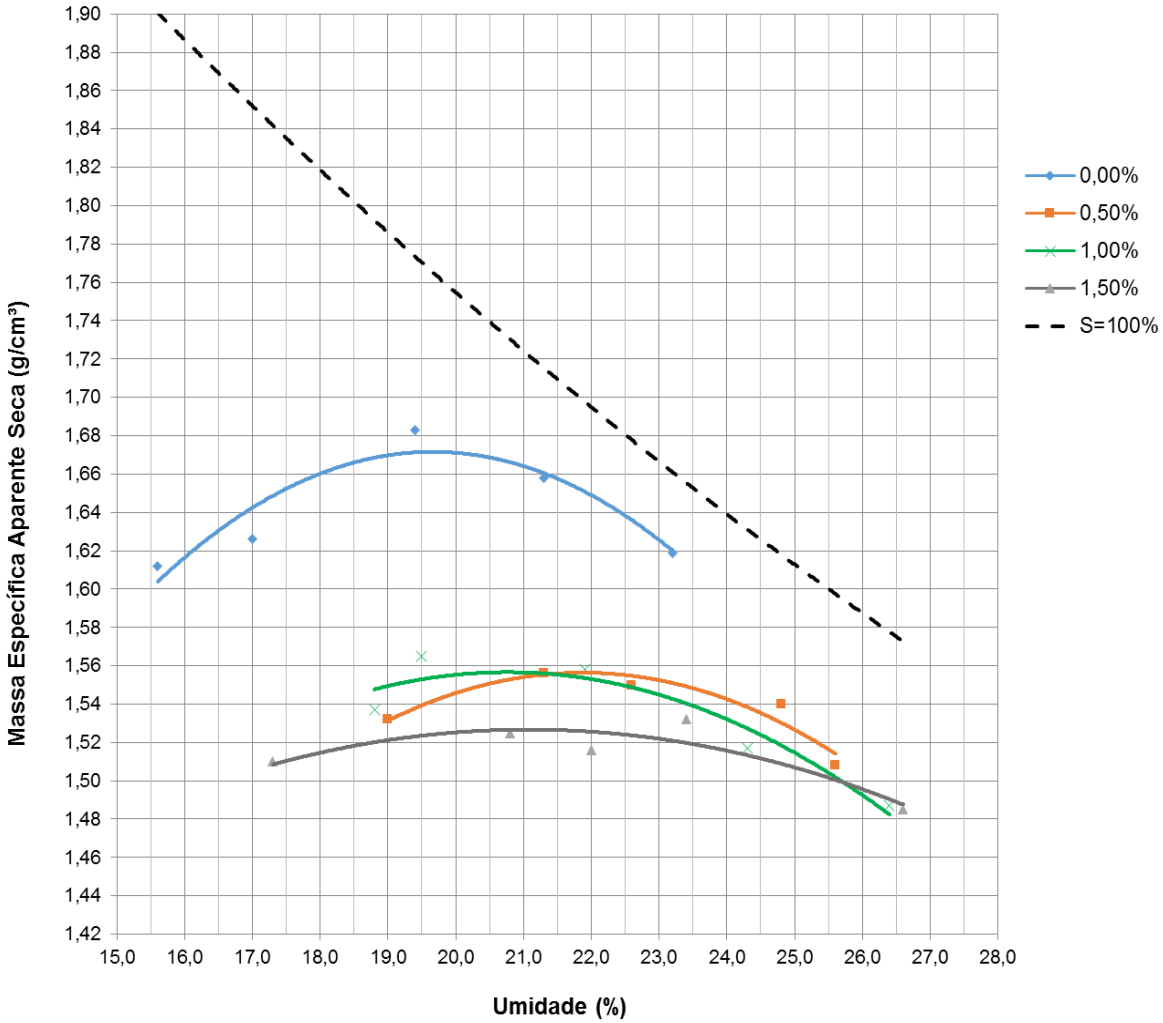



**Figura 21: Curvas de Compactação para diferentes porcentagens de fibras**

## 5.3 Estudos Hidromecânicos

Os corpos-de-prova foram saturados por percolação e contrapressão e em sequência adensados. Após o adensamento, efetuaram-se os ensaios de compressão

diametral e medidas de permeabilidade a cada estágio de 1mm de deslocamento vertical do pistão, que corresponde a 1% de deformação radial da amostra.

### 4.3. Ensaios de Adensamento

A Figura 22 mostra a variação volumétrica de corpos-de-prova com diferentes teores de fibra ao serem adensados sob 100kPa. Observa-se que a compressibilidade cresce com o teor de fibras o que é relevante uma vez que busca-se um material de expressiva ductilidade. Numa segunda campanha de ensaios, os corpos-de-prova foram adensados inicialmente sob tensão confinante de 10kPa, que foi acrescida posteriormente para 100KPa (Figura 23).

