



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**MONOGRAFIA DO TRABALHO DE**  
**CONCLUSÃO DE CURSO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE FIBRAS DE GARRAFAS PET COMO REFORÇO DE SOLOS**  
**COMPACTADOS**

**Talita Gantus de Oliveira**

**Ouro Preto, março de 2016.**



**AVALIAÇÃO DO USO DE FIBRAS DE GARRAFAS PET  
COMO REFORÇO DE SOLOS COMPACTADOS**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

*Reitor*

Prof. Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza

*Vice-Reitor*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Célia Maria Fernandes Nunes

*Pró-Reitor de Graduação*

Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

### **ESCOLA DE MINAS**

*Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

*Vice-Diretor*

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

*Chefe*

Prof. Dr. Antônio Luciano Gandini



**MONOGRAFIA**

**Nº 178**

**AVALIAÇÃO DO USO DE FIBRAS DE GARRAFAS PET COMO  
REFORÇO DE SOLOS COMPACTADOS**

**Talita Gantus de Oliveira**

*Orientador*

Prof. MSc. Eleonardo Lucas Pereira

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 400, ano 2015/2.

**OURO PRETO**

**2016**

---



Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>  
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>  
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>  
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita  
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais  
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Talita Gantus de Oliveira

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

Oliveira, Talita Gantus

Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados.

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro  
Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

<http://www.sisbin.ufop.br>



*Aos meus pais.*



## Agradecimentos

---

Agradeço aos meus pais, minha melhor lembrança, pelos ensinamentos que perdurarão ao longo da minha trajetória e que serão lembrados até o fim dos meus dias. Aos meus irmãos pelo apoio imprescindível e indispensável ao longo de toda minha caminhada. À minha querida avó por alimentar meus sonhos e me fazer crer que o impossível é palpável – se assim quisermos. À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino público de qualidade e pelo aprendizado que vai além da sala de aula: por me tornar uma pessoa mais humana no convívio com as diferenças que presenciamos durante a vida universitária. À Fundação Gorceix pelo amparo à comunidade estudantil. Às minhas amadas Carolina, Raissa, Sara, Renata, Pabline e Nayara por acalmarem meus últimos – e ansiados – meses da graduação, tornando-os mais leves e alegres. À Geologia por ser uma ciência mágica que abriu meus olhos para um mundo que existe além da minha ínfima imaginação, até então infértil. Aos amigos, tão importantes, que a faculdade me presenteou, Ícaro, Vitor Augusto, João Paulo, Lorena, Jéssica, Sthenio, Henrique e Vitor Hugo pela amizade, momentos de descontração e por compartilharem ideias que me fizeram expandir a mente para enxergar além dos afloramentos e das histórias geológicas, e que, com certeza, me tornarão uma geóloga melhor. Ao IGEO e ao NUGEO pela oportunidade de me permitir crescer academicamente. Ao Guilherme pela ajuda, aprendizado, paciência e amizade no último ano. Ao Professor Eleonardo pelo ensino e pela orientação nesse Trabalho, o qual me fez confirmar de maneira prática que posso utilizar todos os artifícios da engenharia em prol de um mundo mais sustentável. Enfim, chego ao fim dessa jornada aspirando por um mundo em que a raça humana saiba retribuir toda a grandeza que a natureza nos dá.



# Sumário

---

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1    Considerações Iniciais .....	9
1.2    Objetivos .....	11
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>13</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1    Classificação dos Solos .....	13
2.1.1    Solos Lateríticos .....	14
2.2    Reutilização de Resíduos Sólidos .....	14
2.3    Metodologia Normativa dos Ensaios Laboratoriais .....	15
2.3.1    Ensaios de Caracterização .....	15
2.3.2    Ensaios de Compactação e Resistência ao Cisalhamento .....	20
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>23</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
3.1    Esquema Metodológico.....	23
3.1.1    Fase 1 – Pesquisa Bibliográfica.....	23
3.1.2    Fase 2 – Seleção da Área e Coleta de Material para Ensaios Laboratoriais.....	24
3.1.3    Fase 3 – Realização de Ensaios Laboratoriais de Caracterização, de Compactação, de ISC e de Cisalhamento Direto .....	24
3.1.4    Fase 4 – Fabricação das Fibras de Garrafas PET .....	24
3.1.5    Fase 5 – Realização de Ensaios Laboratoriais para o Solo com Aplicação de uma Porcentagem Predeterminada de Fibras de Garrafas PET .....	25
3.1.6    Fase 6 – Análise dos Resultados .....	26
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>27</b>
<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
4.1    Aplicação Qualitativa dos Ensaios de Caracterização do Solo .....	27
4.2    Análise dos Resultados de Caracterização do Solo.....	27
4.2.1    Análise Granulométrica.....	27
4.2.2    Limites de Consistência .....	32
4.3    Aplicação Qualitativa dos Ensaios sob a Influência das Fibras .....	35
4.4    Análise e Comparação dos Resultados dos Ensaios sob a Influência das Fibras .....	35

4.4.1	Compactação .....	35
4.4.2	Índice de Suporte Califórnia.....	37
4.4.3	Cisalhamento Direto.....	42
<b>CONCLUSÕES .....</b>		<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>49</b>

## Lista de Ilustrações

<b>Figura 1-</b> Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria por peneiramento. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) .....	17
<b>Figura 2-</b> Ensaio de granulometria por sedimentação. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) .....	17
<b>Figura 3-</b> À esquerda, desenho esquemático representando o ensaio de limite de liquidez. (Fonte: <a href="http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1337881634.pdf">http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1337881634.pdf</a> . Acessado em 29/03/2016 às 22:32); à direita: ensaio de limite de liquidez. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) .....	18
<b>Figura 4-</b> À esquerda, desenho esquemático representando o ensaio de limite de plasticidade. (Fonte: <a href="http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1337881634.pdf">http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1337881634.pdf</a> . Acessado em 29/03/2016 às 22:56); à direita: ensaio de limite de plasticidade. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) .....	18
<b>Figura 5-</b> Ensaio de massa específica pelo método do picnômetro de vidro e da bomba de vácuo. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) .....	19
<b>Figura 6-</b> Granulômetro a laser. (Fonte: Laboratório de Ensaios Especiais – NUGEO/UFOP) .....	20
<b>Figura 7-</b> Ensaio de compactação. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) ...	20
<b>Figura 8-</b> Ensaio de Índice de Suporte Califórnia. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) .....	21
<b>Figura 9-</b> Ensaio de cisalhamento direto. (Fonte: Laboratório de Ensaios Especiais – NUGEO/UFOP) .....	22
<b>Figura 10-</b> Esquema metodológico do processo de análise adotado. ....	23
<b>Figura 11-</b> Guilhotina utilizada na confecção das fibras. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP) .....	24
<b>Figura 12-</b> Representação do tamanho das fibras utilizadas. ....	25
<b>Figura 13-</b> Quantidade total de fibras utilizadas para a realização dos ensaios. ....	25
<b>Figura 14-</b> Solo utilizado no estudo com a adição das fibras de garrafas PET na proporção de 5 kg de solo para 20 g de fibras. ....	26
<b>Figura 15-</b> Ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação sem a adição de defloculante.	29
<b>Figura 16-</b> Ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação com a adição de defloculante. ....	29
<b>Figura 17-</b> Ensaio de granulometria a laser sem a adição de defloculante. A curva em vermelho representa a aplicação do sonar por um intervalo de tempo de 10 segundos. A curva em azul representa o ensaio sem aplicação do sonar. ....	31
<b>Figura 18-</b> Ensaio de granulometria a laser com a adição de defloculante. A curva em vermelho representa a aplicação do sonar por um intervalo de tempo de 10 segundos. A curva em azul representa o ensaio sem aplicação do sonar. ....	31
<b>Figura 19-</b> Gráfico gerado pelo ensaio de limites de consistência. ....	32
<b>Figura 20-</b> Carta de Plasticidade. Em vermelho estão representados os pontos em que se inserem o solo do presente estudo. C: solo argiloso; M: solo silteoso; O: solo orgânico; H: alta compressibilidade; L: baixa compressibilidade. (modificado de Pinto, 2006).....	34
<b>Figura 21-</b> Curvas de compactação de diversos solos brasileiros. (retirado de Pinto, 2006) .....	36

<b>Figura 22-</b> Em azul: Curva de compactação para o solo sem a adição das fibras; em vermelho: Curva de compactação para o solo com a adição das fibras. ....	37
<b>Figura 23-</b> Gráficos de correção do ISC para o ponto 1, de umidade 20,3%.....	38
<b>Figura 24-</b> Gráficos de correção do ISC para o ponto 2, de umidade 22,0%.....	39
<b>Figura 25-</b> Gráficos de correção do ISC para o ponto 3, de umidade 23,6. ....	39
<b>Figura 26-</b> Gráficos de correção do ISC para o ponto 4, de umidade 26,5%.....	40
<b>Figura 27-</b> Gráficos de correção do ISC para o ponto 5, de umidade 28,3. ....	40
<b>Figura 28-</b> Representação gráfica do ISC, em porcentagem, para cada ponto compactado –pressão padrão de 6,90 MPa. Em azul: solo sem reforço; em vermelho: solo reforçado.....	41
<b>Figura 29-</b> Representação gráfica do ISC, em porcentagem, para cada ponto compactado – pressão padrão de 10,35 MPa. Em azul: solo sem reforço; em vermelho: solo reforçado.....	42
<b>Figura 30-</b> Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. $\sigma$ : tensão normal existente no plano de cisalhamento; $\tau$ : tensão cisalhante; $\phi'$ : ângulo de atrito interno. (modificado de Pinto, 2006) .....	43
<b>Figura 31-</b> Corpo de prova, moldado com solo reforçado, cisalhado com uma tensão aplicada de 100 kPa.....	43
<b>Figura 32-</b> Gráfico de “tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal” para o solo sem reforço.....	44
<b>Figura 33-</b> Gráfico de “tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal” para o solo reforçado. ....	44
<b>Figura 34-</b> Gráfico de "tensão cisalhante <i>versus</i> tensão normal". Em azul: solo sem reforço; em vermelho: solo reforçado.....	44
<b>Figura 35-</b> Gráficos de “deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal” para o solo sem reforço. ....	45
<b>Figura 36-</b> Gráficos de “deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal” para o solo reforçado. .	45

## Lista de Tabelas

---

<b>Tabela 1-</b> Tamanho das partículas segundo a norma técnica NBR 6502 (ABNT, 1995).....	16
<b>Tabela 2-</b> Teor de umidade natural do solo. ....	28
<b>Tabela 3-</b> Massa específica dos grãos. ....	28
<b>Tabela 4-</b> Porcentagem de cada fração granulométrica para as curvas de distribuição dos ensaios. ...	30
<b>Tabela 5-</b> Porcentagem de cada fração granulométrica para as curvas de distribuição dos ensaios. ...	30
<b>Tabela 6-</b> Tabela gerada pelo ensaio de limites de consistência. ....	33
<b>Tabela 7-</b> Classificação dos solos pelo caráter de plasticidade segundo Jenkins. ....	33
<b>Tabela 8-</b> Estimativa da consistência pelo índice de consistência. (retirado de Pinto, 2006) .....	33
<b>Tabela 9-</b> Resumo das características geotécnicas do solo.....	35
<b>Tabela 10-</b> Parâmetros do ensaio de compactação para o solo.....	37
<b>Tabela 11-</b> Umidades de compactação utilizadas no ensaio de ISC.....	38
<b>Tabela 12-</b> Valor do ISC, em porcentagem, dos pontos compactados, para uma pressão padrão de 6,90 MPa. ....	41
<b>Tabela 13-</b> Valor do ISC, em porcentagem, dos pontos compactados, para uma pressão padrão de 10,35 MPa. ....	41
<b>Tabela 14-</b> Valor da expansão, em porcentagem, dos pontos compactados.....	42
<b>Tabela 15-</b> Valores numéricos da coesão e do ângulo de atrito para o solo com e sem reforço da fibra. ....	45

Oliveira, T. G., 2016. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados.

## Resumo

---

Atualmente, com o crescimento acelerado em obras de infraestrutura e o aumento das atividades minerárias para atender a demanda de consumo, fazem-se necessárias a criação e a utilização de medidas sustentáveis para minimizar impactos no meio ambiente. No que tange às técnicas que atendem a esses quesitos, e trazendo-as para o contexto da geotecnia, é possível associar geotecnia analítica e experimental à geotecnia ambiental, estudando e analisando métodos alternativos para sua abordagem em obras civis geotécnicas. No âmbito da pavimentação de rodovias e da estabilização de taludes, por exemplo, muitos profissionais desconhecem ou descartam a utilização de reforços alternativos para o solo. Entretanto, mesmo sendo poucos os estudos no que diz respeito ao aproveitamento de materiais para essa finalidade, o uso de estruturas de solo reforçado tem crescido consideravelmente na última década. Visto isso, alguns estudos foram realizados fazendo uso, como reforço, de geossintéticos e de materiais de descarte – como resíduos de construção e demolição – visando melhorias no desempenho das estradas e no prolongamento de sua vida útil. Desse modo, sendo poucos os estudos acerca da influência das propriedades mais relevantes no comportamento de materiais aplicados ao solo, são necessárias mais investigações sobre esse tema. No intuito de ampliar a área de conhecimento em referência ao aproveitamento de materiais para reforço de solos compactados, o presente trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento de solo reforçado com fibras de garrafas PET para a pavimentação de estradas, simulado por meio de ensaios laboratoriais de caracterização, de compactação e de resistência ao cisalhamento, atentando-se, também, para a redução do impacto ambiental causado pelo descarte dessas garrafas, visto que seu tempo de decomposição no meio ambiente é longo. Da conjugação dos fatores supracitados e tendo em vista a importância do desenvolvimento de posturas que contemplem a preservação dos recursos naturais e a utilização de medidas sustentáveis, surge uma interessante perspectiva para a utilização de materiais alternativos para aterro em obras. Tem-se, com isso, a conciliação de sustentabilidade e de soluções geotécnicas. A fim de se atingir os objetivos apresentados, foi proposto um amplo programa de investigação em laboratório em uma amostra composta pela mistura de fibras em um solo laterítico. Foram realizados ensaios de compactação, de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e de cisalhamento direto. Os resultados obtidos mostraram a influência das fibras de garrafas PET no aumento da resistência do solo.

**PALAVRAS CHAVE:** Pet, Sustentabilidade, Pavimentação, Fibras, Compactados.

Oliveira, T. G., 2016. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados.

## **Abstract**

---

Currently, with the rapid growth in infrastructure and increased mining activities to meet the demand, it is necessary to create and use sustainable measures to minimize impact on the environment. The techniques which meet these requirements include analytical and experimental geotechnics to environmental geotechnics, studying and analyzing alternatives for this approach in geotechnical civil works. Many professionals ignore or discard the use of alternative reinforcement of the soil, i.e. within road paving and slope stabilization. However, even with few studies regarding the use of materials for this purpose, the use of reinforced soil structures has grown considerably in the last decade. Some studies were performed making use of geosynthetics and disposal of materials for reinforcement – such as construction and demolition waste, for improvements in road performance and lifespan extension. Thus, with few studies about the influence of these most important properties in the behavior of materials applied to the soil, it will take more research on this topic. To expand this area of knowledge to the use of materials for reinforcing compact soils, this paper aims to study reinforced soil behavior with PET bottle fibers for road paving, simulated by laboratory of characterization, compaction and shear strength testing, keeping in mind the reduction of the environmental impact caused by the long decomposition time of these bottles. The combination of the above factors, in view of the importance of developing positions that include the preservation of natural resources and the use of sustainable measures, provides an interesting argument for the use of alternative materials in the landfill. Sustainability with geotechnical solutions must be reconciled. To achieve these objectives, compression tests were performed in a laboratory research program, mixing fibers and laterite soil using California Bearing Ratio (CBR) and direct shear. The results showed the influence of PET bottle fibers on the increase of the soil resistance.

