



**Phillipe Mourão Ribeiro**

**Comportamento mecânico de uma Bentonita  
reforçada com borracha de pneu e PET Triturado**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof<sup>a</sup> Raquel Quadros Velloso



**Phillipe Mourão Ribeiro**

**Comportamento mecânico de uma  
Bentonita reforçada com borracha de  
pneu e PET triturado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Michele Dal Toé Casagrande**

Co-orientadora

Universidade de Brasília

**Prof. Vitor Nascimento Aguiar**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

**Prof. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães**

Instituto Militar de Engenharia

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de agosto de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Phillipe Mourão Ribeiro**

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Veiga de Almeida em 2013. Ingressou no Mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em agosto de 2014, desenvolvendo a dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a reforço de solo para pavimentação.

#### Ficha Catalográfica

Ribeiro, Phillipe Mourão

Comportamento mecânico de bentonita reforçada com borracha de pneus e PET triturado / Phillipe Mourão Ribeiro; orientador: Raquel Quadros Velloso. – 2018.

109 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil e ambiental - Teses. 2. Bentonita. 3. Reforço de solos. 4. Borracha de pneu. 5. Misturas de bentonita com borracha. 6. Fibra PET. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

Dedico esse trabalho aos meu pais e familiares que sempre me apoiaram.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), através do fornecimento de bolsa de estudos. Sem esse apoio não seria possível a obtenção do título.

À minha co-orientadora, Michéle, por toda ajuda durante todo o período do Mestrado, sempre me mostrando qual melhor caminho a seguir.

A toda equipe do laboratório de Geotecnia, onde me apoiou na realização dos ensaios, tornando a pesquisa experimental um pouco menos complicada.

Aos meus pais, Diva Tavares Mourão e Geraldo Mariano, e à minha irmã por terem me apoiado incondicionalmente. Sem eles nada disso seria possível. Muito obrigado!

A minha namorada, Priscila Chaves Ribeiro, por me ajudar e incentivar aos estudos.

Aos integrantes do "Casagrande's Research Group", que sempre estiveram presentes, mesmo que pelo WhatsApp, apoiando em tudo o que era preciso e deixando todo o trabalho mais leve.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, em especial à Rita, que sempre com boa vontade nos ajuda a resolver todos os problemas burocráticos.

Aos professores da PUC Rio que sempre estiveram dispostos a tirar as minhas dúvidas e assim ajudando indiretamente.

## Resumo

Ribeiro, Phillipe Mourão; Velloso, Raquel Quadros (Orientadora). **Comportamento mecânico de uma Bentonita reforçada com borracha de pneu e PET triturado.** - Rio de Janeiro, 2018. 109p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As atuais técnicas propostas para a destinação final dos pneus não são 100% eficientes, existindo um grande déficit do material em questão. Um outro material que necessita de uma destinação final é o PET (polietileno tereftalato), que hoje em dia, apesar da grande quantidade reciclada, necessita de mais opções de destinação. O estudo apresentado propõe a utilização da borracha triturada (em forma de fibras e em pó - granulometria inferior a 2mm) em diferentes teores (de 5% e 10%, em relação ao peso seco da bentonita) e do PET triturado (na forma de fibras e em pó), como reforço de uma bentonita, para aumento dos parâmetros de resistência desta. O objetivo da pesquisa consiste em avaliar a possibilidade da utilização da borracha e do PET como melhoramento de bentonita em obras geotécnicas, como por exemplo em camadas impermeabilizantes para aterros sanitários, visto que com a utilização da borracha e do PET em obras geotécnicas seria possível a destinação de um grande volume desses materiais. Para o desenvolvimento do estudo experimental foram realizados ensaios de caracterização física e de caracterização mecânica, como ensaios de cisalhamento direto e adensamento. Com resultados obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto e ensaio de adensamento, pode se perceber que as misturas B90BF10 e B90PETT10 se mostraram mais favoráveis a utilização como barreira impermeabilizando para aterros sanitários, tendo em vista o aumento nas resistências de Pico, pós pico e residual, além do aumento do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) e redução da permeabilidade ( $k$ ).

## Palavras-chave

Bentonita; reforço de solo; borracha de pneu; misturas de bentonita com borracha; fibra PET.

## Abstract

Ribeiro, Phillipe Mourão; Velloso, Raquel Quadros (Advisor). **Mechanical behavior of bentonite reinforced with ground rubber and PET flakes.** Rio de Janeiro, 2018. 109p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The current techniques proposed for the final destination of the tires are not 100% efficient, and there is a great deficit of the material in question. Another material that needs an end destination is the PET (polyethylene terephthalate), which nowadays, despite the large amount recycled, needs more disposal options. the present study proposes the use of crushed rubber (in the form of fibers and powder - granulometry of less than 2 mm) in different contents (5% and 10%, in relation to the dry weight of bentonite) and crushed PET (in the form of fibers and powder), as reinforcement of a bentonite, to increase the resistance parameters of this one. The objective of the research is to evaluate the possibility of using rubber and PET as an improvement of bentonite in geotechnical works, such as waterproofing layers for sanitary landfills, since with the use of rubber and PET in geotechnical works it would be possible to allocate a large volume of these materials. For the development of the experimental study, physical characterization and mechanical characterization tests were performed, such as direct shear tests and densification. With results obtained from the direct shear tests and the densification test, it can be seen that the mixtures B90BF10 and B90PETT10 were more favorable to use as a waterproofing barrier for sanitary landfills, in view of the increase in peak and residual, besides the increase of the coefficient of densification ( $c_v$ ) and reduction of the permeability ( $k$ ).

## Keywords

Bentonite; reinforcement of soil; tire rubber; bentonite mixtures with rubber; PET fiber.

## Sumário

1	Introdução	18
1.1	Relevância e Justificativa da Pesquisa	18
1.2	Objetivos	19
1.3	Organização do trabalho	20
2	Revisão bibliográfica	21
2.1	Bentonita	21
2.1.1	Produção da Bentonita	22
2.1.2	Mineralogia e geologia	22
2.1.3	Caracterização da Bentonita	23
2.1.4	Uso e Funções	23
2.2	Polietileno Tereftalato (PET)	25
2.2.1	Aspectos gerais do PET	25
2.2.2	Matéria Prima e produção do PET	29
2.3	O descarte de resíduos no Brasil	30
2.3.1	Reciclagem de pneus	31
2.3.2	Principais utilizações dos pneus inservíveis	32
2.3.3	Aproveitamento dos Pneus inservíveis	34
2.4	Reciclagem do PET	35
2.5	Estudos anteriores sobre solos reforçados	38
3	Estudo experimental	47
3.1	Materiais utilizados na Pesquisa	47
3.1.1	Bentonita	47
3.1.2	Borracha moída de Pneu	48
3.1.3	Polietileno Tereftalato	49
3.1.3.1	PET Triturado	49
3.1.3.2	Pó de PET	51
3.1.3.3	Fibra de PET	54
3.1.4	Água	55
3.1.5	Misturas - Bentonita x Borracha	55

3.1.6	Misturas - Bentonita x PET	56
3.2	Métodos e procedimentos de ensaio	57
3.2.1	Ensaio de Caracterização Física	57
3.2.1.1	Densidade Real dos Grãos	58
3.2.1.2	Limites de Atterberg	59
3.2.1.3	Análise Granulométrica	59
3.2.2	Ensaio de Caracterização Mecânica	60
3.2.2.1	Ensaio de Cisalhamento Direto	60
3.2.2.2	Ensaio de Adensamento Edométrico	63
4	Resultados e Análises	67
4.1	Ensaio de Caracterização Física	67
4.1.1	Bentonita	67
4.1.2	Borracha Moída	68
4.1.3	Pó de PET	70
4.2	Ensaio de Caracterização Mecânica	71
4.2.1	Ensaio de cisalhamento Direto	71
4.2.1.1	Bentonita	71
4.2.1.2	Bentonita x Borracha	73
4.2.1.3	Bentonita x PET	78
4.2.2	Ensaio de Adensamento	85
4.2.2.1	Resultados de ensaio de adensamento na Bentonita	86
4.2.2.2	Resultados de ensaio de adensamento na Bentonita x Borracha	87
4.2.2.3	Resultados de ensaio de adensamento na Bentonita x PET	92
4.2.3	Comparativo com trabalhos anteriores	98
5	Conclusão	101
5.1	Conclusões	101
5.2	Sugestões para pesquisas futuras.	103
6	Referências bibliográficas	104

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura química ácido tereftálico e etilenoglicol.....	27
Figura 2.2 – Reação de Policondensação.....	29
Figura 2.3 – Simbologia do PET reciclado.....	30
Figura 2.4 – Tecnologias utilizadas na destinação de pneumáticos inservíveis.....	37
Figura 2.5 – Produção de polímeros termoplásticos em 2005.....	38
Figura 2.6 – Porcentagens em peso para lixo sólido de PET .....	38
Figura 2.7 – Evolução da reciclagem no Brasil.....	39
Figura 3.1 – Amostra da Bentonita utilizada na pesquisa.....	49
Figura 3.2 – Borracha em Fibra utilizada na pesquisa.....	50
Figura 3.3 – Borracha em Pó utilizada na pesquisa.....	51
Figura 3.4 – Garrafa PET limpa, sem topo e base.....	51
Figura 3.5 – Equipamento utilizado para triturar as garrafas PET.....	52
Figura 3.6 - Peneira de 10 mm e PET triturado de 10 mm.....	53
Figura 3.7 - Peneira de 2 mm e PET triturado de 2 mm.....	53
Figura 3.8 – Pó de PET utilizado na pesquisa.....	54
Figura 3.9 – Máquina PKM empresa Pallmann.....	55
Figura 3.10 – Layout da máquina PKM empresa Pallmann.....	55
Figura 3.11 – Fibra de PET utilizado na pesquisa.....	56
Figura 3.12 – (a) Procedimento de dispersão em aparelho de ultra-som e (b) Bomba vácuo.....	60
Figura 3.13 – (a) Molde e (b) Base acrílica.....	62
Figura 3.14 – (a) Amostra moldada e (b) Amostra na caixa de cisalhamento.....	63
Figura 3.15 – Equipamento de Cisalhamento Direto – Puc-Rio.....	64
Figura 3.16 – Condições de contorno no ensaio de adensamento.....	65
Figura 3.17 – Amostras moldadas no anel de adensamento utilizado.....	66
Figura 3.18 – Curva para Obtenção da $\sigma'p$ .....	68
Figura 3.19 – Equipamento de Adensamento – Puc-Rio.....	68
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica da Bentonita.....	70
Figura 4.2 - Curva granulométrica da borracha moída 0,2 a 2,0 mm.....	71

Figura 4.3 - Curva granulométrica do Pó de PET e PET triturado.....	73
Figura 4.4 - Gráfico de Tensão Cisalhante e Desl. Vertical x Desl. Horizontal para a Bentonita.....	74
Figura 4.5 – Envoltória de Resistência da Bentonita.....	75
Figura 4.6 - Gráfico de Tensão Cisalhante e Desl. Vertical. x Desl. Horizontal para a Bentonita com borracha em fibra.....	76
Figura 4.7 - Gráfico de Tensão Cisalhante e Desl. Vertical. x Desl. Horizontal para a Bentonita com borracha em fibra.....	78
Figura 4.8 – Tensão Cisalhante x Tensão Normal – Bentonita com Borracha em fibra.....	79
Figura 4.9 – Tensão Cisalhante x Tensão Normal – Bentonita com Borracha em Pó.....	79
Figura 4.10 - Gráfico de Tensão Cisalhante e Desl. Vertical. x Desl. Horizontal para a Bentonita com Pó de PET.....	81
Figura 4.11 - Gráfico de Tensão Cisalhante e Desl. Vertical. x Desl. Horizontal para a Bentonita com PET Triturado.....	82
Figura 4.12 - Gráfico de Tensão Cisalhante e Desl. Vertical. x Desl. Horizontal para a Bentonita com Fibra de PET.....	84
Figura 4.13 – Tensão Cisalhante x Tensão Normal – Bentonita com Pó de PET.....	85
Figura 4.14 – Tensão Cisalhante x Tensão Normal – Bentonita com PET Triturado.....	85
Figura 4.15 – Tensão Cisalhante x Tensão Normal – Bentonita com Fibra de PET.....	86
Figura 4.16 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva – Bentonita Pura.....	87
Figura 4.17 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva – Bentonita x Borracha em Fibra.....	89
Figura 4.18 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva – Bentonita x Borracha em Pó.....	91
Figura 4.19 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva – Bentonita x Pó de PET.....	93
Figura 4.20 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva – Bentonita x PET Triturado.....	96
Figura 4.21 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva – Bentonita x Fibra de PET.....	97

Figura 4.22 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva.....100

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas das fibras PET.....	55
Tabela 3.2 – Misturas realizadas com a Borracha.....	57
Tabela 3.3 – Misturas realizadas com a PET.....	57
Tabela 4.1 – Índices do Pó de PET.....	71
Tabela 4.2 – Parâmetros de Resistência Bentonita.....	74
Tabela 4.3 – Intercepto coesivo e Ângulo de atrito – Bentonita x Borracha Moída .....	79
Tabela 4.4 – Intercepto coesivo e Ângulo de atrito – Bentonita x PET.....	85
Tabela 4.5 – Intercepto coesivo e Ângulo de atrito – Bentonita x PET (Louzada).....	85
Tabela 4.6 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita.....	87
Tabela 4.7 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita x Borracha Em fibra.....	88
Tabela 4.8 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita x Borracha em pó.....	91
Tabela 4.9 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita x Pó de PET.....	93
Tabela 4.10 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita x PET Triturado.....	95
Tabela 4.11 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita x Fibra de PET.....	97
Tabela 4.12 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita x Borracha.....	99

## Lista de Abreviações

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET  
ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
BHET – Tereftalato de bis (2-hidroxietileno)  
CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente)  
CP – Corpo de Prova  
CR – Crumb Rubber (borracha de pneu moído)  
DMT – Densidade Máxima Teórica  
EPS - Poliestireno Expandido  
GCL (Geocomposto Bentonítico)  
HCl - Ácido Clorídrico  
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - Ácido Sulfúrico  
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis  
IP - Índice de Plasticidade  
LL - Limite de Liquidez  
LP - Limite de Plasticidade  
IME – Instituto Militar de Engenharia  
LVDT – Linear Variable Differential Transformer  
MMT – montmorilonita  
NBR – Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas  
PEAD – Polietileno de Alta Densidade  
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade  
PET – Polietileno Tereftalato  
PP – Polipropileno  
PS – Poliestireno  
PUC – Pontifícia Universidade Católica

PVC – Policloreto de vinila

V<sub>s</sub> – Volume de Sólidos

V<sub>v</sub> – Volume de Vazios

## Lista de Símbolos

$a_v$	Coefficiente de compressibilidade
$c_v$	Coefficiente de Adensamento
$e$	Índice de Vazios
$e_0$	Índice de Vazios inicial
$\Delta e$	Variação do Índice de Vazios
$E_{oed}$	Módulo Oedométrico
$G_s$	Densidade relativa
$g/cm^3$	Grama por centímetro cúbico
$g/mol$	Grama por molécula
$H$	Altura final do corpo de prova.
$h_i$	Altura inicial do corpo de prova.
$H_{50}$	Altura do corpo de prova em 50% de deformação
$k$	Permeabilidade
$kg/hab$	Quilo por habitante
$m^2/kg$	Metro quadrado por quilograma
$mPa$	Megapascal
$Mt - \text{Mil toneladas}$	Kilopascal
$m_v$	Coefficiente de compressibilidade volumétrica
$Pa$	Pascal
$\Delta \sigma'_v$	Variação de tensão vertical efetiva
$\sigma_p$	Tensão de pré-adensamento
$^{\circ}C$	Grau celcius
$\omega$	Teor de umidade
$\rho$	Massa específica do solo
$Bar$	Unidade de Pressão
$\emptyset'$	Ângulo de atrito
$c'$	Coesão
$\%$	Porcentagem
$ml$	Mililitro
$\%$	Porcentagem
$ml$	Mililitro

mm	Milímetro
cm	Centímetros
m	Metro
t	Tonelada
t/ano	Tonelada por ano
mm/min	Milímetro por minuto
min	Minuto
g	Gramma
kg	Quilograma
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
kgf/m <sup>2</sup>	Quilograma força por metro quadrado
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
°C	Graus centígrados
Cu	Coefficiente de Uniformidade
Cc	Coefficiente de Curvatura
D <sub>10</sub>	Diâmetro Efetivo
D <sub>50</sub>	Diâmetro Médio
e <sub>min</sub>	Índice de Vazios mínimo
e <sub>máx</sub>	Índice de Vazios máximo

# 1 Introdução

## 1.1 Relevância e Justificativa da Pesquisa

A descarte final de pneus representa um problema difícil de lidar, pelo fato de ser um produto que precisa de um grande espaço de armazenamento, leva em torno de 600 anos para se decompor. No Brasil, a resolução nº258/99 do Conama (conselho nacional do meio ambiente) trata sobre a disposição final de pneus inservíveis, estabelecendo que os fabricantes e importadores de pneus devem coletar e dar uma destinação adequada a pneus inservíveis. As empresas recicladoras de pneus formam parte do sistema criado para satisfazer essa resolução. Estas empresas adotaram como alternativa de gestão a diminuição do volume dos pneus inservíveis através da técnica da trituração, produzindo resíduos de borracha em diversas granulometrias, que podem ser utilizados em diversas aplicações.

A destinação final de garrafas de PET também é um grande problema para a sociedade, tendo em vista que a sua decomposição no meio ambiente leva em torno de 50 anos. Atualmente apenas 50% das garrafas PET produzidas são recicladas. Um dos motivos que dificulta o aumento do percentual de PET reciclado é a não utilização em determinados produtos, como: medicamentos, bebida, brinquedos e material hospitalar, seguindo uma orientação da vigilância sanitária.

Hoje em dia, a preocupação com o descarte desses tipos de resíduos vem sendo tratado com mais seriedade quando comparado com as décadas anteriores.

Cada vez mais são criadas leis que possam reduzir tais problemáticas que agredem o meio ambiente. Quando manipulado erroneamente, o material não reciclado pode causar muitos impactos ambientais desde a geração até a disposição final.

A inclusão de materiais alternativos em obras geotécnicas ajuda a reduzir os custos das obras, incentivando o investimento nesse tipo de infraestrutura e em pesquisas.

Para dar outra alternativa a esses resíduos, é extremamente importante que o comportamento mecânico da mistura seja estudado, bem como suas características físicas, ambientais e químicas. O conhecimento do mecanismo de reforço ajudará a uma melhor compreensão do comportamento mecânico das misturas de bentonita-borracha/bentonita-PET. Estes materiais podem funcionar como reforço da bentonita a ser aplicada em obras geotécnicas.

O uso destes resíduos como materiais alternativos podem contribuir para minimizar os problemas ambientais, agregar valor ao lixo, prevenir problemas verdes como a poluição do ar e o assoreamento dos rios e lagos, eliminando os problemas atuais de descarte de lixo em lixões e aterros sanitários.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência da borracha moída de pneus inservíveis e do PET em diferentes granulometrias e percentuais no comportamento mecânico da bentonita aplicado a barreira impermeabilizante de aterros sanitários. Devido à alta plasticidade da bentonita, a mesma apresenta uma resistência de pico acentuada e uns pós pico com queda drástica. Tal fato ocorre devido a tixotropia do material. A inclusão da borracha moída e do PET tendem a aumentar a resistência de pico e a suavizar a queda no pós pico, atenuando as deformações e mostrando que poderá ser uma camada impermeabilizante reforçada (Casagrande, 2015). A barreira impermeabilizante nos aterros sanitários tem o objetivo de prevenir a contaminação do solo, onde o chorume é captado pela bentonita. Já os materiais misturados tendem a exercer uma proteção mecânica.

Este objetivo poderá ser alcançado através da avaliação do comportamento físico e mecânico da bentonita e das misturas, estabelecendo parâmetros de comportamento que possam medir a influência da adição da borracha moída e do PET.

De acordo com o objetivo principal descrito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar caracterização física geotécnica através de testes laboratoriais padronizados, na bentonita, nas misturas de bentonita com borracha e nas misturas de bentonita com PET;
- Avaliar o comportamento mecânico da bentonita pura e nas misturas com diferentes teores de resíduo de borracha e PET através do ensaio de cisalhamento direto e do ensaio de adensamento, obtendo os parâmetros de resistência ao cisalhamento e de adensamento;
- Comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com estudos experimentais que utilizaram outros tipos de materiais.

### 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, iniciando com este capítulo introdutório (capítulo 1), seguido do capítulo 2, onde é apresentada uma revisão da literatura existente sobre a reciclagem de pneus, impacto ao meio ambiente, tecnologias existentes de reciclagem, a utilização de bentonita e suas propriedades, etc. Também é abordado de forma concisa o reforço de solos com outros tipos de materiais e pesquisas anteriores que já utilizaram a borracha de pneus inservíveis como reforço de solos e a utilização de PET.

No capítulo 3 é descrito detalhadamente o programa experimental seguido neste trabalho. Descrevem-se também os materiais e métodos utilizados, os equipamentos e os métodos de ensaios.

O capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica realizados. Estes resultados são analisados com o fim de procurar uma tendência de comportamento das misturas em função da borracha moída de pneu e do PET adicionada na bentonita.

Finalmente no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais baseadas no conhecimento obtido da realização deste trabalho e da análise dos resultados.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Bentonita

A bentonita possui um elevado teor de montmorilonita (MMT). A nomenclatura “bentonita” foi utilizada pela primeira vez em um tipo de argila plástica e coloidal de uma rocha descoberta em Fort Benton, Wyoming-EUA. Os argilominerais da bentonita fazem parte do grupo esmectita, que é uma família de argilas com propriedades próximas. As bentonitas são caracterizadas por apresentarem:

- (a) elevada carga superficial;
- (b) alta capacidade de troca catiônica;
- (c) inchamento em presença de água;
- (d) partículas muito finas;
- (e) elevada superfície específica.

Tais propriedades são procuradas para diversas aplicações industriais, dentre as principais são:

- (a) componente de fluidos utilizados para perfuração de poços de petróleo;
- (b) aglomerante de areias de moldagem usadas em fundição;
- (c) pelletização de minério de ferro;
- (d) descoloramento de óleos e clarificação de bebidas;
- (e) elevada absorção de água;
- (f) absorvente sanitário para animais de estimação;
- (g) carga mineral em produtos farmacêuticos, rações animais, produtos cosméticos e outros;
- (h) agente plastificante para produtos cerâmicos;
- (i) composição de cimento, entre outros (Albarnaz, 2009).

A bentonita pode ser classificada como sódica ou cálcica, que quando em contato com água pode-se expandir seu volume várias vezes formando um gel tixotrópico. Os cátions podem provocar uma expansão onde as camadas dos cristais se separam até a sua célula unitária, já o sódio provoca a expansão mais notável (USGR, 2007).

### **2.1.1 Produção da Bentonita**

A produção de bentonita bruta no Brasil em 2016 aumentou sensivelmente, alcançando um patamar de 551.699 t. Isso representa um aumento de produção de 98,7% em comparação com o ano anterior. Logo, percebe-se claramente a recuperação dos produtores de bentonita, além de indicativo do aumento de dinamismo dos compradores, que são essencialmente nacionais. Do total produzido, a Paraíba produziu 69,34%, a Bahia produziu 24,17%, São Paulo 5,19%.

A produção da bentonita moída seca correspondeu a 35.804 t, o que representou um aumento de 19,76% em relação ao ano anterior. A bentonita ativada correspondeu a 291.623 t, aumento de 64,21%, no mesmo período. A distribuição geográfica da produção de bentonita moída seca deu-se da seguinte forma: São Paulo com 87% do total e Paraná com 13,0%. Quanto à bentonita ativada: a Paraíba produziu 78% de toda a produção nacional e a Bahia, 22%.

Os EUA lideram a produção mundial. Em 2016 produziram 5,62 Mt. O consumo aparente no mesmo ano foi de 4,39 Mt, equivalendo a um consumo per capita de 11,3 kg/hab. Para efeito de comparação, o consumo brasileiro fica em torno de 1,2 kg/hab. (USGR, 2016).

### **2.1.2 Mineralogia e geologia**

Cada mineral possui uma estrutura cristalina diferente, o termo utilizado anteriormente “esmetita” se refere ao um grupo constituído por diversos minerais, sendo eles: montmorilonita, beidelita, montronita, hectorita e saponita. O mineral mais comum nos depósitos econômicos do grupo da esmetita é a montmorilonita.

Estruturalmente, podemos perceber que os argilominerais da bentonita são constituídos por um empilhamento formando camadas de íons coordenados octaedralmente entre duas camadas de íons coordenados tetraedralmente.

A bentonita é composta essencialmente de uma argila cristalina, tendo as características de um mineral formado pela desvitrificação de um material ígneo e vítreo, normalmente um tufo ou cinza vulcânica. Esse material normalmente contém proporções variadas de grãos de cristais acessórios que foram originalmente fenocristais num vidro vulcânico. Esses minerais geralmente são feldspatos (ortoclásio e oligoclásio), biotita, quartzo, piroxênio, zircônio e vários outros tipos de minerais, característicos de rochas vulcânicas (Elzea E Murray, 1995; Luz et al, 2001A).

### **2.1.3 Caracterização da Bentonita**

Das diversas opções de caracterização, podemos identificar a bentonita sódica avaliando a sua capacidade de inchamento, quando adicionado água. A bentonita composta de sódio, como elemento dominante, possui capacidade elevada de inchamento e tem as características de uma massa em presença de água. Esse tipo de bentonita pode ser encontrado nas jazidas de Wyoming-EUA.

As bentonitas que tem o cálcio como elemento dominante, possui uma menor capacidade de inchamento. As bentonitas sódicas/cálcicas, denominadas mistas, incham de forma moderada e formam géis de menor volume quando comparados com as bentonitas sódicas. Dessa forma, as bentonitas são classificadas como de alto inchamento ou sódica, baixo inchamento ou cálcica e de moderado inchamento ou tipo mista.

### **2.1.4 Uso e Funções**

Em 2016, A distribuição da bentonita consumida nos EUA se deu:

- 30% - PET Litter (absorvente de dejetos de animais domésticos);
- 28% - Aglutinante de areias na indústria;
- 8% - Aglomerante na pelotização de minério de ferro;
- 25% - Agente tixotrópico;

- 9% - Para outros fins (USGS, 2016).

Já o consumo de bentonita bruta no Brasil foi distribuído da seguinte forma:

- 45,2% - Pelotização;
- 22% - Extração de petróleo e gás;
- 10,5% - Fabricação de filtros;
- 7,2% - Fundição;
- 4,8% - Construção civil;
- 3,8% -Cosméticos;
- 1,8% - Tintas, esmaltes e vernizes;
- 0,5% - Cerâmica branca;
- 4,2% - Outros não especificados (Resende et al., DNPM 2016).

A bentonita pode ser utilizada como fluido de perfuração, e suas funções quanto utilizada para esse fim são (Gray e Darley, 1985):

(a) refrigerar e limpar a broca de perfuração;

(b) reduzir a fricção entre o colar da coluna de perfuração e as paredes do poço;

(c) auxiliar na formação de uma torta de filtragem nas paredes do poço, de baixa permeabilidade, de forma a controlar a perda de filtrado do fluido de perfuração, contribuindo para evitar o desmoronamento do poço;

(d) conferir propriedade tixotrópica à lama de perfuração, ajudando a manter em suspensão as partículas sólidas, principalmente, quando cessa, temporariamente, o movimento da coluna de perfuração ou o bombeamento da lama de perfuração;

(e) conferir viscosidade à lama de perfuração, para auxiliar no transporte dos cascalhos do fundo do poço para a superfície.

As argilas organofílicas (bentonitas modificadas com surfactantes-sais orgânicos de aminas quaternárias) são usadas em fluidos de emulsão inversa, onde a fase contínua é constituída por óleo mineral de baixa toxidez, n- parafina. Esse tipo de fluido é recomendado para aplicações especiais, em poços que atravessam formação contendo camadas de folhelho.