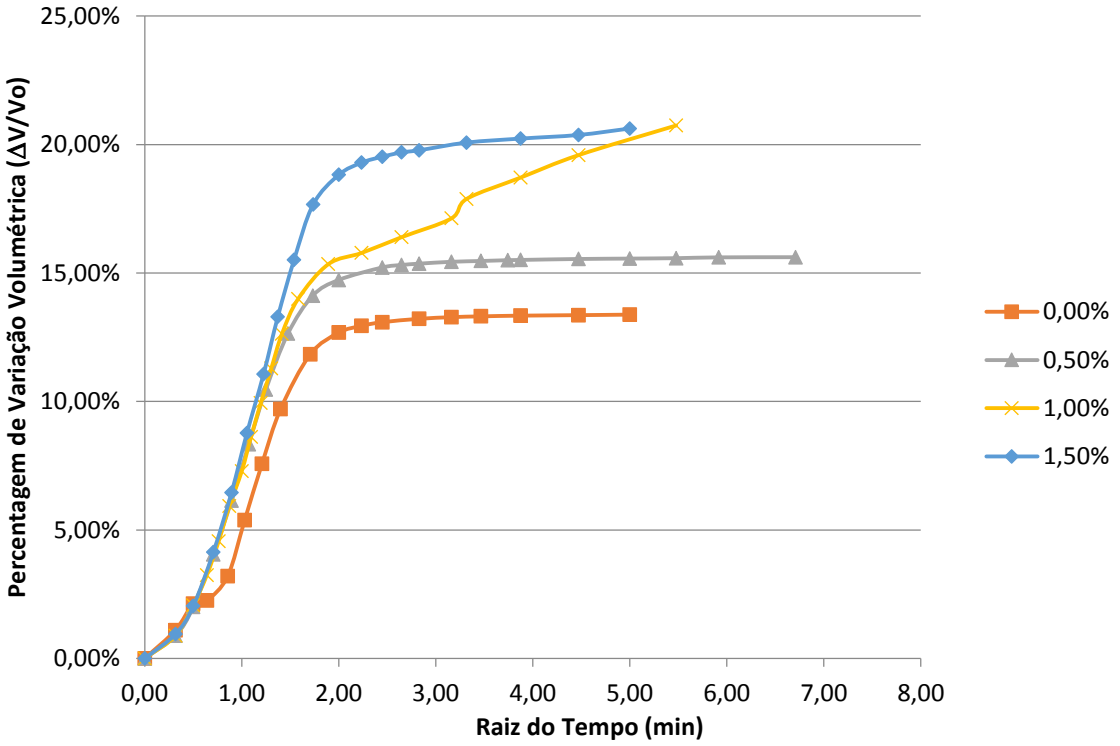



**Figura 22: Adensamento de corpos-de-prova sob diferentes teores de fibras ($\sigma_c$=100kPa)**

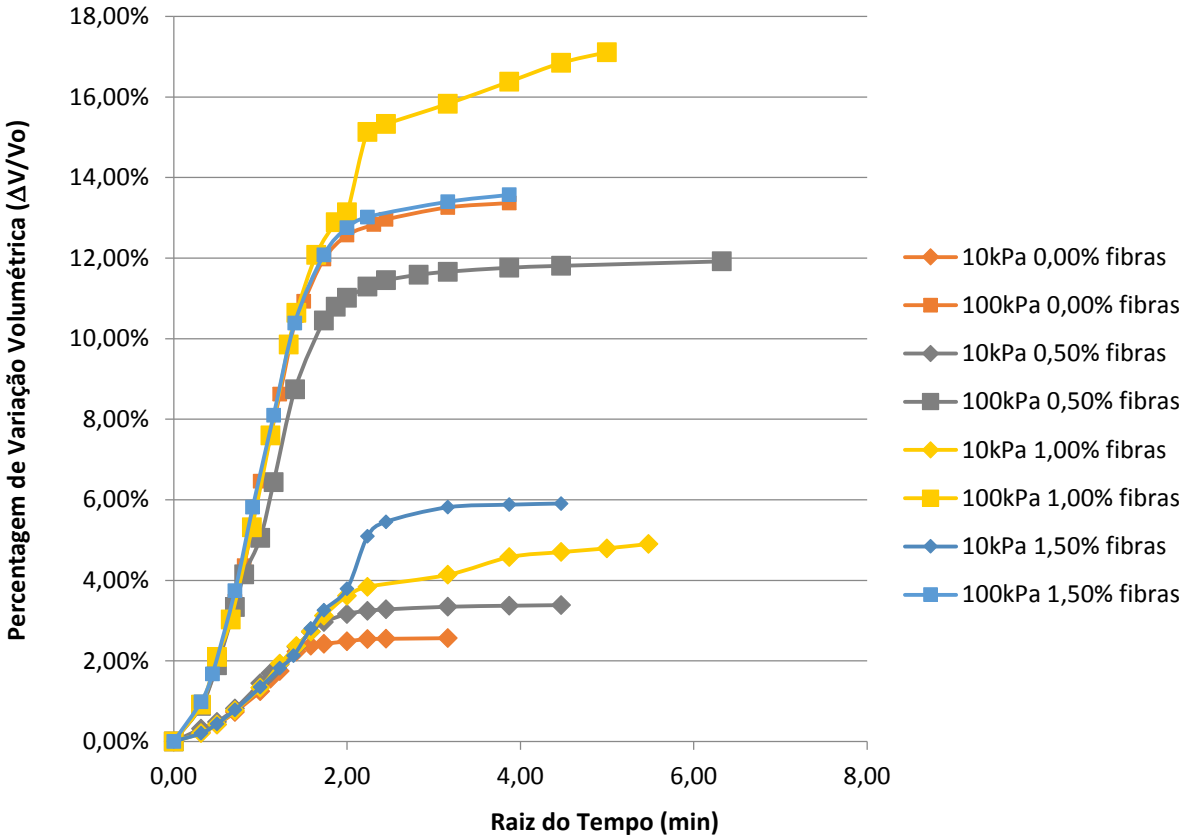



**Figura 23: Adensamento de corpos-de-prova sob diferentes teores de fibras segunda etapa (primeiro com $\sigma_c$= 10 kPa e, posteriormente, $\sigma_c$= 100kPa)**

### 4.4. Compressão diametral

Nas Figuras 24 e 25, apresentam-se, correspondente aos resultados da primeira campanha de ensaios em amostras ensaiadas sob tensão confinante de 100 KPa, as curvas tensão de tração e condutividade hidráulica v.s. deformação, respectivamente. Na Figura 26, são apresentadas fotos dos corpos-de-prova quando da finalização desses ensaios. Nos diferentes ensaios pode-se observar um comportamento tensão/deformação razoavelmente linear, mais evidente nas amostras com fibras, amostras estas que também se mostraram mais deformáveis. Além disso, percebe-se que só na amostra com teor de fibras de 0,5% houve ganho de resistência e ductilidade.