**KEYWORDS:** Pet, Sustainability, Paving, Fibers, Compact.

Oliveira, T. G., 2016. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde os tempos mais remotos, o solo é, sem dúvida, o material mais utilizado pelo homem em suas construções. Desde a antiguidade, ele tem empregado a técnica de reforço de solos com a inclusão de materiais (raízes de árvores, telas de bambu, fibras de coco) por meio da correção das suas características de resistência com a função de elementos de reforço (Benjamin, 2006).

Com o passar do tempo, o desenvolvimento da indústria de materiais poliméricos, verificado nas últimas décadas, veio contribuir com sua utilização como matéria-prima na fabricação de elementos de reforço, os chamados geossintéticos.

O emprego de geossintéticos como materiais de reforço tem crescido bastante, principalmente em países com alto nível de desenvolvimento econômico e social. Já em países como o Brasil, que se encontram em desenvolvimento, o emprego destes materiais em obras rodoviárias tem aumentado notavelmente nos últimos anos, especialmente pela necessidade de rodovias com maior resistência e durabilidade, visto que a aplicação do reforço melhora a capacidade de suporte do sistema (Góngora, 2015).

Não apenas na pavimentação de rodovias, mas no contexto da estabilidade de taludes, camadas de reforços geossintéticos são usadas contra rupturas profundas. O talude reforçado pode ser parte da restauração de um rompido e o reforço é usado para aumentar a resistência de taludes de aterros rodoviários. Não apenas como método de restauração, as camadas de reforço permitem que sejam construídos taludes mais íngremes, fazendo uso de geocélulas ou geomantas, que geralmente são usadas para ajudar a fixação da vegetação.

Entretanto, apesar das vantagens relacionadas à utilização de geossintéticos, a maioria das estruturas de contenção em nosso país ainda é executada por meio de soluções convencionais. A ausência de um conhecimento mais profundo sobre o real comportamento de estruturas em solo reforçado, principalmente em termos de deslocamentos, certamente impede uma utilização mais intensa dessas estruturas no Brasil (Benjamim, 2006).

À vista disso, destacam-se alguns estudos que foram realizados fazendo uso, como reforço, de geossintéticos e de materiais de descarte – como resíduos de construção e demolição (Santos, 2011) e fios de cabelo (Aguiar *et al.*, 2009) – visando melhorias no desempenho das estradas e no prolongamento de sua vida útil.

No que tange às técnicas que atendem a esses quesitos, e trazendo-as para um contexto sustentável, é possível associar geotecnia analítica e experimental à geotecnia ambiental, estudando e analisando métodos alternativos para sua abordagem em obras civis geotécnicas, pois, com o crescimento acelerado em obras de infraestrutura e o aumento das atividades minerárias para atender a demanda de consumo, fazem-se necessárias a criação e a utilização de medidas sustentáveis para minimizar impactos no meio ambiente.

Sendo poucos os estudos acerca da influência das propriedades mais relevantes no comportamento de materiais aplicados ao solo, devem ser realizadas mais investigações sobre esse tema no intuito de ampliar a área de conhecimento em referência ao aproveitamento de materiais recicláveis para reforço de solos compactados. Visto isso, o presente trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento de solo reforçado com fibras de garrafas PET para a pavimentação de estradas. Para isso, foi proposto um programa de investigação laboratorial com a simulação do comportamento do aterro, por meio de ensaios de caracterização, de compactação e de resistência ao cisalhamento em uma amostra composta pela mistura das fibras e de um solo laterítico.

Os solos lateríticos são originados em regiões com intemperismo intenso e rápido, com altas temperaturas, ambiente úmido, chuvas abundantes e percolação de água, sendo este um ambiente propício ao processo de laterização do solo. Esse processo culmina na formação de uma crosta de aparência e espessura bem variáveis, onde predominam óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, devido à intensa lixiviação da sílica em pH elevado e argilominerais. Segundo Santos (2006), o solo fica estável em presença de água devido ao recobrimento dos argilominerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados, que também atuam como cimentantes naturais entre as partículas.

Na década de 50 foi realizada a primeira construção de rodovia utilizando-se solo laterítico fino como base de pavimento (Reschetti, 2008). Desde então, vários pesquisadores vêm agregando conhecimento nos estudos a respeito desse material, tais como: Nogami e Villibor (1980), Villibor (1981) e Bernucci (1995).

Segundo Reschetti (2008), a utilização de fibras como material de reforço em pavimento também já foi estudada. Fletcher e Humphries (1991) analisaram a adição de fibras de polipropileno em um solo siltoso utilizando os ensaios de ISC e de compactação e afirmaram que existe um teor ótimo de fibra que aumenta o valor do ISC. Specht (2000), estudando um solo reforçado com a mesma fibra, concluiu que a influência da inclusão aleatória depende das características da fibra. Gray e Ohashi (1983) reforçaram um solo não coesivo e concluíram que seu reforço aumentou significativamente a resistência ao cisalhamento de pico no ensaio de cisalhamento direto.

Da conjugação dos fatores supracitados, e tendo em vista a importância do desenvolvimento de posturas que contemplem a preservação dos recursos naturais e a tomada de medidas sustentáveis,

surge uma interessante perspectiva para a utilização de materiais alternativos para reforço em obras de aterro.

Atentando-se para a redução do impacto ambiental causado pelo descarte de garrafas PET e sabendo-se que seu tempo de decomposição no meio ambiente é longo, obteve-se, nesse trabalho, a conciliação de sustentabilidade e de soluções geotécnicas.

## **1.2 OBJETIVOS**

Considerando-se os benefícios e o grande potencial que os reforços em obras geotécnicas apresentam, este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo o estudo do comportamento de solos reforçados com fibras de garrafas PET, simulado por meio de ensaios laboratoriais de caracterização, de compactação e de resistência ao cisalhamento do solo, além da interpretação e do estudo acerca dos resultados obtidos.

Com isso, buscou-se por meio de análises geotécnicas experimentais o aumento da resistência do solo a partir da aplicação do reforço. Com o aumento verificado, foram propostas análises mais aprofundadas para que essa fibra seja aplicada no mercado.

Os objetivos específicos foram:

- determinação da influência das características qualitativas do reforço;
- comparação do desempenho do comportamento mecânico do solo sem a aplicação de reforço e com a aplicação em uma porcentagem predeterminada.

Oliveira, T. G., 2016. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

De acordo com Das (2011), os sistemas de classificação dos solos fornecem uma linguagem simples para expressar de forma concisa as características do solo – que são infinitamente variadas – sem descrições detalhadas. A maioria dos sistemas de classificação que foram desenvolvidos para fins de engenharia tiveram como base as propriedades de índice simples, como a distribuição granulométrica e a plasticidade. Embora existam diversos sistemas de classificação em uso, nenhum é totalmente definitivo para todos os elementos e para todas as aplicações possíveis, pois há uma grande diversidade de comportamento de cada solo.

Embora a classificação textural do solo seja relativamente simples, ela é totalmente baseada na distribuição granulométrica. A quantidade e o tipo de argilominerais presentes em um solo de grãos finos determinam, em grande parte, suas propriedades físicas. Conseqüentemente, os engenheiros geotécnicos devem considerar a plasticidade, que resulta da presença de argilominerais, para interpretar as características do solo de forma adequada. Como os sistemas de classificação textural não consideram a plasticidade e não indicam de forma precisa muitas das importantes propriedades do solo, eles não são adequados para a maior parte das metas da engenharia (Das, 2011).

Segundo Pinto (2002), o objetivo da classificação dos solos sob o ponto de vista da engenharia é o de poder estimar seu provável comportamento ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação geotécnica necessária para permitir a adequada análise de um problema.

Usualmente, os engenheiros geotécnicos utilizam dois sistemas de classificação mais elaborados considerando a distribuição granulométrica e os limites de Atterberg, sendo eles: o Sistema de Classificação da Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte (AASHTO) e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) (Das, 2011). O sistema de classificação da AASHTO é muito empregado na engenharia rodoviária. Já o Sistema Unificado é o mais utilizado mundialmente pelos engenheiros geotécnicos.

Entretanto, visto que os sistemas de classificação foram desenvolvidos com base na experiência acumulada em solos de clima temperado, ambos apresentam limitações e incompatibilidades quando aplicados a solos subtropicais e tropicais, como o solo laterítico utilizado para desenvolvimento do presente estudo. Por esse motivo, as classificações tradicionais categorizavam este solo como inadequado para utilização como base de pavimentação, até ser utilizado em um acesso à cidade de Campinas, executado pelo Departamento de Estradas de Rodagem

(DER-SP) no fim da década de 50. Desde então, vários trechos foram construídos com a mesma técnica (Reschetti, 2008).

### **2.1.1 Solos Lateríticos**

Solos lateríticos são caracterizados por apresentarem características macroscópicas e constituição mineralógica peculiar, e constituem a parte mais superficial do perfil de solo das áreas bem drenadas (acima do lençol freático). Eles se destacam a partir da uniformidade e da coloração característica, podendo se apresentar nas cores vermelho, alaranjado ou amarelo, e raramente em outras cores (Nogami; Villibor, 1981).

Os solos lateríticos apresentam-se na natureza, geralmente, não saturados e com índice de vazios elevado, por isso possuem pequena capacidade de suporte. Quando compactados, entretanto, sua capacidade de suporte é elevada, sendo, por isso, muito empregados em obras de pavimentação e de aterros. Após a compactação, os solos lateríticos se contraem se o teor de umidade diminuir, mas não se expandem na presença de água (Pinto, 2002).

A fração de argila é predominantemente constituída de caulinita e é rica em óxidos de alumínio e de ferro, o que caracteriza sua tonalidade e causa uma cimentação natural recobrendo agregações de partículas argilosas. Estes óxidos envolvem os argilominerais, resultando em uma microestrutura porosa (com alta permeabilidade) e em uma homogeneidade granulométrica.

Quanto à fração arenosa, pode conter elevada percentagem de concreções de resistência inferior à da areia tradicional (quartzo), pois a presença de mica e/ou feldspato nos solos lateríticos reduz a massa específica seca, a capacidade de suporte e o índice de plasticidade, aumentando o teor de umidade ótima e a expansão do solo (Abel, 2011).

## **2.2 REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Solos lateríticos, ao passarem pelo processo de laterização, tornam-se menos suscetíveis à ação da água, sofrendo menos erosão se comparados aos solos não lateríticos, além de adquirirem uma cimentação que lhes dá bom desempenho mecânico para a aplicação em base de pavimentos.

Não obstante, a estabilização dessa base pode ser feita com a adição de novos materiais que proporcionem a melhoria ou o reforço do solo utilizado, sendo esse reforço associado à utilização de inclusões que melhorem o estado físico do solo, enquanto as melhorias associam-se ao estado químico.

Tendo em vista os aspectos supracitados, Reschetti (2008) propôs a avaliação da influência da inclusão de fibras de vidro e de polipropileno no comportamento mecânico de um solo laterítico. Já Santos (2011) propôs a análise experimental do potencial de uso de materiais alternativos em

estruturas de solo reforçado, fazendo uso de resíduos sólidos de construção e demolição reciclados como material de preenchimento de um solo silto arenoso.

No que refere-se aos resíduos sólidos, têm sido um dos temas ambientais mais destacados na agenda de discussão sobre o meio ambiente, sobretudo nos grandes centros urbanos. Diferentes estudos e publicações científicas têm focado variados fenômenos relacionados à geração, coleta, disposição e reciclagem do lixo urbano (Berthier, 2003; Pieters, 1991).

Uma grande possibilidade apontada pela literatura é a reciclagem do lixo para que ele fosse reutilizado por outros usuários, para outros propósitos ou como materiais secundários (Pieters, 1991).

Associando-se os fatores supramencionados, o presente trabalho se volta à reutilização de materiais plásticos – as garrafas PET. Segundo Forlin e Faria (2002), os plásticos são considerados substratos inertes, com índices de decomposição variáveis (quase desprezíveis) por elementos ambientais, como luz, umidade, calor e microrganismos. Quando degradados, podem originar substâncias não inócuas, de prolongada persistência e de restrito controle ambiental.

A consolidação e o incremento do volume dos materiais plásticos utilizados em embalagens na vida moderna representa um desafio sob o ponto de vista da sua reciclagem racional, exigindo uma abordagem integrada entre os processos de transformação das matérias-primas, fabricação das embalagens e seu descarte pós-uso.

A transformação mecânica em novos materiais ou produtos consiste em submeter os materiais plásticos a processos mecânicos, moldando-os fisicamente em uma forma diferente da original. Outra forma de reutilizar esses materiais que seriam descartados, e que foi abordada no presente estudo, é a fabricação de fibras de garrafas PET para sua utilização como reforço de solos compactados em obras geotécnicas. Desse modo, conciliam-se duas vertentes almeçadas nos dias de hoje: sustentabilidade e obras de engenharia.

Para atingir o objetivo proposto de avaliar o comportamento do solo laterítico em questão reforçado com as fibras, foi elaborado um programa metodológico dos ensaios laboratoriais realizados, segundo a preconização de suas respectivas normas.

## **2.3 METODOLOGIA NORMATIVA DOS ENSAIOS LABORATORIAIS**

### **2.3.1 Ensaio de Caracterização**

#### ***2.3.1.1 Granulometria por Peneiramento e Sedimentação***

O ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação tem sua metodologia baseada na norma técnica NBR 7181 (ABNT, 1984). Tem como objetivo a obtenção da curva de distribuição

granulométrica de um solo, em termos de porcentagem de toda uma gama de diâmetros dos grãos do material em estudo. Por meio dessa curva, algumas propriedades dos solos podem ser obtidas.

As variadas proporções dos diferentes tamanhos das partículas sólidas do solo caracterizam sua textura, que, segundo Jorge (1986), é essencial nos estudos de classificação, morfologia e gênese, relacionando-se, ainda, com as propriedades físicas e químicas do solo.

Os solos são divididos em categorias de pedregulho, areia, silte e argila com base no tamanho das partículas, sendo nomeados a partir de seus componentes principais, como argila arenosa, argila siltosa, e assim por diante (Das, 2011). O tamanho das partículas, preconizado segundo a norma técnica NBR 6502 (ABNT, 1995), encontra-se representado na Tabela 1.

**Tabela 1-** Tamanho das partículas segundo a norma técnica NBR 6502 (ABNT, 1995).

Fração	Limite
Matacão	20 cm a 1 mm
Pedra	60 mm a 20 cm
Pedregulho	2,0 mm a 60 mm
Areia grossa	0,60 mm a 2,0 mm
Areia média	0,20 mm a 0,60 mm
Areia fina	0,06 mm a 0,20 mm
Silte	0,002 mm a 0,06 mm
Argila	inferior a 0,002 mm

A distribuição granulométrica da parte grossa é determinada por peneiramento, e a parte fina é determinada indiretamente por sedimentação, baseada na Lei de Stokes. As peneiras utilizadas encontram-se representadas na Figura 1.

O ensaio de sedimentação (Figura 2) fornece a velocidade final de uma partícula, com um determinado diâmetro, caindo num meio fluido livremente. Os diâmetros das partículas do solo são considerados equivalentes a diâmetros de partículas esféricas de massa específica igual às da sua em suspensão, que teriam as mesmas velocidades de queda das partículas do solo.

