



**Natalia Andrea Durán Jaramillo**

**Comportamento Mecânico de Solos  
Reforçados com Borracha de Pneus**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro  
Agosto de 2016



**Natalia Andrea Durán Jaramillo**

**Comportamento Mecânico de Solos  
Reforçados com Borracha de Pneus**

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

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

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

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

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Nilo Cesar Consoli**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico-científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de agosto de 2016

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

**Natalia Andrea Durán Jaramillo**

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Universidade Pontifícia Bolivariana de Bucaramanga (Bucaramanga-Colômbia) em 2013. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2014, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a solos reforçados.

Ficha Catalográfica

Durán Jaramillo, Natalia Andrea

Comportamento mecânico de solos reforçados com borracha de pneus / Natalia Andrea Durán Jaramillo; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2016.

112 f.: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Comportamento mecânico. 3. Ensaio triaxiais. 4. Solos reforçados. 5. Borracha de pneus. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

A Deus, por tudo.

A meu companheiro de vida Manuel, pelo seu imenso amor e por me transformar numa mulher melhor a cada dia.

A minha mãe e amiga Inelva, pelo amor e impulso colocados em cada passo da minha existência.

A minha avó Maria Elvia, as minhas tias Miriam e Maria Teresa e a minha prima Milena, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

Aos meus adorados primos Juan David y Angie, por encher a minha alma de alegria.

A minha orientadora Michéle Dal Tóe Casagrande pelo permanente estímulo e amizade.

A meus amigos de toda a vida Juli, Eiver, Ruth, Silvia e Sara pelas contínuas mensagens de apoio e amizade durante este tempo.

As meninas da sala 614, Nathalia (BH), Nathalia (SG), Mariana, Anita e Gabrielle pela imensa ajuda e amizade incondicional.

A meus amigos colombianos e peruanos que tive a oportunidade de conhecer durante a pós-graduação.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

A equipe de trabalho do Laboratório de Geotecnia e Meio ambiente, pelo apoio para realizar os ensaios.

À CAPES, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Jaramillo, Natalia Andrea Durán; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Comportamento mecânico de solos reforçados com borracha de pneus.** Rio de Janeiro, 2016. 112 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O volume de pneus inservíveis continua aumentando a cada ano, se tornando um tema de grande preocupação para a sociedade. Motivados por esta problemática ambiental, o presente estudo experimental propõe utilizar 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 realizaram-se 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, se evidencia que, tanto para a argila quanto para a areia, foi mais efetivo o reforço com 10% de fibras de borracha de pneu. Todos os compósitos estudados possuem 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 contribuiria com o menor consumo de material natural e redução dos custos de transporte e volume de material mobilizado.

## Palavras-chave

Comportamento mecânico; ensaios triaxiais; solos reforçados; borracha de pneus.

## Abstract

Jaramillo, Natalia Andrea Durán; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Mechanical behavior of soils reinforced with tires rubber**. Rio de Janeiro, 2016. 112 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The volume of discarded tires continues to increase each year, becoming a major topic of concern for society. Motivated by this environmental issue, this experimental study proposes using tire chips and tire buffings as an alternative material to improve the shear strength of two types of soil (sand and clayey soil). Because of this, standard Proctor compaction tests, consolidated-drained triaxial tests and compressibility tests were performed to assess the influence of tire rubber particle size, (with average sizes of 4.6 mm and 2 mm, respectively) and tire rubber content (5, 10% and 15% by dry weight of soil) into the mechanical behavior of sand and clayey soil. The tests results showed that both, chips and buffings contribute increasing the shear strength parameters of both the soil and increase the strain energy absorbed during the shear phase. By analyzing, the mechanical response both for clayey soil and for sand was found that the best shear strength improvement was obtained at 10% of tire buffings. All the composites showed resistance characteristics that would ensure the requirements for many geotechnical applications (embankments over soft soils, slope reinforcement and surface foundations), so the use of waste tires as a reinforcement material would help solve problems associated with natural resources and reducing transportation costs and earthmoving.

## Keywords

Mechanical behavior; triaxial tests; reinforced soils; tires rubber.

## Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Relevância e Justificativa da Pesquisa	16
1.2.	Objetivos	17
1.3.	Organização do Trabalho	18
2	Revisão Bibliográfica	19
2.1.	Atual cenário de gerenciamento dos pneus inservíveis no Brasil	19
2.1.1.	Legislação ambiental	19
2.1.2.	Principais destinações ambientalmente adequadas	21
2.1.3.	Trituração dos pneus	24
2.2.	Uso da borracha de pneu como material alternativo para reforço de solos	25
2.2.1.	Classificação	26
2.2.2.	Propriedades e aplicabilidade em obras de engenharia	26
2.2.3.	Comportamento mecânico de misturas de solo – resíduos de pneu	27
2.2.3.1.	Compactação	27
2.2.3.2.	Resistência ao cisalhamento	31
2.2.3.3.	Compressibilidade	38
2.2.3.4.	Permeabilidade	40
2.2.3.5.	Análise química dos resíduos de pneu e impactos na qualidade da água	43
2.2.4.	Considerações finais	44
3	Programa Experimental	45
3.1.	Materiais	45
3.1.1.	Areia	45
3.1.2.	Solo argiloso	46
3.1.3.	Borracha de pneu	47
3.1.4.	Água	48

3.1.5. Misturas solo-borracha de pneu	48
3.2. Métodos e procedimentos de ensaio	49
3.2.1. Ensaio de caracterização física	49
3.2.1.1. Índice de vazios máximo e mínimo	49
3.2.1.2. Análise granulométrica	50
3.2.1.3. Densidade real dos grãos	50
3.2.1.4. Limites de Atterberg	51
3.2.2. Ensaio mecânicos	51
3.2.2.1. Ensaio de compactação proctor standard	51
3.2.2.2. Ensaio triaxiais CID	52
3.2.2.3. Ensaio de adensamento unidimensional	62
4 Resultados e análises	63
4.1. Ensaio de caracterização física	63
4.1.1. Areia	63
4.1.2. Solo argiloso	64
4.2. Ensaio mecânicos	65
4.2.1. Ensaio de compactação proctor standard	65
4.2.2. Ensaio triaxiais CID	67
4.2.2.1. Areia	68
4.2.2.2. Misturas de areia – chips de borracha de pneu	70
4.2.2.3. Misturas areia–fibras de pneu	77
4.2.2.4. Solo argiloso	82
4.2.2.5. Misturas de solo argiloso-chips de borracha de pneu	83
4.2.2.6. Misturas de solo argiloso-fibras de pneu	88
4.2.2.7. Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas em areia em relação ao teor e granulometria da borracha empregada	95
4.2.2.8. Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas em solo argiloso em relação ao teor e granulometria da borracha empregada	98
4.2.3. Comparação com os resultados de pesquisas anteriores	101
4.2.4. Ensaio de adensamento unidimensional	104

5 Considerações finais	107
5.1. Conclusões	107
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	109
6 Referências bibliográficas	110

## Lista de Figuras

Figura 2.1 Tecnologias utilizadas na destinação de pneumáticos inservíveis (%) (IBAMA, 2015)	25
Figura 2.2 Curvas obtidas no ensaio de compactação proctor normal para argila pura e misturas com chips de pneu finos (a) e chips de pneu grossos (b) (Cetin et al., 2006)	29
Figura 2.3 Curvas de compactação para todos os teores (Chrusciak e Araújo, 2015)	31
Figura 2.4 Representação esquemática da influência do teor de resíduos na resistência ao cisalhamento da mistura de solo – pedaços de pneu para uma constante densidade relativa da matriz do solo, (Zornberg et al., 2004)	33
Figura 2.5 Tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e deformação vertical de a) solo argiloso puro e (b - f) misturas com chips de pneu fino (Cetin et al., 2006)	35
Figura 2.6 Comparação entre os resultados obtidos com ensaios triaxiais drenados e com a rede neural à tensão confinante efetiva de 200 kPa (Edinçliler et al., 2010)	37
Figura 2.7 Curvas de compressibilidade das misturas de solo argiloso - chips de pneu de 2 polegadas para o primeiro estágio de carregamento/descarregamento (Ahmed, 1993).	40
Figura 2.8 Coeficientes de permeabilidade vs tensão normal das misturas com a) chips de pneu finos e b) chips de pneu grossos (Cetin et al. 2006)	41
Figura 2.9 Coeficientes de condutividade hidráulica para a argila pura e misturas medidos antes e depois do cisalhamento (Özkul e Baykal, 2007)	42
Figura 3.1 Areia utilizada	45
Figura 3.2 Solo argiloso utilizado nesta pesquisa	46
Figura 3.3 Chips de pneu com tamanho 4,76 mm	47
Figura 3.4 Fibras de pneu com tamanho 2,0 mm	48