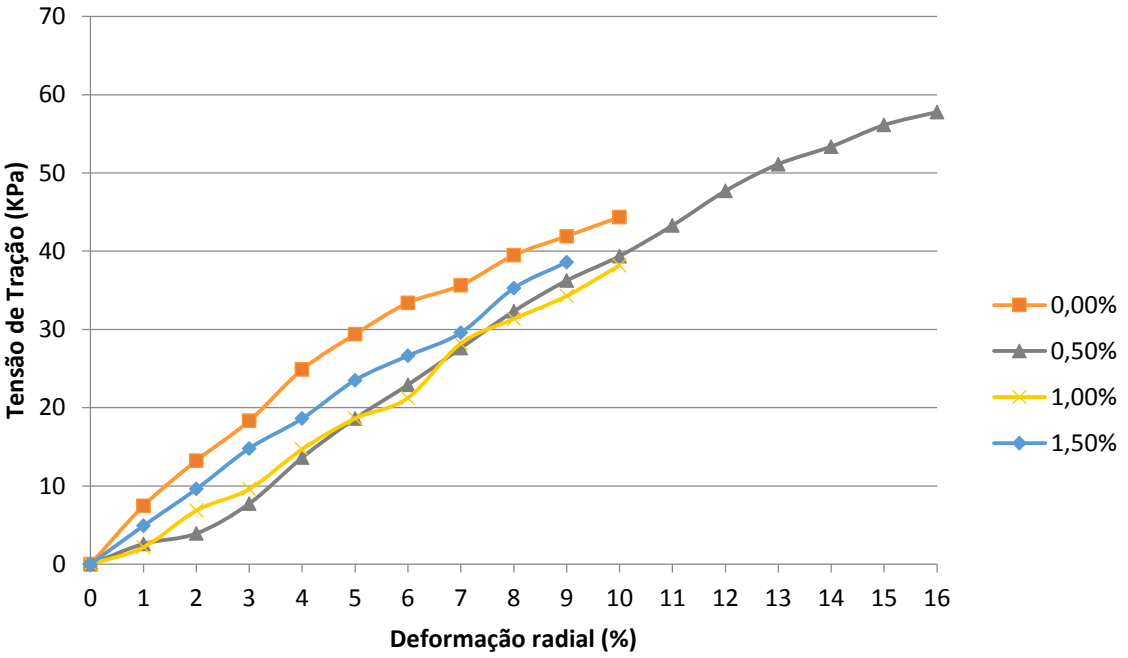



**Figura 24: Tensão de tração resultante nos CP's x Deformação radial – 1ª etapa ($\sigma_c$=100kPa)**

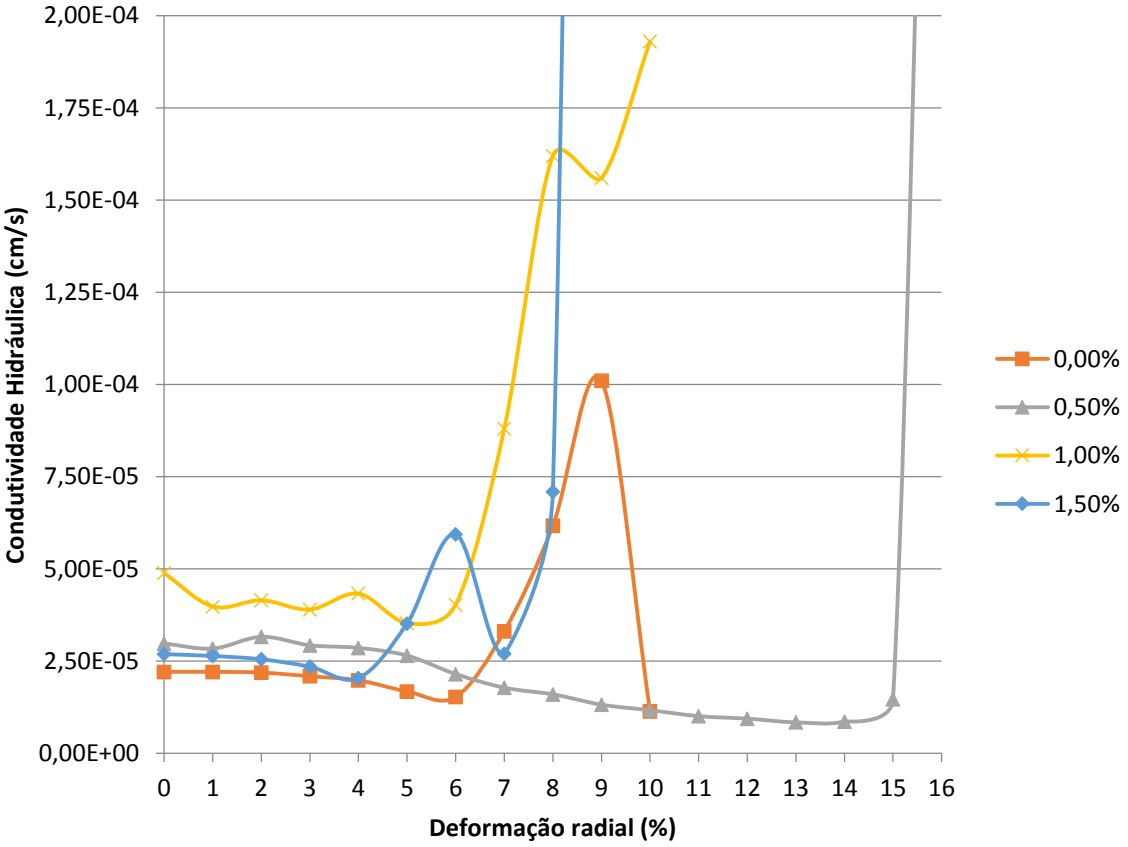
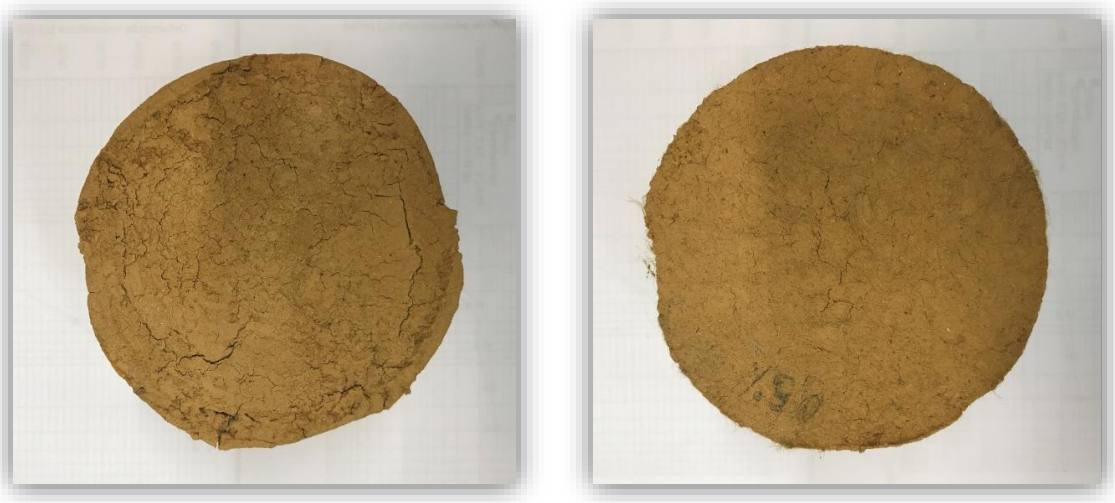
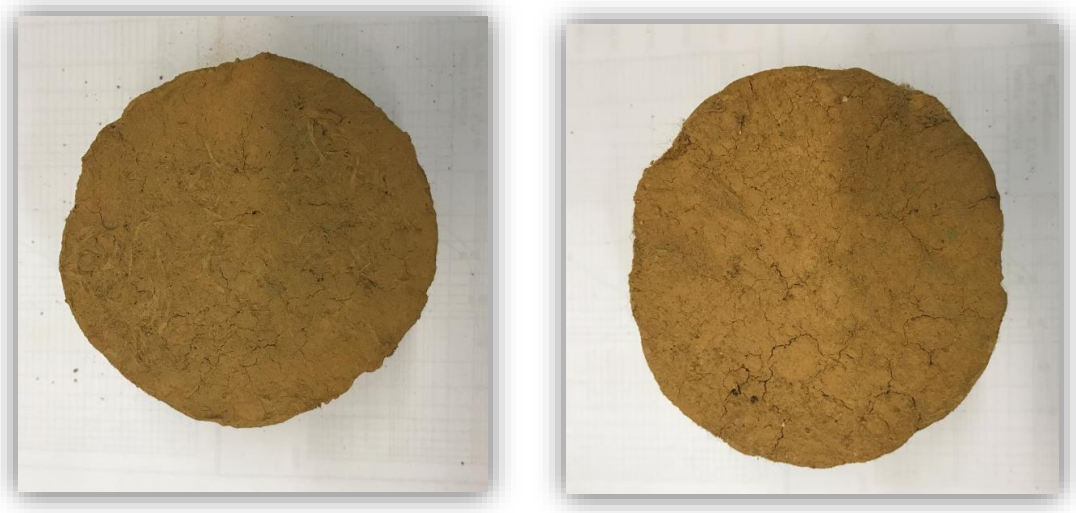



**Figura 25: Condutividade Hidráulica x Deformação radial - 1ª etapa ($\sigma_c$=100kPa)**



(a) (b)



(c) (d)

**Figura 26: Aberturas de trincas após ensaios de compressão diametral: (a) sem fibras, (b) 0,5% de fibras (c) 1,0% e (d) 1,5% de fibras PET**

Quanto à condutividade hidráulica, percebe-se que a 6% de deformação as amostras sem e com 1,0%, 1,5% de fibras apresentaram significativo acréscimo na permeabilidade do material, indicando possíveis aberturas de trincas. Nas Figuras 25 e 26, correspondente à condição final de ensaio, estas trincas podem ser observadas. O único corpo-de prova que resistiu a maiores deformações sem aumento na permeabilidade foi o com 0,5% de fibras. Tal ensaio só apresentou aumento brusco na permeabilidade somente a 15% de deformação, indicando a eficácia deste teor de fibras na redução de aberturas de trincas.