De acordo com Franzoi (1990), solos lateríticos possuem uma variação granulométrica muito ampla, geralmente com a predominância de finos passantes integralmente na peneira com 2,0 milímetros de abertura. Salienta-se que, devido à cimentação presente nesse tipo de solo, pode ser difícil obter a granulometria real do material, tendo como consequência porcentagens de silte e areia acima do normal.



**Figura 1-** Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria por peneiramento. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)



**Figura 2-** Ensaio de granulometria por sedimentação. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)

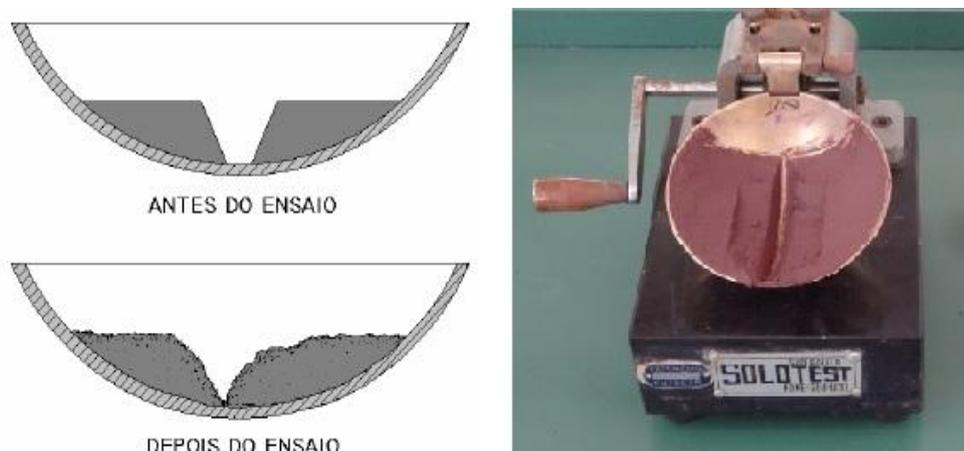
### **2.3.1.2 Teor de Umidade**

A determinação do teor de umidade, o qual expressa o estado do solo, é feita em conformidade com os procedimentos internos do laboratório do Núcleo de Geotecnia da UFOP. Para se determinar o teor de umidade é pesado o solo úmido e, após sua secagem por 24 horas em uma estufa a 150°C, é feita a pesagem do solo seco. Por meio de cálculos é determinada a massa da água e o teor de umidade da amostra. O processo se repete por mais duas vezes. O teor de umidade final se dá pela média aritmética das três pesagens.

### **2.3.1.3 Limites de Consistência**

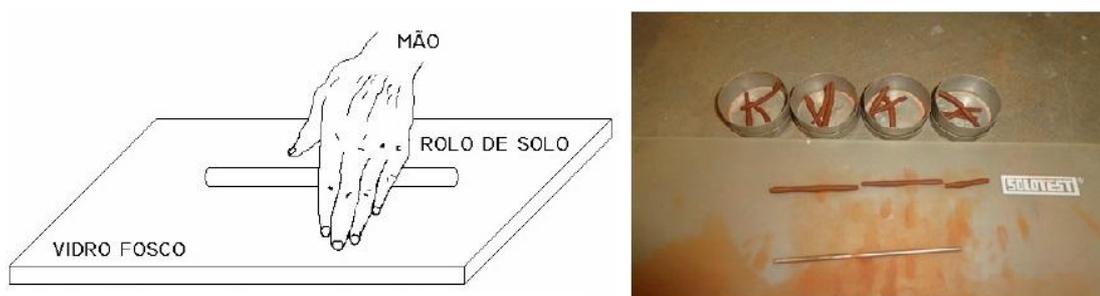
Este ensaio aborda a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, usando como referência as metodologias preconizadas pelas normas técnicas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180

(ABNT, 1984). O limite de liquidez define a fronteira entre o estado plástico e o estado líquido de um solo. O ensaio é realizado no Aparelho de Casagrande, sendo o limite de liquidez correspondente ao teor de umidade associado ao fechamento da ranhura com 25 golpes. Parte do procedimento é mostrada na Figura 3.



**Figura 3-** À esquerda, desenho esquemático representando o ensaio de limite de liquidez. (Fonte: <http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1337881634.pdf>. Acessado em 29/03/2016 às 22:32); à direita: ensaio de limite de liquidez. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)

De maneira análoga, o limite de plasticidade (Figura 4) define a fronteira entre o estado plástico e o estado semissólido de um solo. Por meio desses limites é possível determinar o índice de plasticidade, o qual, juntamente com o limite de liquidez, é utilizado para a classificação geotécnica do solo.



**Figura 4-** À esquerda, desenho esquemático representando o ensaio de limite de plasticidade. (Fonte: <http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1337881634.pdf>. Acessado em 29/03/2016 às 22:56); à direita: ensaio de limite de plasticidade. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)

#### 2.3.1.4 Massa Específica dos Grãos

Este ensaio é realizado para a determinação da massa específica dos grãos do solo. Sua normatização ocorreu segundo procedimentos internos do laboratório do Núcleo de Geotecnia da UFOP.

O laboratório utiliza o método do picnômetro de vidro e da bomba de vácuo (Figura 5), o qual é realizado da seguinte forma: primeiramente, são colocados 75 g da amostra em um picnômetro de 500 mL, o qual, em seguida, é completado com água destilada até a marca de 250 mL. A bomba de vácuo é utilizada para a retirada de todo o ar do picnômetro. Acrescenta-se, então, água destilada até ser atingido o menisco. Por fim, o picnômetro é pesado e mede-se a temperatura da amostra.

São necessários para os cálculos os pesos do solo seco, do picnômetro vazio e do picnômetro com solo e água ao final do ensaio.



**Figura 5-** Ensaio de massa específica pelo método do picnômetro de vidro e da bomba de vácuo. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)

### **2.3.1.5 Granulometria a Laser**

Para a determinação da textura ou da granulometria do solo, utiliza-se, também, o granulômetro a laser (Figura 6). Esse ensaio foi realizado para fins de comparação com o método convencional – granulometria por peneiramento e sedimentação.

Apesar da inexistência de procedimentos normativos para o ensaio, a realização das análises granulométricas ocorre segundo a orientação dos manuais de operação do equipamento (*Malvern Instruments, 2007*), o qual consiste em um analisador de tamanho de partículas por difração a laser que proporciona a obtenção de distribuições rápidas e precisas do tamanho das partículas para dispersões secas e úmidas, com capacidade de medições que variam de nanômetros a milímetros. Para isso, ele mede a intensidade da luz espalhada na medida em que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra.

Os resultados obtidos são utilizados para o cálculo a distribuição do tamanho das partículas obtidas a partir do padrão de espalhamento gerado



**Figura 6-** Granulômetro a laser. (Fonte: Laboratório de Ensaios Especiais – NUGEO/UFOP)

## **2.3.2 Ensaios de Compactação e Resistência ao Cisalhamento**

### **2.3.2.1 Ensaio de Compactação**

O ensaio de compactação do solo, representado pela Figura 7, utiliza como referência a metodologia preconizada pela norma técnica NBR 7182 (ABNT, 1988). Esse ensaio tem como objetivo determinar a correlação entre o teor de umidade de uma determinada massa de solo e o peso específico aparente seco que ele alcança nessa umidade, quando submetido a uma energia de compactação, podendo ela ser normal, intermediária ou modificada.

Variando o teor de umidade do solo em uma ampla faixa, obtém-se uma curva “peso específico seco *versus* teor de umidade”, comumente chamada curva de compactação. O resultado do ensaio é obtido da curva de compactação e definido como peso específico seco máximo.



**Figura 7-** Ensaio de compactação. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)

### **2.3.2.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)**

Este ensaio é regido pela norma técnica NBR 9895 (ABNT, 1987). A capacidade de suporte de um solo compactado pode ser medida por meio do método do Índice de Suporte Califórnia - ISC

(*California Bearing Ratio* - CBR), idealizado pelo engenheiro O. J. Porter, no estado da Califórnia, Estados Unidos da América.

Trata-se de um método de ensaio empírico adotado por grande parcela de órgãos rodoviários no Brasil e no mundo. O objetivo do ensaio é determinar o Índice de Suporte Califórnia e a expansão.

O ensaio ISC, representado pela Figura 8, consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em porcentagem. O ensaio pode ser realizado de duas formas: moldando-se um corpo de prova com teor de umidade próximo ao ótimo (determinado previamente em ensaio de compactação); ou moldando-se corpos de prova para o ensaio de compactação (em teores de umidade crescentes), com posterior ensaio de penetração desses mesmos corpos de prova, obtendo-se simultaneamente os parâmetros de compactação e os valores de ISC.

Como já destacado, por ele é possível determinar, também, a expansão e a contração do solo durante a imersão dos corpos de prova na água por um período de quatro dias. Como regra geral, os solos lateríticos apresentam pouca expansão (Bernucci, 1995).



**Figura 8-** Ensaio de Índice de Suporte Califórnia. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)

### **2.3.2.3 Cisalhamento Direto**

O ensaio de cisalhamento direto (Figura 9) baseia-se na metodologia consagrada pela norma técnica da *American Society for Testing & Materials* (ASTM). Foi desenvolvido, basicamente, para a determinação da resistência ao corte de um corpo de prova de solo, de forma prismática, de seção quadrada e de pequena espessura.

Esse ensaio é drenado e aplicado ao estudo da resistência ao cisalhamento de solos com estratificações ou xistosidades definidas, ou quando se quer avaliar a resistência entre contatos de diferentes materiais. O objetivo do ensaio é a determinação do esforço resistente do solo quando

Oliveira, T. G., 2016. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados.

submetido a uma tensão vertical e a uma tensão de cisalhamento com uma força horizontal crescente, obtendo-se, por meio da interpretação de uma envoltória linear, os valores do ângulo de atrito interno do solo e do intercepto coesivo.



**Figura 9-** Ensaio de cisalhamento direto. (Fonte: Laboratório de Ensaio Especiais – NUGEO/UFOP)

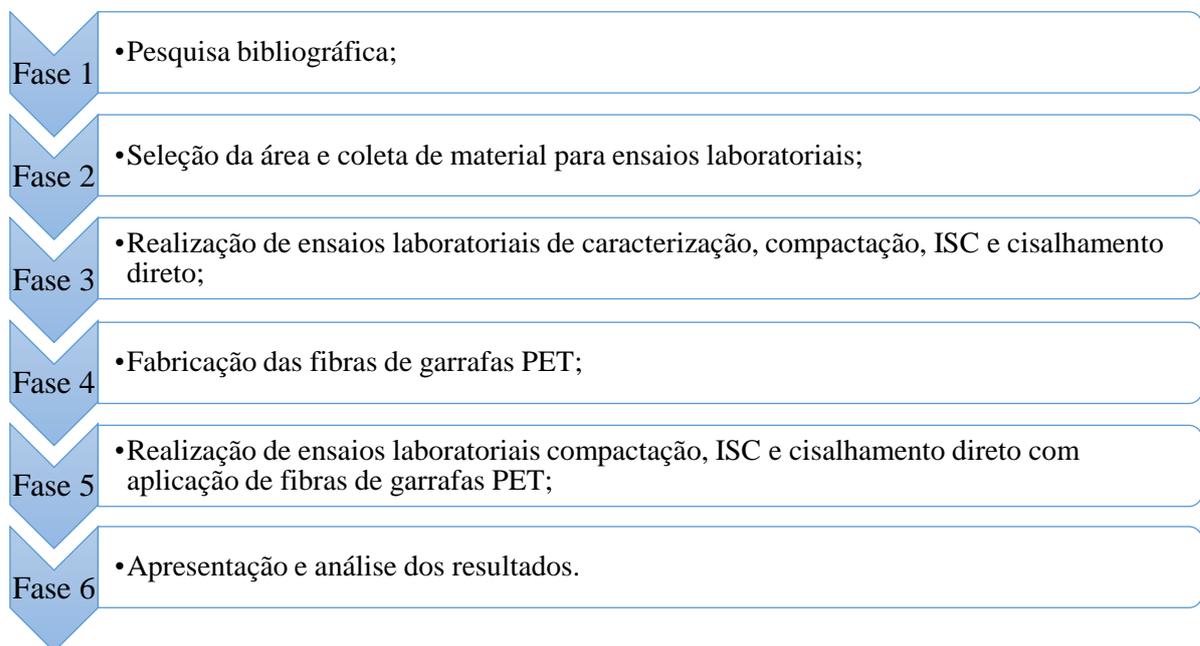
Baseando-se na metodologia dos ensaios segundo suas respectivas normas e considerando a necessidade de analisar e discutir os resultados gerados para, então, avaliar o comportamento do solo reforçado, foi desenvolvido um esquema metodológico apresentando os materiais e métodos necessários para o desenvolvimento do estudo.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ESQUEMA METODOLÓGICO

A adoção dos materiais e dos métodos foi pautada a fim de se atingir o objetivo proposto para este trabalho, que consiste na análise geotécnica estimando o aumento da resistência e da coesão do solo a partir da aplicação do reforço. O esquema metodológico encontra-se representado pela Figura 10.



**Figura 10-** Esquema metodológico do processo de análise adotado.

##### 3.1.1 Fase 1 – Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica é uma etapa que se estendeu ao longo de todo o trabalho. No entanto, a etapa inicial teve um importante papel na definição dos métodos aplicados para se atingir o objetivo do presente trabalho.

Foram utilizadas teses, artigos e dissertações durante todo o processo de elaboração do estudo, desde a escolha das metodologias até a interpretação dos resultados gerados, além de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da *American Society for Testing & Materials* (ASTM) para auxiliar na execução dos ensaios.

### 3.1.2 Fase 2 – Seleção da Área e Coleta de Material para Ensaio Laboratoriais

Os trabalhos de coleta de amostras – baseados na norma NBR 9604 (ABNT, 1986) – para a execução dos ensaios foram realizados no distrito de Passagem de Mariana, MG, numa área conhecida como Vila São Vicente. O solo selecionado trata-se de um solo laterítico. Sua seleção se deu pelo fato de que alguns estudos foram realizados analisando-se a influência de outros reforços nesse tipo de solo. Alguns dos estudos foram propostos por Reschetti (2008), Trovatto e Portelina (2015) e Benjamim *et al.* (2007), dentre outros.

### 3.1.3 Fase 3 – Realização de Ensaio Laboratoriais de Caracterização, de Compactação, de ISC e de Cisalhamento Direto

Nessa etapa, foram realizados ensaios da amostra coletada sem a adição das fibras. Os ensaios de caracterização, como análise granulométrica e limites de consistência, foram concluídos nessa fase para se determinar as características fundamentais do solo. Posteriormente, foram realizados os ensaios de compactação na energia normal, de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e de cisalhamento direto para se determinar a massa específica seca máxima, a umidade ótima e a resistência do corpo de prova para posterior comparação dos resultados obtidos com a adição das fibras.

### 3.1.4 Fase 4 – Fabricação das Fibras de Garrafas PET

As fibras foram confeccionadas manualmente com o auxílio de uma guilhotina (Figura 11) para reduzi-las ao tamanho desejado: formato retangular com, aproximadamente, 7 cm por 1 mm (Figura 12). A dimensão foi proposta de modo que as fibras pudessem ser facilmente homogeneizadas no solo e acomodadas no molde do corpo de prova usado no ensaio de cisalhamento direto, o qual possui um volume de 200 cm<sup>3</sup>; entretanto, não tão pequenas a ponto de não exercerem influência no ensaio de ISC.