Pelotização de minérios de ferro - a pelletização de minério de ferro usa entre 6 e 8 kg de bentonita sódica, ou esmectita cálcica ativada com carbonato de sódio, para cada tonelada de minério de ferro. A bentonita tem como função promover uma ligação entre as partículas minerais, conferindo resistência (Harben e Kuzvart, 1996).

Aglomerante de areias de moldagem - conforme Harben e Kuzvart (1996), na preparação de moldes de fundição, a bentonita sódica (bentonita cálcica pode ser usada em temperaturas mais baixas de fundição) é usada como ligante na proporção de 4 a 6% e tem a função de promover a aglutinação da areia de quartzo, conferindo as propriedades físicas (porosidade, refratariedade etc.) Requeridas dos moldes de fundição.

Descoramento de óleos - as argilas bentoníticas, principalmente quando calcinadas, apresentam alta adsorção (capacidade de atrair e manter íons ou moléculas de gás ou líquido) e absorção (capacidade de incorporar material). A esmectita (montmorilonita) cálcica após ativação ácida (HCl ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) aumenta as suas propriedades sorptivas e é usada no descoramento, desodorização e desidratação de óleos vegetais, minerais e animais.

## **2.2 Polietileno Tereftalato (PET)**

### **2.2.1 Aspectos gerais do PET**

O tereftalato de polietileno, ou simplesmente o PET, é um polímero termoplástico, da família do poliéster. Os termoplásticos têm uma característica que quando aquecidos amolecem e se tornando mais fluidos à medida que o calor adicional é aplicado. O processo de cura é completamente reversível, uma vez que nenhuma ligação química ocorre. Esta característica permite que os materiais termoplásticos sejam remodelados e reciclados sem prejuízo de suas propriedades físicas. No entanto, existe um outro tipo de polímero, o termorrígido, que contém polímeros que se reticulam durante o processo de cura para formar uma ligação química irreversível. O processo de reticulação elimina o risco de refluxo do produto quando o calor é aplicado, tornando os termorrígidos ideais para aplicações de alta temperatura, como eletrônicos e eletrodomésticos.

Em 1941 houve a primeira sintetização do PET, realizada por Whinfield e Dickson, onde foi realizada a reação de dois monómeros, o ácido tereftálico e o etileno glicol. O ácido tereftálico é um sólido cujo ponto de fusão é de cerca de 130 ° C e o etileno glicol é um álcool líquido à temperatura ambiente que tem sua ebulição de 197°C (Mano e Mendes, 2001).

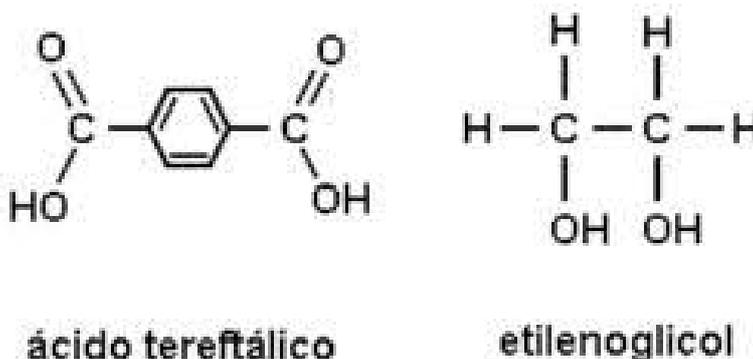


Figura 2.1 - Estrutura química ácido tereftálico e etilenoglicol (Guimarães, Unifal-2016)

Em 1946, as indústrias começaram a utilizar o poliéster. Após esse marco, a utilização do PET teve um aumento significativamente devido aos avanços da tecnologia, ampliando assim a utilização desse polímero.

Em 1960 foi desenvolvido uma película fina de polímero bi orientado em duas etapas e em direções diferentes, e que foi amplamente utilizado como material para embalagem de alimentos (Barry e Pellereau, 1993). Nos anos 70, as primeiras garrafas PET foram criadas nos estados unidos e na europa, após uma análise cuidadosa dos aspectos ambientais e de segurança. Em 1988, o PET chegou ao brasil e também foi usado pela primeira vez na indústria têxtil. Somente, nos anos 90, o PET ocupou um lugar importante no mercado de embalagens, revolucionando-o, especialmente o mercado de bebidas carbonatadas.

Na época, o transporte de garrafas de vidro era complexo e gerava uma grande perda de material devido ao atrito das garrafas que se chocavam e quebravam. Com a chegada do PET esse problema foi resolvido, pois esse novo material apresentava uma elevada resistência ao impacto. Além disso as novas embalagens apresentavam propriedades como transparência, impermeabilidade e leveza. Ademais, o custo do transporte passou a ser menor devido ao novo peso apresentado.

Ao contrário de alguns tipos de polímeros, o PET resiste ao ataque prejudicial dos ácidos, água e bases. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de o PET apresentar anéis aromáticos a sua cadeia polimérica, dificultando o acesso dos materiais degradantes (Barboza, 2003).

Segundo Mano e Mendes (2001) a produção industrial utilizando PET pode ser feita em duas ou três etapas, dependendo da sua aplicação: (i) pré-polymerização; (ii) policondensação e (iii) polimerização no estado sólido. A pré-polymerização e a policondensação são geralmente utilizadas para a produção de fibras têxteis que não requerem altos esforços mecânicos. Para as garrafas de PET, o polímero precisa de um peso molecular elevado ( $> 30\,000\text{ gmol}^{-1}$ ) e isso só pode ser alcançado aplicando o passo de polimerização no estado sólido.

Atualmente, o PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo, alcançando no final da década de 90 uma produção mundial em torno de  $2,4 \times 10^{10}$  kg. As aplicações do PET são: fibras têxteis (67%), embalagens processadas por injeção-sopro (24%), filmes biorientados (5%) e polímeros de engenharia (4%). O sucesso deste material deve-se à sua excelente relação entre as propriedades mecânicas, térmicas e o custo de produção (Romão et al, 2009)

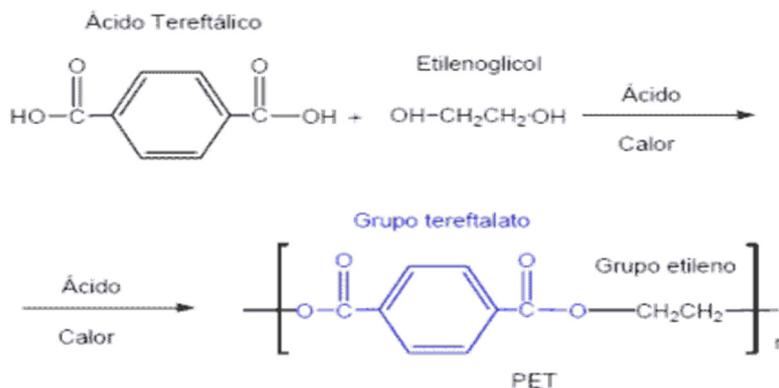


Figura 2.2 – Reação de policondensação (Romão et al, 2009).

No Brasil, a principal aplicação do PET é na indústria de embalagens (71%). O segmento do mercado nacional da indústria alimentícia e de embalagens corresponde a 32% do mercado brasileiro de polímeros, envolvendo diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas. Essa é a explicação sobre a diferença observada entre o cenário mundial e o nacional em relação à produção e reciclagem de PET.

Podemos observar, no nosso cotidiano, que boa parte dos materiais usados em residências, hospitais, escolas, comércio etc. Vem sendo substituída por materiais plásticos. Uma das substituições mais visíveis foi a das embalagens de refrigerantes, que como já falado, passaram de garrafas de vidro para recipientes de plástico. O quadro 2.1 apresenta alguns dados que comprovam esse fato.

Embalagens	Porcentagem		
	1990	1996	1998
Vidro não retornável	<1	<1	<1
Vidro retornável	87	27	10
PET não retornável	3	59	74
PET retornável	<1	5	3
Latas	<1	6	9

Quadro 2.1 – Comparativo de da evolução da utilização do PET (ABIPET, 2010)

Para facilitar a identificação dos materiais plásticos, em 1994, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) determinou que cada tipo de plástico recebesse uma numeração específica e que esse número viesse dentro do triângulo que simboliza reciclagem. As embalagens de PET são identificadas pelo número 1. Na maioria das embalagens, o triângulo é aplicado em alto relevo na parte inferior do recipiente. Confira na figura 1 a simbologia utilizada para identificar o PET.



Figura 2.3 – Simbologia do PET reciclado

Símbolos do mesmo tipo são utilizados para identificação de outros tipos de plástico, mudando apenas a numeração. Por exemplo:

- 2: PEAD (polietileno de alta densidade)
- 3: PVC (policloreto de vinila)

- 4: PEBD (polietileno de baixa densidade)
- 5: PP (polipropileno)
- 6: PS (poliestireno)
- 7: outros

### 2.2.2

#### Matéria Prima e produção do PET

Entre os polímeros sintéticos mais usados estão as borrachas e os plásticos. Além de se produzir os combustíveis e lubrificantes que saem direto das refinarias, do petróleo também se extrai a nafta é um dos derivados do petróleo que serve como matéria-prima básica da indústria petroquímica, de onde vêm os plásticos, resinas, solventes e outros produtos tão presentes em nosso cotidiano que fica difícil pensar a vida sem eles. Sem o petróleo, a maioria dos materiais sintéticos não existiriam. Roupas de poliéster e tênis de nylon teriam que voltar a ser feitos de algodão.

A fração nafta resultante do craqueamento é fornecida para as centrais petroquímicas, onde passa por uma série de processos, dando origem aos principais monômeros como, por exemplo, o eteno.

É importante observar que apenas uma pequena parcela da produção mundial de petróleo é usada para a obtenção dos plásticos, em processos totalmente controlados que não afetam o meio ambiente e muito menos contribuem para o aquecimento global.

Mais de um terço de todo o petróleo extraído é usado em aquecimento de ambientes (particularmente no hemisfério norte), e quase outro tanto é usado na produção de combustíveis. Um quinto do total vai para a geração de energia elétrica. E somente 4% bastam para a produção dos plásticos.

O PET é produzido em duas fases:

Na primeira, o PET amorfo é obtido pela polimerização no estado líquido com vi em torno de 0,6. Nesta etapa é formado o bis-2-hidroxi-tereftalato (BHET), também chamado de monômero da polimerização. Nesta operação forma-se água, que é retirada continuamente do meio. O monômero é então transferido para a polimerização, onde, sob alto vácuo, ocorre a policondensação líquida. Nesta operação, o glicol é eliminado da reação com o aumento da vi do polímero (reação 2). Neste ponto, o polímero amorfo é retirado do polimerizado, resfriado,

solidificado, cortado e então armazenado. Na segunda etapa que é a pós-condensação no estado sólido, a resina PET amorfa - obtida na primeira fase de fabricação - é cristalizada e polimerizada continuamente (reação 3). Nesse processo, a  $\eta_{sp}/c$  do polímero é aumentada tipicamente a 0,8dl/g. A resina é então embalada, estando pronta para ser comercializada (ABIPET, 2010)

A resina PET é um dos mais recentes materiais para embalagem. Embora seja largamente utilizada em todo o mundo para a fabricação de embalagens, notadamente garrafas para bebidas carbonatadas (refrigerantes, águas com gás, cervejas, etc), tem várias outras utilidades, sendo encontrada em diversos segmentos de mercado.

O alto desempenho em resistência mecânica, brilho e transparência, faz desse termoplástico o preferido de muitos setores. A leveza do PET permite produzir garrafas e frascos de alta capacidade volumétrica, com perfeita manutenção da segurança em todas as etapas (envase, empacotamento, distribuição, utilização final pelo consumidor).

Os benefícios ambientais proporcionados pelas embalagens de PET no pré-consumo são:

1. Redução do desperdício de produtos e embalagens - já que não se quebram mesmo após quedas consideráveis;
2. Extrema redução nas emissões durante o transporte;
3. Economia de água no envase de refrigerantes e outras bebidas, por dispensar a lavagem de cascos vazios – como ilustração, são necessários 6 litros de água para cada litro de refrigerante produzido em sistemas de embalagens retornáveis, enquanto o sistema que utiliza as garrafas recicláveis de PET precisa de apenas 2 litros.

No pós-consumo, a indústria do PET trabalha incessantemente para desenvolver aplicações para o PET reciclado.

### **2.3 O descarte de resíduos no Brasil**

Com o passar do tempo às leis que regem o descarte de resíduos de PET, como a reutilização de pneus na condição de inservíveis, vem se tornando cada vez mais rígidas, tentando assim, minimizar o impacto ambiental gerado por esse

resíduo. Entretanto mesmo com diversas opções de reutilização tal problema está longe de ser resolvido. O acúmulo dos resíduos dispostos inadequadamente resultante do consumo da sociedade é um problema ambiental que, embora já haja diversos encaminhamentos na tentativa de minimizar o impacto gerado, ainda não está resolvido.

Esse acúmulo ocorreu porque esta questão foi tratada por vários anos como uma consequência indesejada, mas inevitável, do desenvolvimento econômico, e sempre foi carente de regulação e fiscalização intensivas. Assim, o descuido com o meio ambiente gerou a poluição das águas, solo e ar, degradação da natureza, perda de biodiversidade, danos à saúde e qualidade de vida e geração de impactos sociais, culturais, podendo tornar-se uma situação irreversível e inclusive comprometer a médio e longo prazo o próprio desenvolvimento econômico. Devido à constatação, conscientização e aumento dos resultados negativos das agressões ao meio ambiente, os países passaram a regulamentar e a adotar imposições mais rígidas aos diversos agentes envolvidos, sejam consumidores, empresas, poder público ou outras instituições.

O conceito de passivo ambiental é decorrente desta situação, e refere-se à obrigação ambiental contraída por um agente - seja empresa, sociedade, ou qualquer outra instituição - devido a ações passadas que geraram degradação, e que envolvem investimento de recursos para amenização ou extinção dos danos causados. O reconhecimento de um passivo ambiental decorre da responsabilização do agente causador que é obrigado a reparar o dano, impactando diretamente em seu resultado econômico. Desta forma, a sociedade responsabiliza quem degrada o ambiente, e impõe penalidades por estas ações.

### **2.3.1 Reciclagem de pneus**

Com o aumento da população brasileira e indiretamente o aumento do número de veículos utilizados no dia a dia, aumenta-se a preocupação com a destinação dos pneus inservíveis. A prova disso é a inclusão da indústria de pneus no programa obrigatório de implantação da logística reversa em acordo com a política nacional de resíduos sólidos (lei 12.305/2010 art. 33º inciso iii). Por outro lado, com as tecnologias modernas, quase 100% de um pneu pode ser reciclado e dessa forma

colocar pneus em aterros sanitários ou incinerá-los é um desperdício de matéria prima e contribui para desmatamentos e extração de ferro, na medida que a fabricação de pneus precisa desses materiais.

Tendo em vista que reciclar significa separar e tratar as diversos materiais que compõem um produto, torna-se necessário entender de que material um pneu é composto para depois entender seu processo de reciclagem.

### **2.3.2 Principais utilizações dos pneus inservíveis**

Segundo Larguinhos (2008) as tecnologias mais utilizadas para a reutilização e reciclagem de pneus inservíveis praticadas pelas empresas que declaram anualmente as suas atividades de destinação no relatório de pneumáticos são:

1 - Pirólise: processo de decomposição térmica da borracha conduzido na ausência de oxigênio ou em condições em que a concentração de oxigênio é suficientemente baixa para não causar combustão, com geração de óleos, aço e negro de fumo. O relatório de pneumáticos, em 2015, informou que durante o ano 2014 esta tecnologia de destinação não foi utilizada.

2 - Regeneração da borracha: a regeneração é um processo de desvulcanização onde os pneus depois de triturados, são submetidos à temperatura e pressão e recebem oxigênio e vapor de produtos químicos, como álcalis e óleos minerais, dentro de uma autoclave rotativa. Os pneus são cortados em lascas ou raspas que passam por um processo de moagem mecânica, onde são transformados em pó de borracha e tratados por um sistema de separação com peneiras e cilindros magnéticos. Em seguida, em autoclaves rotativas, que utiliza o vapor saturado, o material recebe oxigênio e é submetido a uma temperatura de 180° c e a uma pressão de 15 bar, provocando o rompimento de pontes de [enxofre-enxofre] e [carbono-enxofre] entre as cadeias poliméricas. Assim, a borracha é transformada em matérias passíveis de novas formulações. A massa de borracha resultante deste processo sofre uma trituração mecânica, aumentando com isso a viscosidade, para depois ser prensada. No final do processo, o material ganha a forma de fardos de borracha. Esta borracha pode ser utilizada na formulação de novos artefatos de borracha com demanda e aplicações limitadas, pois possuem propriedades

mecânicas inferiores quando comparadas com a borracha original. O material regenerado tem várias aplicações, tais como: cobrir áreas de lazer e quadras esportivas, tapetes para automóveis, passadeiras, saltos e solados de sapatos, colas e adesivos, câmaras de ar utilizado em pneus convencionais, rodos metálicos, tiras para indústrias de estofados, entre outras aplicações. Em 2014, foram utilizadas 316,28 toneladas de pneus inservíveis que corresponde ao 0,06% do total reciclado no mesmo ano.

3 - Industrialização do xisto: processo industrial de co-processamento do pneumático inservível conjuntamente com o xisto betuminoso, como substituto parcial de combustíveis. Após ser minerado a céu aberto, o xisto passa pelos britadores primários e secundários, os quais reduzem a granulometria do material bruto na faixa de 11 a 80 mm, que é transportado até a retorta, com a utilização de transportador de correias. Os pneus triturados, em tiras ou pedaços de 50 a 100 mm, são transportados perpendicularmente do silo de alimentação de pneus até o transportador de correia de xisto cru. A taxa de alimentação para a retorta é de 5% de pneus triturados e 95% de rocha de xisto pirobetuminoso. O material já misturado é transportado até a parte superior da retorta, e é descarregado pelo topo, assim a carga segue seu fluxo naturalmente. Para evitar as emissões fugitivas, do processo para a atmosfera, durante o carregamento da retorta, é feita a selagem do topo, pela injeção de gases inertes (nitrogênio, gás carbônico), bem como a selagem do fundo da região de descarga do xisto e do aço contido nos pneus, com água utilizada no processo. Após a descarga do xisto e do aço contido nos pneus pelo topo da retorta, ocorrem à secagem e a retortagem, pela passagem do gás no fluxo inverso ao da carga. Este aquecimento provoca a vaporização da matéria orgânica contida no xisto e pneus, gerando gás e óleo. O relatório de pneumáticos, em 2015, informou que durante o ano 2014 esta tecnologia de destinação não foi utilizada.

4 - Laminação: o processo de laminação consiste em diversas operações de cortes efetuadas em pneus inservíveis, para extrair lâminas e trechos de contornos definidos. As empresas que trabalham com o processo de laminação de pneus possuem uma estrutura de coleta de pneus convencionais. Estes pneus não possuem em sua construção, as malhas de aço, o que facilita a sua reciclagem. Os pneus laminados são utilizados em diversas aplicações, tais como: indústria de estofados, indústria de calçados, fazendas, fábricas de rodos, tubos para águas pluviais, tubos para combate a erosões e passagem de níveis, solados, saltos e palminhas de pneus,

solados de calçados, tiras para móveis, sofás e poltronas, cestos, e inúmeras outras aplicações. Em 2014 foram utilizados no processo de laminação, trituração e fabricação de artefatos de borracha, 54,168 mil toneladas de pneus inservíveis, 9,94% do total reciclado no ano.

5 - Granulação: processo industrial de fabricação de borracha moída, em diferentes granulometrias com separação e aproveitamento do aço. Em 2014 foram utilizados no processo de granulação 189,699 mil toneladas de pneus inservíveis, 34,83% do total reciclado no ano.

6 – Co-processamento: definido como a utilização de materiais inservíveis pelo seu gerador em um outro processo em que possa agregar valor como matéria-prima ou como energia. O co-processamento de pneus nos fornos de clínquer é uma atividade que proporciona o aproveitamento térmico dos pneus, reduzindo a queima de combustíveis fósseis não renováveis, além disso, incorpora ao clínquer o aço contido nos pneus. Devido à quantidade de energia requerida em uma fábrica de cimento, as indústrias cimenteiras buscam continuamente alternativas mais econômicas para a utilização dos combustíveis. As atividades de co-processamento de resíduos iniciaram-se no Brasil na década de 90, no estado de São Paulo, estendendo-se posteriormente para o rio de janeiro, paraná, rio grande do sul e minas gerais. Em 2014 foram co-processados 300.510 mil toneladas de pneus inservíveis, 55,17% do total reciclado no ano.

### **2.3.3 Aproveitamento dos Pneus inservíveis**

Para a utilização dos pneus inservíveis é necessário à transformação do pneumático inservível em lascas ou “chips”, por meio da trituração. As empresas trituradoras coletam ou recebem pneus inteiros, radiais e convencionais, e também os resíduos de borracha provenientes do processo de laminação.

Os processos mais utilizados para a trituração de pneus são: à temperatura ambiente e/ou com resfriamento criogénico que resfria a superfície.

No Brasil o processo mais utilizado é a trituração a temperatura ambiente, o qual pode operar a temperatura máxima de 120°C, reduzindo os pneus inservíveis a partículas de tamanhos finais de até 0,2 mm. Este processo tem alto custo de manutenção e alto consumo de eletricidade. Nesse processo os pneus passam pelo

tritador e pelo granulador. No triturador ocorre uma redução dos pneus inteiros em pedaços de 50,8 a 203,2 mm. Após a etapa de trituração os pedaços de pneus são alimentados através de um sistema transportador de correias no granulador, para a redução de pedaços de 10 mm, dependendo do tipo de rosca montada no granulador. O aço é removido em um separador magnético de correias cruzadas e as frações de nylon, rayon e poliéster, são removidas pelos coletores de pó. O pó-de-borracha é separado através de um sistema de roscas e peneiras vibratórias em várias granulometrias (Lagarinhos,2008).

De modo geral, o co-processamento em fornos rotativos para produção do clínquer continua sendo a principal tecnologia de destinação de pneus inservíveis realizada no país, representando 55,17% do total de pneumáticos destinados. Em segundo lugar, permanece a granulação, com 34,83% no ano de 2014. A representação abaixo demonstra as tecnologias de destinação e sua representatividade (IBAMA, 2015).

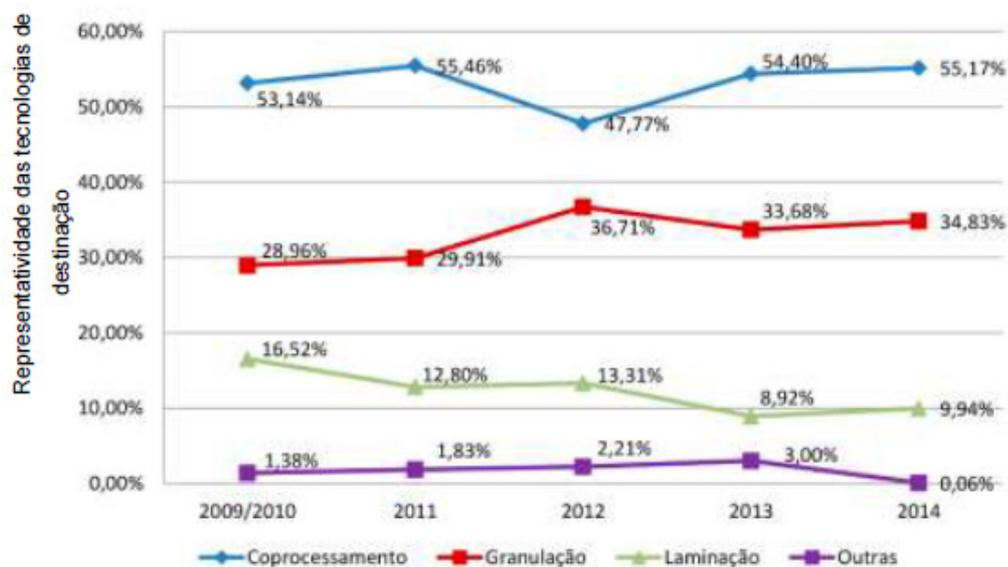


Figura 2.4 – Tecnologias utilizadas na destinação de pneumáticos inservíveis (%) (IBAMA, 2015)

## 2.4 Reciclagem do PET

Uma garrafa PET demora cerca de 400 anos para se degradar no meio ambiente. A fim de evitar o acúmulo de PET existe o processo de reciclagem, podendo ser pelo processo de termo reação, ou a quente, no qual a determinada

temperatura, o polímero fica líquido, podendo então ser moldado, extrudado, comprimido ou em outra forma. As garrafas produzidas com este polímero podem permanecer na natureza por até 800 anos. No começo da década de 1980, os EUA e o Canadá iniciaram a coleta dessas garrafas, reciclando-as inicialmente para fazer enchimento de almofadas. Com a melhoria da qualidade do PET reciclado, surgiram aplicações importantes, como tecidos, lâminas e garrafas para produtos não alimentícios. Mais tarde na década de 1990, o governo norte-americano autorizou o uso destes materiais reciclados em embalagens de alimentos. A produção cresceu mais, a reciclagem não acompanhou a produção, gerando uma invasão de garrafas de todos os tamanhos e formatos. Hoje a produção de PET avançou e é um dos maiores vilões do meio ambiente, poluindo matas, rios e córregos.

Atualmente, os polímeros são uma parte significativa na composição do lixo municipal sólido. De acordo com Romão et al (2009), em 2005 eram cerca de 20% (porcentagem em peso) desse material coletado no Brasil. A figura 2.5 mostra os principais polímeros produzidos no Brasil em 2005. Observa-se que a produção de PET é de 9% da produção total de polímeros no Brasil. No entanto, a fração PET que vira lixo é em média 20%, corresponde aos polímeros (figura 2.6). Isso ocorre porque o polipropileno (pp) e o cloreto de polivinilo (pvc) são usados na fabricação de produtos de longa vida, enquanto o PET é usado em produtos de vida curta, como pacotes.

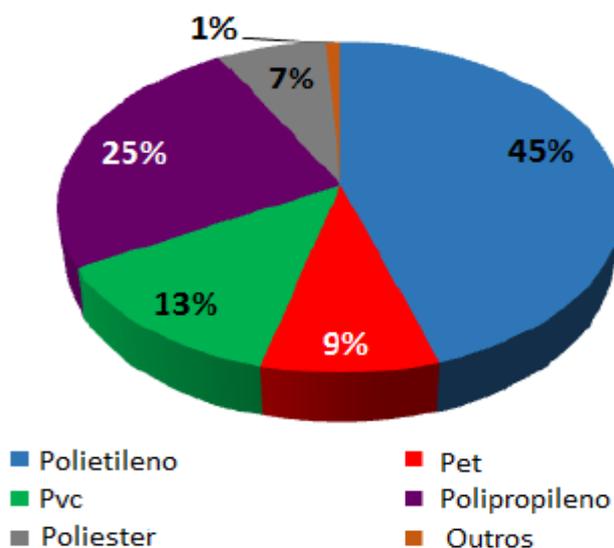


Figura 2.5 – Produção de polímeros termoplásticos em 2005 (Romão et al, 2009).