Na segunda campanha de ensaios, as amostras foram inicialmente confinadas a 10KPa e, após o término dos ensaios de compressão diametral e

permeabilidade nesta condição, o confinamento foi acrescido para 100 KPa e repetidos os ensaios. Nas Figuras 27 e 28, apresentam-se as curvas tensão de tração e condutividade hidráulica v.s. deformação obtidas nestes ensaios, respectivamente. Na Figura 29, tem-se fotos desses corpos de prova após o término desta segunda etapa. Nesta segunda etapa do ensaio, sob tensão confinante de 100kPa, observa-se que também há um ganho na resistência a compressão diametral para o ensaio na amostra com teor de 0,5% de fibras. Quanto a condutividade hidráulica, verifica-se que não houveram alterações significativas quando do acréscimo do confinamento para 100kPa. Este acréscimo no confinamento de 10kPa para 100kPa não foi suficiente para alterar significativamente o impacto na permeabilidade promovido pelas trincas induzidas pela compressão diametral na fase anterior.

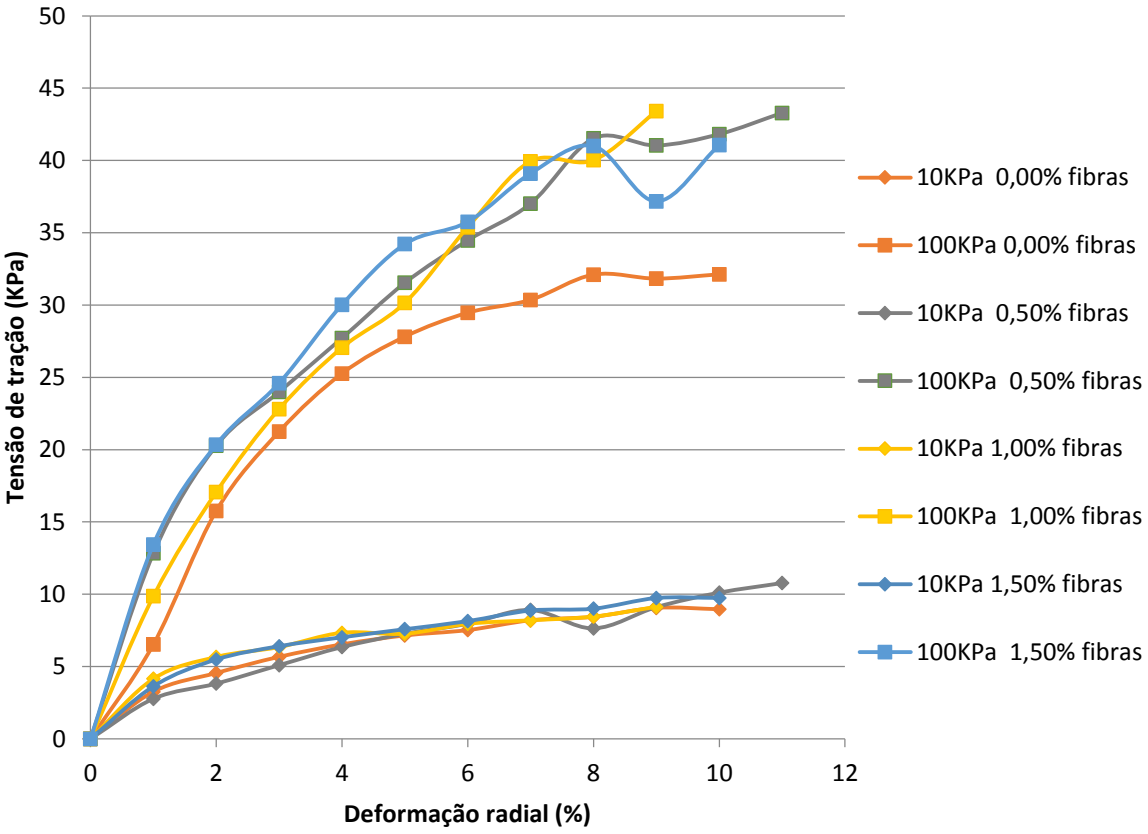



**Figura 27: Tensão de Tração x Deformação radial – CP1 (0,0%), CP2 (0,5%), CP3 (1,0%), CP4 (1,5%)**

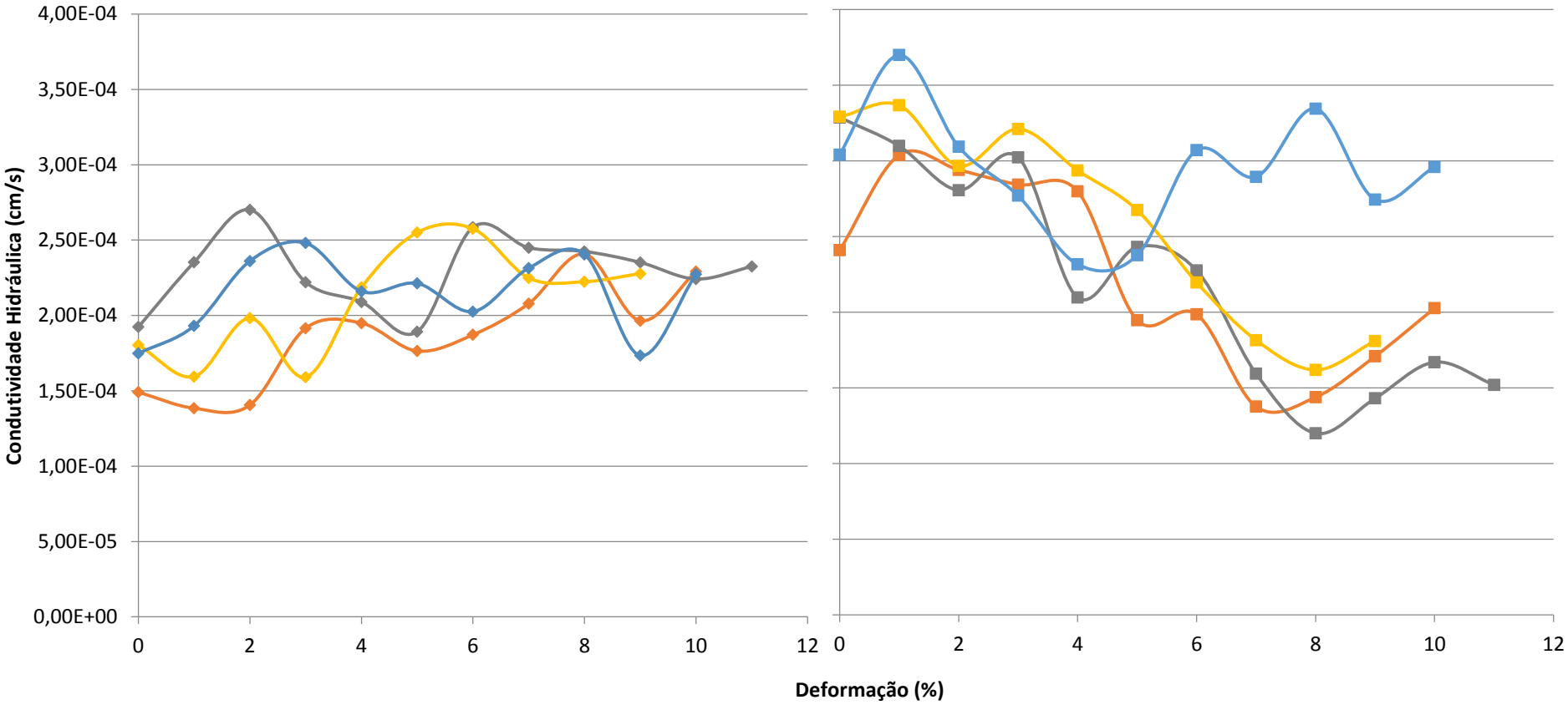
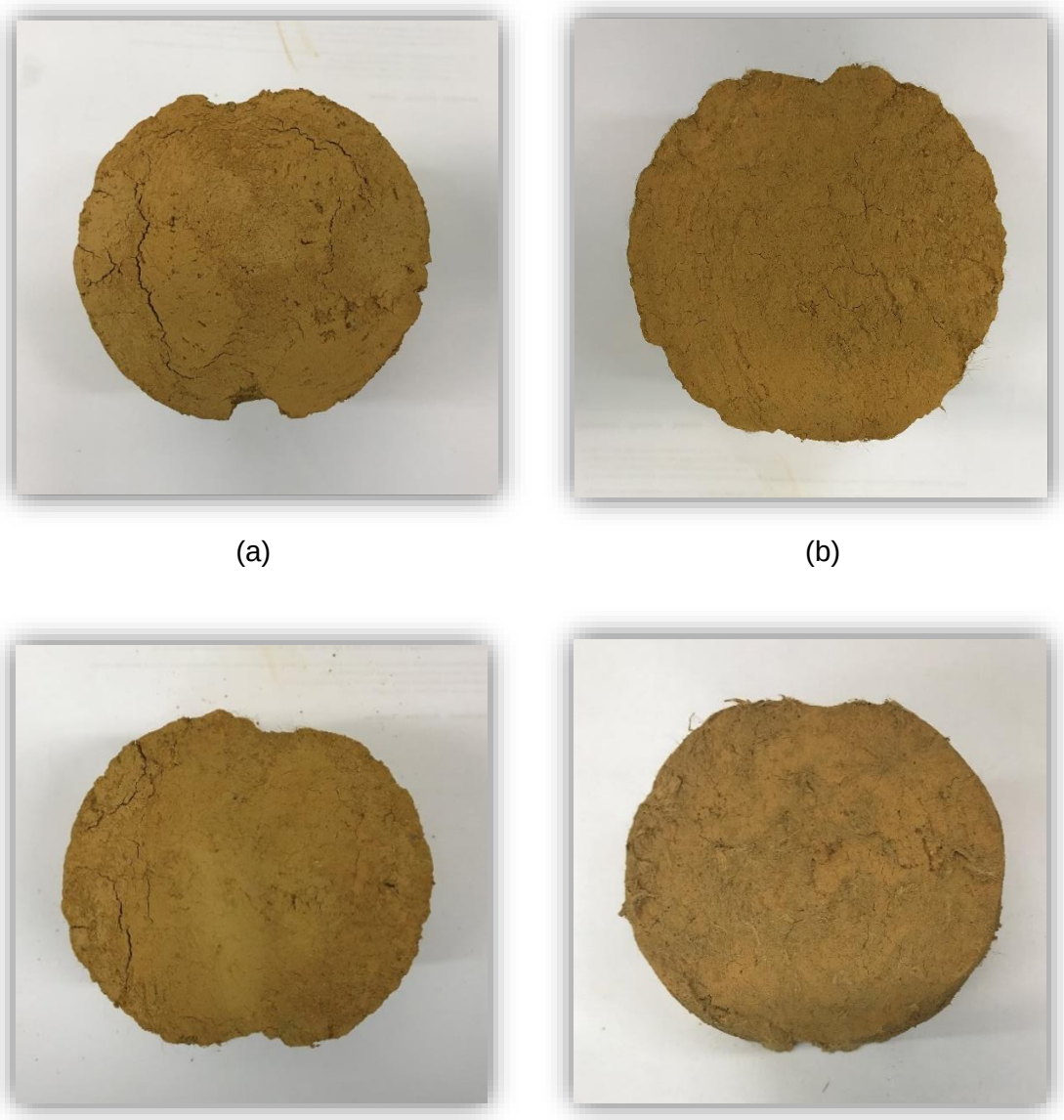