**Figura 11-** Guilhotina utilizada na confecção das fibras. (Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos – NUGEO/UFOP)



**Figura 12-** Representação do tamanho das fibras utilizadas.

### **3.1.5 Fase 5 – Realização de Ensaios Laboratoriais para o Solo com Aplicação de uma Porcentagem Predeterminada de Fibras de Garrafas PET**

Após determinadas as características fundamentais do solo por meio dos ensaios de caracterização e realizados os ensaios de compactação, de ISC e de cisalhamento direto, foram executados esses três últimos ensaios no solo reforçado com as fibras.

Uma porcentagem de fibras foi adicionada ao solo para se obter dois resultados para comparação – resultado 1: solo sem reforço; resultado 2: solo reforçado com 0,4%, em peso, de fibras. Essa porcentagem é equivalente à proporção de 5 kg de solo para 20 g de fibras. Salienta-se que sua distribuição no solo foi feita de modo aleatório. A quantidade total de fibras utilizadas para a realização dos ensaios encontra-se ilustrada na Figura 13.



**Figura 13-** Quantidade total de fibras utilizadas para a realização dos ensaios.

As fibras foram homogeneizadas no solo, aleatoriamente, de modo a formar uma mistura de solo reforçado, como observado na Figura 14.



**Figura 14-** Solo utilizado no estudo com a adição das fibras de garrafas PET na proporção de 5 kg de solo para 20 g de fibras.

### **3.1.6 Fase 6 – Análise dos Resultados**

Finalizadas as etapas de elaboração dos resultados por meio dos ensaios, foram apresentadas as análises, de caráter qualitativo e quantitativo, bem como a interpretação dos dados sobre o aumento ou não da resistência do solo após a adição das fibras.

## **CAPÍTULO 4**

### **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

---

#### **4.1 APLICAÇÃO QUALITATIVA DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentadas pelos diversos tipos de solos perante as solicitações de interesse da engenharia levaram ao seu natural agrupamento em conjuntos distintos, aos quais podem ser atribuídas algumas propriedades. Dessa tendência racional de organização da experiência acumulada, surgiram os sistemas de classificação dos solos. O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é o de poder estimar seu provável comportamento ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.

A classificação pela sua origem é um complemento importante para o conhecimento das ocorrências e para a transmissão de conhecimentos acumulados. Algumas vezes, a indicação da origem do solo é tão ou mais útil do que a classificação sob o ponto de vista da constituição física. Entretanto, o material do presente estudo, além da classificação pela sua origem, a qual já é conhecida, deve ter sua identificação a partir das partículas que os constituem (Pinto, 2006). Para isso foram empregados os ensaios de análise granulométrica e de determinação dos limites de consistência.

#### **4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**

##### **4.2.1 Análise Granulométrica**

Primeiramente, foi realizado o ensaio para se determinar o teor de umidade natural do solo. Segundo Pinto (2006), quando uma argila se encontra remoldada o seu estado pode ser expresso pelo seu índice de vazios. Como é muito comum que as argilas se encontrem saturadas, ou seja, com os vazios preenchidos, seu estado, normalmente, é expresso pelo teor de umidade ( $w$ ), o qual encontra-se representado na Tabela 2.

A massa específica dos grãos ( $\rho_s$ ) é utilizada como dado para o cálculo da granulometria, e o resultado do ensaio para sua determinação encontra-se representado na Tabela 3.

**Tabela 2-** Teor de umidade natural do solo.

Cápsula n°	46	68	10
Massa cápsula (g)	7,68	7,61	7,58
Massa cápsula+solo+água (g)	20,83	20,05	16,02
Massa cápsula+solo (g)	18,25	17,67	14,40
Massa solo (g)	10,57	10,06	6,82
Massa água (g)	2,58	2,38	1,62
Umidade (%)	24,41	23,66	23,75
Teor de umidade – w (%)	23,71		

**Tabela 3-** Massa específica dos grãos.

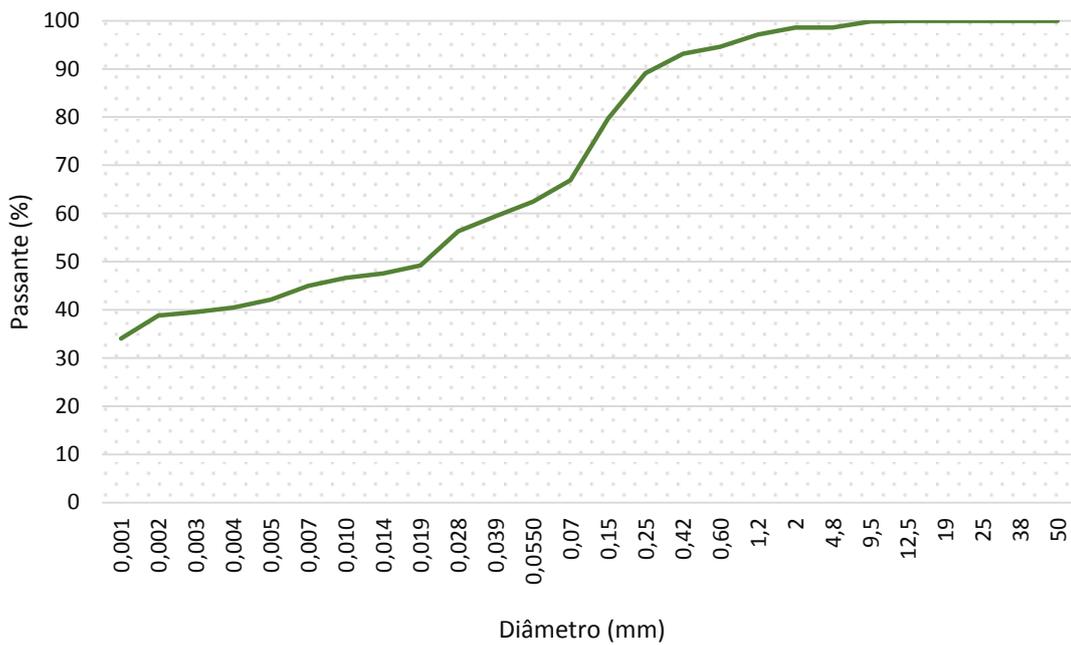
Picnômetro n°	3	1
Massa picnômetro (g)	170,29	169,86
Massa picnômetro+solo+água (g)	703,08	704,20
Temperatura – T (°C)	24,60	24,50
Massa picnômetro+solo+água à T (g)	666,83	666,63
Massa solo seco (g)	55,24	57,30
Fator de correção	0,9972	0,9972
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,901	2,897
Massa específica dos grãos média – $\rho_s$	2,899	

Os ensaios para se determinar a granulometria do solo, preconizados conforme a norma, foram realizados com e sem a adição de defloculante – hexametáfosfato de sódio na proporção de 120 ml para 75 g de solo. Como o defloculante tem a função de desagregar grãos maiores, os resultados do ensaio indicaram uma classificação para o solo como sendo argila siltosa com pedregulhos de cor marrom avermelhada; já para o ensaio sem o defloculante, o solo foi classificado como areia siltosa com pedregulhos de cor marrom avermelhada, pois neste os grãos argilosos não se desagregaram. Os resultados distintos da análise realizada com e sem o uso do defloculante pode se justificar pela existência de agregações de partículas constituintes do solo analisado em concreções com certa resistência à água, necessitando de um agente químico dispersor.

Os resultados foram fornecidos segundo uma curva de distribuição granulométrica, como representada nas Figuras 15 e 16.



**Figura 15-** Ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação sem a adição de defloculante.



**Figura 16-** Ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação com a adição de defloculante.

Os dados da porcentagem de cada fração granulométrica encontram-se na Tabela 4.

**Tabela 4-** Porcentagem de cada fração granulométrica para as curvas de distribuição dos ensaios.

Fração	% sem defloculante	% com defloculante
Argila	0,0	38,8
Silte	5,6	24,7
Areia fina	69,2	20,9
Areia	18,1	10,2
Areia	1,9	0,0
Pedregulho	5,2	5,4

Em complementação aos ensaios de granulometria, para se obter a curva de distribuição do solo foram realizados ensaios no granulômetro a laser. O equipamento é capaz de atingir leituras em faixas granulométricas mais estendidas, aumentando a precisão do resultado; enquanto o método convencional limita-se até 0,001 mm, o outro método atinge partículas de até 0,00001 mm.

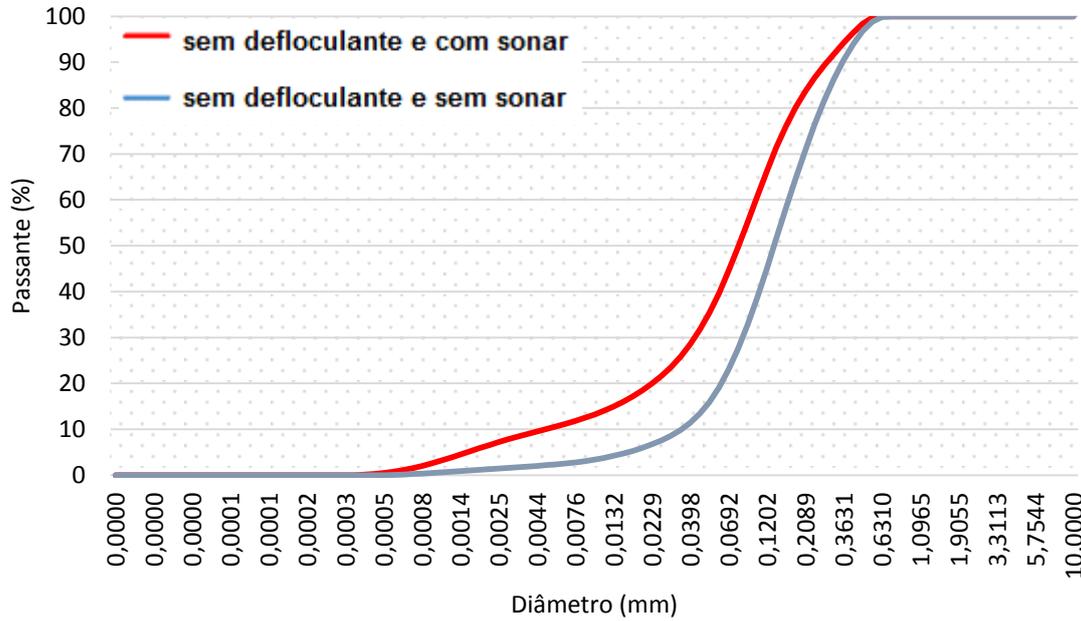
O granulômetro a laser age medindo a intensidade da luz espalhada na medida em que um feixe de laser – emitido pelo sonar – interage com as partículas dispersas da amostra. Esses dados são utilizados para o cálculo da distribuição do tamanho das partículas obtidas a partir do padrão de espalhamento gerado. Segundo Lima *et al.* (2009), o programa do granulômetro determina a quantidade correta da concentração pela medição da quantidade de luz do laser que foi perdida ao passar pela amostra. Tal efeito é conhecido como “obscurecimento”, e é dado em porcentagem. A faixa de obscurecimento aceitável para o ensaio deve estar contida no intervalo de 10 a 30%. A amostra é ser acrescentada ao sistema até que se enquadre nesse intervalo. Nos ensaios realizados, 1,0 g de amostra foi o suficiente para atingir essa faixa. De maneira análoga ao método convencional, o ensaio realizado pelo equipamento gera como resultado uma curva de distribuição da granulometria.

Os dados de cada fração granulométrica encontram-se na Tabela 5.

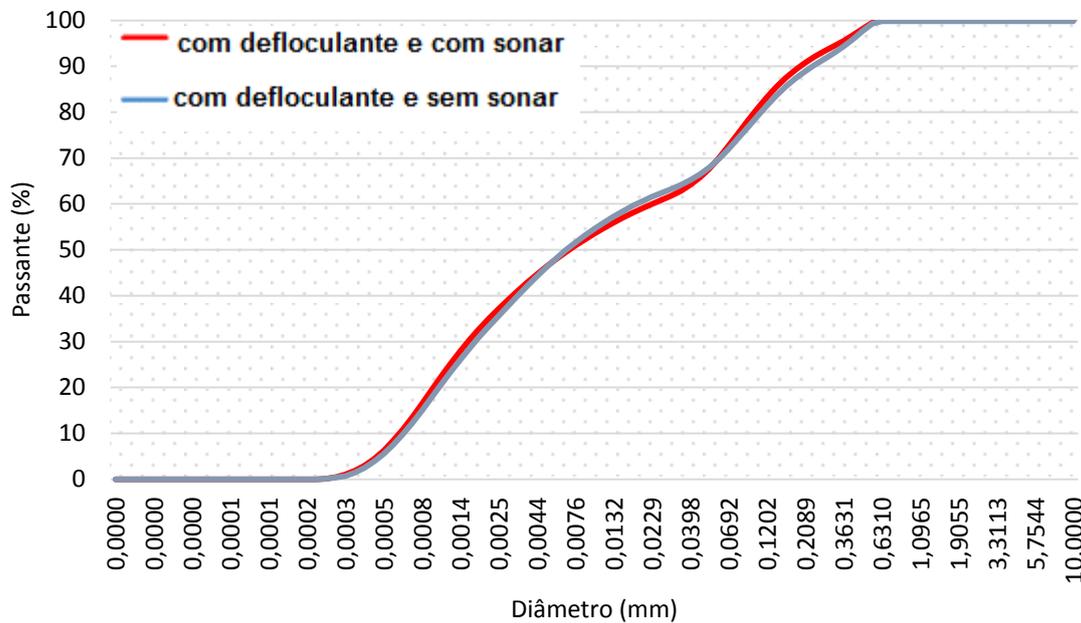
**Tabela 5-** Porcentagem de cada fração granulométrica para as curvas de distribuição dos ensaios.

Fração	Sem defloculante		Com defloculante	
	% com sonar	% sem sonar	% com sonar	% sem sonar
Argila	6,57	1,32	35,06	33,38
Silte	28,83	14,63	32,64	34,60
Areia fina	48,21	54,82	23,10	20,96
Areia média	16,05	28,03	8,70	10,30
Areia grossa	0,34	1,17	0,49	0,58
Pedregulho	0,00	0,00	0,00	0,00

As Figuras 17 e 18 representam as curvas granulométricas geradas para cada ensaio.



**Figura 17-** Ensaio de granulometria a laser sem a adição de defloculante. A curva em vermelho representa a aplicação do sonar por um intervalo de tempo de 10 segundos. A curva em azul representa o ensaio sem aplicação do sonar.



**Figura 18-** Ensaio de granulometria a laser com a adição de defloculante. A curva em vermelho representa a aplicação do sonar por um intervalo de tempo de 10 segundos. A curva em azul representa o ensaio sem aplicação do sonar.

As análises dos resultados demonstraram que o solo sem nenhum tipo de pré-tratamento (defloculante ou sonar) – curva azul da Figura 17 – distancia-se dos valores granulométricos esperados

para uma amostra de granulometria predominantemente fina, como pode ser observado comparando-se as curvas da Figura 17, em que a aplicação do sonar no solo sem defloculante – curva vermelha – aponta um resultado próximo ao da granulometria pelo método convencional (Figura 16). Já a curva da amostra tratada com defloculante e com sonar – curva vermelha da Figura 18 – aponta valores similares ao da amostra tratada apenas com defloculante – curva azul da Figura 18 –, bem como ao da granulometria por peneiramento e sedimentação (Figura 16). Com isso, é possível observar a atuação do sonar num processo mecânico de destruição das agregações, agindo, portanto, de maneira similar ao defloculante.