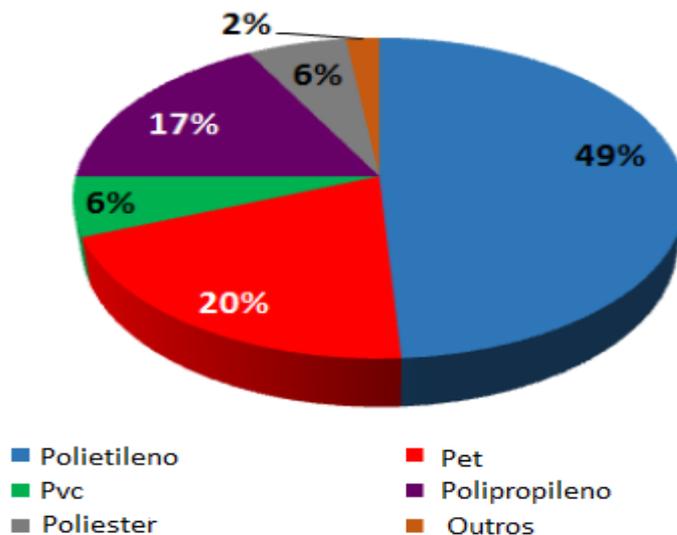


Figura 2.6 – Porcentagens em peso para lixo sólido de PET (Romão et al, 2009)

O Brasil ocupa o segundo lugar depois do Japão na taxa de recuperação de PET (taxa de reciclagem), colocando-se à frente dos países europeus e dos estados unidos, que possuem técnicas de reciclagem mais avançadas (ABIPET, 2009). Segundo a ABIPET (2015) a taxa de reciclagem veio apresentando um aumento entre 2008 e 2012, sofrendo uma queda de 2013 a 2015. (Figura 2.7). Tal queda se deu devido à baixa atividade econômica (queda da demanda) e redução drástica do preço do petróleo, que foram fatores que reduziram a rentabilidade e, portanto, a atratividade. Setores importantes, como têxtil, químico, automotivo e de transporte tiveram quedas de quase 50% em suas atividades, refletindo negativamente sobre a reciclagem, já que são grandes consumidores de matéria-prima reciclada.

#### Evolução da Reciclagem do PET no Brasil

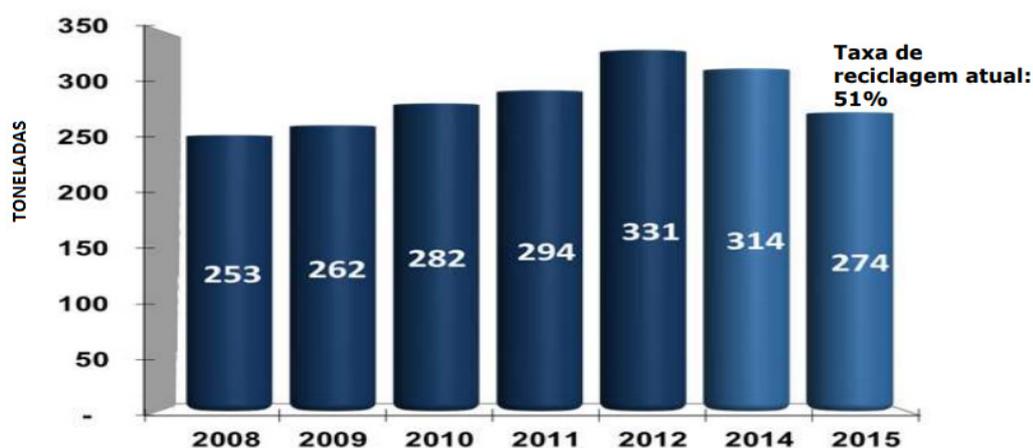


Figura 2.7 – Evolução da reciclagem no Brasil (ABIPET, 2015)

## 2.5 Estudos anteriores sobre solos reforçados

Segundo Palmeira (1992 *apud* Casagrande, 2005) o início do reforço do solo se deu a muitos anos atrás, onde se podia encontrar diversos tipos de materiais aplicados com a finalidade de reforçar os solos. Na mesopotâmia, 1400 anos antes de cristo, já podia se constatar a utilização de mantas e raízes de árvores intercaladas com camadas de solo para assim obter um solo mais resistente. Também era possível encontrar a utilização de pedaços de bambu e junco para reforçar tijolos de barro, juntamente com solos granulares para a construção de diversas obras de terra. Podemos ver a aplicação de técnicas em construções de grande conhecimento mundial como: muralha da china, estradas construídas pelos incas, etc.

Estudos mais recentes confirmam que existem inúmeras maneiras de se melhorar as propriedades mecânicas do solo, seja através de processos físicos, processos químicos ou até pela junção dos dois, sendo um processo físico-químico. Dentre os inúmeros materiais existentes podemos citar: as fibras (podendo ser PET, vidro, borracha, coco, etc), geossintéticos, bentonita, etc.

A melhoria ou reforço de solos vem da utilização de processos físicos e/ou químicos que tem o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos solos, seja pelo aumento da resistência do solo tratado, seja pela diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos e físicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes (Casagrande, 2005).

Casagrande (2005) abordou o comportamento de solos reforçados com fibras, observando-se o acréscimo constante da resistência com o aumento das deformações distorcionais em uma matriz arenosa reforçada com fibras de polipropileno. São diversos os tipos de fibras usadas em reforços de solos. Além do tipo de fibra utilizada por Casagrande (2005), de polipropileno, podem ser utilizadas fibras naturais, as quais podem ser usadas na formação de compósitos de bambu, juta, cana de açúcar, etc. As fibras de polietileno, de poliéster e de poliamida, junto com as fibras de polipropileno são classificadas como fibras poliméricas. Cada uma destas apresenta diferentes características em função da sua estrutura química.

Gray e Ohashi (1983) desenvolveram um modelo teórico para estudar o comportamento de uma areia reforçada com fibras. Foram executados ensaios de cisalhamento direto com areia, nos estados fofo e compacto, reforçados com fibras naturais, sintéticas e metálicas. Os resultados permitiram concluir que a inclusão da fibra aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e reduz a queda pós-pico. Outra conclusão foi a existência de uma tensão de confinamento crítica, abaixo da qual, as fibras são arrancadas e, acima da qual, as fibras são alongadas. As fibras com módulo baixo comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não romperam durante o ensaio. O aumento do comprimento das fibras resultou num aumento da resistência, porém, existe um limite que após ser obtido a resistência se mantém.

A pesquisa desenvolvida por Shewbridge e Sitar (1989) avaliou desenvolvimento da zona de cisalhamento de um solo granular reforçado com diferentes tipos de fibras. Para isso, foi utilizado um equipamento de cisalhamento direto com dimensões alteradas. Para o solo reforçado, a zona de cisalhamento era mais larga e aumentava com a concentração, rigidez e aderência entre o solo e o reforço. Com a finalização da pesquisa pode-se concluir que a resistência aumentava em função das propriedades da areia, sendo afetada pelo tamanho e forma dos grãos, sua graduação e devido a fibra, teor e módulo. Observou-se uma redução da resistência com o aumento do tamanho médio e da esfericidade das partículas de areia, por outro lado, há um acréscimo da resistência com o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, do teor de fibras e módulo das fibras. O modelo proposto pelos autores para prever o comportamento do solo reforçado com fibras é baseado num modelo aplicado a concreto reforçado com fibras. Em geral, há um razoável ajuste entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo. Entretanto, ainda há a necessidade de um melhor refinamento do modelo, principalmente em relação à estimativa da espessura da zona de cisalhamento.

Curcio (2008) realizou uma pesquisa voltada para o comportamento hidromecânico e mecânico de amostras de solo compactado reforçado com fibras de PET reciclado. A adição de fibras mostrou que houve uma redução da magnitude das fissuras de tração. Percebeu-se que o comportamento do material compósito em relação à resistência à tração inicialmente é controlado apenas pela matriz de solo. Com o crescimento das deformações, o comportamento passa a ser controlado pela matriz e pelas fibras. A inserção de 1% de fibras, além de favorecer o acréscimo da

tensão de tração máxima do solo, retarda a abertura de fissuras e reduz a magnitude das mesmas, sem alterar as propriedades desejáveis na compactação e sem influenciar negativamente a condutividade hidráulica do solo quando utilizadas sob tensão confinante.

Moo-Young et al. (2003) pesquisaram sobre uma coluna contendo areia e pedaços de pneu colocados em camadas individuais com o objetivo de determinar a influência do pneu nas propriedades químicas da água tais como turbidez, pH e nas concentrações de ferro e carbono orgânico total. Foram realizados ensaios para a condição drenada com as válvulas de entrada e saída de água abertas e para a condição de não drenada na qual se interrompe o fluxo de água na entrada e na saída do sistema. A pesquisa se iniciou com a execução dos ensaios de coluna para a condição drenada variando o tamanho dos pedaços de pneu utilizados: uma determinada coluna foi ensaiada contendo solo e fragmentos de pneu com tamanhos de 50-100 mm e outra com pedaços de tamanho de 100-200 mm. Três amostras do efluente das colunas foram coletadas duas vezes por dia durante sete dias para a análise das propriedades químicas da água mencionadas acima. Finalizados os ensaios de coluna descritos anteriormente, continuou-se com os testes com drenagem inibida. Como neste caso a água foi deixada dentro das colunas, amostras de lixiviado foram periodicamente coletadas permitindo a saída de apenas um certo volume de efluente das colunas. Os resultados dos ensaios de coluna na condição de livre drenagem mostraram que a qualidade de água tende a melhorar com o tempo. Além disso, a medida que o tamanho dos pedaços de pneu aumenta, os resultados indicaram uma redução no carbono orgânico total (de 22.7 a 3.1 ppm) e na turbidez (de 254 para 99 NTU).

Humphrey et al. (1992) avaliaram durante 5 anos os possíveis efeitos da inserção de pedaços de pneu em obras civis construídas acima do lençol freático e concluíram que os efeitos provocados pelo uso do pneu na qualidade da água podem ser considerados desprezíveis. Já os ensaios de coluna com drenagem inibida revelaram um aumento nas concentrações de carbono orgânico total e ferro. Além disso foram registrados valores de turbidez e pH mais altos que os iniciais.

O geossintético é um material que vem sendo utilizado como reforço de solos. Segundo a NBR 12553/1991, geossintéticos é a denominação genérica de produtos poliméricos, podendo ser sintéticos ou naturais, que são industrializados e desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, que desempenham uma ou

mais funções, entre as quais se destacam: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial. Há atualmente um grande número de geossintéticos desenvolvidos para diversas aplicações, sendo estes classificados em geotêxteis, geomembranas, geocompostos argilosos para barreira impermeável e para drenagem, georredes, geogrelhas, geocélulas e geomantas. Dentre estes, os mais utilizados para o reforço são o geotêxtil tecido e não tecido, geocomposto para drenagem, geogrelha e geocélula.

Casagrande (2006) pesquisou sobre o comportamento de uma bentonita reforçada com fibra de polipropileno avaliando a sua resistência ao cisalhamento por uma série de testes de cisalhamento direto com suas tensões normais variando entre 20 e 400 kPa. As misturas de fibras de polipropileno/bentonita foram moldadas com um teor de umidade inicial de 170%, com comprimentos de fibra de 12 ou 24 mm. A espessura da fibra era de 0,023 mm e o teor de fibra era 1,5 ou 3% em peso seco. Pode-se concluir que com a inclusão das fibras distribuídas aleatoriamente houve um aumento da resistência ao cisalhamento da bentonita, mas o aumento da resistência deteriorou-se em grandes deslocamentos e as resistências residuais da bentonita não reforçada e reforçada com fibras foram similares. Verificou-se que a força máxima de cisalhamento aumentou tanto com o aumento do comprimento e tanto com o aumento de quantidade de fibras. Após a conclusão do ensaio as fibras foram analisadas e constatou-se que as fibras tinham estendido e quebrado, com predominância de fibras quebradas.

Abdelrahman et al (2009), com o intuito de obter mais opções de materiais para o reforço de solo, estudaram a influência da mistura de EPS com o solo para substituir o solo expansivo, reduzindo assim as pressões de inchaço na base da estrutura. Os testes laboratoriais foram apresentados na formação de argila expansiva usando bentonita. Os autores também usaram um modelo de laboratório usando um material de reposição feito de uma mistura de areia e EPS para medir a diminuição do inchaço. Os resultados mostraram que o efeito de diferentes composições e diferentes proporções entre EPS e areia como solo de reposição no solo expansivo, apresentava um inchaço igual a 96,7%. Os resultados também mostraram que a areia misturada com EPS reduziram significativamente o volume dos solos expansivos.

Zornberg et al. (2004), realizou a construção de um aterro utilizando uma areia siltosa com pedaços de pneu. Seu objetivo foi avaliar a resposta mecânica de

um aterro construído com misturas de solo e pedaços de pneu com camadas intercaladas. O início da pesquisa se deu com a construção de um aterro experimental, que foi desenhado com dimensões menores, porém com as características do aterro desejado. Com a construção do aterro experimental, foi possível avaliar a quantidade e tamanho dos pedaços de pneu que deviam compor o aterro rodoviário. Além disso, também foram estudados os processos de mistura e de compactação em campo. Após o estudo optou-se pela utilização de pedaços de pneu entre 2 -12 polegadas, com razão entre o comprimento e a espessura do pedaço de pneu entre 2 e 6. Com relação aos teores, foram definidas duas propostas: 10% e 30% de pedaços de pneu em relação ao peso do solo. Para o aterro experimental, compactaram-se quatro seções, cada uma com duas camadas de 0,15 m de altura e com base de 3 m por 3 m (9 m<sup>2</sup>). A primeira seção foi preenchida com o compósito contendo 10% de pedaços de pneu, a segunda com o compósito a 30% e as duas remanescentes foram preenchidas com pneu puro e com solo puro, respectivamente. Foi utilizado um rolo pé de carneiro de 6,7 t (escolha compatível com o verificado por Moon – Yong et al., 2003), que identificaram este equipamento como um dos mais apropriados para a mistura em campo). Para atingir o peso específico desejado em cada camada do aterro experimental, os autores determinaram que seria necessário realizar quatro passadas.

Entre os aspectos mais importantes avaliados neste estudo, destaca-se o processo para mistura em campo. O estudo mostrou que uma melhor eficiência na mistura de solo com pedaços de pneus foi obtida utilizando-se uma carregadeira de rodas com concha dentada, de capacidade de 1,6 m<sup>3</sup>. A produção foi de 3 m<sup>3</sup> a cada 10 minutos.

Segundo os autores, apesar de os resultados em ensaios anteriores apontarem que a maior resistência ao cisalhamento era obtida com a adição de 30%, em peso de pedaços de pneu, a mistura desse material com o solo possui alto grau de dificuldade. Partindo dessa premissa, optou-se por empregar o teor de 10%. Após a análise dos dados fornecidos pelo aterro experimental, o modelo de aterro rodoviário foi construído e submetido ao tráfego de caminhões. Dito modelo conta com três seções, cada uma medindo 10 m de comprimento por 17,5 m de base (largura), altura de 1,5 m e a largura de crista de 9 m. Os taludes laterais possuem inclinações diferentes: um sob a relação 3H:1V e o outro 2.5H: 1V. Em termos de disposição dos pedaços de pneu, duas formas foram estudadas: construção de um

aterro com camadas bem definidas de solo e de pneus intercaladas; e aterro construído de uma mistura homogênea de dois componentes.

As duas primeiras seções foram executadas com as duas disposições a cima descritas, com quantidade de borracha idêntica. A última seção, foi composta de solo puro para servir de referência. Solo puro para servir de referência.

O modelo de aterro rodoviário foi monitorado por 824 dias. Os resultados apontaram que o desempenho das misturas de solo – pedaços de pneu é satisfatório em longo prazo. Verificou-se que a grande maioria dos deslocamentos nos compósitos – superior ao verificado na seção com solo puro – ocorreu após 120 dias de tráfego. Após este tempo, os recalques são semelhantes ao verificado na seção de referência. O compósito que teve melhor rendimento foi aquele misturado de maneira uniforme com o solo.

Ramirez (2012) desenvolveu um estudo experimental para avaliar o comportamento de solos reforçados com borracha moída de pneu. Os solos utilizados foram, um solo maduro argiloso de origem coluvionar e uma areia fina, limpa e mal graduada. Realizaram-se ensaios de compactação proctor normal e ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID) a fim de estabelecer padrões de comportamento relacionados aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.

Foram utilizados teores de borracha moída de 0, 5, 10, 20, 30 e 40%, em relação ao peso seco do solo, para as amostras de solo argiloso e de 0, 5 e 10%, para as amostras de solo arenoso. Os resultados mostraram que o teor de borracha influenciou o comportamento mecânico final dos compósitos. Nos compósitos de solo argiloso a inserção de borracha foi mais eficaz para tensões de confinamento até 200 kPa, sendo que para tensões maiores a presença de borracha foi prejudicial. O teor de borracha ótimo situou-se entre 10% e 20%. Para os compósitos de solo arenoso a inserção de borracha foi mais efetiva para tensões de confinamento entre 100 e 200 kPa e o teor de borracha ótimo esteve na faixa de 0% - 5%.

Calheiros (2013) realizou um estudo do comportamento de solos reforçados com adição de pérolas de EPS (poliestireno expandido) através de estudo experimental. Os solos utilizados foram: um solo argiloso de origem coluvionar, uma areia limpa, mal graduada e bentonita. Foram realizados ensaios de caracterização física e de caracterização mecânica, como ensaios de compactação proctor normal, ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID) e

ensaios de cisalhamento direto para buscar estabelecer padrões de comportamento que poderiam explicar a influência da adição de pérolas de EPS, relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Foram realizados ensaios triaxiais (CID) em amostras de solo argiloso compactadas na densidade máxima seca e umidade ótima, com teores de pérolas de EPS de 0%, 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1%, em relação ao peso seco do solo e os ensaios triaxiais CID em amostras de areia foram realizados para uma densidade relativa de 50% e umidade de 10%, com teores de pérolas de EPS de 0%, 0,50% e 0,75%, em relação ao peso seco do solo. Os ensaios de cisalhamento direto com bentonita foram realizados com teores de pérolas de EPS de 0%, 0,50% e 0,75%, em relação ao peso seco do solo. Com a pesquisa foi possível constatar que o tipo de solo, o teor de pérolas de EPS e o nível de tensão confinante influenciam positivamente o comportamento mecânico final dos compósitos com relação aos parâmetros de resistência, porém não há uma tendência de comportamento bem definida ao analisar cada fator independentemente. Portanto, o uso de pérolas de EPS em obras geotécnicas de carregamento estático contribuiria com o menor consumo de material natural e a consequente redução dos custos de transporte e volume de material mobilizado.

Cetin et al., (2006) realizaram ensaios de compactação em misturas de argila com chips de pneu grossos (coarse tire chips), entre 2 mm e 4,75 mm e chips de pneu finos (fine tire chips), contendo partículas menores que 0,425 mm, com o objetivo de determinar as características de compactação, peso específico seco máximo e umidade ótima do solo puro e compósitos. A partir dos resultados foi possível observar que para o solo puro, o peso específico seco máximo ( $\gamma_d$  máx) de 15,79 kn/m<sup>3</sup>, é obtido na umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ) de 19%. Os pesos específicos secos, tanto para os chips de pneu de maior granulação quanto para aqueles mais finos, decrescem com o aumento da porcentagem de resíduos de pneu. Para o resíduo mais grosso, a ( $\omega_{ót}$ ) aumenta com o aumento do teor de pneus, ao passo que o resíduo mais fino a ( $\omega_{ót}$ ) parece não sofrer influência do teor de pneus. Os autores concluíram que os pesos específicos secos dos compósitos preparados com ambos os tamanhos de resíduo de pneu foram menores que os encontrados para solos típicos.

Louzada (2015) realizou um estudo de solos reforçados com PET (polietileno tereftalato), onde foram utilizados três tipos de materiais, sendo: solo

coluviar, areia limpa e pouco graduada e bentonita. Para cada material foram realizados ensaios químicos e mecânicos (triaxiais drenados isotropicamente consolidados e cisalhamento direto) e a caracterização química. O ensaio triaxial foi realizado nas amostras de solo argiloso compactado na densidade seca máxima e teor ótimo de umidade com razões de 0, 10, 20 e 30% de pó de PET e 3,0 e 5,0% de PET triturado, em relação ao peso seco do solo. Os testes triaxiais em amostras de areia foram feitos para uma densidade relativa de 50% e 10% de teor de água, e com 0, 10 e 20% de PET triturado, por via seca do solo.

Os ensaios de cisalhamento direto com bentonita foram realizados com proporções de 0 e 30% de pó de PET e 3,0 e 5,0% de PET triturado, em relação ao peso seco do material. Os resultados mostraram que o teor de PET influenciou no comportamento mecânico final das misturas. Independentemente da granulometria do PET, as misturas apresentam um comportamento satisfatório, aumentando ou mantendo os parâmetros de resistência ao cisalhamento semelhantes ao solo puro. Para as misturas argilosas, com teor de 30% de pó de PET comparando com o teor de 5% de PET triturado, o PET triturado foi mais eficaz, uma vez que aumentou os parâmetros de resistência. Para misturas arenosas, a adição de PET é mais eficaz com o teor de 10% de pó de PET em menores tensões de confinamento. Para misturas de bentonita, a adição de PET é mais eficaz com o com 5% de PET triturado.

Durán Jaramillo (2016), realizou uma pesquisa utilizando a borracha de pneu triturada como reforço de solos, em duas diferentes granulometrias (chips e fibras), como material alternativo para o reforço de dois tipos de solos (areia e solo argiloso). Com este fim foram realizados ensaios mecânicos, tais como ensaios de compactação proctor standard, ensaios triaxiais do tipo consolidado e isotropicamente drenado e ensaios de adensamento unidimensional, para avaliar os efeitos da granulometria da borracha de pneu, triturada em chips e fibras (com os tamanhos médios de 4,6 mm e 2 mm, respectivamente) e do teor de borracha de pneu (5, 10% e 15% em relação à massa de solo seco), no comportamento mecânico de misturas de areia-borracha e de misturas solo argiloso borracha. Os resultados mostraram que tanto os chips como as fibras de pneu de borracha contribuem no aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de ambos os solos e aumentam a energia de deformação absorvida durante o cisalhamento. Ao analisar a resposta obtida em ambos os solos foi possível perceber que tanto para a argila

quanto para a areia, foi mais eficaz o reforço com 10% de fibras de borracha de pneu. Todos os compósitos estudados possuíam características de resistência que poderiam cumprir as exigências de determinadas obras geotécnicas (aterros sobre solos moles, reforço de taludes, solo de base de fundações superficiais). Portanto o uso da borracha de pneu como reforço de solos nestas obras contribuiria com o menor consumo de material natural, e conseqüente redução dos custos de transporte e volume de material mobilizado.

### 3 Estudo experimental

O programa experimental estabelecido nesta dissertação teve como objetivo avaliar o efeito da adição de borracha e de PET na resistência ao cisalhamento e nos parâmetros de adensamento da bentonita. Foram empregados os percentuais de 5% e 10% de borracha, sendo de 2 tipos, caracterizada como fibra e pó. Também foram realizados ensaios com PET para 3 tipos, sendo 5% e 10% para PET triturado e pó de PET. Já para a fibra de PET foram utilizados os percentuais de 0,5% e 0,7%, devido ao grande volume de material. Foi avaliado seu comportamento mecânico aplicando-se diferentes carregamentos, sendo 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa.

#### 3.1 Materiais utilizados na Pesquisa

##### 3.1.1 Bentonita

A bentonita (Figura 3.1) utilizada nesta pesquisa foi adquirida comercialmente no Rio de Janeiro. Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), essa bentonita pode ser classificada como uma argila. Os resultados da curva granulométrica e índices físicos foram obtidos por Louzada (2015) e estão apresentados no item 4.1.1.

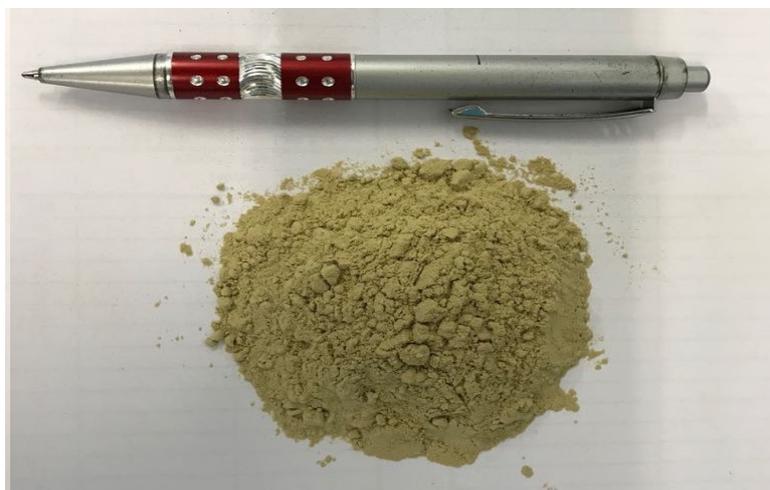


Figura 3.1 – amostra da bentonita utilizada na pesquisa.

### 3.1.2 Borracha moída de Pneu

A borracha moída pode ser obtida através de diferentes técnicas de processamento, diferentes tamanhos e formas de resíduos de pneu. Para a referida pesquisa, foram utilizados materiais oriundo da trituração de pneus inservíveis na composição de 50% em peso de veículos de passeio e 50% de pneus de veículos de carga. O material foi disponibilizado para a pesquisa pela empresa de reciclagem de pneus Ecobalbo reciclagem de pneus S.A, situada na região de Cravinhos, interior de São Paulo.

A determinação da granulometria de cada tipo de borracha foi realizada de acordo com a classificação estabelecida pela ASTM D 6270 (american society for testing and materials), sendo necessário a realização da análise granulométrica do material recebido, a partir da qual escolheu-se usar partículas com tamanho 2,0 mm para fibra e para valores variando de 0,2 mm a 2,0 mm com um diâmetro médio de 1,00 mm para o pó de borracha. A análise granulométrica está apresentada no item 4.1.2.

O pó de borracha de pneu utilizado na presente pesquisa é classificado como “pó de borracha malha 20”, obtido por moagem e selecionado em peneiras apropriadas (Szeliga, 2011). As figuras 3.2 e 3.3 apresentadas a seguir mostram os resíduos de borracha em suas diferentes granulometrias, sendo em fibra e pó, respectivamente.



Figura 3.2 – borracha em fibra utilizada na pesquisa.



Figura 3.3 – borracha em pó utilizada na pesquisa.

### 3.1.3 Polietileno Tereftalato

#### 3.1.3.1 PET Triturado

Os grãos de PET triturado obtidos durante pesquisa possuíam dois tamanhos distintos: passantes na peneira de 10 mm e na de 2 mm. Eles foram obtidos através do processo de trituração das garrafas PET por um equipamento triturador localizado no laboratório de estruturas e materiais da PUC Rio. O processo pode ser dividido em três etapas:

a) as garrafas PET são limpas, retirando a etiqueta e seu topo e a sua base são cortadas (figura 3.4).



Figura 3.4 – Garrafa PET limpa, sem topo e base.

O triturador, da marca Radial LaFrance, modelo SG-500F (figura 3.5), corta o material, utilizando cinco lâminas. As garrafas são colocadas no topo do equipamento (1), as lâminas as trituram até que elas passem pela peneira localizada na parte de baixo do equipamento (2), assim, o material é coletado em uma caixa (3). O processo de trituração é repetido para cada peneira até que o material alcance o tamanho desejado (Louzada, 2015).