**Figura 28: Condutividade hidráulica x Deformação Radial com $\sigma_c$= 10kPa e posteriormente $\sigma_c$= 100kPa para os teores de 0,0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibra PET**



(a) (b)

(c) (d)

**Figura 29: Corpos de Prova após a 2ª rodada dos ensaios: (a) CP1 (0,0%), (b) CP2 (0,5%), (c) CP3 (1,0%) e (d) CP4 (1,5%)**

Observa-se neste conjunto de ensaios um comportamento não linear da curva tensão de tração versus deformação radial tanto sob confinamento de 10kPa e 100 kPa, indicando uma tendência a estabilização, que não se verificou até a condição final de ensaio a cerca de 10% de deformação. Os resultados destacam a contribuição das fibras no comportamento, sob confinamento de 100kPa, a amostra sem adição de fibras para 10% de deformação radial apresentou um limite de resistência inferior aos demais. Para 10% de deformação radial, verificou–se um acréscimo de cerca de 30% na resistência relativamente ao valor obtido na amostra sem fibras. Não se observou grandes varições

nos resultados dos ensaios efetuados nas amostras com fibras. No entanto, pode-se destacar a eficácia do teor 0,5% de fibras PET, que levou resistência pouco superior dentre os teores de fibras ensaiados. Já sob confinamento de 10 kPa, para 2% de deformação radial, verificou-se comparativamente as amostras sem e com 1% e 1,5% de fibras um acréscimo de resistência de 20%. Este aumento de resistencia com a adição de fibras foi também observado por Curcio (2008).

Tal como encontrado na literatura (MAHER e HO, 1994; CURCIO,2008), verificou-se que a presença de fibras aumentou a permeabilidade das amostras. As fibras criam caminhos preferenciais que facilitam a percolação do fluido. Sob confinamento de 10kPa a fissuração ocorreu nos primeiros estágios de deformação radial (~2%). Com a fissuração ocorrida no primeiro estágio, na segunda etapa a condutividade hidráulica encontrada apresentou-se superior. Tal indica que o confinamento mais elevado não foi capaz de fechar as trincas abertas anteriormente. No material compósito estudado por Curcio (2008), o confinamento mais elevado (100 kPa) favoreceu, uma redução significativa na condutividade hidráulica, mesmo sob compressão diametral, o que não se verificou na presente pesquisa.

Deve-se destacar a maior quantidade de finos no solo utilizado na presente pesquisa (53%) comparativamente ao utilizado por Curcio (2008) (44%). No entanto, os valores de permeabilidade medidos na atual pesquisa (~$10^{-5}$ cm/s) apresentaram-se significativamente superior aos obtidos por Curcio (2008) (~$10^{-7}$ cm/s), sob confinamento de 100kPa.

# 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

## 5.1. Conclusões

O solo residual laterizado com 53% de finos utilizado na presente pesquisa mostrou floculação/dispersão da fração argila dependente do pH. A presença de argilominerais 2:1 na fração argila do solo levou que o hexametafosfato de sódio, se apresentasse como agente dispersor de maior eficácia se comparado ao NaOH 1mol.$L^{-1}$.

Tal como encontrado na literatura verificou-se que a presença de fibras não alterou significativamente os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima das amostras ensaiadas, aumentou a compressibilidade e permeabilidade das amostras. Há um teor ótimo de fibras para aplicação em barreiras uma vez que, excedendo a quantidade que confere ductilidade ao solo, favorece o surgimento de caminhos preferenciais para percolação do fluido, perdendo assim a eficácia do sistema. A adição de fibras PET de 10mm de comprimento, em um teor de 0,5% a 1% aumentou a resistência à tração máxima do compósito, retardou a abertura de fissuras e reduziu a magnitude das mesmas.

Com a deformação radial (~6%) as amostras com e sem a presença das fibras apresentaram significativo acréscimo na permeabilidade do material, indicando possíveis aberturas de trincas. Estas trincas foram observadas ao final do ensaio. O único corpo-de prova que resistiu a maiores deformações sem aumento na permeabilidade foi com 0,5% de fibras na condição de ensaio direto com 100kPa. Tal ensaio só apresentou aumento brusco na permeabilidade a 15% de deformação, indicando a eficácia deste teor de fibras na redução de abertura de trincas. Relativamente ao valor obtido na amostra sem fibras, verificaram–se acréscimos de cerca de 30% e 20% na resistência à compressão diametral sob confinamento de 100kPa e 10 kPa, respectivamente.

Sob confinamento de 10kPa a fissuração ocorreu nos primeiros estágios de deformação radial (~2%). Diversamente ao observado no material compósito estudado por Curcio (2008), o confinamento mais elevado (100 kPa) não foi capaz de evitar o aparecimento e garantir fechamento das trincas abertas anteriormente.

Deve-se destacar a maior quantidade de finos no solo utilizado na presente pesquisa (53%) comparativamente ao utilizado por Curcio (2008) (44%). Sob confinamento de 100kPa, no entanto, os valores de permeabilidade medidos na atual pesquisa (entre $10^{-4}$cm/s e $10^{-5}$ cm/s) apresentaram-se significativamente superior aos obtidos por Curcio (2008) (~$10^{-7}$ cm/s).