Visto isso, devido à similaridade entre os resultados apresentados pelos métodos convencional e do granulômetro a laser, a classificação do solo permaneceu inalterada – argila siltosa com pedregulhos de cor marrom avermelhada.

Contudo, como o teor de umidade e a análise granulométrica por si só não indicam o estado das argilas, faz-se necessária a caracterização do solo em relação aos teores de umidade correspondentes a comportamentos semelhantes; esses teores são os limites de consistência (Pinto, 2006), os quais mostram-se muito úteis para a identificação do solo e sua classificação. Dessa forma, com o seu conhecimento pode-se prever muito sobre o comportamento do solo, sob o ponto de vista da engenharia. Tais resultados são apresentados em seguida.

#### 4.2.2 Limites de Consistência

O ensaio de limites de consistência gera um resultado segundo o gráfico de “número de golpes *versus* teor de umidade”, como representado na Figura 19.

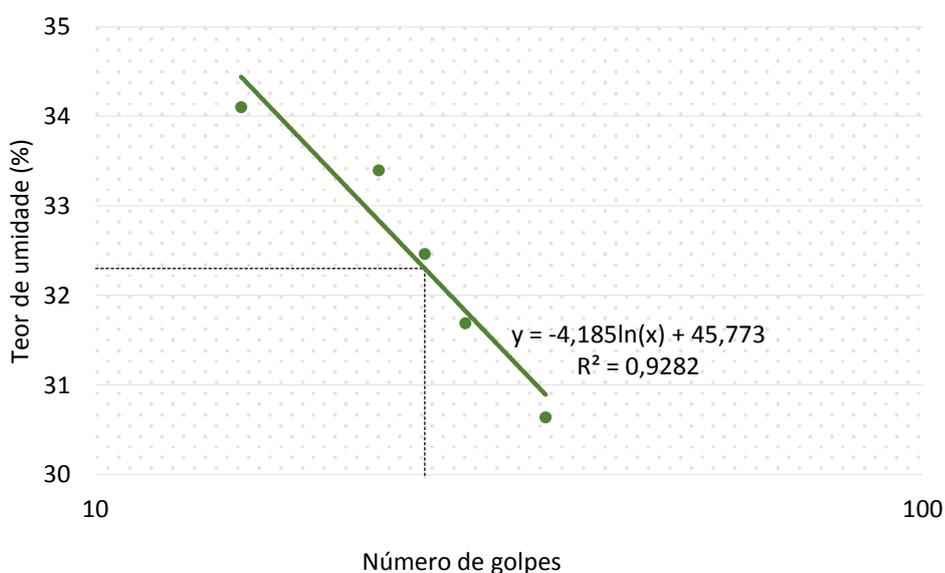


Figura 19- Gráfico gerado pelo ensaio de limites de consistência.

A Tabela 6 fornece o valor, em porcentagem, do limite de liquidez (LL) e do limite de plasticidade (LP).

**Tabela 6-** Tabela gerada pelo ensaio de limites de consistência.

LL (%)	38,5
LP (%)	28,0
LL – LP = IP(%)	10,5

O índice de plasticidade (IP) determina o caráter de plasticidade do solo e é calculado pela equação (1):

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

A classificação do solo segundo Jenkins encontra-se na Tabela 7.

**Tabela 7-** Classificação dos solos pelo caráter de plasticidade segundo Jenkins.

Fracamente plásticos	$1 < IP \leq 7$
Medianamente plásticos	$7 < IP \leq 15$
Altamente plásticos	$IP > 15$

Nesse caso, o solo foi classificado como medianamente plástico, pois, como pode ser observado na Tabela 6, seu IP é igual a 10,5.

Para indicar a posição relativa da umidade em relação aos limites de mudança de estado, Terzaghi propôs o índice de consistência (IC), cuja classificação é didática no sentido de realçar a dependência da resistência ao teor de umidade e, conseqüentemente, ao adensamento que a argila sofre pela sobrecarga que ela suporta (Pinto, 2006). O IC se dá pela equação (2) – em que w representa o teor de umidade:

$$IC = \frac{LL-w}{LL-LP} \quad (2)$$

Foi fornecida, então, uma classificação estimada segundo a Tabela 8.

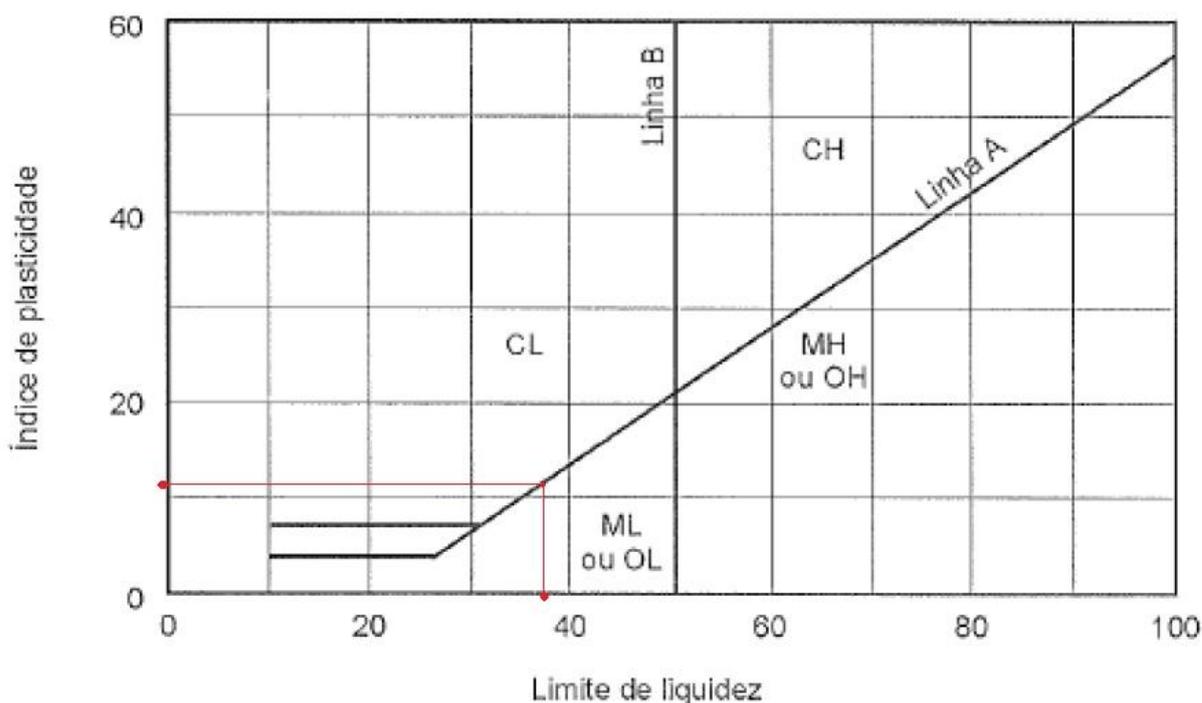
**Tabela 8-** Estimativa da consistência pelo índice de consistência. (retirado de Pinto, 2006)

Consistência	IC
Mole	< 0,5
Média	0,5 a 0,75
Rija	0,75 a 1
Dura	> 1

Utilizados os dados fornecidos nas Tabelas 7 e 8 e na Figura 19, pela expressão, obteve-se um IC igual a 1,40. O solo foi, então, classificado segundo sua consistência como duro.

De acordo com Pinto (2006), o Sistema Unificado classifica os solos siltsos (M), argilosos (C) e orgânicos (O), secundariamente, em função de sua alta compressibilidade (H) ou baixa compressibilidade (L), em razão de o LL ser superior ou inferior a 50, respectivamente, como é mostrado na Carta de Plasticidade, representada na Figura 20. Sabe-se, ainda, que as argilas são tanto mais compressíveis quanto maior for o IP. Desse modo, no presente estudo o solo foi classificado como argila siltosa de baixa compressibilidade, ou seja, apresenta baixa deformação volumétrica quando lhe são aplicadas cargas externas.

Observa-se que sua classificação granulométrica segundo a Carta de Plasticidade – argila siltosa – coincidiu com o resultado fornecido pela curva de distribuição gerada pelo ensaio de granulometria (Figura 16), bem como com a condição de compressibilidade baixa em conformidade com o baixo valor do IP.



**Figura 20-** Carta de Plasticidade. Em vermelho estão representados os pontos em que se inserem o solo do presente estudo. C: solo argiloso; M: solo siltoso; O: solo orgânico; H: alta compressibilidade; L: baixa compressibilidade. (modificado de Pinto, 2006)

Quando se quer avaliar o potencial da fração argila em conferir plasticidade e coesão ao solo, deve-se calcular o índice de atividade (Ia) de um solo argiloso, o qual é definido pela equação (3):

$$Ia = \frac{IP}{\text{fração argila (menor que 0,002 mm)}} \quad (3)$$

Neste caso, conhecido o valor de IP e feita a análise da curva de distribuição granulométrica da Figura 16, afirma-se que o valor da fração argila foi de 38,8% e o do Ia de 0,27. Vale destacar que, segundo Pinto (2002), um  $I_a < 0,75$  denota um material inativo. Segundo Sória (1986), a baixa atividade é típica dos solos lateríticos.

As características geotécnicas de interesse foram resumidas na Tabela 9. Os resultados mostram que, de maneira geral, trata-se de um material no qual os valores obtidos nos ensaios se mantiveram dentro de uma faixa esperada para o tipo de solo em estudo – solo laterítico.

**Tabela 9-** Resumo das características geotécnicas do solo.

Teor de umidade – w (%)	20,4
Limite de plasticidade – LP	28,0
Limite de liquidez – LL (%)	38,5
Índice de plasticidade – IP (%)	10,5
Índice de atividade – Ia	0,27
Índice de consistência –IC	1,40
Massa específica dos grãos – $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,899

Depois de realizada a caracterização completa do solo é possível prever seu comportamento quando usado em base estabilizada na pavimentação de rodovias. Com isso, torna-se executável a aplicação do reforço, por meio de ensaios predeterminados, para a análise qualitativa da sua influência no solo. Tais ensaios são descritos a seguir.

### **4.3 APLICAÇÃO QUALITATIVA DOS ENSAIOS SOB A INFLUÊNCIA DAS FIBRAS**

Os ensaios adotados para a obtenção do objetivo do trabalho, que consiste na comparação entre o comportamento mecânico do solo não reforçado e do reforçado com base na influência exercida pelas fibras de garrafas PET, foram o de compactação, o de ISC e o de cisalhamento direto.

### **4.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS SOB A INFLUÊNCIA DAS FIBRAS**

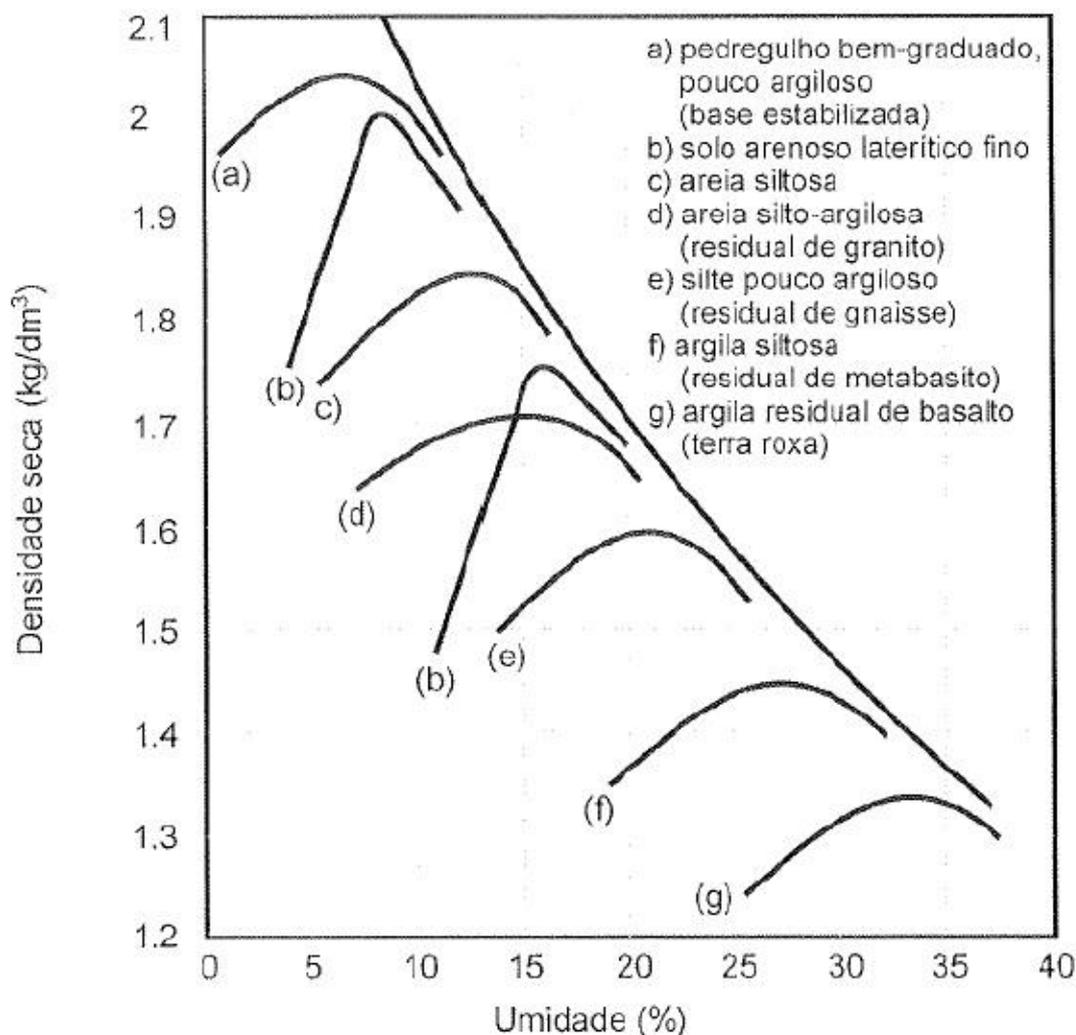
#### **4.4.1 Compactação**

A compactação consiste na densificação do solo por meio de equipamento mecânico, tendo em vista dois aspectos: aumentar o contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo. Nela, as quantidades de partículas e de água permanecem constantes e o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios. A partir de certo teor de umidade, a compactação não

consegue mais expulsar o ar dos vazios, pois o grau de compactação já é elevado e o ar está ocluso. Há, portanto, para a energia aplicada, um teor de umidade que conduz a uma massa específica seca máxima, denominado umidade ótima. A curva de compactação consiste na representação da massa específica seca em função da umidade, obtida a partir de ensaios de compactação.

No presente estudo, esse ensaio foi realizado com e sem a aplicação do reforço, sendo necessários cinco pontos para cada, compactados nas seguintes faixas de umidade: os dois primeiros no ramo seco, o terceiro na umidade ótima e os dois últimos no ramo úmido.

Salienta-se que os solos lateríticos apresentam o ramo ascendente da curva – ramo seco – nitidamente mais íngreme que os outros solos, como pode ser observado na Figura 21 e confirmado na Figura 22. Tal peculiaridade, inclusive, é empregada na sua identificação (Pinto, 2006).