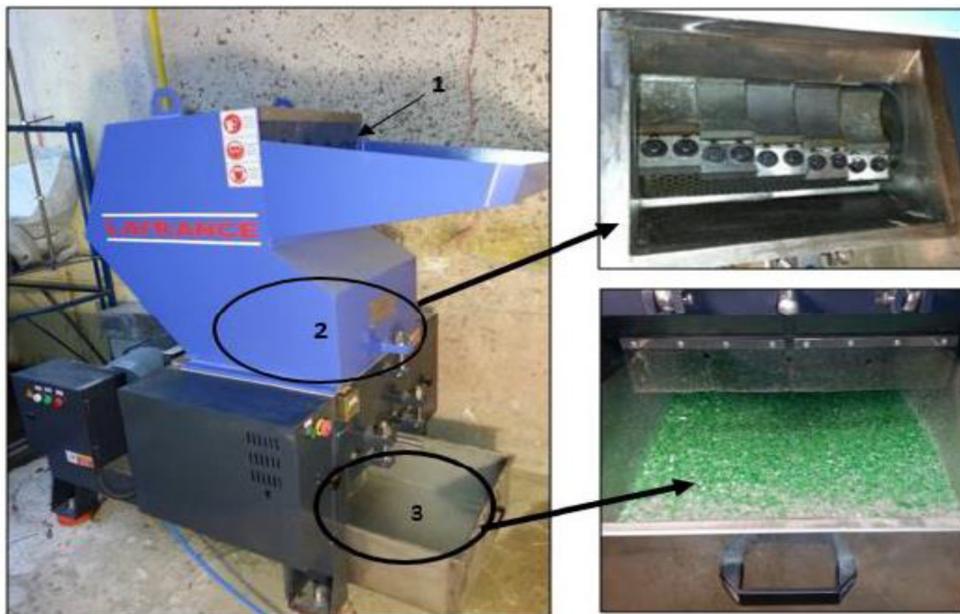


Figura 3.5 – Equipamento utilizado para triturar as garrafas PET: (1) Topo onde colocam-se as garrafas PET; (2) Lâminas que trituram as garrafas; (3) Caixa em que se coletam os fragmentos de PET (Louzada, 2015).

b) para o corte do PET de 10 mm foi necessário triturar o material três vezes, para que o material ficasse mais homogêneo. Isso aconteceu porque uma parte do PET caía pela lateral das peneiras. Além disso, como o PET triturado possui um formato lamelar e tem flexibilidade, algumas partículas de maiores tamanhos passavam pela peneira. O PET de 2 mm, por sua vez, foi triturado e passado primeiro pela peneira de 10 mm, para que facilitar o corte em tamanhos menores. A figura 3.6 mostra a peneira e a aparência do PET triturado retido na peneira de 10 mm.



Figura 3.6 - Peneira de 10 mm e PET triturado de 10 mm.

c) A peneira de 10 mm, então, é substituída pela peneira de 2 mm. Para que o material ficasse homogêneo, foi necessário passar pelo triturador pelo menos cinco vezes (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Peneira de 2 mm e PET triturado de 2 mm.

### 3.1.3.2 Pó de PET

O pó de PET utilizado nesta pesquisa (figura 3.8) foi fabricado em campina grande, paraíba. Este mesmo material foi utilizado no estudo de Silva *et al.* (2013) e é resultado de um método específico de trituração que fabrica partículas finas de PET.

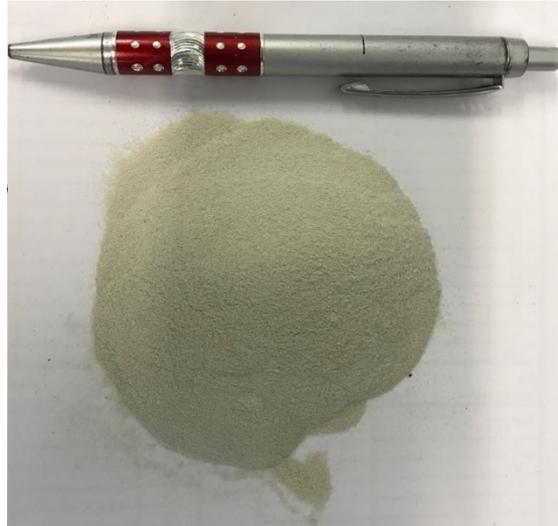


Figura 3.8 – Pó de PET utilizado na pesquisa.

De acordo com Melo (2004), para produzir o pó de PET, normalmente passa-se pelo processo que pode ser descrito em seis etapas:

- 1) a coleta e seleção de garrafas com a retirada dos rótulos e tampas e a lavagem em água;
- 2) é feito o processo de granulação, quando as garrafas são moídas em moinhos de “facas”, produzindo “flakes” de PET, que é o PET triturado;
- 3) a aglomeração é realizada e o PET triturado, por possuírem baixa densidade, recebem um processamento térmico com a finalidade de diminuir o seu volume e aumentando, assim, sua densidade;
- 4) a remodelagem é feita para preparar o material para a etapa de moagem;
- 5) a moagem consiste em cortar o material estrudado por rotomoldagem, deixando-os em uma forma arredondada;
- 6) a micronização é feita reduzindo o material a pó com partículas passantes na peneira 0,42 mm.

Como exemplo do processo de micronização, a empresa alemã pallmann esmaga o material em um tamanho de pó, usando a máquina PKM (figura 3.9)



Figura 3.9 – Máquina PKM empresa Pallmann.

Método de operação da máquina Pallmann pkm (figura 3.10): recipiente de armazenamento (1), unidade de dosagem (2), o material a ser moído é alimentado no moinho (3). O material pulverizado é transportado para fora do moinho por meio de um ventilador (4) e é transportado através de um separador de ciclone (5) com a câmara rotativa a jusante (6) para uma unidade de peneiramento especial (7). O material grosso da tela é reintroduzido no moinho para redução adicional de tamanho.

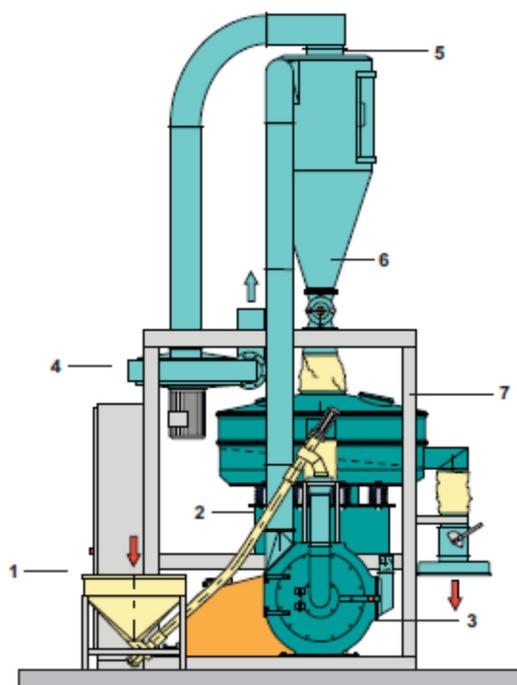


Figura 3.10 – Layout da máquina PKM empresa Pallmann.

### 3.1.3.3 Fibra de PET

As fibras utilizadas nesta pesquisa são 100% confeccionadas pela indústria têxtil a partir da reciclagem de resíduos constituídos pelo polímero polietileno tereftalato, comumente conhecido como PET. Foram cedidas pela empresa M&G fibras Brasil Ltda. para a realização desta pesquisa e possuem o nome comercial de Alya Eco. A figura 3.11 apresenta a fibra PET utilizadas na presente pesquisa.

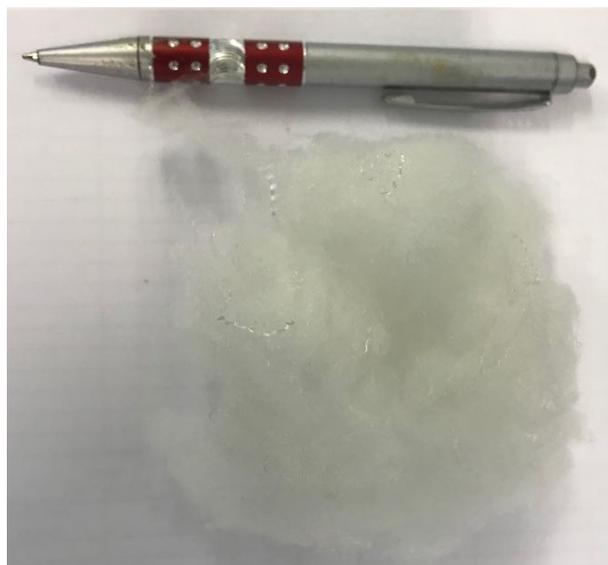


Figura 3.11 – Fibra de PET utilizado na pesquisa.

A tabela 3.1 abaixo mostra informações da fibra utilizada nesta pesquisa, as quais foram cedidas pelo fabricante do material.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas das fibras PET (Fonte: M&G Fibras Brasil Ltda.)

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Alongamento até a ruptura (%)
1,27	81	2800	70

Após a obtenção do PET triturado, o material passa por um processo de extrusão à 300°C, transformando-se em pasta. Todo o PET é enviado para uma bomba, passando por microfuros, onde são lubrificadas e reunidas em tambores.

Os microfuros determinam a espessura que a fibra terá. Saindo dos tambores, o PET passa por um processo de estiragem, termofixação e secagem. A finalização da produção se dá no processo de carda, onde as fibras são

embaladas em fardos para sua destinação final que podem servir para: placa de isolamento acústico e térmico, placa de captação solar, toalha, roupão, enchimento de colchão, etc.

### **3.1.4 Água**

A água utilizada na preparação dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto para a bentonita e para misturas foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

### **3.1.5 Misturas - Bentonita x Borracha**

Os diferentes percentuais e granulometrias foram inseridos separadamente, ou seja, cada mistura foi composta de um percentual e granulometria, com o intuito de viabilizar a avaliação do tamanho e/ou forma inserida na bentonita.

Para cada tipo de mistura de bentonita e resíduo de borracha de pneu foram preparadas 3 amostras, com o objetivo de analisar o comportamento mecânico dos compósitos em relação ao teor de resíduo empregado. Em ambas as misturas foram utilizados os teores de 5% e 10% de resíduos de pneu (fibra e pó), calculados em relação ao peso da bentonita seca. A escolha destes teores foi baseada nos resultados observados em pesquisas anteriores que utilizaram tamanhos de partículas similares para estudar o efeito do teor de borracha nos parâmetros de resistência de solos reforçados com resíduos de borracha de pneu.

As misturas foram preparadas com umidade de 170%, correspondente a aproximadamente 50% do limite de liquidez. Estes teores foram determinados a partir do ensaio de cisalhamento realizado no bentonita pura (Louzada, 2015). Esses valores foram semelhantes aos encontrados por Casagrande (2005).

Esses teores foram determinados com o intuito de analisar a evolução dos parâmetros de resistência de cada tipo de misturas, a fim de estabelecer uma melhoria máxima com o maior volume de resíduo, já que, um dos objetivos do uso deste material como reforço, é dar uma destinação ambientalmente correta para a maior quantidade possível.

A Tabela 3.2 apresenta as abreviaturas utilizadas para identificar cada tipo de mistura. Foram realizados 36 ensaios de cisalhamento direto até se encontrar uma média confiável para as misturas relacionadas.

Tabela 3.2 – Misturas realizadas com a Borracha.

Material / Mistura	Bentonita (%)	Borracha (%)		Símbolo
		Fibra	Pó	
Bentonita	100	-	-	B100%
Mistura 1	95	5	-	B95%BF5%
Mistura 2	90	10	-	B90%BF10%
Mistura 3	95	-	5	B95%BP5%
Mistura 4	90	-	10	B90%BP10%

### 3.1.6

#### Misturas - Bentonita x PET

As misturas envolvendo PET foram preparadas nas mesmas condições e objetivos já citados nas misturas envolvendo borracha, sendo preparadas 3 amostras para cada mistura. Foram utilizados os teores de 5% e 10% de PET triturado e pó de PET. Para a fibra de PET foi necessário a redução desse percentual devido ao maior volume de material, sendo assim, foi utilizado 0,5% e 0,7% em relação ao peso seco da bentonita.

A Tabela 3.3 apresenta as abreviaturas utilizadas para identificar cada tipo de mistura. Foram realizados 33 ensaios de cisalhamento direto até se encontrar uma média confiável para as misturas relacionadas.

Tabela 3.3 – Misturas realizadas com a PET.

Material / Mistura	Bentonita (%)	PET (%)			Símbolo
		Triturado	Fibra	Pó	
Bentonita	100	-	-	-	B100%
Mistura 7	95	-	-	5	B95%PPET5%
Mistura 8	90	-	-	10	B90%PPET10%
Mistura 9	95	5	-	-	B95%PETT5%
Mistura 10	90	10	-	-	B90%PETT10%
Mistura 11	99,05	-	0,5	-	B99,5%FPET0,5%
Mistura 12	99,03	-	0,7	-	B99,3%FPET0,7%

## 3.2 Métodos e procedimentos de ensaio

Neste item serão apresentados as metodologias e procedimentos utilizados para as análises físicas e mecânicas da bentonita e das misturas. O objetivo deste programa experimental foi a caracterização dos materiais para conhecer seu comportamento e posteriormente realizar os ensaios mecânicos (ensaios de cisalhamento direto e ensaio de adensamento) a fim de conhecer seus parâmetros de resistência e ter uma ideia de como as misturas podem se comportar.

### 3.2.1 Ensaio de Caracterização Física

Com a finalidade de determinar as propriedades índices dos materiais envolvidos na pesquisa, foram executados ensaios de caracterização física no laboratório de Geotecnia e meio ambiente da PUC-Rio. Os materiais foram preparados segundo o preconizado nas normas técnicas brasileiras (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT). Os ensaios realizados seguiram os métodos indicados pelas seguintes normas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.
- NBR 12004/1990 - Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos;
- NBR 12051/1991 - Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.

### 3.2.1.1 Densidade Real dos Grãos

Não foi possível determinar a densidade real dos grãos da bentonita a partir dos procedimentos da NBR 6508/1984 da ABNT citada anteriormente, uma vez que a bentonita apresenta granulometria muito fina. Sendo assim, a água adicionada aos picnômetros para a realização do ensaio não conseguia penetrar e molhar toda amostra (25g). Em função disso, formava-se uma camada de material seco aderida às paredes no fundo dos picnômetros, além da formação de grumos do material. Além de ser um material de granulometria fina, a bentonita sódica é altamente expansiva, causando problemas como formação de camada de solo seco no fundo dos picnômetros, formação de grumos, inchamento excessivo e perda de material durante a aplicação do vácuo, o que tornou impraticável o ensaio com uma massa de material de 25g. Calheiros (2013) desenvolveu um método alternativo que possibilitou realizar este teste na bentonita o qual é descrito a seguir:

- Utilização de uma massa de material de 10g;
- Adição e homogeneização do material aos poucos dentro do picnômetro já tarado com uma determinada quantidade de água. Dessa maneira foi possível molhar todo o material e evitou-se a formação da camada de material seco aderido ao fundo do picnômetro;
- Dispersão do material já dentro dos picnômetros, durante 30 minutos, através de um aparelho de ultrassom para evitar a perda de material e conseguir uma dispersão mais efetiva (Figura 3.12-a);
- Retirada do ar através da aplicação do vácuo com auxílio de uma bomba (Figura 3.12-b).

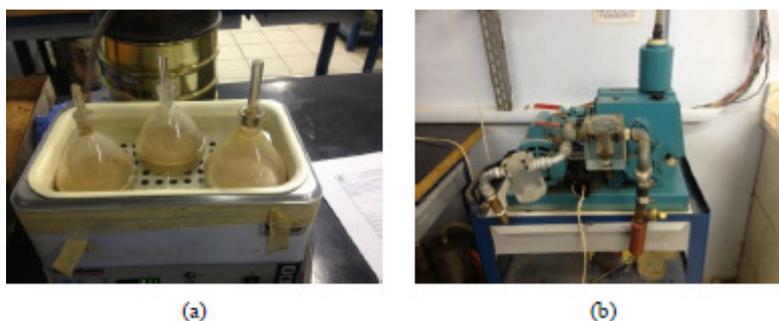


Figura 3.12 – (a) Procedimento de dispersão em aparelho de ultra-som e (b) Bomba a vácuo (Calheiros, 2013)

Após os procedimentos foi possível chegar em um valor de Gs de 2,90 g/cm<sup>3</sup>.

A densidade dos grãos da borracha de pneu foi estimada a partir dos dados reportados por diferentes autores que realizaram ensaios de caracterização deste material. Valores de massa específica de pedaços de pneu sem aço encontrados por (Zornberg et al., 2004) estiveram próximos a 1,15 g/cm<sup>3</sup>. (Franco, 2012) obteve um valor de 1,11 g/cm<sup>3</sup> em pesquisa realizada com desbastes de pneu. De acordo com estes resultados e considerando o tamanho dos resíduos empregados no presente trabalho, optou-se por adotar um valor de Gs de 1,11 g/cm<sup>3</sup>.

### **3.2.1.2 Limites de Atterberg**

Os limites de Atterberg, limite de liquidez e limite de plasticidade da bentonita foram determinados utilizando-se o material passante na peneira #40 (0,425 mm), segundo as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 da ABNT.

### **3.2.1.3 Análise Granulométrica**

Observou-se que para determinar a curva granulométrica da bentonita através do processo de sedimentação, os mesmos problemas mencionados anteriormente foram observados (Louzada, 2015).

Primeiramente, o teste foi realizado seguindo a descrição da NBR 7181/1984 da ABNT, porém uma grande quantidade de material ficou presa nas paredes da proveta causando perda de material. Outro problema encontrado durante o teste de sedimentação foi que o hexametáfosfato de sódio deveria agir como defloculante, mas isso não aconteceu e o material floculou.

Para evitar este problema, 125 ml de hexametáfosfato de sódio foram misturados com 200 ml de água e 50 g de bentonita. Esta mistura foi deixada a repousar durante 24 horas e depois foi realizado o teste de sedimentação. Após este procedimento, todo o material foi lavado e nada foi retido na malha # 200.

## 3.2.2 Ensaio de Caracterização Mecânica

### 3.2.2.1 Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com a bentonita, com as misturas de borracha e PET, com objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento do solo. Essa resistência é obtida através da obtenção dos parâmetros coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ).

Estes ensaios foram realizados segundo os métodos descritos pela norma ASTM D 3080/2004. A seguir será descrito o método de preparação utilizado para a bentonita.

Para confecção dos corpos de prova da bentonita e misturas, a compactação do material inicialmente foi realizada diretamente na caixa de cisalhamento e de forma manual, conforme orientação de estudos anteriores. No entanto tal método manual não garantia a padronização da espessura das amostras.

As amostras foram moldadas no molde para amostras indeformadas (Figura 3.13 – a) apoiadas em uma base acrílica com vaselina aplicada (Figura 3.14 – b), a fim de evitar perda da amostra.

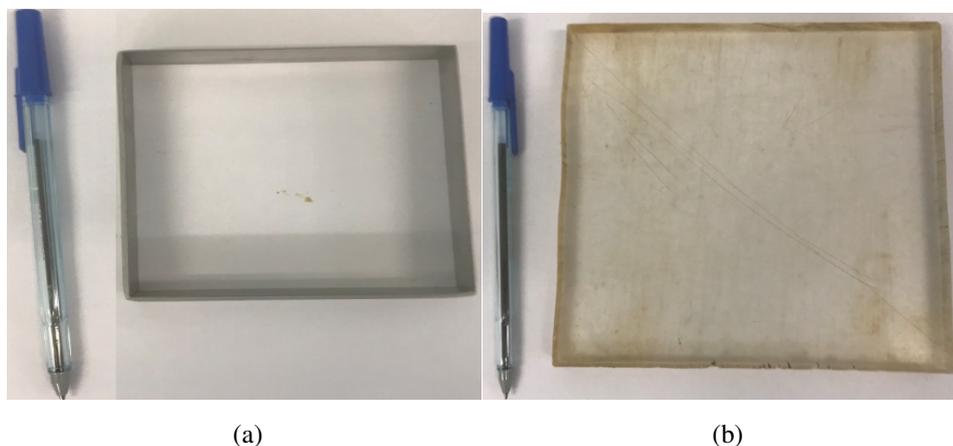


Figura 3.13 – (a) Molde e (b) Base acrílica

Após a montagem o material foi transpassado para a caixa de cisalhamento direto. Tal procedimento garantiu a padronização da espessura das amostras. Os corpos de prova ficaram em média com as medidas de: 1,96 cm de altura e 10,15 cm de lado, área 103,02 m<sup>2</sup> e volume total inicial 201,92 cm<sup>3</sup>

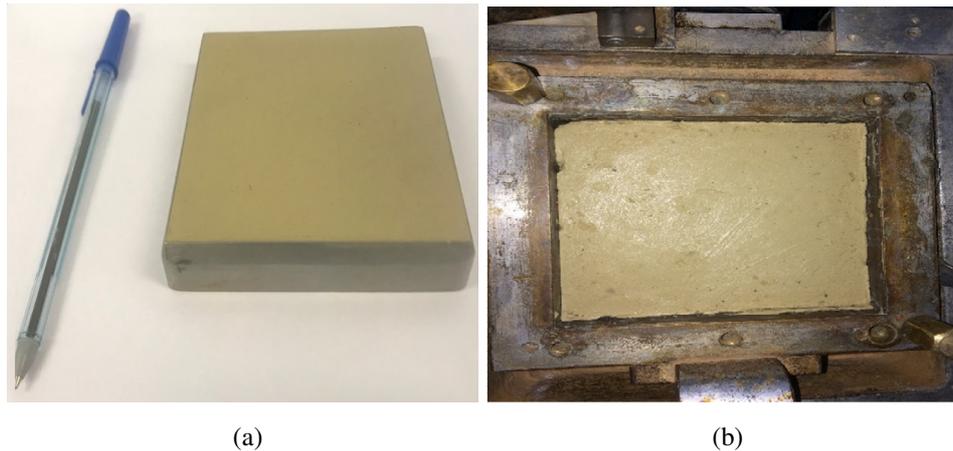


Figura 3.14 – (a) Amostra moldada e (b) Amostra na caixa de cisalhamento

As amostras de bentonita foram preparadas com 170% de umidade, que corresponde a um índice de vazios de 4,93.

Para garantir que o material ficasse com todas as propriedades adequadas, calculou-se a quantidade certa de material seco que deveria ser adicionado à caixa de cisalhamento (120g), realizando-se em seguida a mistura com a quantidade de água (170%) e posteriormente com as porcentagens de borracha (5% e 10%) e PET (5%, 10%, 0,5% e 0,7%).

Para realização do ensaio, o corpo de prova foi colocado na caixa de cisalhamento metálica. A caixa é dividida horizontalmente em duas metades e a força normal é aplicada a partir do topo da caixa de cisalhamento no corpo de prova. A força de cisalhamento é aplicada movendo-se uma metade da caixa em relação à outra para provocar a ruptura. As caixas superior e inferior são distanciadas de 5,0 mm antes de se dar início à fase de cisalhamento do ensaio, para que possa haver o deslocamento relativo entre elas. Acima e abaixo do corpo de prova são colocadas placas ranhuradas, que fornecem atrito ao solo impedindo que este deslize quando aplicada a força horizontal, papéis filtro, para impedir o carreamento de partículas, e pedras porosas, para que a drenagem possa ocorrer livremente, estando o corpo de prova completo ou parcialmente saturado. O ensaio de cisalhamento direto realizado ocorreu com o controle do deslocamento relativo entre as partes da caixa, onde uma taxa constante de deslocamento cisalhante é aplicada na metade superior da caixa por um motor que atua por meio de engrenagens a uma velocidade determinada por um fator que vai de acordo com a carga aplicada verticalmente. Essa velocidade foi calculada através dos dados da fase inicial do ensaio, chamada

fase de adensamento, onde o corpo de prova é submetido somente à tensão vertical, e mede-se a variação de altura com o tempo, até que está se estabilize. Através de um gráfico de deslocamento vertical versus raiz do tempo ( $t$ ), obtém-se o valor de  $t^{100}$ , correspondente a 100% do adensamento, e calcula-se a velocidade a ser adotada na fase de cisalhamento. O tempo de adensamento foi estipulado em 24 horas.

Na fase de cisalhamento, a ruptura sofrida pelo corpo de prova ocorre ao longo do plano de divisão da caixa. O deslocamento horizontal da metade superior da caixa é medido por um LVDT (linear variable differential transformer) horizontal, que funciona como um sensor para medição de deslocamento linear. As variações da altura do corpo de prova, ou seja, as variações do volume do mesmo ao longo do ensaio são obtidas através das leituras no LVDT vertical. O anel de carga mede a força horizontal variável à qual o corpo de prova está sendo submetido. Os ensaios foram repetidos em corpos de prova similares, para cada mistura. Adotou-se os valores de 50, 100 150 e 200 kPa para as tensões normais aplicadas, porém observou-se que não foi possível a realização do ensaio em tensões acima de 150 kPa. O material apresentou uma rápida deformação vertical e vazou pela caixa de cisalhamento, o que inviabilizou a execução do ensaio.

Através do gráfico da tensão cisalhante máxima, que indica o momento da ruptura, versus tensão normal, pré-definida, determinam-se as envoltórias de ruptura e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. A figura 3.15 ilustra o equipamento de cisalhamento direto utilizado na presente pesquisa.



Figura 3.15 – Equipamento de cisalhamento direto – Puc-Rio

### 3.2.2.2 Ensaio de Adensamento Edométrico

O ensaio foi escolhido para obter os parâmetros de adensamento da bentonita, no caso que se comporta como um solo de baixa permeabilidade.

O ensaio de adensamento edométrico é o mais antigo e mais conhecido para a determinação de parâmetros de compressibilidade do solo. O ensaio consiste na compressão de uma amostra de solo, compactada ou indeformada, pela aplicação valores crescentes de tensão vertical, sob a condição de deformação radial nula.

As condições de contorno podem ser observadas na figura 3.16 abaixo:

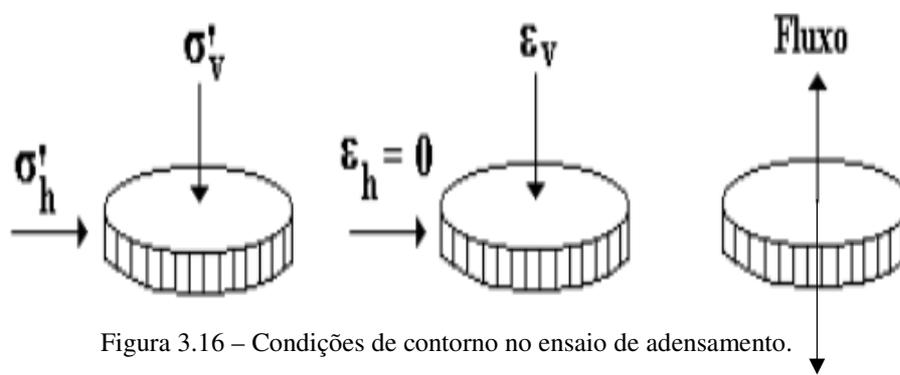


Figura 3.16 – Condições de contorno no ensaio de adensamento.

Antes de ser realizado o ensaio de adensamento, foi realizada a preparação de todo equipamento, verificou-se as condições da prensa, foram realizados os ajustes necessários, houve a verificação do extensômetro a ser utilizado (sensibilidade de 0,01 mm/div.), as pedras porosas foram saturadas em água destilada, os conjuntos de pesos a serem utilizados em todo o incremento de carga foram separados e deixados à mão.

Na fase de moldagem da amostra, mediu-se o diâmetro e a altura do anel de adensamento com um paquímetro e determinou-se seu peso, sendo de 7,12 cm, 2,0 cm e 46,15 gf, respectivamente.

A parede interna do anel foi lubrificada com vaselina de silicone e cuidadosamente iniciou-se a moldagem da amostra diretamente no anel de adensamento de forma manual. As amostras foram preparadas de forma manual a uma umidade de 170% e moldadas diretamente no anel (figura 3.17). A umidade foi a mesma realizada no ensaio de cisalhamento direto.

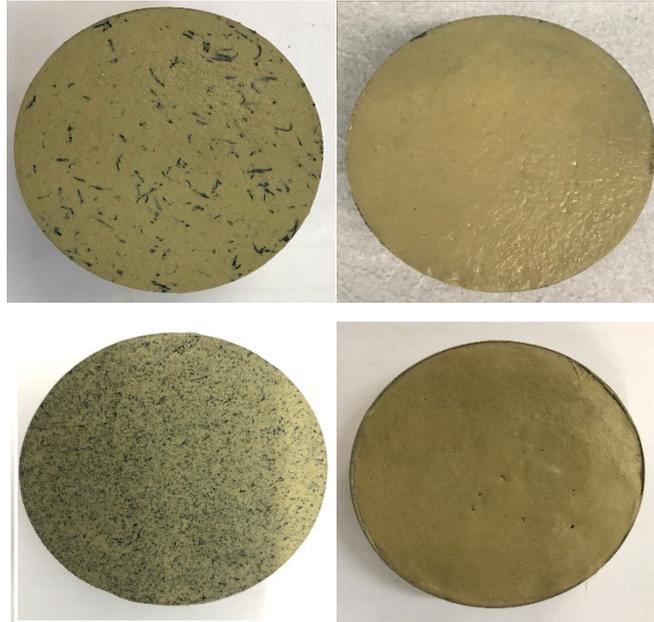


Figura 3.17 – Amostras moldadas no anel de adensamento utilizado.