### 5.2. Sugestões para Futuras Pesquisas

- Desenvolver estudos com materiais compósitos de diferentes tipos de solo, comprimento e tipos de fibras, sob diferentes condições de confinamento;
- Estudar o comportamento hidromecânico com modelagem física em maior escala e efetuar estudos computacionais de modelagem da abertura de trincas e seu impacto na permeabilidade do conjunto.

## 6. REFERÊNCIAS


ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6459. Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

_____. (1984). NBR 7180. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

_____. (1984). NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro.

_____. (1986). NBR 7182. Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

_____. (1986). NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro

AZAMBUJA, E.; ***A Influência do Dano Mecânico na determinação da Tensão Admissível dos Geossintéticos em Estruturas de Solo Reforçado.*** Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos; Rio de Janeiro, 1999.

BALDOTTO, M. A., VELLOSO, A. C. X. ***Pontos de carga zero, potenciais da dupla camada elétrica e eletroquímica do húmus de solos tropicais.*** XXXIV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo; Santa Catarina, 2013.

BEAR, F. E.; ***Chemistry of the Soil.*** 2ª Ed. New York: International Student Editions, 1964.

BRAGA, et. al.; ***Introdução À Engenharia Ambiental: O Desafio Sustentável***. 2ª Ed. Pearson Prentice Hall; São Paulo, 2005.

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

CALLISTER, Jr., WILLIAM, D.; ***Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução***. 7ª Ed. LTC Editora, Rio de Janeiro, 2012.

CAPUTO, H. P.; ***Mecânica dos Solos e Suas Aplicações: Fundamentos***. 6ªEd. LTC Editora. Vol.1. Rio de Janeiro, 1988.

CETESB – Companhia de Tecnologia e de Saneamento Ambiental de São Paulo - ***Resíduos Sólidos Ambientais***. São Paulo/SP. 1993.

CURCIO, D. S.; ***Comportamento Hidromecânico de Compósito Solo-fibra***. Dissertação (Mestrado) – COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

DANTAS, B. T. ***Análise do Comportamento de Estruturas de solo Reforçado Sob Condições de Trabalho***. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

DUNCAN, J. M., et. al.; ***Strenght, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses***. Journal of Geotechnical Engineering, Rep. No. UCB/GT/80-1, University of California, Berkeley, California, 1980.

EHRLICH, M., ***Análise de muros e taludes de solos reforçados***. Geossintéticos' 99, Vol. 2, pp. 73-84, Rio de Janeiro, 1999.

EHRLICH, M.; BECKER, L.; ***Muros e Taludes de Solo Reforçado: Projeto e Execução***. Coleção Huesker: Engenharia com Geossintéticos; Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

EMBRAPA-CNPS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. ***Manual de métodos de análise de solo***. 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA-CNPS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. ***Manual de métodos de análise de solo***. Teixeira P. C., *et al.* 3. ed. rev. atual. – Brasília DF, 2017.

EMBRAPA-CNPS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. ***Sistema brasileiro de classificação de solos.*** Brasília: Embrapa -SPI, 1999.

EPA - United States Environmental Protection Agency. ***Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers***. Washington DC., 2004. 421p.

HEINECK, K. S. ***Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis***. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

ILLSTON, J. M.; ***Construction Materials; their nature and behaviour***. E & FN Spon, 2ed. 518p., London, 1994.

JOHNSTON, C. D.; ***Fibre-reinforced cement and concrete***. In: V. M. Malhorta. Advances in concrete technology. 2ed.Ottawa, 1994

LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V., ***Soil Mechanics***, John Wiley and Sons, New York, 1969.

LEINZ, V. & AMARAL, S. E. ***Geologia Geral***.11ªed. São Paulo, 1989.

LEMOS, R. G. ***Estudo do Comportamento Hidráulico, Mecânico e Químico de Barreiras Hidráulicas Verticais, Compostas de Solo Residual, Bentonita e Cimento Sob Ação de Substâncias Agressivas***. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

MANO, E. B., ***Polímeros como materiais de engenharia***, São Paulo, 1991.

MAHER, M. H., HO, Y. C., ***Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite***. Journal of Geotechnical Engineering, Vol.120, Nº 8, pp 1381-1393. ASCE, 1994.

MARSHALL, C. E,; ***The Physical Chemistry and Mineralogy of Soils***. Vol1: Soil Materials. John Wiley and Sons, New York, 1964.

MITCHELL, J.K.; ***Fundamentals of Soil Behavior***; John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 1ª edição, 1976.

MITCHELL, J.K.; ***Fundamentals of Soil Behavior***; John Wiley & Sons, 2ª Edição, 1993.

PARKS, G. A; BRUYN, P. L.; ***The Zero Point of Charge of Oxides.*** Department of Metallurgy, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 39, Massachusetts,1962.

PEREIRA, L. C., NETO, F. L.; ***Avaliação da aptidão agrícola das terras: Proposta metodológica.*** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004.

PINTO JR. N. O.; ***Relatório de Ensaios Tecnológicos: Análise do Desempenho de Concretos Incorporando Baixos Teores de Fibras de Polipropileno, Nylon e Poliester à Etruria Industria de Fibras e Fios Sintéticos Ltda,*** Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2001.

RAIJ, B. van. ***Determinação do ponto de carga zero em solos.*** Bragantia, Vol.32, Campinas, 1973.

SANTOS, P. S. ***Ciência e Tecnologia de Argilas***. Vol.1. Editora Blücker – São Paulo, p. 214-231, 1989.

SCHULER, A. R.; ***Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado***. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. ***Iron oxides***. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438.

TAYLOR, D.W., ***Fundamentals of Soil Mechanics***, John Wiley and Sons, New York, 1948.

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

TEIXEIRA *et al*. ***Decifrando a Terra***, Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2000.