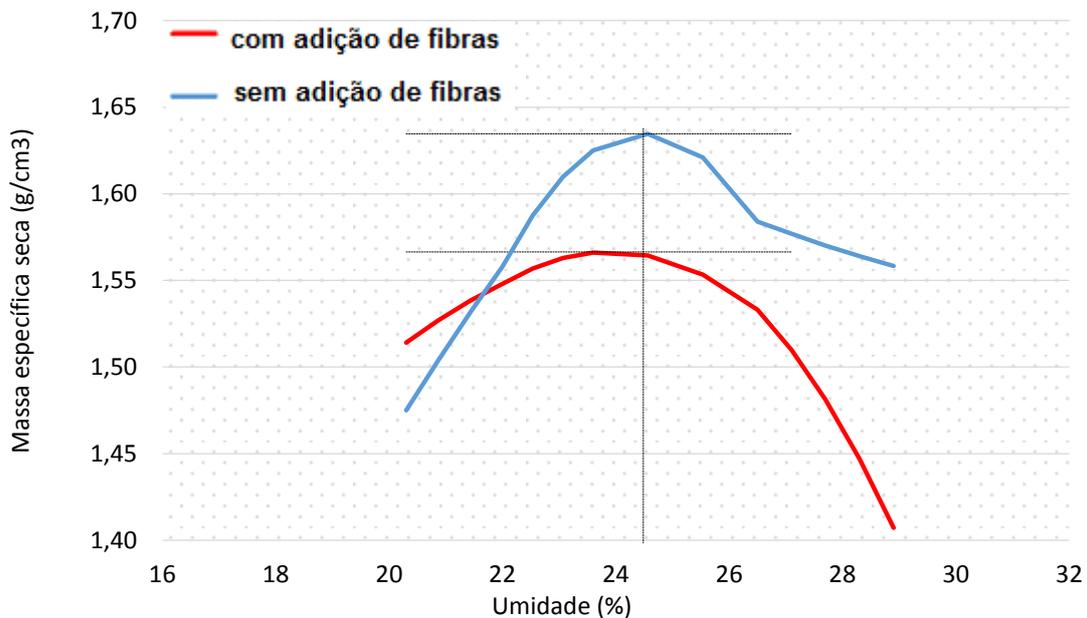
**Figura 21-** Curvas de compactação de diversos solos brasileiros. (retirado de Pinto, 2006)

Na Tabela 10 são representadas as umidades e as massas específicas secas máximas para o solo sem e com a aplicação das fibras.

**Tabela 10-** Parâmetros do ensaio de compactação para o solo.

	Sem fibras	Com fibras
Umidade ótima – $w_{ot}$ (%)	24,5	23,9
Massa específica seca máxima – $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,635	1,567

Nota-se que após a adição das fibras tanto a umidade ótima quanto a massa específica seca máxima diminuíram. Esse fato pode ser explicado pela influência exercida por elas, pois, ao serem homogeneizadas no material, ocupam os vazios que seriam preenchidos pelos grãos de solo na compactação. Por serem mais leves que as partículas do solo, a massa específica seca máxima, que sofre influência do peso do solo + água + fibras, diminui; o que ocorre de maneira análoga com a umidade ótima. A representação gráfica do resultado encontra-se na Figura 22.



**Figura 22-** Em azul: Curva de compactação para o solo sem a adição das fibras; em vermelho: Curva de compactação para o solo com a adição das fibras.

A partir das umidades determinadas pelo ensaio de compactação nos cinco pontos compactados, realiza-se o ensaio de Índice de Suporte Califórnia, no qual cada corpo de prova é moldado em uma das umidades.

#### 4.4.2 Índice de Suporte Califórnia

No ensaio de ISC, cada corpo de prova imerso é moldado em uma umidade específica determinada pelo ensaio de compactação. Cada umidade define um ponto, e são considerados dois pontos no ramo seco (pontos 1 e 2), um no ramo ótimo – ou próximo da umidade ótima – (ponto 3) e dois no ramo úmido (pontos 4 e 5), como pode ser observado na Tabela 11.

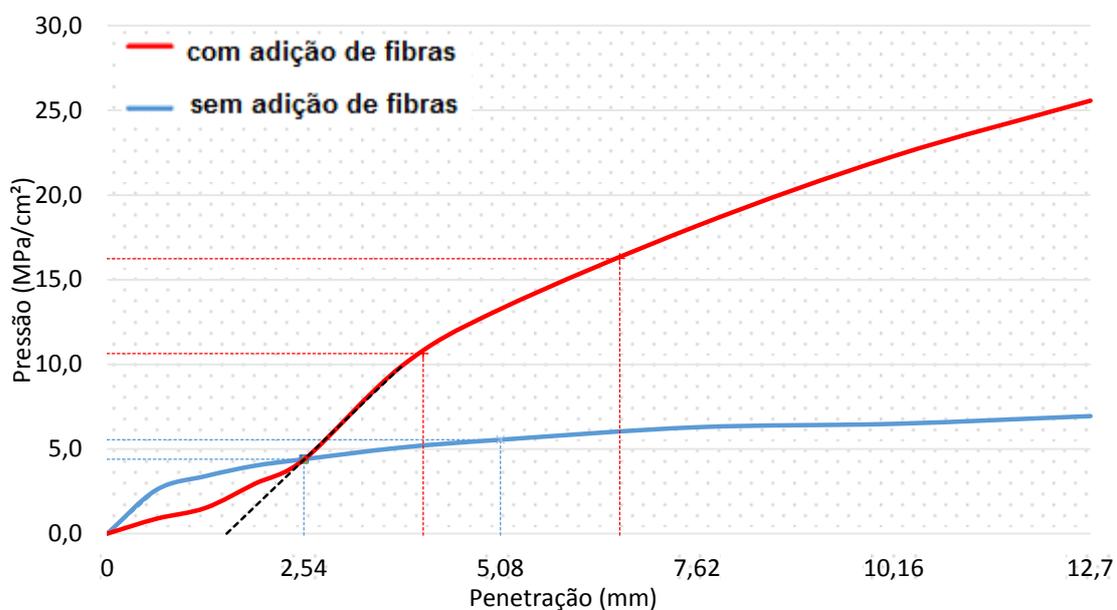
**Tabela 11-** Umidades de compactação utilizadas no ensaio de ISC.

Pontos	Umidade (%)
1	20,3
2	22,0
3	23,6
4	26,5
5	28,3

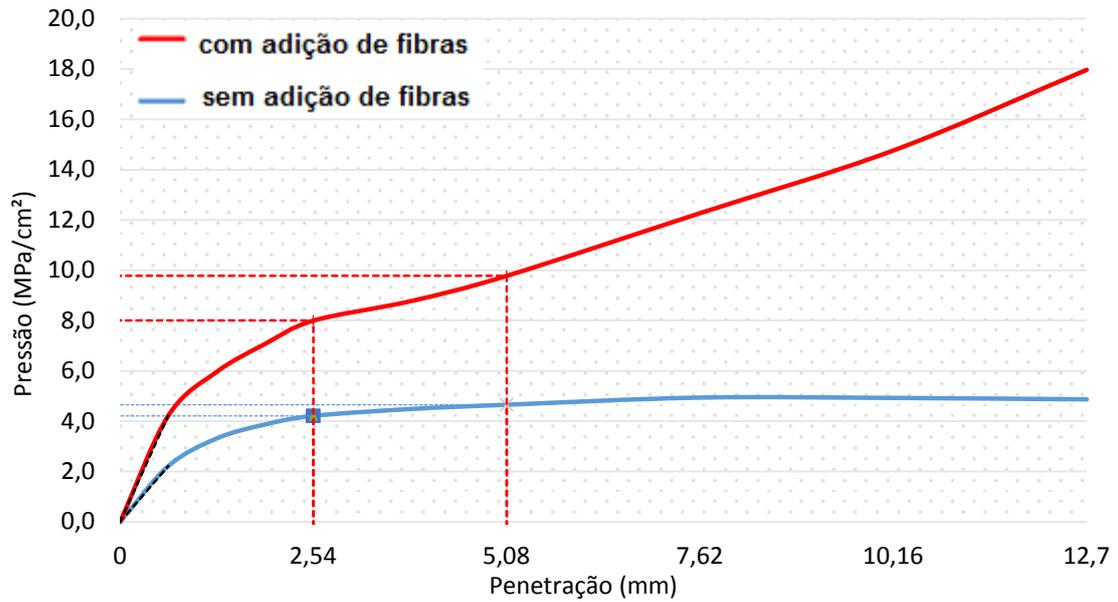
Salienta-se que a resistência à penetração considerada é uma medida de resistência do material, fundamental para calcular sua estabilidade no pavimento. O ensaio de ISC é hoje um dos mais utilizados no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Por isso, é um ensaio adotado por uma grande parcela dos órgãos rodoviários no Brasil e no mundo.

O ensaio de penetração, feito após quatro dias de imersão do corpo de prova, simula a pior condição possível do subleito. O resultado foi dado pelo gráfico de correção do ISC, plotado na curva “pressão *versus* penetração”. Quanto maior a pressão exercida para se penetrar no corpo de prova, maior é a resistência do material.

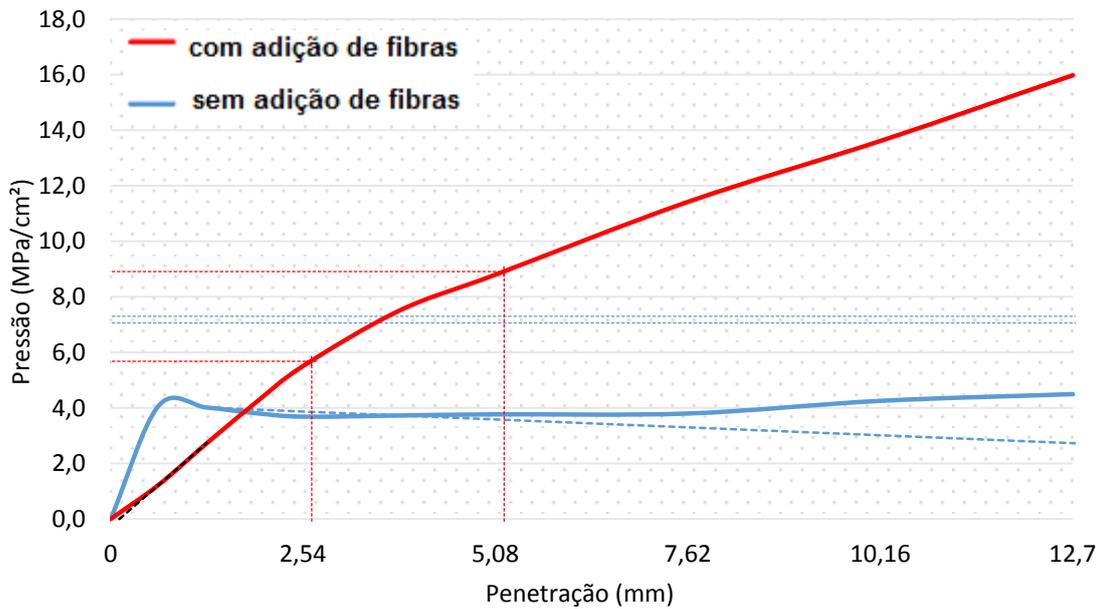
As Figuras 23 a 27 representam as curvas para os pontos descritos na Tabela 11. Em cada gráfico é feita uma comparação para o comportamento do material sem e com a aplicação das fibras.



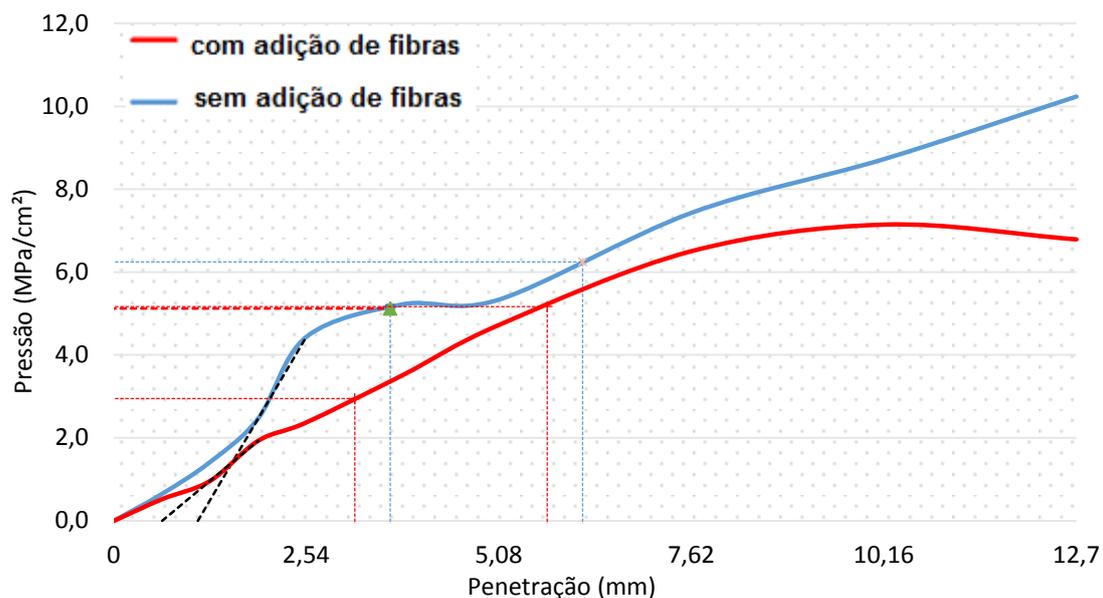
**Figura 23-** Gráficos de correção do ISC para o ponto 1, de umidade 20,3%.



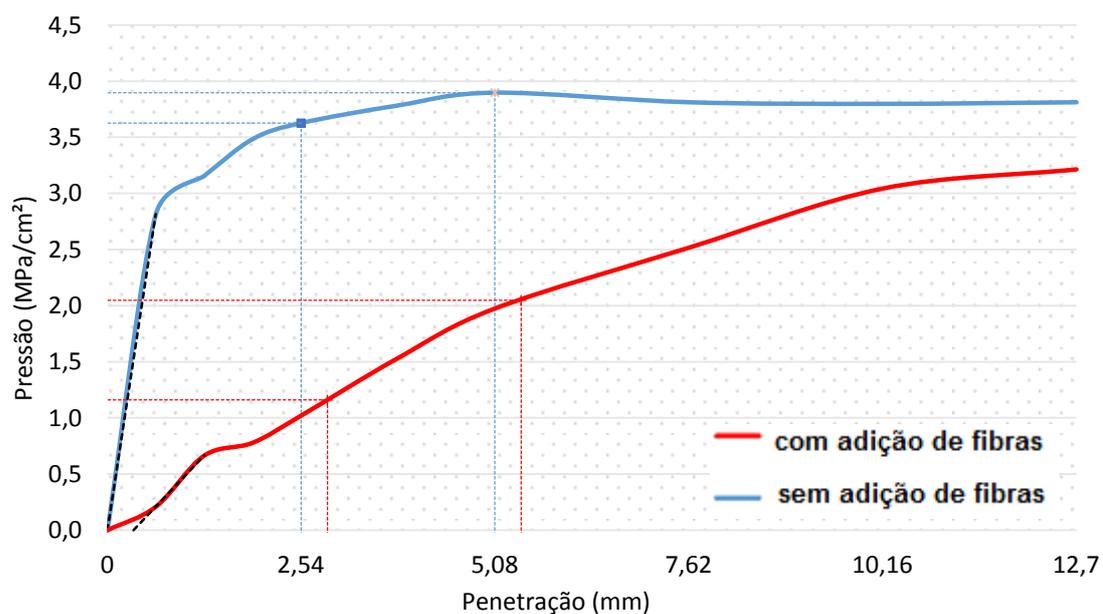
**Figura 24-** Gráficos de correção do ISC para o ponto 2, de umidade 22,0%.