A amostra com o anel foi colocada cuidadosamente dentro da célula de adensamento sobre uma pedra porosa saturada e uma lâmina de papel filtro entre a amostra e a pedra. Em seguida colocou-se uma outra lâmina de papel filtro e a placa de carregamento, que tem uma pedra porosa acoplada.

Foi assegurado que a pedra porosa superior entrou livremente no anel, evitando assim, possíveis distorções no resultado, podendo então o ensaio ser conduzido satisfatoriamente. Colocou-se a célula de adensamento na prensa, o extensômetro foi posicionado na leitura máxima e o braço da prensa foi equilibrado.

Aplicou-se o primeiro estágio de carregamento que funciona como uma carga de ajuste, ou pré- carga, que não influenciou nos cálculos dos parâmetros. Para a referida pesquisa foram realizadas 5 etapas de carregamento, seguindo de 4 etapas de descarregamento, sendo para o carregamento as tensões de 2,5 kPa, 39,38 kPa, 76,25 kPa, 113,13kPa, 150 kPa e 113,13 kPa, 76,25 kPa, 39,38 kPa e 2,5 kPa para descarregamento.

Mesmo com a carga de ajuste, foi mantido 24h para a colocação do próximo carregamento. Após as 24h aplicou-se o primeiro incremento de carga e simultaneamente se iniciou as leituras no extensômetro nos tempos indicados na seguinte sequência: 0, 0.25, 0.5, 1, 2. 4, 8, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 24 horas. A duração dos incrementos de carga foi mantida em 24 horas.

Ao final do ensaio o anel foi desmontado do equipamento e levado para estufa para determinação da umidade final.

Com os valores das tensões verticais de adensamento e os respectivos índices de vazios, plotou-se a curva “índice de vazios versus log da tensão vertical efetiva”, a partir da qual, pode se obter parâmetros de adensamento tais como: coeficiente de adensamento vertical, condutividade hidráulica e coeficiente de variação volumétrica.

As leituras de deformação x tempo foram realizadas para cada incremento de carga e foram plotadas em um gráfico de  $\sqrt{t}$ . A partir dessas representações foi possível determinar o tempo de leitura correspondente a 90% de adensamento, que é usado no cálculo do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) para cada incremento de carga a partir do Método de Taylor a partir da formula abaixo:

$$c_v = \frac{0,848.(H_{50})^2}{t_{90}} \quad \text{Equação 1}$$

O valor de  $H_{50}$  pode ser obtido a partir da média entre a altura inicial e final no carregamento desejado.

O Coeficiente de compressibilidade ( $a_v$ ) foi obtido a partir da equação:

$$a_v = \frac{-\Delta e}{\Delta \sigma'_{v1}} \quad \text{Equação 2}$$

O Coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $m_v$ ) foi obtido a partir da equação:

$$m_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_{v1}} \frac{1}{(1+e_0)}, e_{100} = e_0 - \Delta e \quad \text{Equação 3}$$

$$E_{oed} = \frac{1}{m_v} \quad \text{Equação 4}$$

A partir da obtenção do valor do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) foi possível calcular o valor da permeabilidade do material puro e das misturas, através da equação 5 citada abaixo:

$$k = \gamma_w \cdot m_v \cdot c_v \quad \text{Equação 5}$$

A tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_p$ ) foi calculada pelo método de Pacheco e Silva. Pinto (1992) mostrou que a construção de Casagrande depende da escala do desenho ao passo que a construção de Pacheco e Silva não sofre influência da escala utilizada. A figura 3.18 demonstra o procedimento para obtenção da  $\sigma'_p$ . Os resultados deste ensaio são discutidos no item 4.2.2.

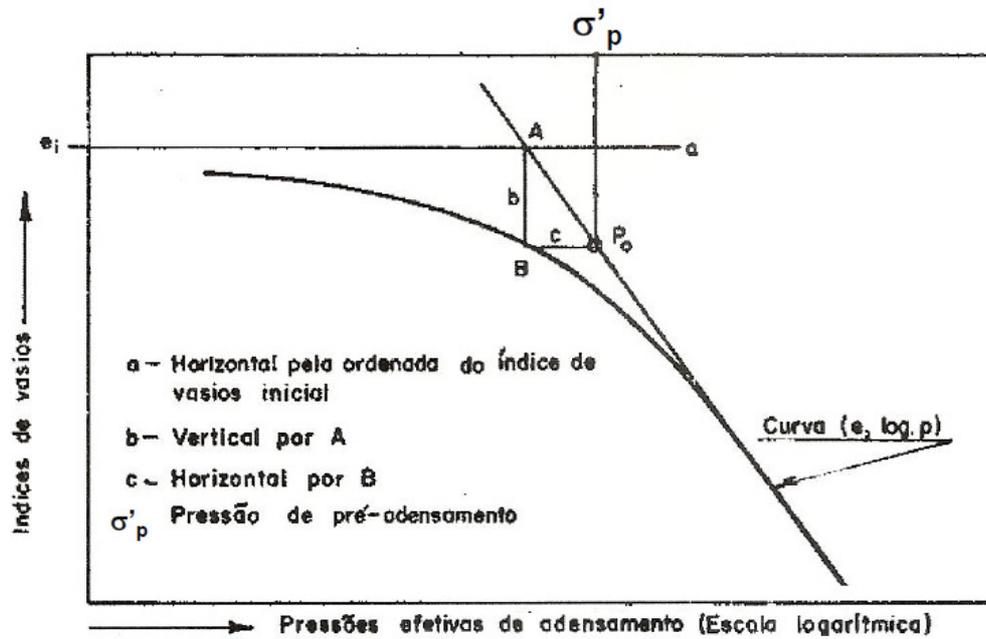


Figura 3.18 – Curva para obtenção da  $\sigma'_p$ .



Figura 3.19 – Equipamento de adensamento – Puc-Rio.

## **4**

### **Resultados e Análises**

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios descritos no capítulo 3 para as amostras de bentonita pura e para as misturas, sendo de bentonita com borracha em pó e fibra (5% e 10%), bentonita com pó de PET e PET triturado (5% e 10%) e bentonita com fibra de PET (0,5% e 0,7%).

Inicialmente serão expostos e analisados os resultados realizados na bentonita pura, seguido dos ensaios executados nas misturas com borracha com suas diferentes granulometrias e percentuais, logo após, os ensaios executados nas misturas com PET com suas diferentes granulometrias e percentuais, todos para a avaliação do comportamento mecânico. A partir dos resultados será verificado se houve uma melhora significativa da resistência ao cisalhamento e nos parâmetros de adensamento das misturas, quando comparadas com o material puro, podendo ser proposto a utilização como barreira impermeabilizante de aterros sanitários.

#### **4.1**

##### **Ensaio de Caracterização Física**

##### **4.1.1**

###### **Bentonita**

###### **Densidade relativa**

O valor do Gs para a Bentonita foi obtido através da média aritmética de quatro determinações, sendo que a variação máxima foi de 1,1 %. O valor do Gs encontrado foi 2,90.

###### **Análise Granulométrica**

A curva granulométrica da bentonita apresentada por Louzada (2015), foi obtida através de ensaios de sedimentação (figura 4.1).

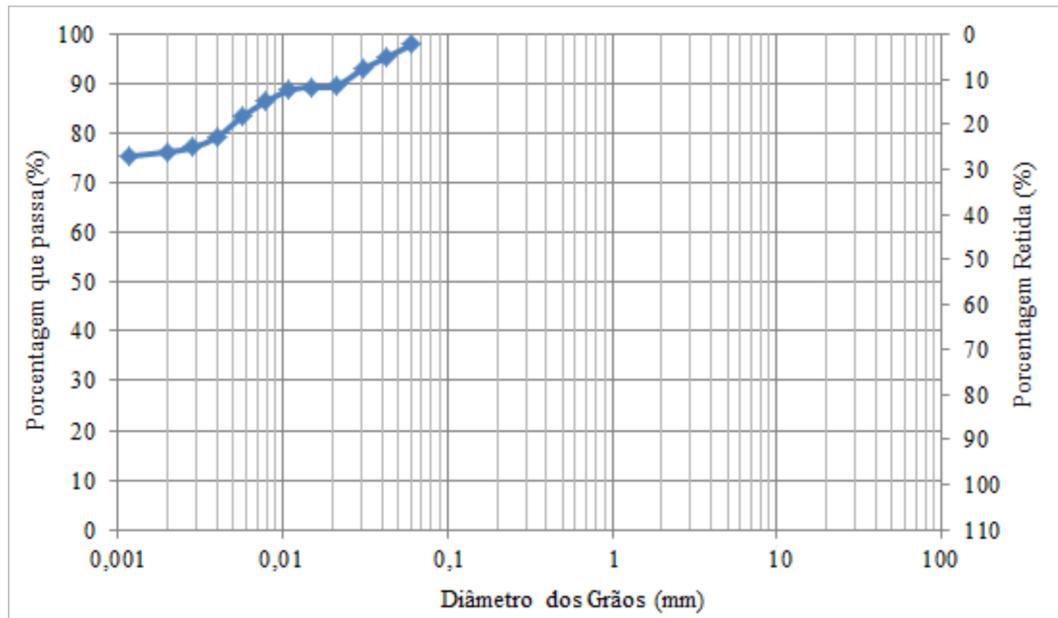


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica da bentonita (Louzada, 2015)

### Limites de Atterberg

A partir dos resultados obtidos no laboratório, tem-se que o Limite de Liquidez da bentonita é igual a 368,4% e o limite de plasticidade igual a 53,7%, resultando em um índice de plasticidade igual a 314,7% ( $IP = LL-LP$ ).

#### 4.1.2 Borracha Moída

##### Densidade relativa (Gs)

De acordo como Venkatappa & Dutta, 2006; Ahmed, 1993; Edil & Bosscher, 1994; Foose et al., 1996), a densidade relativa de tiras de pneus varia entre 1,02 e 1,26, dependendo da quantidade de resíduo de aço presente no material.

Para borracha com conteúdo de metal, tem-se um valor médio igual a aproximadamente 1,22, e para o material puro, este se aproxima de 1,15 (Szeliga, 2011).

Yang et al. (2002) realizou ensaios para determinar a densidade relativa de partículas de borracha que possuíam tamanho entre 2,0 e 10,0 mm, sendo 1,15 o valor médio.

Wu et al. (1997) utilizou partículas de borracha de diferentes tamanhos para determinar a resistência ao cisalhamento através de ensaios laboratoriais. Para as partículas de borracha de tamanho máximo 2,0 mm (da empresa The Baker Rubber Co) o peso específico foi de 1,12 gf/cm<sup>3</sup>. Os valores do peso específico das partículas de borracha apresentados por estes autores se situam dentro de um pequeno intervalo, sendo a variação máxima para a borracha pura de 0,03.

A densidade dos grãos da borracha de pneu foi estimada a partir dos dados reportados por diferentes autores que realizaram ensaios de caracterização deste material. Valores de massa específica de pedaços de pneu sem aço encontrados por (Zornberg et al., 2004) estiveram próximos a 1,15 g/cm<sup>3</sup>. (Franco, 2012) obteve um valor de 1,11 g/cm<sup>3</sup> em pesquisa realizada com desbastes de pneu. De acordo com estes resultados e considerando o tamanho dos resíduos empregados no presente trabalho, optou-se por um valor de Gs de 1,11.

### Análise Granulométrica

A figura 4.2 apresenta a curva granulométrica da borracha moída (0,2 a 2,0 mm) obtida por Szeliga (2011).

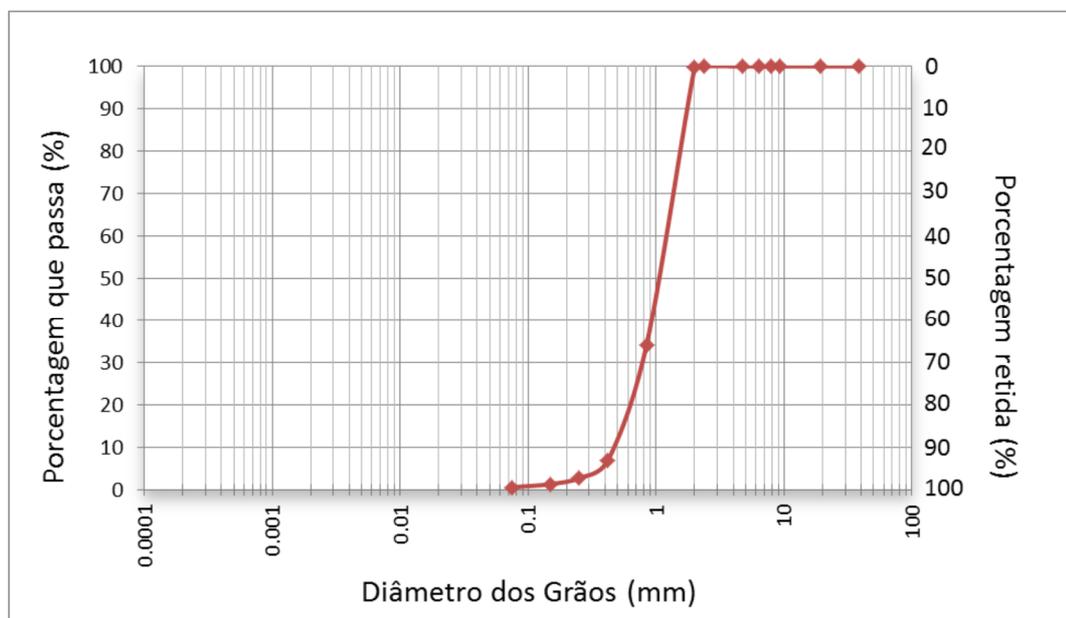


Figura 4.2 - Curva granulométrica da borracha moída 0,2 a 2,0 mm (Szeliga, 2011)

### 4.1.3 Pó de PET

A caracterização física do PET utilizado no presente estudo foi obtida por Louzada (2015), que utilizou este em sua pesquisa.

#### Densidade relativa (Gs)

O PET fino triturado estudado é um material muito fino, proveniente de um processo de micronização. As propriedades do Pó de PET são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Índices do Pó de PET (Louzada, 2015)

Índices Físicos	Pó de PET
Densidade relativa (Gs)	1,44
Coefficiente de Uniformidade (Cu)	14
Coefficiente de Curvatura (Cc)	4,6
Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ )	0,01 mm
Diâmetro Médio ( $D_{50}$ )	0,12 mm
Índice de Vazios Mínimo ( $e_{\min}$ )	0,69
Índice de Vazios Máximo ( $e_{\max}$ )	1,27

#### Análise Granulométrica

A figura 4.3 apresenta a curva granulométrica do PET triturado e do pó de PET. Segundo Louzada (2015) houve uma dificuldade no peneiramento, pois o PET triturado é laminar, flexível e leve. Por esta razão não foi possível o peneiramento mecânico. Observou-se que no peneiramento manual alguns pedaços de PET triturado passavam pelas peneiras dobrando-se, assim, concluiu-se que as curvas plotadas podem não mostrar o resultado “real” do material.

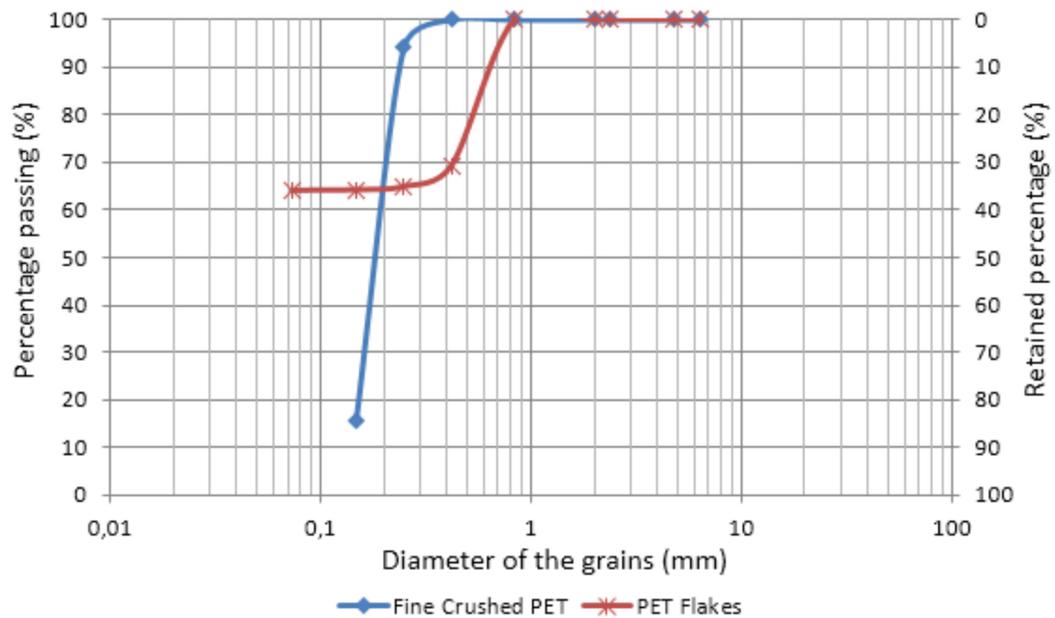


Figura 4.3 - Curva granulométrica do pó de PET e PET triturado (Louzada,2015)

## 4.2 Ensaio de Caracterização Mecânica

### 4.2.1 Ensaio de cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados na bentonita pura e misturas bentonita-PET e bentonita-Borracha, aplicando-se as tensões verticais de 50, 100 e 150 kPa.

Estes ensaios foram feitos para determinar a resistência ao cisalhamento do solo e das misturas.

#### 4.2.1.1 Bentonita

A figura 4.4 mostra os gráficos da tensão cisalhante e deslocamento vertical x deslocamento horizontal da bentonita.

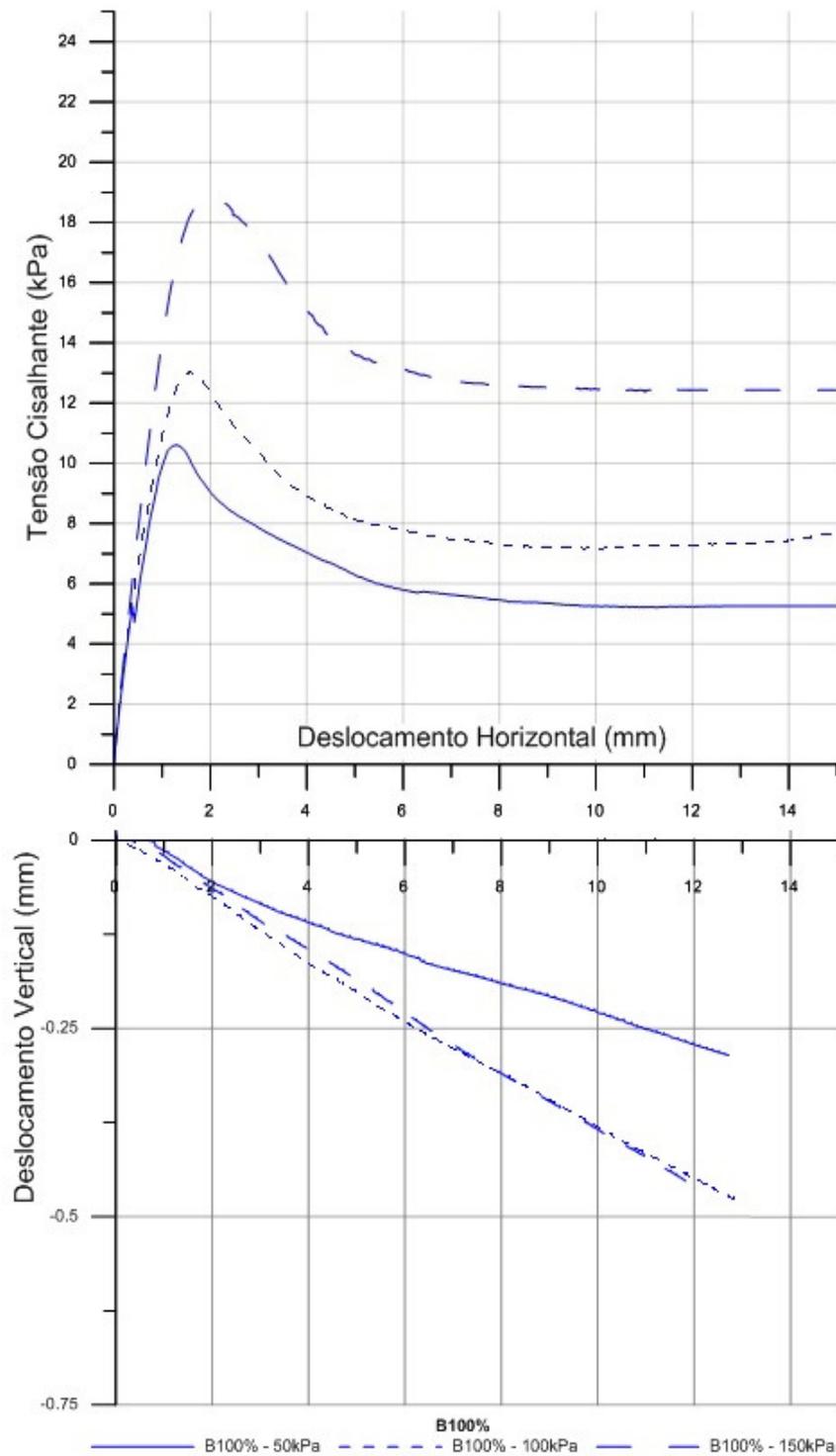


Figura 4.4 - Gráfico de tensão cisalhante e desl. vertical x desl. horizontal para a bentonita.

A figura 4.5 mostra as envoltórias de resistência para a bentonita.

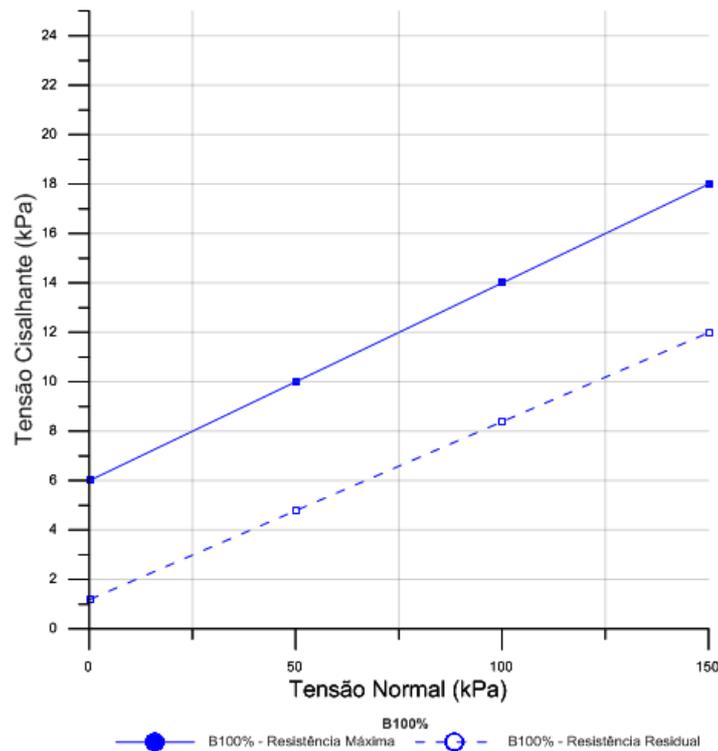


Figura 4.5 – Envoltória de resistência da bentonita.

Tabela 4.2 – Parâmetros de resistência bentonita.

Mistura	Resistência de Pico		Resistência Residual	
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito(°)	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito(°)
B100	6	4,6	1,2	4,1

#### 4.2.1.2 Bentonita x Borracha

A figura 4.6 mostra os gráficos da tensão cisalhante e deslocamento vertical x deslocamento horizontal da bentonita x borracha em fibra (5% e 10%).

A partir dos gráficos pode se concluir que para as misturas com 5% de borracha em fibra, para todas as tensões normais aplicadas (50kPa, 100kPa e 150kPa), há um aumento na resistência de pico quando comparado com o material puro. Para a tensão normal de 50kPa, além do aumento da resistência de pico, o pós pico tende a se manter maior que as tensões da bentonita pura. Há uma elevação na resistência residual. No gráfico de deslocamento vertical x deslocamento horizontal podemos perceber que para ambos percentuais de borracha que há uma compressão inicial em seguida de uma dilatação que tende a se estabilizar em todos os corpos de prova, mostrando a influência da fibra na bentonita.

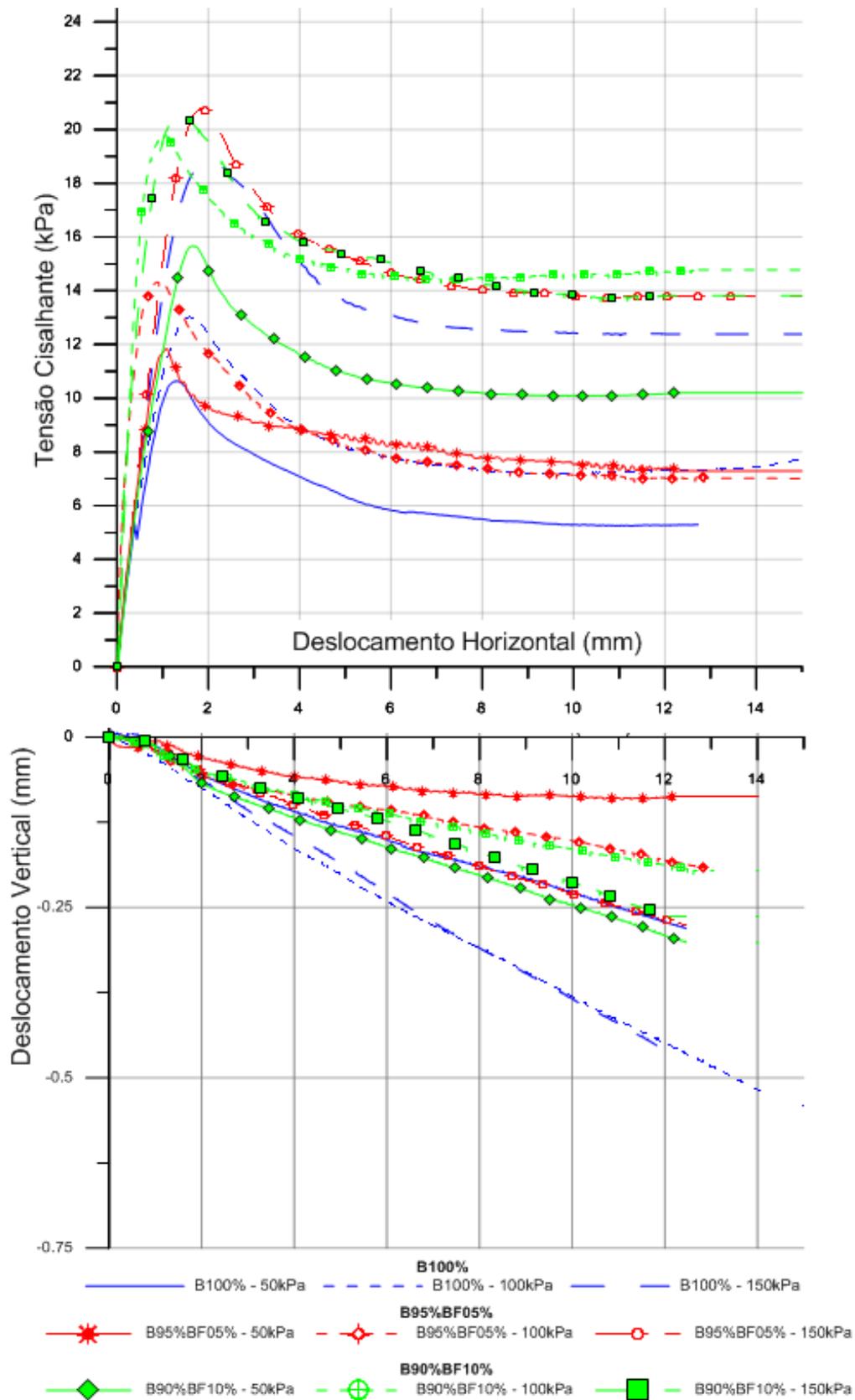


Figura 4.6 - Gráfico de tensão cisalhante e desl. vertical. x desl. horizontal para a bentonita com borraça em fibra.

Para a tensão normal de 100kPa, pode se notar um aumento na resistência de pico, porém não se nota uma variação considerável na resistência residual. Para a tensão normal de 150kPa há um aumento nas resistências de pico e residual.

Para as misturas com 10% de Borracha em Fibra é possível afirmar que: para as tensões normais de 50kPa e 100kPa há uma elevação na resistência de pico e residual, sendo mais elevada que a mistura com 5% de fibra. Há um aumento no pós pico de todas as misturas, porém a mistura com 10% de fibra a uma tensão de 50 kPa se destaca em relação as demais.

Para a tensão normal de 150kPa houve um aumento das resistências quando comparado com a bentonita pura. Ao comparar as misturas de 5% e 10% de fibra, tanto as resistências de pico e residual são praticamente.

A Fig. 4.7 mostra os gráficos das misturas de bentonita com borracha em pó (5% e 10%).

Para a tensão normal de 50kPa, o material com 5% de pó de borracha, apresentou um aumento em suas resistências quando comparado com o material puro.

Analisando a mistura com 10% de pó de borracha pode se perceber um pequeno decréscimo na resistência de pico e a resistência residual se mantendo muito próxima do material com 5% de pó de borracha.

Para a tensão de 100kPa houve um aumento expressivo da resistência de pico e da resistência residual do material com 5% de pó de borracha em relação ao material puro. A resistência de pico é maior até mesmo que a do material com 10% de pó de borracha.

Para a tensão de 150 kPa, pode-se notar um comportamento parecido com a tensão de 50kPa, onde o material com 5% de pó de borracha apresenta um aumento em suas resistências quando comparado com o material puro, porém quando comparado com a mistura de 10% de pó de borracha a resistência de pico foi maior e a resistência residual praticamente a mesma.

Pode se perceber que no gráfico de deslocamento vertical x deslocamento horizontal há uma compressão inicial em seguida de uma dilatação que tende a se estabilizar em todos os corpos de prova, exceto para a mistura B95BP5 com a tensão de 150 kPa, onde apresentou uma inclinação mais acentuada, mostrando uma compressão do material.

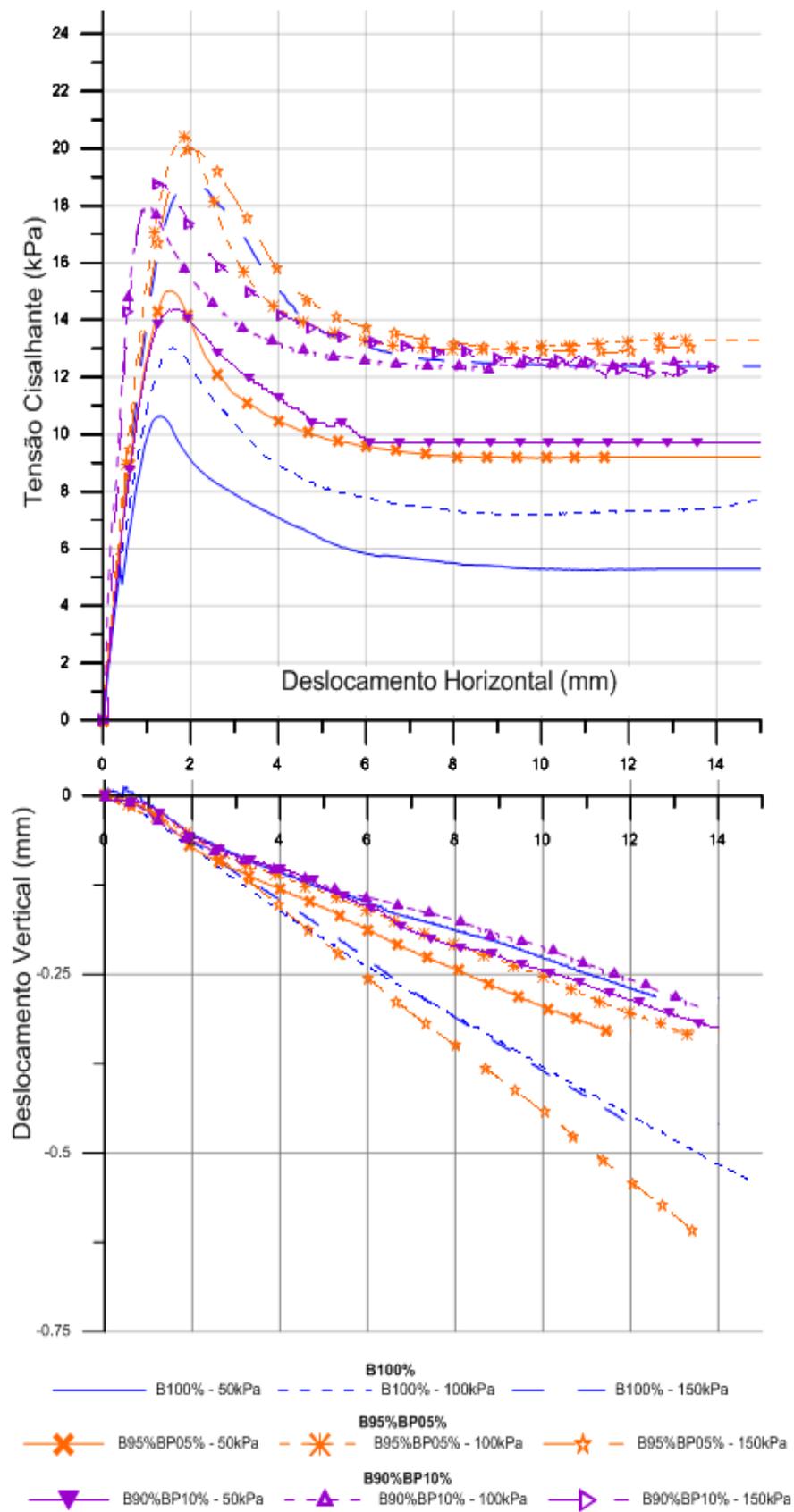


Figura 4.7 - Gráfico de tensão cisalhante e desl. vertical. x desl. horizontal para a bentonita com borracha em fibra.

As Figuras 4.8, 4.9 e a Tabela 4.3 apresentam as envoltórias e os parâmetros de resistência de pico e residual da bentonita e de todas as misturas bentonita-borracha no ponto correspondente ao deslocamento horizontal de 15mm.

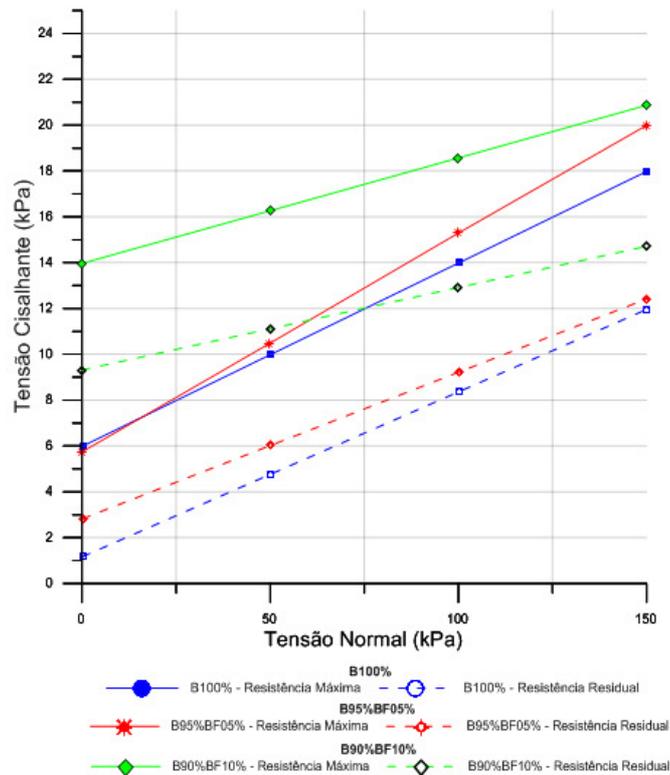


Figura 4.8 – Tensão cisalhante x tensão normal – bentonita com borracha em fibra.

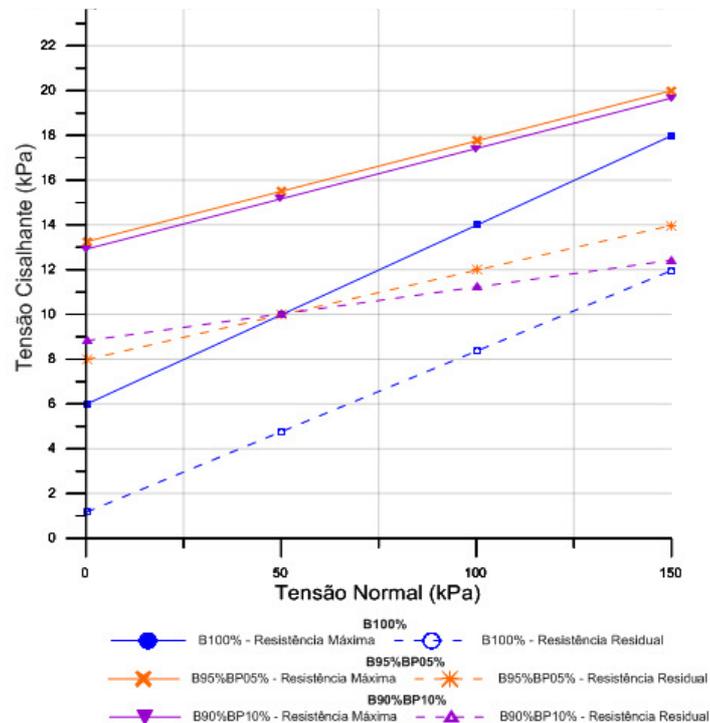


Figura 4.9 – Tensão cisalhante x tensão normal – bentonita com borracha em pó.

Tabela 4.3- Intercepto coesivo e ângulo de atrito – bentonita x borracha moída

Mistura	Resistência de Pico		Resistência Residual	
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito(°)	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito(°)
B100	6,0	4,60	1,20	4,10
B95BF05	5,75	5,40	2,80	3,70
B90BF10	14	2,60	9,30	2,10
B95BP05	13,25	2,60	8,0	2,30
B90BP10	12,90	2,60	8,80	1,40

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a adição de borracha à bentonita, em relação a resistência máxima, gerou um aumento no intercepto coesivo das misturas B90BF10, B95BP05 e B90BP10, uma redução no ângulo de atrito em relação a bentonita pura. Para a mistura B95BF05 houve uma redução no valor do Intercepto coesivo e um aumento no ângulo de atrito quando comparado com os valores para a mistura B100.

No caso da resistência residual, nota-se que em todas as amostras houve um aumento no Intercepto coesivo e uma redução do ângulo de atrito, quando comparado com o material puro (B100).

#### 4.2.1.3 Bentonita x PET

A figura 4.10 mostra os gráficos da tensão cisalhante e deslocamento vertical x deslocamento horizontal da bentonita x pó de PET (5% e 10%).

A partir dos gráficos pode-se concluir que para as misturas com 5% de pó de PET, para as tensões de 50kPa e 100kPa houve um aumento na resistência de pico e residual, sendo que para a tensão de 100kPa houve um aumento considerável.

Para a tensão de 150kPa houve uma pequena elevação na resistência de pico. A resistência residual se manteve praticamente a igual ao do material puro.

Para as misturas de 10% pode se notar que para a tensão de 50kPa o aumento do percentual de pó de PET levou a um decréscimo na resistência de pico e residual quando comparado com o material com 5% de pó de PET.

Para a tensão de 100kPa notou-se que houve um aumento considerado em relação ao material puro, porém quando comparado com o material com 5% de pó

de PET houve uma leve queda na resistência de pico, porém a resistência residual se manteve praticamente a igual.

Para a tensão de 150kPa a resistência de pico e a residual se mantiveram bem próximas do material com 5% de pó de PET, não havendo uma diferenciação considerável. Em relação ao material puro houve um leve aumento na resistência de pico.

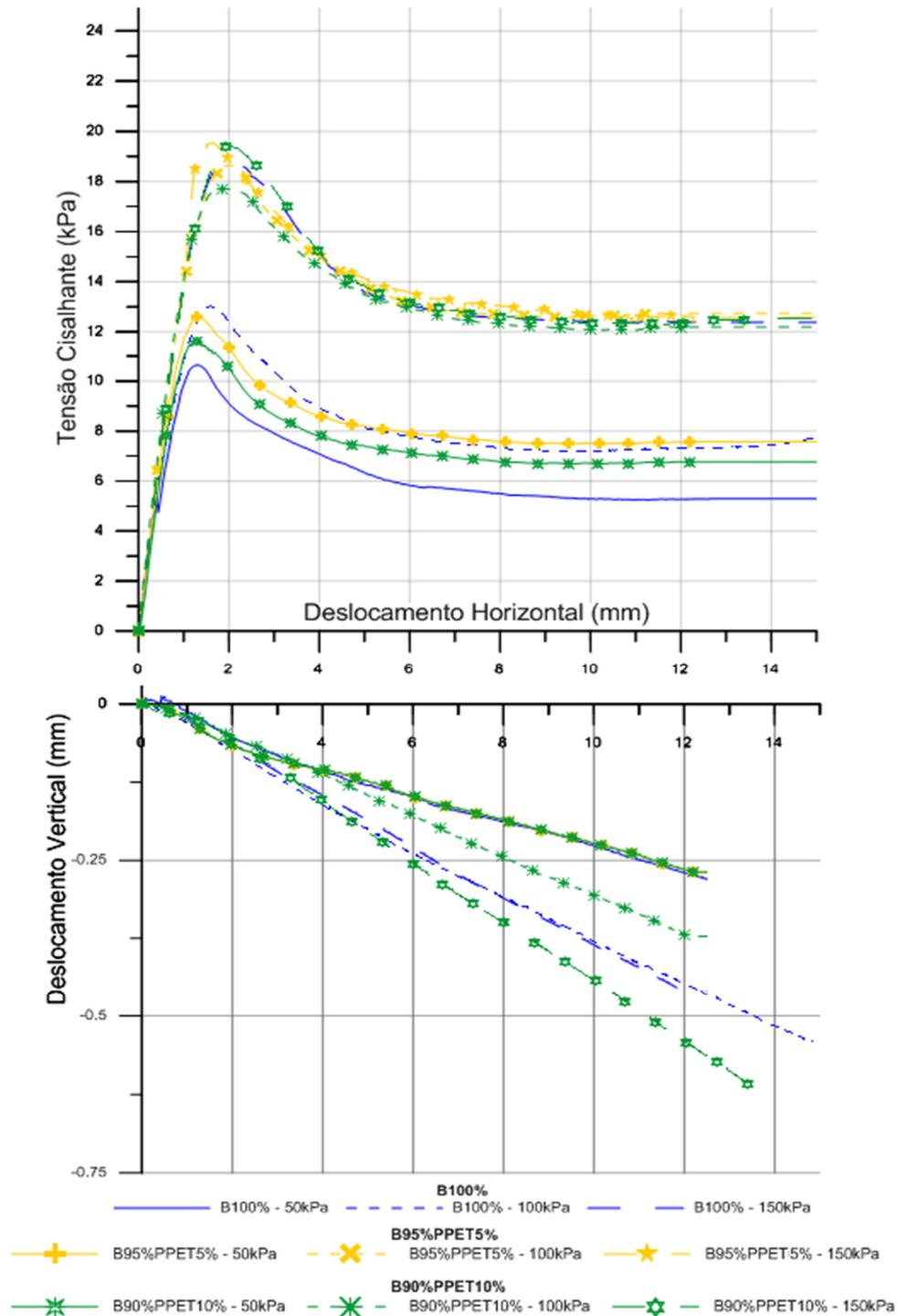


Figura 4.10 - Gráfico de tensão cisalhante e desl. vertical. x desl. horizontal para a bentonita com pó de PET.

A figura 4.11 mostra os gráficos da tensão cisalhante e deslocamento vertical x deslocamento horizontal da bentonita x PET triturado (5% e 10%).

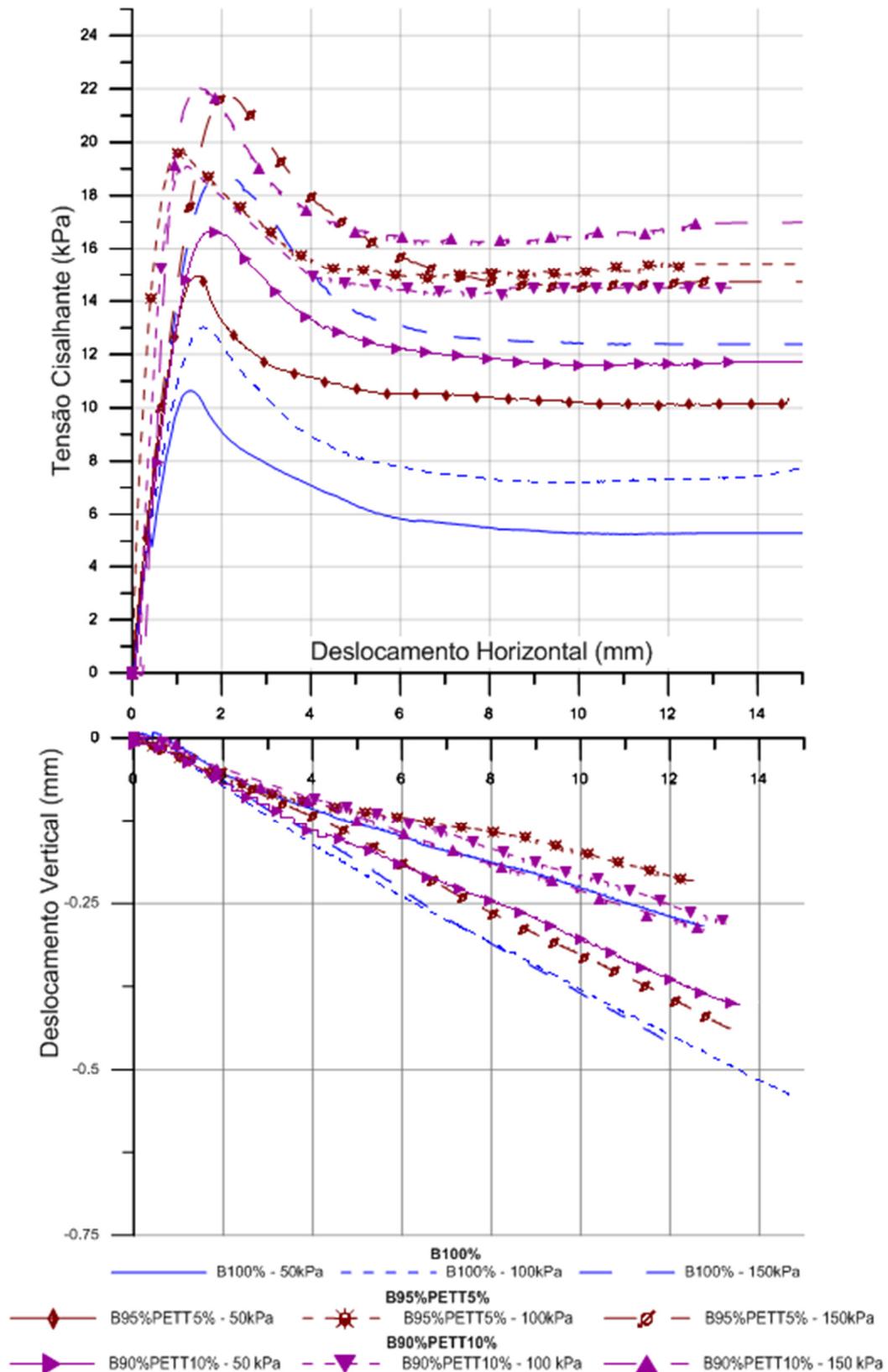


Figura 4.11 - Gráfico de tensão cisalhante e desl. vertical. x desl. horizontal para a bentonita com PET triturado.

Para a tensão de 50kPa com 5% de PET triturado houve um aumento considerável para as resistências de pico e residual.

As tensões de 100kPa e 150kPa também tiveram um aumento na resistência de pico e residual, onde as resistências residuais foram praticamente as mesmas.

Para os ensaios com as misturas com 10% de PET triturado notou-se uma melhora significativa para a resistência de pico e residual, sendo na tensão de 50kPa quando comparado com o material puro.

Com relação ao material com 5% de PET triturado também se notou uma melhora nas resistências de pico e residual.

Pode se notar que para as tensões de 100kPa e 150kPa as resistências de pico e residual para as misturas com 10% de PET triturado ficaram muito próximas das misturas com 5%, podendo-se concluir que para altas tensões a elevação do percentual de PET triturado não influencia na resistência do material.

Observou-se nos ensaios que para baixas tensões o aumento no percentual do PET triturado elevou as resistências do material.

A figura 4.12 mostra os gráficos da tensão cisalhante e deslocamento vertical x deslocamento horizontal da bentonita x fibra de PET (0,5% e 0,7%).

A partir dos ensaios pode se observar que o comportamento dos ensaios com fibra de PET foi completamente diferente. Para as misturas que tiveram a inclusão de 0,5% de fibra de PET pode se perceber uma mudança expressiva nos resultados quando comparados com os demais materiais. Houve uma melhora significativa para as tensões de pico e residual para as cargas de 50kPa e 100kPa em relação ao material puro. Pode se perceber que existiu uma leve queda da tensão de pico e, após a queda, a tensão se manteve constante. Para a tensão de 150kPa a tensão de pico foi menor que a do material puro, porém a tensão residual se manteve uniforme e muito próxima da tensão de pico.

Para as misturas com 0,7% de fibra de PET houve um leve aumento nas resistências de pico e residual para as tensões de 50kPa e 100kPa, quando comparado com a mistura com 0,5% de fibra de PET. Comparando com o material puro a elevação das tensões foi expressiva.

Para a tensão de 150kPa notou-se que o material teve uma tensão de pico e uma tensão residual menor, quando comparado com a mistura com 0,5% de fibra de PET. Quando comparado com o material puro as elevações de tensão também foram expressivas.

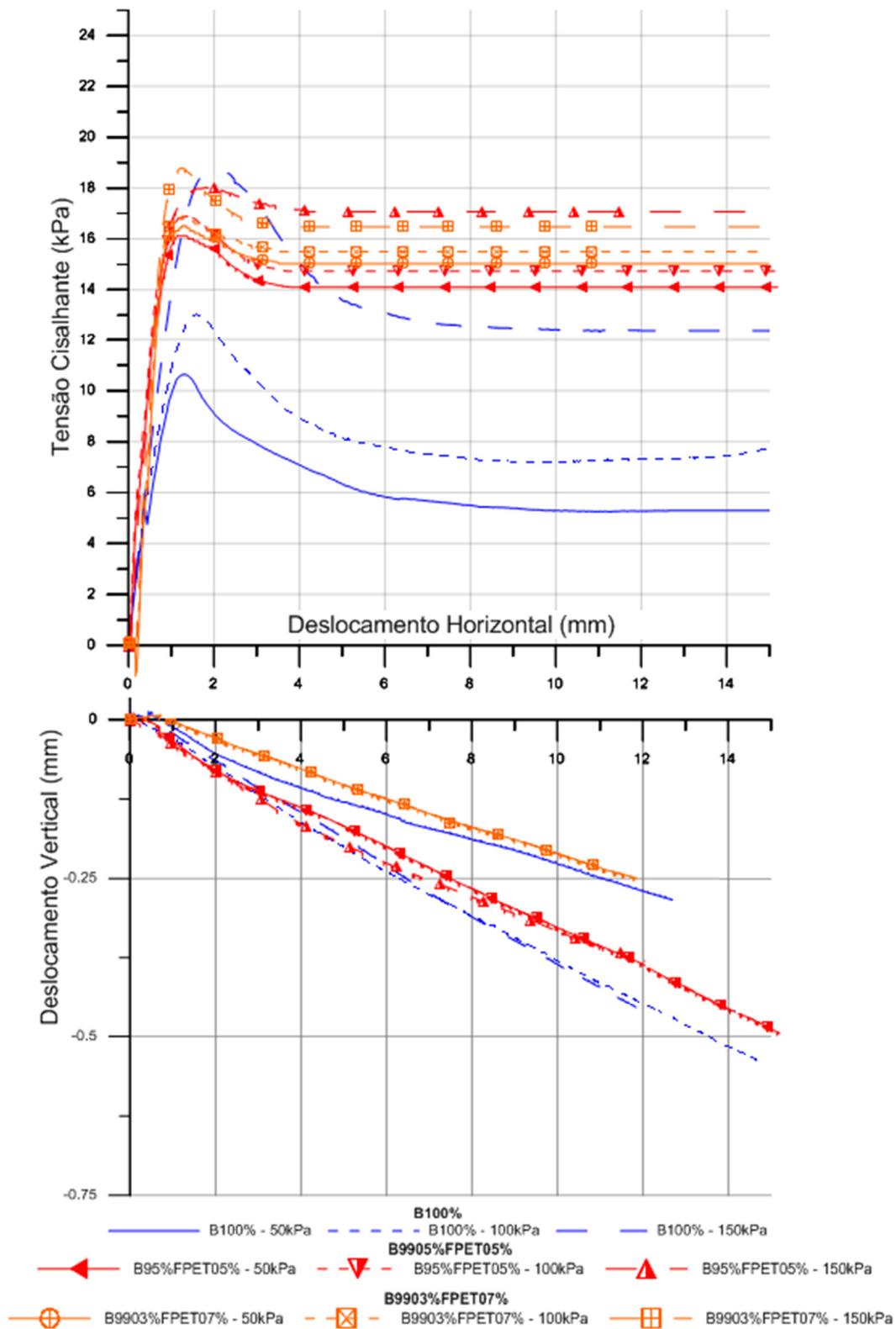


Figura 4.12 - Gráfico de tensão cisalhante e desl. vertical. x desl. horizontal para a bentonita com fibra de PET.

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e a Tabela 4.4 apresentam os parâmetros de resistência de pico e residual da bentonita e de todas as misturas bentonita-PET (no ponto correspondente ao deslocamento horizontal de 15mm)

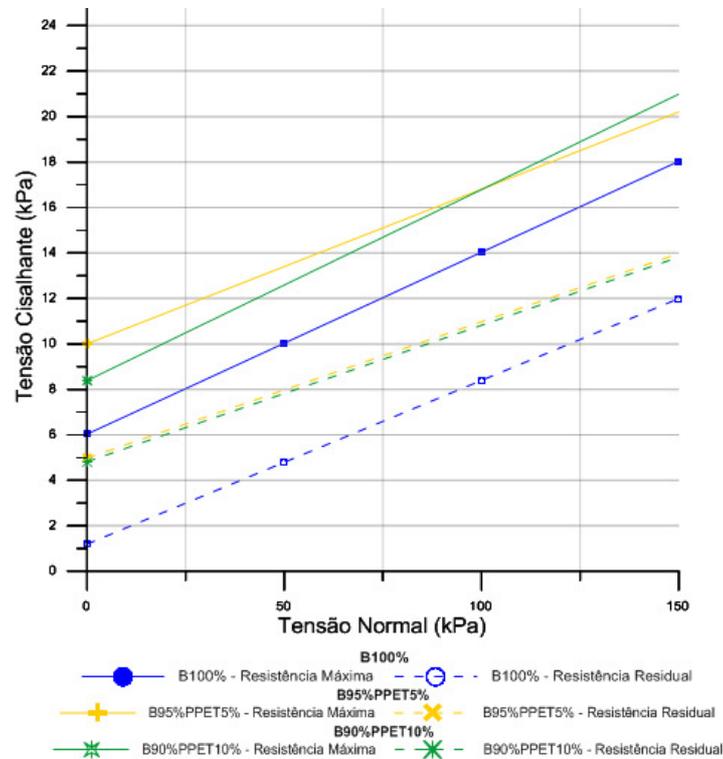


Figura 4.13 – Tensão cisalhante x tensão normal – bentonita com pó de PET.