**Figura 25-** Gráficos de correção do ISC para o ponto 3, de umidade 23,6.



**Figura 26-** Gráficos de correção do ISC para o ponto 4, de umidade 26,5%.



**Figura 27-** Gráficos de correção do ISC para o ponto 5, de umidade 28,3.

Analisando-se os gráficos, de maneira geral, observa-se que a pressão exercida durante a penetração foi maior para o solo com o reforço, com exceção dos pontos situados no ramo úmido. Nesse caso as fibras apresentaram efeito contrário, provavelmente justificado pela lubrificação dos grãos e estrutura dispersa. Desse modo, afirma-se que as fibras representaram um ganho de resistência para o solo quando compactado no ramo seco e na umidade ótima.

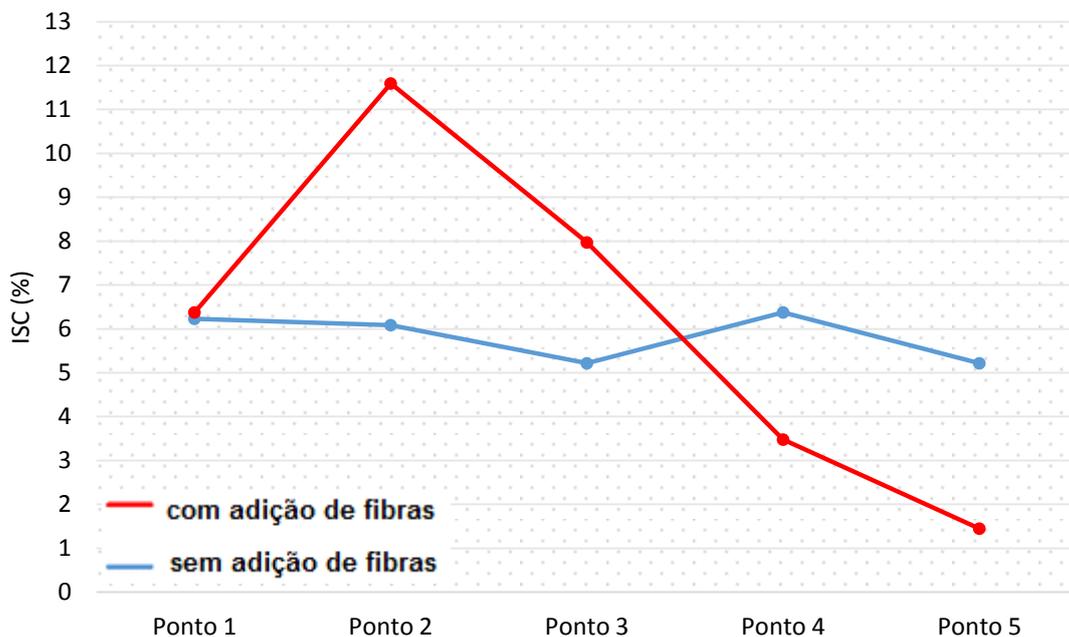
Comparando-se os gráficos de ISC em cada ponto compactado, confirma-se o aumento do índice para o solo reforçado, como pode ser observado nas Figuras 28 e 29. O ISC é obtido pela equação (4):

$$ISC\% = 100 \times \frac{\text{Pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{Pressão padrão}} \quad (4)$$

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados dos índices obtidos por meio da equação acima e calculados para os dois valores de pressão padrão – 6,90 MPa e 10,35 MPa. As pressões padrão têm valores correspondentes às penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm, respectivamente, e encontram-se representadas, para os pontos de 1 a 5, nas Figuras 23 a 27. As representações gráficas das referidas tabelas encontram-se nas Figuras 28 e 29.

**Tabela 12-** Valor do ISC, em porcentagem, dos pontos compactados, para uma pressão padrão de 6,90 MPa.

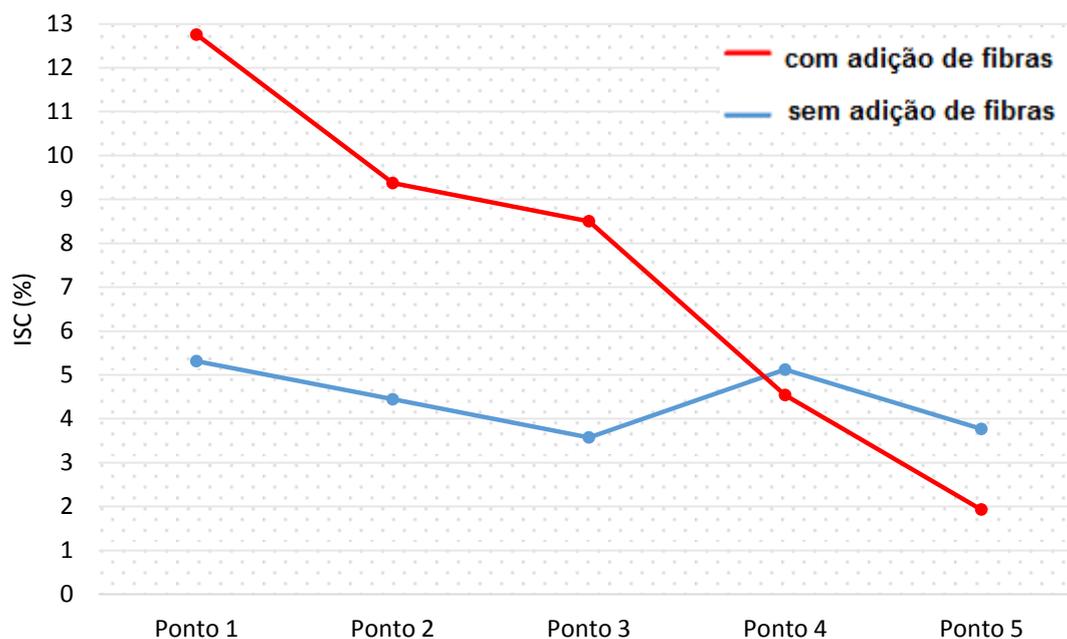
	Ponto 1 (%)	Ponto 2 (%)	Ponto 3 (%)	Ponto 4 (%)	Ponto 5 (%)
Sem fibras	6,23	6,09	5,22	6,38	5,22
Com fibras	6,38	11,59	7,97	3,48	1,45



**Figura 28-** Representação gráfica do ISC, em porcentagem, para cada ponto compactado – pressão padrão de 6,90 MPa. Em azul: solo sem reforço; em vermelho: solo reforçado.

**Tabela 13-** Valor do ISC, em porcentagem, dos pontos compactados, para uma pressão padrão de 10,35 MPa.

	Ponto 1 (%)	Ponto 2 (%)	Ponto 3 (%)	Ponto 4 (%)	Ponto 5 (%)
Sem fibras	5,31	4,44	3,57	5,12	3,77
Com fibras	12,75	9,37	8,50	4,54	1,93



**Figura 29-** Representação gráfica do ISC, em porcentagem, para cada ponto compactado – pressão padrão de 10,35 MPa. Em azul: solo sem reforço; em vermelho: solo reforçado.

Corroborar-se, observando os dados referentes ao ISC, a análise feita a partir dos gráficos de “penetração *versus* pressão” que apontaram o ganho de resistência para o solo, exceto quando compactado no ramo úmido.

Foi calculada, também por meio desse ensaio, a expansão do solo quando imerso por quatro dias. De maneira similar à compactação, ao preencherem os vazios que seriam ocupados pelas partículas do solo, as fibras impedem que durante a imersão e conseqüente saturação do material esses vazios sejam oclusos pela água, já que são preenchidos pelas fibras. Com isso, o solo satura menos, tendo, portanto, uma menor expansão. De maneira análoga ao ISC, têm-se uma exceção nos pontos situados no ramo úmido. Esse fato pode ser observado na Tabela 14.

**Tabela 14-** Valor da expansão, em porcentagem, dos pontos compactados.

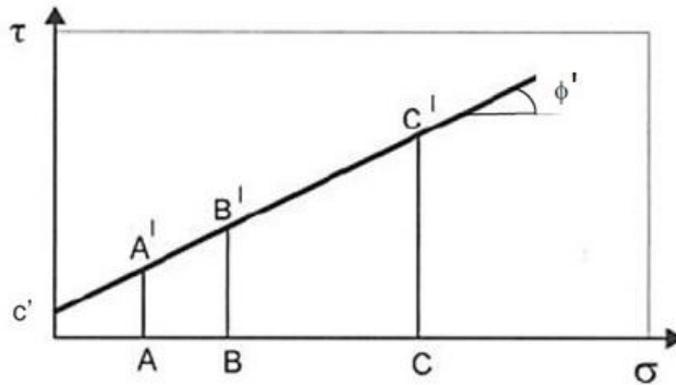
	Ponto 1 (%)	Ponto 2 (%)	Ponto 3 (%)	Ponto 4 (%)	Ponto 5 (%)
Sem fibras	0,43	0,50	0,13	0,13	0,11
Com fibras	0,11	0,16	0,18	0,09	-0,02

Em complementação aos estudos, foram realizados ensaios de cisalhamento direto para avaliar a influência do reforço na resistência do solo, como explicitado a seguir.

#### 4.4.3 Cisalhamento direto

Segundo Pinto (2006), o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento, e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb, o

qual pode ser expresso como: *não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão  $(c + f) \times \sigma$ , sendo  $c$  e  $f$  constantes do material e  $\sigma$  a tensão normal existente no plano de cisalhamento*. Os parâmetros  $c$  e  $f$  são denominados, respectivamente, coesão ( $c'$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ), e encontram-se expostos na Figura 30.



**Figura 30-** Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.  $\sigma$ : tensão normal existente no plano de cisalhamento;  $\tau$ : tensão cisalhante;  $\phi'$ : ângulo de atrito interno. (modificado de Pinto, 2006)

As amostras foram cisalhadas com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. O cisalhamento foi realizado para o solo com e sem reforço. Neste, as fibras foram dispostas aleatoriamente, sem uma orientação predeterminada. O volume do corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento foi de 200 cm<sup>3</sup>, e seu procedimento de moldagem, em ambos os casos, foi realizado a partir da extração em um corpo de prova compactado na umidade ótima em um cilindro de compactação de volume 2184,61 cm<sup>3</sup>. A Figura 31 representa um corpo de prova cisalhado com a aplicação do reforço e sob uma tensão de 100 kPa



**Figura 31-** Corpo de prova, moldado com solo reforçado, cisalhado com uma tensão aplicada de 100 kPa.

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto foram apresentados em gráficos de “tensão cisalhante *versus* deformação horizontal” (Figuras 32 e 33), “tensão cisalhante *versus* tensão normal” (Figura 34) e “deformação vertical *versus* deformação horizontal” (Figura 35 e 36).

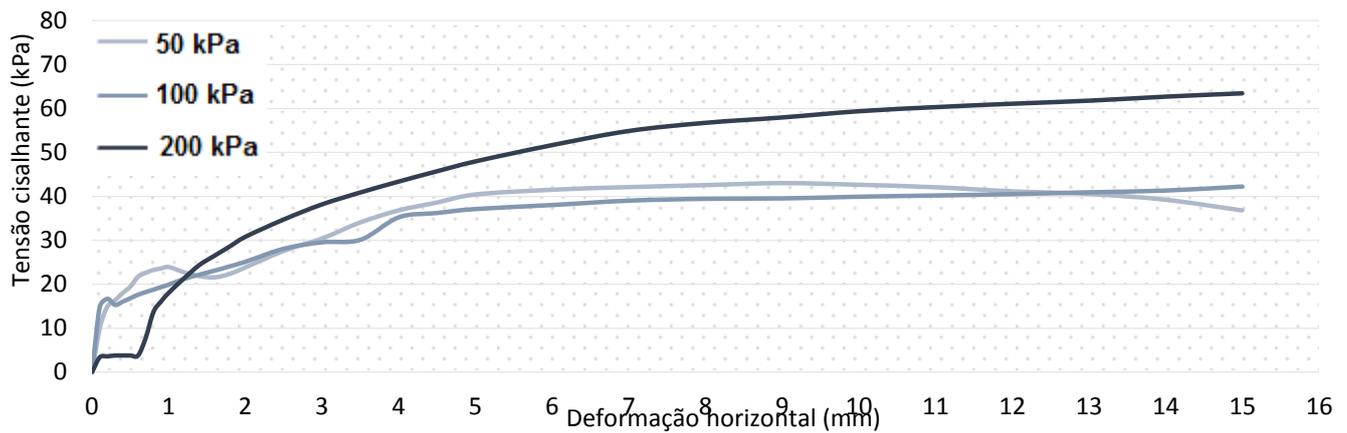


Figura 32- Gráfico de “tensão cisalhante versus deformação horizontal” para o solo sem reforço.

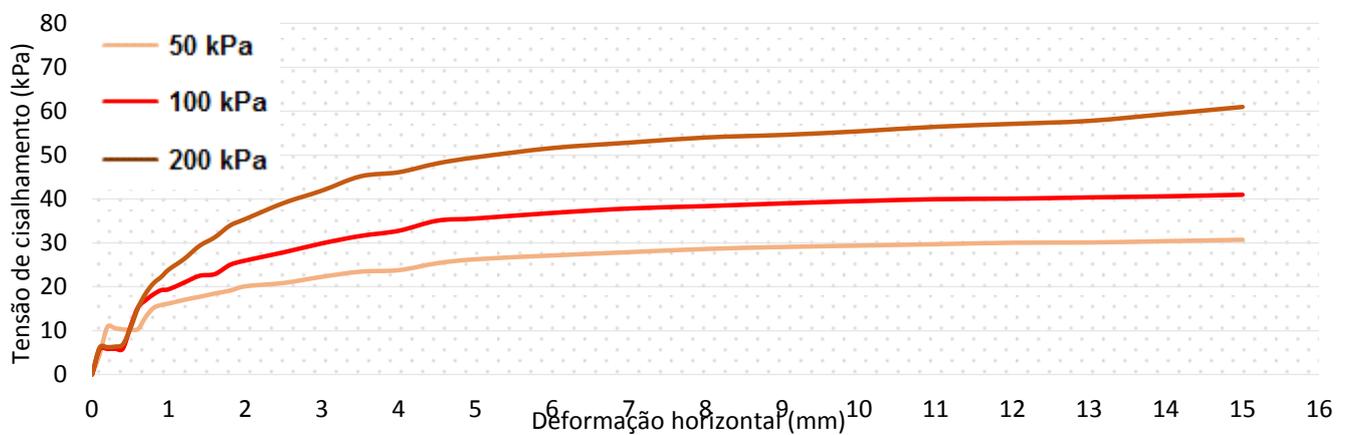


Figura 33- Gráfico de “tensão cisalhante versus deformação horizontal” para o solo reforçado.