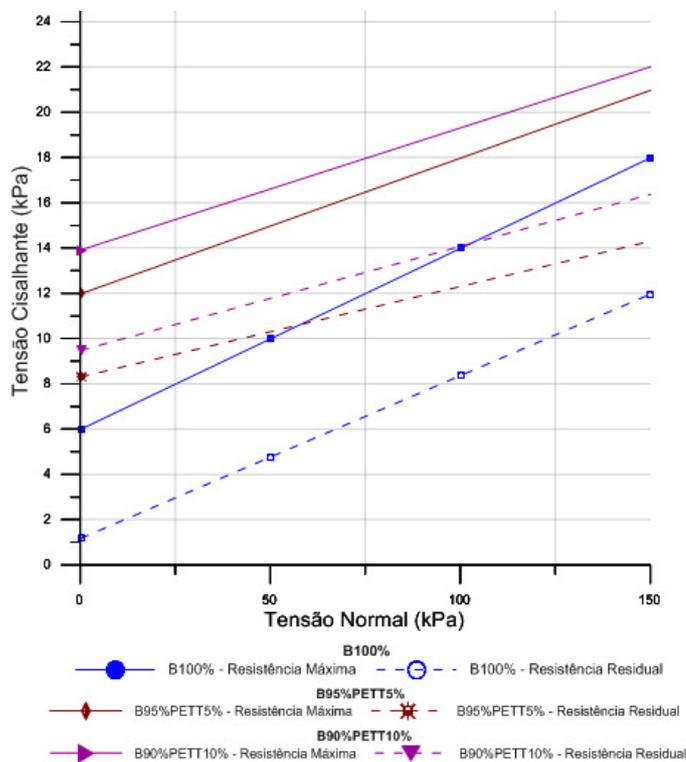


Figura 4.14 – Tensão cisalhante x tensão normal – bentonita com PET triturado.

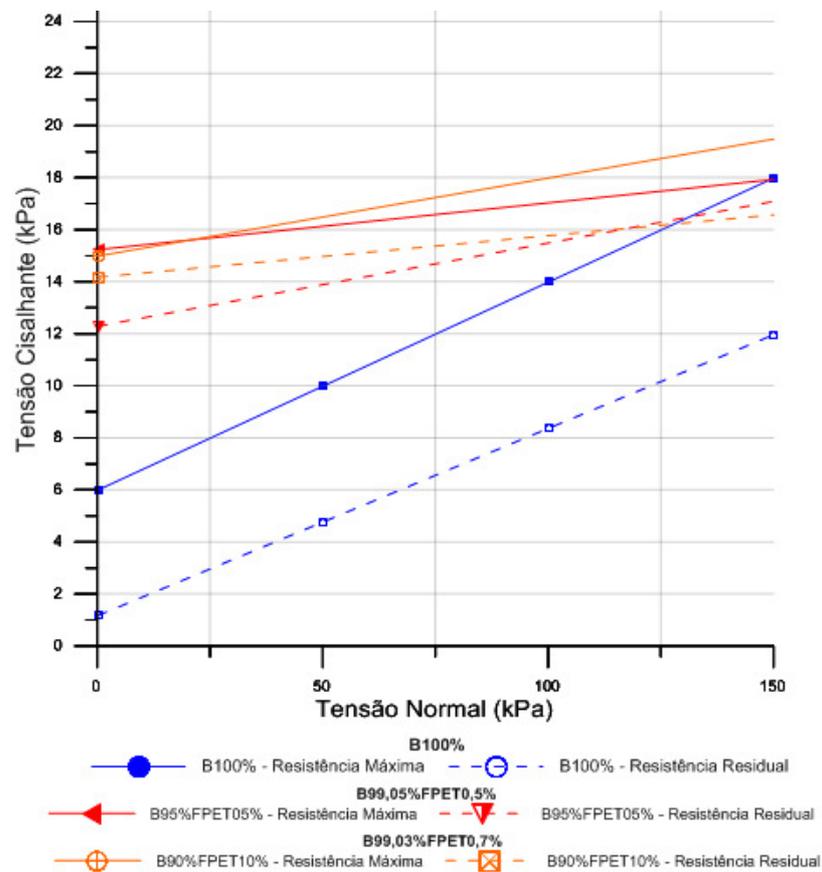


Figura 4.15 – Tensão cisalhante x tensão normal – bentonita com fibra de PET.

Tabela 4.4- Intercepto coesivo e ângulo de atrito – bentonita x PET.

Mistura	Resistência de Pico		Resistência Residual	
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito(°)	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito(°)
B100	6,0	4,6	1,2	4,1
B95PPET5	10	3,9	5,0	3,4
B90PPET10	8,4	4,8	4,8	3,4
B95PETT5	12	3,4	8,3	2,3
B90PETT10	13,9	3,1	9,5	2,6
B9905FPET05	15,2	1,0	12,3	1,8
B9903FPET07	15	1,7	14,2	0,9

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a adição de PET a bentonita, independente de seu tipo, granulometria e quantidade aumentou o intercepto coesivo do material, tanto em termos de resistência máxima e residual. Para as misturas B95PPET5, B95PETT5, B90PETT10, B9905FPET05 e B9903FPET07 houve uma redução do valor de ângulo de atrito, em relação a resistência máxima, quando comparado com o material puro. Realizando uma análise a partir das resistências residuais pode-se perceber que enquanto a o intercepto coesivo se elevou o ângulo de atrito residual diminuiu em todas as amostras estudadas.

Louzada (2015) realizou ensaios de cisalhamento direto na bentonita pura e em misturas, sendo: 70% de bentonita e 30% pó de PET (B70P30), 97% de bentonita e 3% de PET triturado (B97F03) e 95% de bentonita e 5% de PET triturado (B95F05)

Os valores obtidos podem ser observados na tabela 4.5 abaixo.

Tabela 4.5- Intercepto coesivo e ângulo de atrito – bentonita x PET (Louzada, 2015)

Mistura	Resistência de Pico		Resistência Residual	
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito(°)	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito(°)
B100	6,0	4,6	1,2	4,1
B70P30	4,5	2,9	3,0	2,1
B97F03	5,0	2,5	4,0	1,0
B95F05	12,7	0,5	7,9	1,3

A partir dos valores comparados na tabela 4.4 e 4.5, pode se perceber que a partir de um certo ponto o aumento do percentual de pó de PET na bentonita causa uma redução no intercepto coesivo e no ângulo de atrito, para a resistência de pico. Observando os valores obtidos para o material com 30% de pó de PET pode se perceber que houve uma redução na resistência de pico e ângulo de atrito, quando comparado com o material puro. Na resistência residual notou-se que houve um leve aumento no intercepto coesivo e uma diminuição no ângulo de atrito residual. Os valores das resistências de pico e residual para o material com 5% de pó de PET foi superior quando comparados com os demais % de pó de PET. O angulo de atrito de pico com 10% de pó de PET foi maior que o angulo de atrito com 5% de pó de PET.

A partir do comparativo dos valores para as misturas com PET triturado obtidos por Louzada (2015), notou-se que os valores do intercepto coesivo de pico e residual sofreram um aumento com a inserção de material se mantendo o valor mais alto com a mistura de 5% de PET triturado, já os ângulos de atrito obtidos sofreram uma redução a cada aumento de material inserido.

#### 4.2.2 Ensaio de Adensamento

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de adensamento unidimensional realizados no laboratório de Geotecnia e meio

ambiente da Puc-rio para as amostras de bentonita pura, bentonita x borracha e bentonita x PET.

Segundo Bosscher (1994) os resultados do ensaio de adensamento unidimensional constituem uma peça fundamental no projeto de aterros com limite de recalques.

#### 4.2.2.1 Resultados de ensaio de adensamento na Bentonita

A figura 4.16, apresenta o gráfico do índice de vazios ( $e$ ) x Tensão vertical efetiva ( $\sigma'v$ ) obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a bentonita pura.

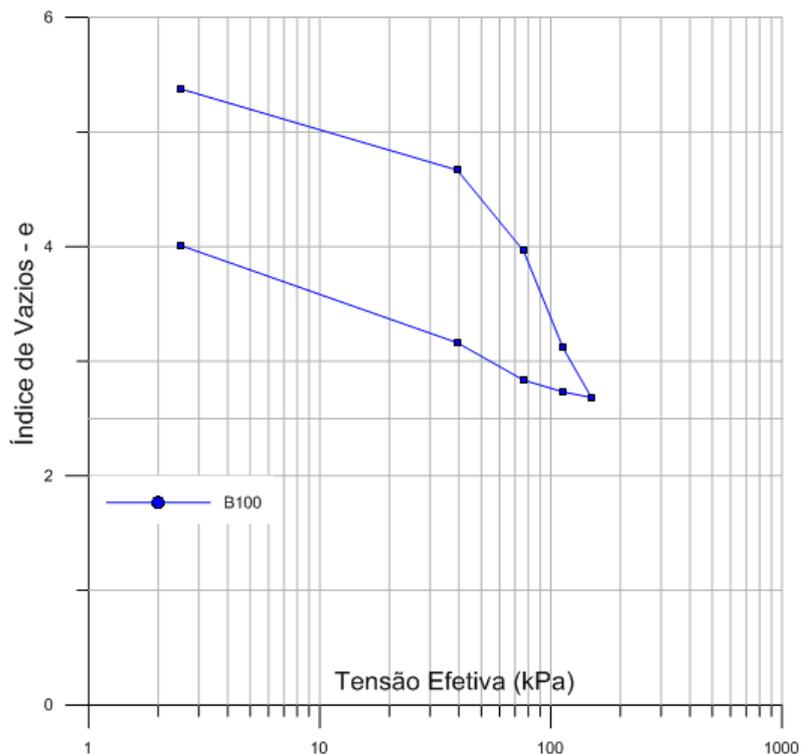


Figura 4.16 – Índice de vazios ( $e$ ) x tensão efetiva – bentonita pura.

A partir do gráfico pode se observar que a amostra sofreu uma deformação plástica, tendo em vista que na fase de descarregamento a trajetória não foi igual ao carregamento.

A tabela 4.6 apresenta os valores obtidos para os parâmetros calculados a partir do ensaio de adensamento realizado no material puro para as tensões aplicadas na fase de carregamento.

Tabela 4.6 – Parâmetros ensaio de adensamento – bentonita

Mistura	Parâmetro	Tensão Efetiva (kPa)			
		39,38	76,25	113,13	150
B100	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,25E-05	5,65E-05	4,12E-05	3,97E-05
	$e$	4,6	3,9	3,1	2,7
	$E_{oed}$ (kPa)	2,95E+02	2,60E+02	1,79E+02	3,13E+02
	$k$ (cm/s)	2,48E-08	2,19E-08	2,32E-08	1,27E-08

A tensão de pré adensamento do material foi obtida a partir do método de Pacheco e Silva, conforme mencionado no capítulo 3. A partir desse método foi possível constatar o material puro com uma  $\sigma'_p = 54$  kPa.

#### 4.2.2.2

#### Resultados de ensaio de adensamento na Bentonita x Borracha

A figura 4.17, apresenta o gráfico do índice de vazios ( $e$ ) x tensão efetiva obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a bentonita com borracha em fibra (5% e 10%).

A partir do gráfico obtido pode se observar que na fase de carregamento as amostras misturadas com fibra exibem um comportamento de compressão menor quando comparado com o material puro. Tal fato pode se ter origem devido a granulometria da borracha (fibra) inserida, onde o material oferece uma resistência a compressão diferente do material puro. Analisando as misturas com o teor de 5% e 10% de fibra, pode se perceber que não houve uma diferença significativa com a variação do percentual de material inserido na bentonita.

No descarregamento, observa-se que tanto no solo puro como nas misturas, as curvas não seguem o mesmo caminho na fase de carregamento, indicando a ocorrência de deformações plásticas irrecuperáveis.

Observou-se que houve uma pequena variação na fase final do descarregamento, onde a amostra B95BF5 teve um índice de vazios maior que a

amostra B90BF10, tal fato pode ter ocorrido devido a amostra B90BF10 ter um menor percentual de bentonita, o que pode ter afetado a expansão final.

A tensão de pré adensamento calculada para a amostra B95BF05 e B90BF10 foi de  $\sigma'_p = 50$  kPa.

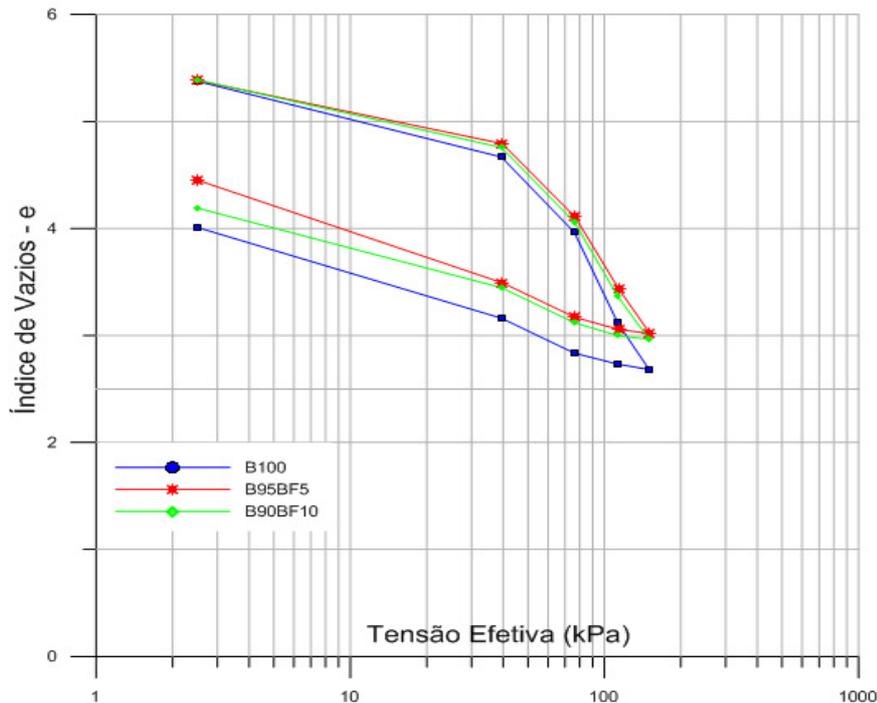


Figura 4.17 – Índice de vazios (e) x tensão efetiva – bentonita x borracha em fibra.

A tabela 4.7 apresenta os valores obtidos para os parâmetros calculados a partir do ensaio de adensamento realizado no material puro, mistura com 5% e 10% de fibra de borracha com as tensões aplicadas na fase de carregamento.

A partir dos valores citados na tabela 4.7 abaixo, observou-se que para a mistura B95BF5 houve uma tendência de diminuição da permeabilidade com o aumento do nível de tensão. Pode se perceber a compressibilidade diminui com a inserção de borracha em fibra, principalmente no início do domínio virgem.

Tabela 4.7 – Parâmetros ensaio de adensamento – bentonita x borracha em fibra.

Mistura	Parâmetro	Tensão Efetiva (kPa)			
		39,38	76,25	113,13	150
B100	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,25E-05	5,65E-05	4,12E-05	3,97E-05
	e	4,6	3,9	3,1	2,7
	$E_{oed}$ (kPa)	2,95E+02	2,60E+02	1,79E+02	3,13E+02
	k (cm/s)	2,48E-08	2,19E-08	2,32E-08	1,27E-08
B95BF05	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,40E-05	5,93E-05	5,61E-05	3,76E-05

	e	4,8	4,1	3,4	3,0
	E <sub>oed</sub> (kPa)	3,63E+02	2,74E+02	2,44E+02	3,57E+02
	k (cm/s)	2,05E-08	2,18E-08	2,31E-08	1,06E-08
<b>B90BF10</b>	c <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	8,14E-05	5,83E-05	4,42E-05	3,82E-05
	e	4,8	4,1	3,4	3,0
	E <sub>oed</sub> (kPa)	3,36E+02	2,67E+02	2,31E+02	3,66E+02
	k (cm/s)	2,44E-08	2,19E-08	1,93E-08	1,05E-08

A diminuição da permeabilidade (k) já era esperada, tendo em vista que a borracha é um material impermeável e sua inclusão aumentou o caminho de percolação. O aumento do índice de vazios (e) se deu devido a uma menor compressibilidade. O módulo oedométrico (E<sub>oed</sub>) aumentou devido ao aumento da rigidez com a inserção da borracha. O coeficiente de adensamento (c<sub>v</sub>) não sofreu grande variação, pois a variação da permeabilidade não foi muito alta.

Para a mistura B90BF10, observou-se uma redução na permeabilidade (k) da mistura quando comparado com o material puro, porém quando comparado com a mistura B95BF5 para baixas tensões a permeabilidade sofre variações muito pequenas. Também se notou uma leve diminuição da permeabilidade (k) em altas tensões na amostra B90BF10, o fato pode ter tido origem devido a inclusão de mais material impermeável. Em baixas tensões o material apresentou uma permeabilidade próximo ao material puro. O índice de vazios (e) se manteve próximo da mistura B95BF5, devido à alta porosidade da borracha em fibra.

Inicialmente o coeficiente de adensamento (c<sub>v</sub>) foi superior ao material puro e a mistura B95BF5, porém nos demais carregamentos pode se perceber que os valores obtidos foram maiores que o material puro, porém menor que a mistura B95BF5.

O módulo oedométrico da mistura B90BF10 se manteve maior que o material puro, porém menor quando comparado com a mistura B90BF5.

A figura 4.18, apresenta o gráfico do Índice de vazios (e) x tensão efetiva obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a bentonita com borracha em pó (5% e 10%).

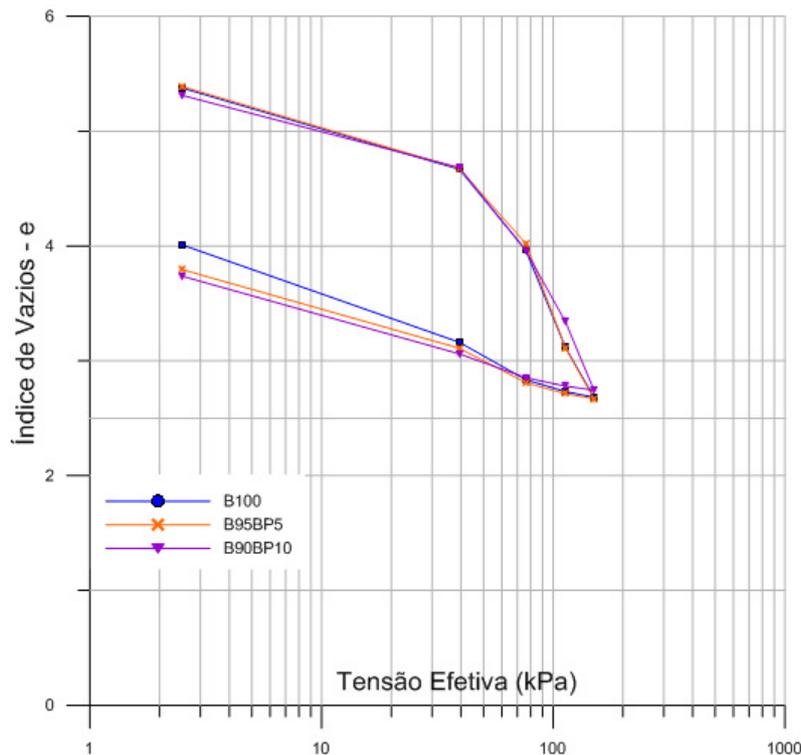


Figura 4.18 – Índice de vazios (e) x tensão efetiva – bentonita x borracha em pó.

A partir do gráfico obtido pode se observar que na fase de carregamento as amostras misturadas com pó exibem um comportamento muito próximo ao material puro. Tal fato ocorreu por se tratar de um material com granulometria muito próxima a granulometria da bentonita.

Analisando as misturas com o teor de 5% e 10% de pó de borracha, pode se perceber que não houve uma diferença significativa com a variação do percentual de material inserido na bentonita.

No descarregamento, observa-se que tanto a bentonita quanto as misturas B95BP05 e B90BP10, as curvas, não seguem o mesmo caminho da fase de carregamento, indicando a ocorrência de deformações plásticas irreversíveis.

no caso das misturas, o índice de vazios (e) final foi menor que a bentonita pura, indicando uma deformação permanente no material inserido.

A tensão de pré adensamento calculada para a amostra B95BP05 foi de  $\sigma'p = 57$  kPa, já para a amostra B90BP10 o valor obtido foi de  $\sigma'p = 60$  kPa.

A tabela 4.8 apresenta os valores obtidos para os parâmetros calculados a partir do ensaio de adensamento realizado no material puro, mistura com 5% e 10% de Pó de borracha com as tensões aplicadas na fase de carregamento.

Tabela 4.8 – Parâmetros ensaio de adensamento – bentonita x borracha em pó.

Mistura	Parâmetro	Tensão Efetiva (kPa)			
		39,38	76,25	113,13	150
<b>B100</b>	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,25E-05	5,65E-05	4,12E-05	3,97E-05
	$e$	4,6	3,9	3,1	2,7
	$E_{oed}$ (kPa)	2,95E+02	2,60E+02	1,79E+02	3,13E+02
	$k$ (cm/s)	2,48E-08	2,19E-08	2,32E-08	1,27E-08
<b>B95BP05</b>	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,25E-05	5,70E-05	4,16E-05	3,02E-05
	$e$	4,7	4,0	3,2	2,7
	$E_{oed}$ (kPa)	2,93E+02	2,83E+02	1,67E+02	3,06E+02
	$k$ (cm/s)	2,49E-08	2,02E-08	2,50E-08	9,93E-09
<b>B90BP10</b>	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,34E-05	5,78E-05	4,41E-05	3,33E-05
	$e$	4,7	4,0	3,3	2,7
	$E_{oed}$ (kPa)	3,32E+02	2,53E+02	2,57E+02	2,32E+02
	$k$ (cm/s)	2,22E-08	2,29E-08	1,72E-08	1,45E-08

A partir dos valores citados na tabela 4.8 acima, observou-se que para ambas as misturas o índice de vazios se manteve constante, exceto para a tensão final, como já mencionado anteriormente. A permeabilidade ( $k$ ) sofreu uma variação para ambas as misturas, exceto quando aplicada a tensão de 150 kPa na amostra B90BP10, onde o material apresentou um índice de vazios um pouco maior que o material puro, sendo propício a percolação da água.

O módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ) do material, para a mistura B95BP5 aumentou para as tensões de 39,38 kPa e 76,25 kPa, sofrendo uma redução para as tensões de 113,13 kPa e 150 kPa. Já para a mistura B90BP10, inicialmente o módulo oedométrico sofre um aumento, quando comparado com o material puro, porém vem sofrendo uma redução em cada incremento de tensão, chegando a um valor final menor que a mistura B95BF5 e a bentonita pura.

Pode ser observar que o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) para a mistura B95BP5 se manteve muito próximo do material puro, exceto para a tensão de 150 kPa, onde houve uma redução. Analisando o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) para a mistura B90BP10, pode se perceber um aumento quando comparado com a mistura e com o material puro, porém para a tensão de 150 kPa o valor ficou abaixo do valor obtido para o material puro e acima do valor obtido na mistura B95BF5.

### 4.2.2.3

#### Resultados de ensaio de adensamento na Bentonita x PET

A figura 4.19, apresenta o gráfico do índice de vazios ( $e$ ) x tensão efetiva obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a bentonita com pó de PET (5% e 10%).

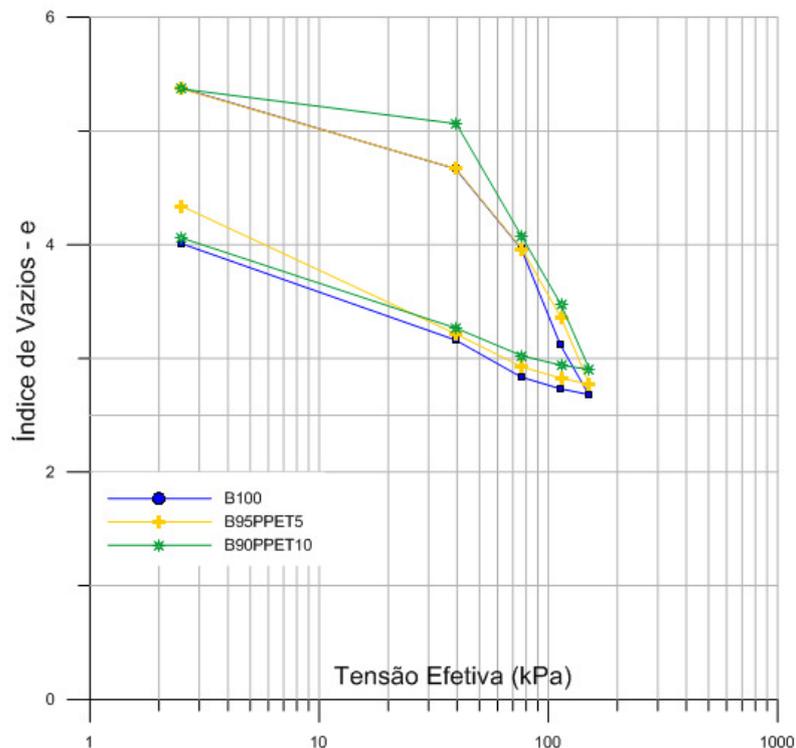


Figura 4.19 – Índice de vazios ( $e$ ) x tensão efetiva – bentonita x pó de PET.

A partir do gráfico obtido pode se observar que na fase de carregamento a amostra B95PPET5 exibe um comportamento muito próximo ao material puro. Percebe-se uma redução da compressibilidade para a mistura com 10% de pó de borracha no trecho de recompressão. A amostra B90PPET10 apresenta um índice de vazios maior quando comparado com a mesma tensão aplicada nas amostras B100 e B95PPET5.

Analisando as misturas com o teor de 5% e 10% de pó de PET, pode se perceber que houve uma diferença significativa com a variação do percentual de material inserido na bentonita, tendo em vista que a amostra B90PPET10 se manteve com o índice de vazios maior com a mesma tensão aplicada.

No descarregamento, observa-se que tanto a bentonita pura quanto as misturas B95PPET5 e B90PPET10, as curvas, não seguem o mesmo caminho de tensão da fase de carregamento, indicando a ocorrência de deformações plásticas. Pode se observar que, em quanto a amostra B90PPET10 teve seu índice de vazios final próximo do material puro, a amostra B95PPET5 se mostrou com uma capacidade de recuperação maior, devido a sua maior compressibilidade.

A tensão de pré adensamento calculada para a amostra B95PPET5 foi de  $\sigma'_p = 62$  kPa, já para a amostra B90PPET10 o valor obtido foi de  $\sigma'_p = 66$  kPa.

A tabela 4.9 apresenta os valores obtidos para os parâmetros calculados a partir do ensaio de adensamento realizado no material puro, mistura com 5% e 10% de pó de PET com as tensões aplicadas na fase de carregamento.