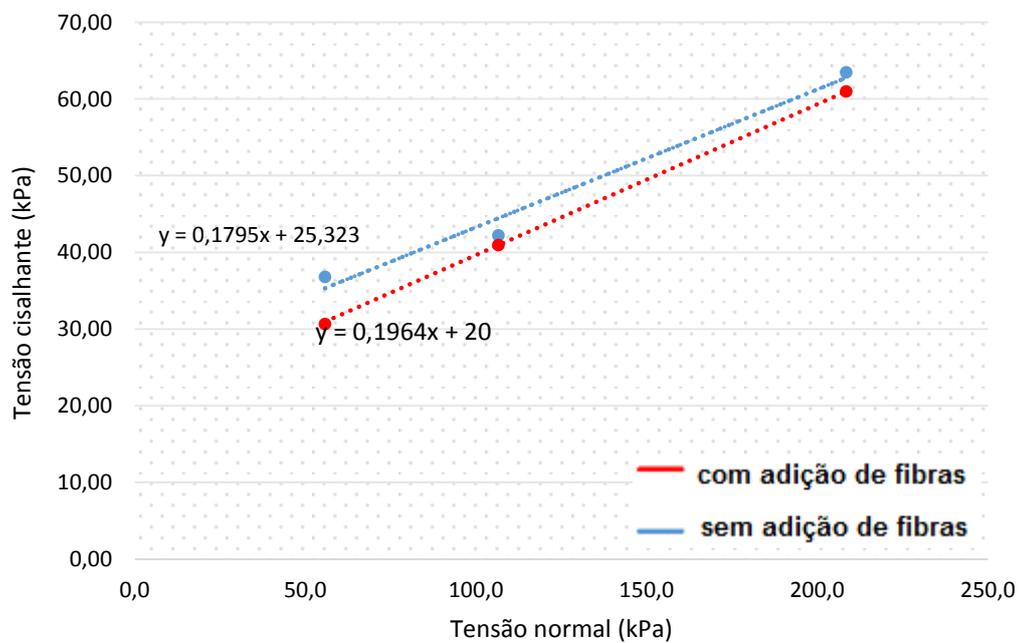
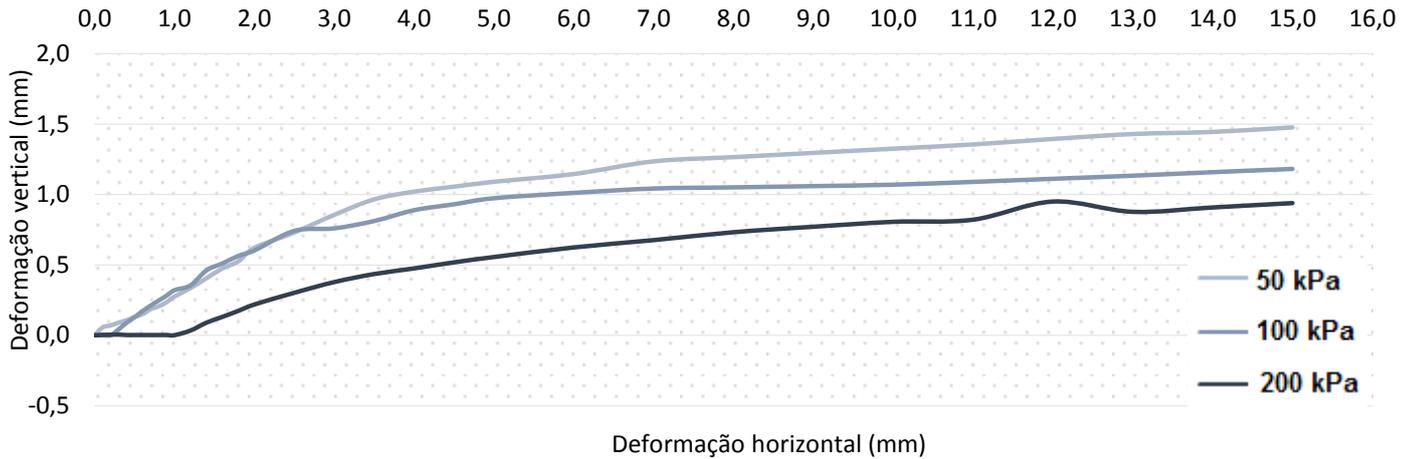
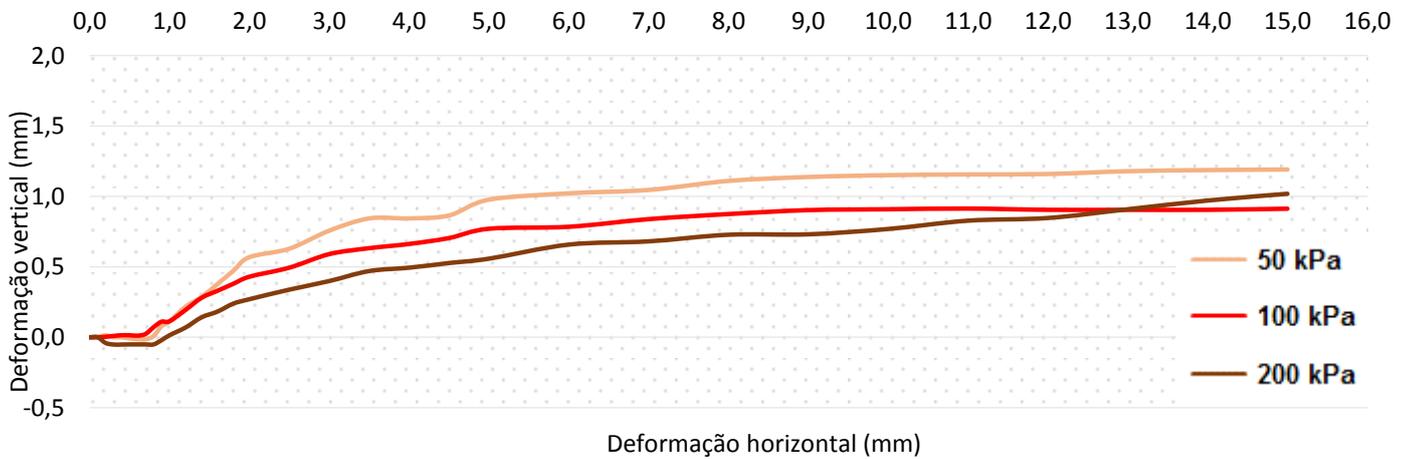


Figura 34- Gráfico de "tensão cisalhante versus tensão normal". Em azul: solo sem reforço; em vermelho: solo reforçado.



**Figura 35-** Gráficos de “deformação vertical *versus* deformação horizontal” para o solo sem reforço.



**Figura 36-** Gráficos de “deformação vertical *versus* deformação horizontal” para o solo reforçado.

Pela equação da reta no gráfico da Figura 34, foi possível determinar o valor numérico da coesão e do ângulo de atrito. Esses valores se encontram representados na Tabela 15.

**Tabela 15-** Valores numéricos da coesão e do ângulo de atrito para o solo com e sem reforço da fibra.

	Sem fibras	Com fibras
$c'$ (kPa)	25,32	20,00
$\phi'$ (°)	10,17	11,11

Analisando-se graficamente a tensão cisalhante gerada em função da tensão normal aplicada (50, 100 e 200 kPa), foi possível notar um razoável aumento na tensão cisalhante quando sob influência das fibras (Figuras 32 e 33). Entretanto, feita uma análise criteriosa dos resultados obtidos, nota-se que a resistência sofreu uma brusca redução na coesão ( $c'$ ) (Tabela 15).

Em relação aos gráficos de “tensão cisalhante *versus* deformação horizontal”, observa-se, de maneira geral, o aumento da tensão cisalhante para o solo reforçado, sugerindo-se uma influência positiva das fibras. Entretanto, como comparado em ambos os gráficos de “deformação vertical *versus* deformação horizontal”, a variação da deformação vertical entre o solo sem reforço e o reforçado foi

mínima. A baixa resistência das fibras ao cisalhamento deve-se ao fato da sua disposição aleatória, que, por estarem paralelas à direção do cisalhamento em alguns pontos, agiram de maneira contrária à esperada, diminuindo o atrito entre os grãos e facilitando o deslocamento do corpo de prova durante o rompimento.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

---

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo avaliar a influência da inclusão de fibras de garrafas PET, distribuídas aleatoriamente, no comportamento mecânico de um solo laterítico, visando sua possível aplicação na construção de pavimentos. Ressalta-se que o presente estudo tem caráter experimental simplificado e merece ser aprofundado.

O solo em questão foi caracterizado como sendo uma argila siltosa com pedregulhos de cor marrom avermelhada, de baixa compressibilidade e de baixa atividade, sendo esta última uma característica típica de solos lateríticos. Foi classificado como medianamente plástico e duro, segundo seu índice de consistência.

Segundo o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006), caso o limite de liquidez seja maior que 25% e/ou o índice de plasticidade seja maior que 6%, o solo poderá ser usado em base estabilizada – camada sobre a qual se constrói o revestimento. Como a caracterização do solo gerou um limite de liquidez de 38,5% e um índice de plasticidade de 10,5%, conclui-se que o estudo apontou resultados que se enquadram dentro das exigências para o material de reforço.

Os ensaios de compactação mostraram que a adição das fibras causou uma diminuição da umidade ótima – de 24,5 para 23,9% – e da massa específica seca máxima – de 1,635 para 1,567 g/cm<sup>3</sup>. Esse fato pode ser explicado pela influência exercida por elas. Ao ocuparem os vazios que seriam preenchidos pelos grãos de solo na compactação, as fibras tornaram a relação peso do solo + água + fibras menos densa, diminuindo a massa específica seca máxima, e, de maneira análoga, a umidade ótima.

Observou-se, também, a diminuição da expansão do solo no ensaio de ISC, pois, as fibras, ao preencherem os vazios que seriam ocupados pelas partículas do solo, impediram que durante a imersão e conseqüente saturação do material esses vazios fossem oclusos pela água, já que foram preenchidos pelas fibras. Com isso, o solo saturou menos, apresentando, portanto, uma menor expansão.

Em relação à pressão exercida durante a penetração, esta foi maior para o solo reforçado, com exceção dos pontos no ramo úmido. O fato das fibras apresentarem efeito contrário nesses pontos pode ser justificado pela lubrificação dos grãos e estrutura dispersa. Em todo modo, afirma-se que as fibras representaram uma resistência à penetração, aumentando sua estabilidade.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado para complementação dos estudos. Os resultados apontaram uma diminuição significativa da coesão para o solo com a inserção do reforço, entretanto,

apresentaram um aumento no ângulo de atrito interno, o qual indica um aumento na resistência para o solo reforçado. Entretanto, o aumento na resistência foi menor que o esperado devido à disposição aleatória das fibras, que, por estarem paralelas à direção do cisalhamento em alguns pontos, agiram diminuindo o atrito entre os grãos e facilitando o deslocamento do corpo de prova durante o rompimento.

Por fim, com base nos resultados apresentados, conclui-se que o emprego das fibras seria indicado para o reforço de solos lateríticos argilo siltosos utilizados na pavimentação de estradas, pois, pelo ensaio de ISC, foi observado o aumento da resistência sob sua influência. Entretanto, estudos em que se aprofunde a análise da influência da quali-quantitativa das fibras devem ser realizados para que se estabeleça uma conclusão definitiva. Com isso, sugere-se o aprofundamento de estudos em que a avaliação do comportamento das fibras seja feita com base na inserção de diferentes proporções do reforço, bem como com fibras naturais, e até mesmo a construção de um pequeno trecho experimental e a utilização de ensaios em campo.

## Referências

---

- AGUIAR, L. A.; AQUINO, F. R.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2009). *Melhoria da Resistência a Tração de Solos Finos por Meio da Incorporação de Fios de Cabelo para Uso em Pavimentação*. Anais Geocentro 2009. p. 112-116.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, D3080, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984). NBR 7181: Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1986). NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1987). NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1988). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995). NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro.
- ABEL, L. S. (2011). *Mapeamento Geotécnico e Caracterização dos Materiais Naturais de Construção da Província de Maputo, Moçambique*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD -068/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 280 p.
- BENJAMIM, C. V. S. (2006). *Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil*. Tese de Doutorado. EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos, 294p.
- BENJAMIM, C. V. S.; BUENO, B. S. e ZORNBERG, J. G. (2007). *Comportamento da Fundação de um Protótipo de Estrutura de Contenção em Solo Reforçado com Geotêxtil Não-tecido*. In: VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO'2007. 7 p.
- BERNUCCI, L. L. B. (1995). *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos laterítico para rodovias de baixo volume de tráfego*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- BERTHIER, H. C. (2003). *Garbage, work and society. Resources, Conservation and Recycling*. 39: 193-210, 2003.
- DAS, B. M. (2011). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. Tradução EZ2Translate; revisão técnica Leonardo R. Miranda. São Paulo: Cengage Learning.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Pavimentação. 3 ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).
- FLETCHER, C. S. e HUMPHRIES, W. K. (1991). California Bearing Ratio Improvement of Remolded Soils by the Addition of Polypropylene Fiber Reinforcement. TBR. *Transportation Research Record*, nº 1295.
- FORLIN, F. S. e FARIA, J. A. F. (2002). Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 12, nº 1, p. 1-10, 2002.
- FRANZOI, S. (1990). *Algumas particularidades resilientes de solos lateríticos e saprolíticos*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- GÓNGORA, I. A. M. G (2015). *Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: Influência de Propriedades Físicas e Mecânicas do Reforço*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-105/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p.

Oliveira, T. G., 2016. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados.

- GRAY, D. H. e OHASHI, H. (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 109, nº 3, p. 335-353.
- JORGE, J. A. (1986) Física e manejo dos solos tropicais. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 328p.
- LIMA, M. C.; SOUZA, N. M.; CARVALHO, J. C. & SANTOS, P. M. N. (2009). *Obtenção da Curva Granulométrica Utilizando o Granulômetro a Laser*. In: Cobramseg, SP. 1: 457-465.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. (1980). *Caracterização e Classificação Geral de Solos para Pavimentação: Limitações dos Métodos Tradicionais, Apresentação de Uma Nova Sistemática*. 15º Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In.: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, v.1. p. 30-40.
- PIETERS, R. (1991). Changing, garbage disposal patterns of consumers: motivation, ability, and performance. *Journal of Public Policy and Marketing*, v.10, 1991.
- PINTO, C. S. (2002). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos.
- PINTO, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos.
- RESCHETTI, P. R. Jr. (2008). *Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentos*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- SANTOS, E. F. (2006). *Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- SANTOS, E. C. G. (2011). *Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) e Solo Fino*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-069/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 214 p.
- SÓRIA, M. H. A. (1986). *Os Limites de Atteberg, o Argilo Mineral e o Teor de Argila*. VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Porto Alegre, RS, vol. 1, p. 167-171.
- SPECHT, L. P. (2000). *Comportamento de Misturas Solo-Cimento-Fibra Submetidas a Carregamentos Estáticos e Dinâmicos Visando a Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- TROVATTO, A. e PORTELINHA, F. H. M. (2015). *Avaliação do Comportamento de Barreiras Capilares em Interfaces entre Solo Fino e Diferentes Geossintéticos*. In: VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos. 6 p.
- VILLIBOR, D. F. (1981). *Pavimentos Econômicos, Novas Considerações*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO:** Avaliação do Uso de Fibras de Garrafas Pet como Reforço de Solos Compactados

**AUTORA:** Talita Gantus de Oliveira

**ORIENTADOR:** Prof. MSc. Eleonardo Lucas Pereira

**Aprovada em:** 09 de março de 2016

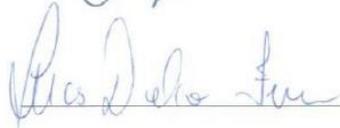
**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Eleonardo Lucas Pereira



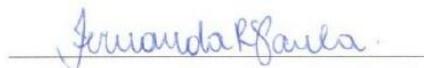
UFOP

Prof. Lucas Deleon Ferreira



UFOP

Fernanda Roberti Gil de Paula



UFOP

Ouro Preto, 09/03/2016