Tabela 4.9 – Parâmetros ensaio de adensamento – bentonita x pó de PET

Mistura	Parâmetro	Tensão Efetiva (kPa)			
		39,38	76,25	113,13	150
B100	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,25E-05	5,65E-05	4,12E-05	3,97E-05
	e	4,6	3,9	3,1	2,7
	E <sub>oed</sub> (kPa)	2,95E+02	2,60E+02	1,79E+02	3,13E+02
	k (cm/s)	2,48E-08	2,19E-08	2,32E-08	1,27E-08
B95PPET5	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,26E-05	5,66E-05	4,34E-05	3,31E-05
	e	4,7	4,0	3,4	2,8
	E <sub>oed</sub> (kPa)	2,98E+02	2,61E+02	2,54E+02	2,39E+02
	k (cm/s)	2,45E-08	2,21E-08	1,65E-08	1,39E-08
B90PPET10	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,75E-05	6,21E-05	4,56E-05	3,51E-05
	e	5,1	4,1	3,5	2,9
	E <sub>oed</sub> (kPa)	7,32E+02	4,36E+02	2,75E+02	2,55E+02
	k (cm/s)	1,86E-08	1,73E-08	1,47E-08	1,38E-08

A partir dos valores citados na tabela 4.9 acima, observou-se que para a mistura B95PPET5 nas tensões iniciais o índice de vazios (e) se manteve igualado ao da mistura B100, para as tensões finais houve um aumento do índice de vazios (e). Para a amostra B90PPET10 notou-se valores maiores para o índice de vazios para todas as tensões aplicadas, quando comparado com as amostras B100 e B95PPET5.

Para a amostra B95PPET5 a permeabilidade (k) se manteve próxima a amostra B100. Para a amostra B90PPET10 o a permeabilidade (k) notou-se uma

leve queda para as amostras B100 e B95PPET5 nas tensões aplicadas, exceto para a tensão de 150 kPa, onde o valor apresentado ficou acima da amostra B100.

O módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ) do material, para a mistura B95PPET5 aumentou, exceto para a tensão final de 150 kPa, onde sofreu uma redução. Já para a mistura B90PPET10, inicialmente o módulo oedométrico sofre um aumento considerável, quando comparado com o material puro, porém vem sofrendo uma redução em cada incremento de tensão, chegando a um valor final menor que a mistura B100.

Pode ser observar que o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) para a mistura B95PPET5 se manteve muito próximo da mistura B100, exceto para a tensão de 150 kPa, onde notou-se uma redução.

Notou-se um aumento no coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) para a mistura B90PET10, quando comparado com a mistura e com o material puro, porém para a tensão de 150 kPa o valor ficou abaixo do valor obtido para o material puro e acima do valor obtido na mistura B95PPET5.

A figura 4.20, apresenta o gráfico do Índice de vazios ( $e$ ) x Tensão Efetiva obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a bentonita com PET Triturado (5% e 10%).

A partir do gráfico pode se notar que a mistura B95PETT5 apresentou um valor de índice de vazios ( $e$ ) maior que as misturas B100 e B90PETT10 para todas as tensões aplicadas.

No descarregamento, observa-se que tanto a bentonita quanto as misturas B95PETT5 e B90PETT10, as curvas, não seguem a mesma trajetória de tensão da fase de carregamento, indicando a ocorrência de deformações plásticas irreversíveis. Pode se observar que, em quanto as amostras com PET triturado tiveram seus gráficos em diferentes pontos, o que ocorreu devido a granulometria do material inserido.

A tensão de pré adensamento calculada para a amostra B95PETT5 foi de  $\sigma'_p = 65$  kPa, já para a amostra B90PETT10 o valor obtido foi de  $\sigma'_p = 68$  kPa.

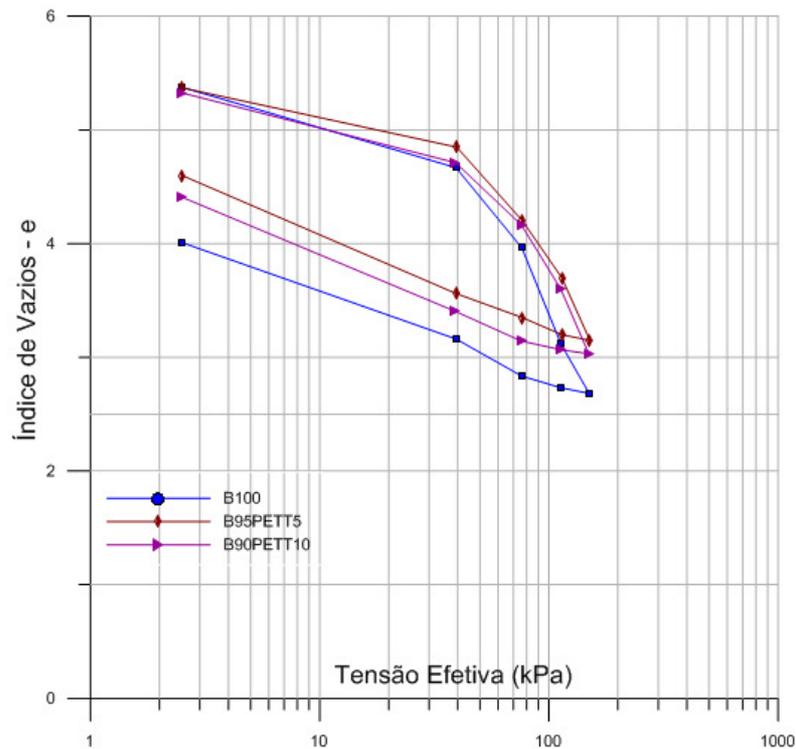


Figura 4.20 – Índice de vazios (e) x tensão efetiva – bentonita x PET triturado.

A tabela 4.10 apresenta os valores obtidos para os parâmetros calculados a partir do ensaio de adensamento realizado no material puro, mistura com 5% e 10% de PET Triturado com as tensões aplicadas na fase de carregamento.

Tabela 4.10 – Parâmetros ensaio de adensamento – bentonita x PET triturado.

Mistura	Parâmetro	Tensão Efetiva (kPa)			
		39,38	76,25	113,13	150
<b>B100</b>	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,25E-05	5,65E-05	4,12E-05	3,97E-05
	e	4,6	3,9	3,1	2,7
	$E_{oed}$ (kPa)	2,95E+02	2,60E+02	1,79E+02	3,13E+02
	k (cm/s)	2,48E-08	2,19E-08	2,32E-08	1,27E-08
<b>B95PETT5</b>	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,54E-05	6,04E-05	4,57E-05	3,78E-05
	e	4,9	4,2	3,7	3,2
	$E_{oed}$ (kPa)	4,14E+02	2,95E+02	3,47E+02	2,78E+02
	k (cm/s)	2,13E-08	2,06E-08	1,33E-08	1,37E-08
<b>B90PETT10</b>	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,36E-05	6,00E-05	4,84E-05	3,78E-05
	e	4,7	4,2	3,6	3,1
	$E_{oed}$ (kPa)	3,49E+02	3,48E+02	3,01E+02	2,60E+02
	k (cm/s)	2,17E-08	1,74E-08	1,62E-08	1,46E-08

A partir da tabela 4.10 acima pode se perceber que o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) sofreu uma redução para todas as tensões aplicadas, exceto para a tensão de 150 kPa, onde os valores obtidos para as amostras B95PETT5 e B95PETT10 foram maiores que a amostra B100.

O módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ) da amostra B95PPET5 se manteve maior que a amostra B100, exceto quando aplicado a tensão de 150 kPa onde o valor obtido foi um pouco abaixo. A amostra B90PETT10 seguiu a mesma trajetória da amostra B95PPET5, porém os valores foram menores que a amostra B95PPET5 e maiores que a B100.

O coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) obtido nas amostras foram superiores a amostra B100, exceto para a tensão de 150 kPa. Foi percebido valores maiores para a amostra B95PETT5 em baixas tensões, sendo superado pela amostra B90PETT10 na medida que a tensão passara de 76,25 kPa e se igualando na tensão final.

A figura 4.21, apresenta o gráfico do Índice de vazios ( $e$ ) x tensão efetiva obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a bentonita com fibra de PET triturado (0,5% e 0,7%).

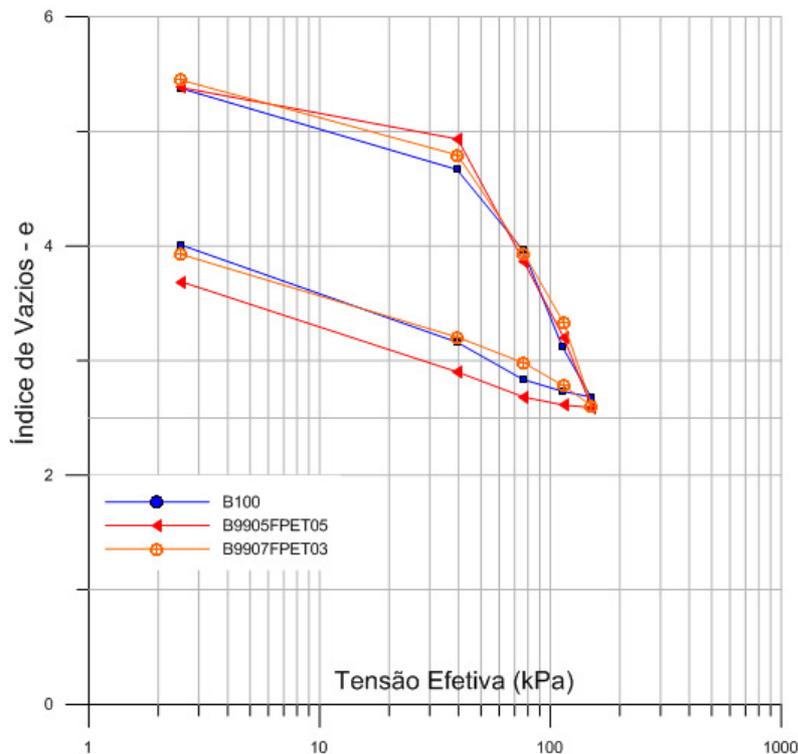


Figura 4.21 – Índice de vazios ( $e$ ) x tensão efetiva – bentonita x fibra de PET.

A partir do gráfico obtido pode se observar que na fase de carregamento ambas as amostras exibem um comportamento muito próximo ao material puro, porém na fase inicial do carregamento apresentam uma diferença no índice de vazios ( $e$ ).

No descarregamento, observa-se a amostra B9907FPET03 apresenta a mesma trajetória da amostra B100, enquanto a amostra B9905FPET05 apresenta um índice de vazios menor que as duas outras amostras.

A tensão de pré adensamento calculada para a amostra B9905FPET05 foi de  $\sigma'p = 66,50\text{kPa}$ , já para a amostra B9907FPET03 o valor obtido foi de  $\sigma'p = 69,50\text{ kPa}$ .

A tabela 4.11 apresenta os valores obtidos para os parâmetros calculados a partir do ensaio de adensamento realizado no material puro, mistura com 0,5% e 0,7% de PET Triturado com as tensões aplicadas na fase de carregamento.

Tabela 4.11 – Parâmetros ensaio de adensamento – bentonita x fibra de PET.

Mistura	Parâmetro	Tensão Efetiva (kPa)			
		39,38	76,25	113,13	150
B100	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,25E-05	5,65E-05	4,12E-05	3,97E-05
	$e$	4,6	3,9	3,1	2,7
	$E_{oed}$ (kPa)	2,95E+02	2,60E+02	1,79E+02	3,13E+02
	$k$ (cm/s)	2,48E-08	2,19E-08	2,32E-08	1,27E-08
B9905FPET05	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,57E-05	5,82E-05	4,10E-05	3,03E-05
	$e$	4,9	3,9	3,2	2,6
	$E_{oed}$ (kPa)	4,87E+02	2,67E+02	2,56E+02	2,15E+02
	$k$ (cm/s)	1,56E-08	1,50E-08	1,46E-08	1,42E-08
B9903FPET07	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,03E-05	5,36E-05	4,09E-05	3,08E-05
	$e$	4,8	3,9	3,3	2,6
	$E_{oed}$ (kPa)	3,27E+02	2,61E+02	2,47E+02	1,82E+02
	$k$ (cm/s)	2,16E-08	2,06E-08	1,58E-08	1,70E-08

A partir da tabela 4.11 acima, pode se perceber que o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) sofreu uma redução para todas as tensões aplicadas, exceto para a tensão de 150 kPa, onde os valores obtidos para as amostras B9905FPET05 e B9903FPET07 foram maiores que a amostra B100. Os valores obtidos de ( $k$ ) para a amostra B9905FPET05 foram menores quando comparados com a amostra B9903FPET07.

O módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ) das amostras com fibra de PET se mantiveram maior que a amostra B100, exceto quando aplicado a tensão de 150 kPa onde o valor obtido foi menor. A amostra B9905PETT05 apresentou valores de  $k$ , menores que as amostras B9903PETT07 e B100. A amostra B9903PETT07 apresentou valores de  $k$  maiores que B9905PETT05, porém menor que B100.

O coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) obtido na amostra B9905FPET05 foi superior a amostra B100 para as tensões de 39,38 kPa e 76,25 kPa, para as tensões 113,13 kPa e 150 kPa os valores obtidos foram menores. Para a amostra B9903FPET07 os valores do coeficiente de adensamento foram menores para todas as tensões, quando comparados com a amostra B100. Quando comparamos a amostra B9903FPET07 com a amostra B9905FPET05, podemos perceber que os valores obtidos para a amostra B9903FPET07 foram menores, exceto para a tensão de 150 kPa que apresentou valor próximo, porém superior.

### 4.2.3 Comparativo com trabalhos anteriores

Os efeitos da inserção da borracha de pneu no comportamento mecânico da bentonita, foram discutidos ao longo deste capítulo estabelecendo notáveis diferenças entre os resultados obtidos com a aplicação da fibra e do pó de borracha de pneu misturados na bentonita. No entanto, buscou-se comparar estes resultados com trabalhos que também avaliaram misturas envolvendo resíduos de borracha de pneu em granulometrias próximas da utilizada neste trabalho.

Durán (2015) realizou ensaios de adensamento em amostra de argila, argila com 5% de borracha em chip e argila com 5% de borracha em fibra com o intuito de avaliar uma possível melhora nos parâmetros do solo argiloso com a adição desses resíduos. Os ensaios de adensamento foram realizados em características similares e foram obtidos os gráficos e valores abaixo

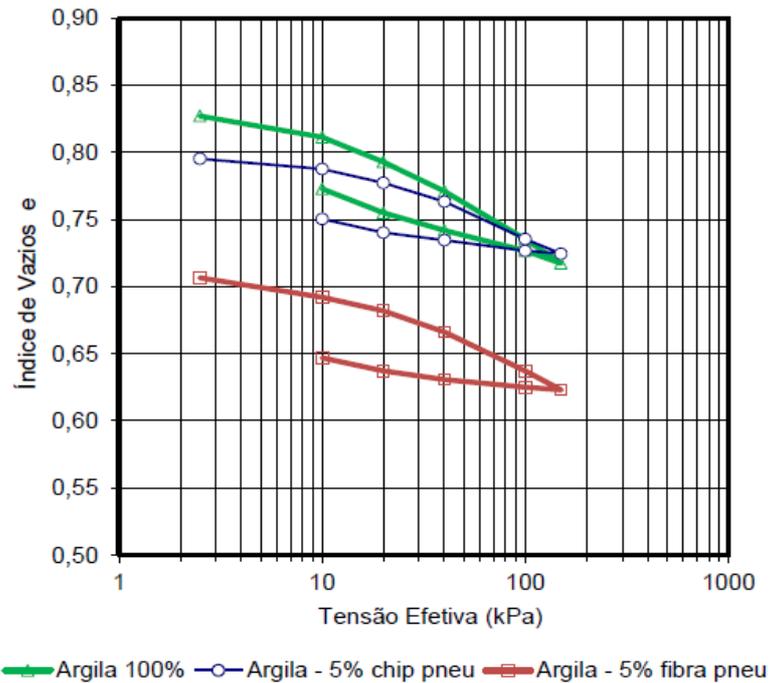


Figura 4.22 – Índice de Vazios (e) x Tensão Efetiva (Durán, 2015)

Tabela 4.12 – Parâmetros ensaio de adensamento – Bentonita x Borracha

Mistura	Parâmetros	Tensão efetiva (kPa)		
		40	100	150
<b>Argila 100%</b>	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	4,78E-02	5,86E-02	6,61E-02
	$k$ (cm/s)	9,15E-06	8,54E-06	5,18E-06
	$E_{oed}$ (kPa)	4,36E+02	6,73E+02	5,45E+03
<b>Argila – 5% chips pneu</b>	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	5,92E-02	7,20E-02	5,58E-02
	$k$ (cm/s)	2,31E-06	1,89E-06	6,92E-07
	$E_{oed}$ (kPa)	2,67E+03	4,03E+03	8,56E+03
<b>Argila – 5% fibras pneu</b>	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	7,86E-04	4,81E-04	2,84E-04
	$k$ (cm/s)	4,29E-06	1,91E-06	1,17E-06
	$E_{oed}$ (kPa)	2,39E+03	3,91E+03	6,62E+03

A partir dos resultados obtidos na tabela 4.12 acima, pode se perceber que a argila utilizada possui um coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) menor em baixas tensões e maior em altas tensões, quando comparado com a bentonita. A permeabilidade ( $k$ ) da argila são menores que a bentonita utilizada, já o módulo oedométrico foi maior em todas as tensões.

Após a adição da fibra no solo argiloso pode se perceber um aumento do módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ), uma redução na permeabilidade ( $k$ ) e uma diminuição no coeficiente de adensamento ( $c_v$ ). Nos resultados apresentados anteriormente para a mistura B95BF5, pode se perceber que o módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ) e a

permeabilidade ( $k$ ) seguiram o mesmo padrão do material argiloso. Já o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) não se comportou da mesma maneira, onde o mesmo sofreu um acréscimo em baixas tensões e uma redução quando aplicada a tensão de 150 kPa.

A partir do comparativo pode se perceber que as misturas com pó de borracha apresentam um menor coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) e índice de vazios ( $e$ ) quando comparado com a fibra, a mistura B90BP5 apresentou uma permeabilidade menor entre as demais misturas e um menor módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ) para baixas tensões.

## 5 Conclusão

### 5.1 Conclusões

Com base nos resultados apresentados e analisados anteriormente, foi possível chegar às conclusões abordadas neste capítulo.

A inserção do resíduo borracha de pneu e/ou PET causam diferentes comportamentos quando inseridos na bentonita, sendo possível observar o desenvolvimento de novos materiais geotécnicos com resíduo de borracha de pneu inservível e/ou PET. Estes novos materiais tem características semelhantes ao material puro, porém existe uma melhora em suas propriedades mecânicas.

As principais conclusões para a adição do resíduo borracha de pneu na bentonita estudada nesta pesquisa foram:

- Com base na análise das resistências de pico e residual das amostras obtidas nos ensaios de cisalhamento direto, a adição de borracha elevou os valores do Intercepto coesivo e diminuiu o ângulo de atrito em todas as misturas. Houe um aumento da resistência como um todo.

- Foi possível notar que o aumento do percentual de borracha de pneu em fibra, 5% para 10%, levou a uma melhora considerável nas resistências de pico, pós pico e residual do material para as tensões de 50kPa e 100kPa, já para tensões mais elevadas o material não apresentou diferença significativa com a variação de percentual de material;

- Observou-se que o aumento do percentual de borracha de pneu em Pó, 5% para 10%, levou a uma queda nas resistências de pico e pós pico.

- Dos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a Bentonita pura e para as misturas de Bentonita com borracha de pneu em fibra pode se perceber que houve uma tendência na redução da compressibilidade do material com a variação de 5% para 10% de fibra de pneu inserida na amostra.

- Para as misturas envolvendo pó de borracha de pneu não houve alteração da compressibilidade;

As principais conclusões para a adição do resíduo de PET na Bentonita estudada nesta pesquisa foram:

- Analisando as misturas com 5% e 10% de pó de PET sendo chamadas de B95PPET5 e B90PPET10, notou-se que não houve variação significativa com o aumento do percentual de pó de PET inserido na amostra, inclusive, o aumento do percentual levou a uma queda nas resistências de pico e residual para a tensão de 50 kPa. Tal fato ocorreu com o pó de borracha e pode reforçar que a granulometria do material inserido influencia diretamente nas resistências obtidas.

- Na análise das misturas com 5% e 10% de PET Triturado sendo chamadas de B95PETT5 e B90PETT10, notou-se que também não houve variação significativa com o aumento do percentual de PET Triturado para altas tensões, porém para a tensão de 50kPa pode se perceber uma melhora significativa nas resistências quando comparado com o material puro e com a mistura com 5% de PET triturado.

- Notou-se que nas misturas B9905FPET05 e B9903FPET07, envolvendo fibra de PET, não houve pico na curva apresentada, onde houve uma leve queda na resistência máxima obtida, em consequência o ângulo de atrito apresentou uma queda considerável quando comparado com o material puro.

- Foi possível constatar um aumento no Intercepto coesivo e uma redução no ângulo de atrito envolvendo todas as misturas com PET.

- Dos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a Bentonita pura e para as misturas de Bentonita com Pó de PET pode se notar um aumento no coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) e uma redução na permeabilidade ( $k$ ) na amostra B90PPET10, com 10% pó de PET, enquanto que para as misturas com PET triturado pode se perceber que para ambas as misturas, sendo 5% e 10% de PET triturado, houve um aumento no coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) e uma redução na permeabilidade ( $k$ ). Para as misturas envolvendo fibra de PET pode se perceber apenas uma redução na permeabilidade ( $k$ ).

## 5.2 Sugestões para pesquisas futuras.

A seguir são citadas algumas sugestões para ampliar o conhecimento e prosseguir com os estudos sobre o reforço de solos com a inserção de borracha de pneu inservíveis e PET.

- Realizar ensaios de cisalhamento direto com uma variação mais ampla nos percentuais de fibra de PET, identificando o percentual exato para se obter a melhor mistura;
- Realizar ensaios triaxiais na Bentonita pura e nas misturas com PET e borracha de pneu, para verificação de diversos tipos de comportamento;
- Desenvolver modelos de previsão de comportamento resistência-deformação, sendo este de muita importância para a simulação numérica de obras geotécnicas;
- Realizar ensaios de cisalhamento direto com borracha de pneu em chip nas tensões atuais e com tensões mais elevadas, a fim de identificar se é possível a realização dos ensaios em altas tensões com o aumento da granulometria do material utilizado;

## 6

### Referências bibliográficas

ABDELRAHMAN G. E. **Lightweight Mixture Using Clay, EPS-Beads and Cement**. Seventeen International Conference in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 17 ICSMGE. 2009.

ABIPET. **Indústria do PET no Brasil**. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, 1995.

AHMED, I. **Laboratory Study on Properties of Rubber Soils**. Ph.D. thesis, school of civil engineering, Purdue University, W. Lafayette, IN, 1992.

ALBARNAZ, LUIZ DELFINOO, **A jazida de bentonita de Bañado de Medina**, Melo, Uruguai. Geologia, mineralogia e utilização tecnológica (2009).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080-4**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, Philadelphia, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 7181**: SOLO – Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 6459**: SOLO – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 7180**: SOLO – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 6508**: SOLO – Determinação da densidade real dos grãos. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) **ABNT NBR 6457**: AMOSTRAS DE SOLOS – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1990) **ABNT NBR 12004**: AMOSTRAS DE SOLOS – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesos. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991) **ABNT NBR 12051**: AMOSTRAS DE SOLOS – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesos. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991) **ABNT NBR 12553**: SOLO – Geotêxteis. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995) **ABNT NBR 6502**: SOLO – Rochas e Solos. Rio de Janeiro/RJ.

BARRY, R. P.; PELLEREAU, B. **Bioriented film**. US n5,241,030 aug 1993

BARBOZA, A. P. **Influência de compatibilidade interfaciais nas propriedades mecânicas de compósitos de PET reciclado/fibra de vidro**. Master Dissertation, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos 2003.

CALHEIROS, ALENA VIKOVÁ; **Análise do comportamento de Solos Reforçados com Poliestireno Expandido**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2013

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. PhD Thesis. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T.; CONSOLI, N. C.; COOP, M. R. **Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand.** Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, v.131, p.1434-1436, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. CONSOLI, N. C. **Behavior of a Fiber-Reinforced Bentonite at Large Shear Displacements.** Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, v.132, p.1505-1508, 2006.

CURCIO, D. S. **Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra.** Tese de Doutorado em Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRJ. Rio de Janeiro. 2008.

DURÁN RAMIREZ, GARY GARY. **Estudo experimental de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2013

DURÁN JARAMILLO, NATALIA ANDREA; **Comportamento mecânico de solos reforçados com borracha de pneus.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015

ELZEA, J e MURRAY, H. H. (1995). **Bentonite, In: Industrial Mineral and Rocks,** AIME, p.223-246.

FRANCO, K. **Caracterização do comportamento geotécnico de misturas de resíduo de pneus e solo laterítico.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2012.

GRAY, D.H.; OHASHI, H. **Mechanics of fiber reinforcement in sand.** Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.109, n.3, p. 335-353, 1983.

GRAY, G. R.; DARLEY, H.C.H.; **Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids,** 1985 509p.

GUIMARÃES, PAULO VITOR. **Caracterização de embalagens PET com aditivos absorvedores de raios UV** / Paulo Vitor Guimarães. – Poços de Caldas, 2016

HARBEN, P.W. & KUZVART, M. (1996) **Industrial minerals: A global geology**. Industrial Minerals Information Ltd, 462pp.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Relatório de pneumáticos-Resolução CONAMA nº 416/09**. p. 01-75, 2015.

LAGARINHOS, C. E TENÓRIO, J. **Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no brasil**. *Polímeros: ciência e tecnologia*. v. 18, n.2, p. 106–118, 2008.

LOUZADA, NATHALIA S. L. ; **Experimental Study of Soils Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET) Residue**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015

MANO, E. B., MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2nd ed., Ed Edgard Blucher Ltda, p.118, 2001.

MELO, J. W. **Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo**. Dissertação de Mestrado. Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, UFOP P CETEC – UFMG. Belo Horizonte, 2004.

MOO-YOUNG, H.; SELLASIE, K.; ZEROKA, D.; SABNIS, G. **Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction**. *Journal of environmental engineering*, n.10, p.921-929, 2003.

RAMIREZ, G. **Estudo experimental de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.

RESENDE, M. M, SILVA, L. R., CANO, T. M. (2016). **Bentonita. Sumário Mineral DNPM.**

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. **Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismo de degradação e sua reciclagem.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.19, n.2, p.121-132, 2009.

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

SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, L. C.; LUCENA, A. E.; PATRICIO, J. D. **Estudo da utilização do politereftalato de etileno (PET) para compor as misturas asfálticas dos revestimentos rodoviários.** 42ª Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Gramado, 2013.

SZELIGA, L., **Avaliação do comportamento de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis para aplicação em obras,** Projeto Final do Curso (ENG1130), Título de Engenheiro Ambiental, Departamento de Engenharia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

VENKATAPPA, G. R.; DUTTA, R. K. **Compressibility and strength behaviour of sand – tyre chip mixtures.** Geotechnical and Geology Engineering, v.24, n.3, p.711-724, 2006.

USGS (2007). Clays. U. S. **Mineral Commodity Summaries**, January 2007

USGS (2016). Clays. U. S. **Mineral Commodity Summaries**, April 2016

WU, W. Y.; BENDA, C. C.; CAULEY, R. F. **Triaxial determination of shear strength of tire chips.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.123, n.5, p.479-482, 1997.

YANG, S.; LOHNES, R. A.; KJARTANSON, B. H. **Mechanical properties of shredded tires**. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, v.25, n.1, p.44-52, 2002.

ZORNBERG, J. G.; CABRAL, A. R.; VIRATJANDR, C. **Behaviour of tire share – sand mixtures**. Canadian Geotechnical Journal, v.41, n.2, p.227-241, 2004.