Figura 3.5. Prensa mecânica utilizada	54
Figura 3.6 Medidor de variação de volume do tipo Imperial College	54
Figura 3.7 Preparação do corpo de prova de areia	57
Figura 3.8 Preparação dos corpos de prova do solo argiloso	59
Figura 3.9 Mistura de argila – 5% chips de pneu compactada no anel de adensamento utilizado	62
Figura 4.1 curva granulométrica dos solos e da borracha de pneu	64
Figura 4.2 Curvas de compactação do solo argiloso puro e misturas com chip de borracha de pneu	66
Figura 4.3 Curvas de compactação do solo argiloso puro e misturas com fibra de borracha de pneu	66
Figura 4.4 Resultados dos ensaios triaxiais CID da areia	69
Figura 4.5 Resultados dos ensaios triaxiais CID das misturas areia-5% chips de pneu	71
Figura 4.6 Resultados dos ensaios triaxiais CID das misturas areia-10% chips de pneu	73
Figura 4.7 Comportamento tensão-deformação das misturas areia-chips de pneu	74
Figura 4.8 Comparação das envoltórias de resistência para as misturas areia-chips de pneu	75
Figura 4.9 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial das misturas de areia-chips de pneu	76
Figura 4.10 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura areia-5% fibras de pneu	77
Figura 4.11 Resultados do ensaio triaxial CID da mistura areia-10% fibras de pneu	78
Figura 4.12 Comportamento tensão-deformação das misturas areia-fibra de pneu	79
Figura 4.13 Comparação das envoltórias de resistência para as misturas areia – fibras de pneu	80
Figura 4.14 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial, das misturas de areia-fibras de pneu	81
Figura 4.15 Resultados do ensaio triaxial CID do solo argiloso puro	82

Figura 4.16 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila – 5% chip de pneu	84
Figura 4.17 comportamento tensão – deformação da mistura argila-5% chip de pneu	85
Figura 4.18 Comparação das envoltórias de resistência do solo puro e mistura argila-5% chip de pneu	86
Figura 4.19 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial, do solo puro e mistura argila-5% chip de pneu	87
Figura 4.20 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila-5% fibras de pneu	88
Figura 4.21 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila-10% fibras de pneu	89
Figura 4.22 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila-15% fibras de pneu	90
Figura 4.23 Comportamento tensão – deformação das misturas argila - fibras de pneu	92
Figura 4.24 Comparação das envoltórias de resistência obtidas para as misturas argila-fibras de pneu	93
Figura 4.25 Energias de deformação absorvidas para 18% da deformação axial, das misturas argila-fibra de pneu	94
Figura 4.26 Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas areia-borracha de pneu	97
Figura 4.27 Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas areia-borracha de pneu	100
Figura 4.28 Comparação entre as relações tensão-deformação obtidas para a misturas de solo argiloso com chip, fibra e borracha moída de pneu no teor de 5%	102
Figura 4.29 Comparação entre as relações tensão-deformação obtidas para as misturas de solo argiloso com fibra e borracha moída de pneu no teor de 10%	103
Figura 4.30 Resultados do ensaio de adensamento unidimensional realizados para o solo puro e misturas de solo argiloso com chips e fibras de pneu	105

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1 Índices físicos do solo arenoso	63
Tabela 4.2 Índices físicos do solo argiloso	64
Tabela 4.3 Parâmetros de compactação obtidos para o solo argiloso e misturas com chips de pneu	67
Tabela 4.4 Parâmetros de compactação obtidos para o solo argiloso e misturas com fibras de pneu	67
Tabela 4.5 Valores de energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial das misturas areia-chips de pneu	76
Tabela 4.6 Valores de energias de deformação absorvidas para 18% da deformação axial nas misturas areia-fibras de pneu	81
Tabela 4.7 Valores de energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial do solo puro e mistura argila-5% chip de pneu	87
Tabela 4.8 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial, das misturas argila – fibras de pneu	94
Tabela 4.9 Parâmetros de resistência determinados para as misturas de ambos os solos (areia e argiloso) com chips e fibras de borracha de pneu	101
Tabela 4.10 Parâmetros de adensamento obtidos para o solo puro e para as misturas de argila com chips e fibras de pneu	106

## Lista de Símbolos

$\omega_{ótimo}$	Teor de umidade ótimo de compactação
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico seco máximo
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$\omega$	Teor de umidade
$\rho$	Massa específica do solo
$G_s$	Densidade real dos grãos
$E$	Índice de vazios
$e_{\text{máximo}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mínimo}}$	Índice de vazios mínimo
$C_u$	Coeficiente de uniformidade
$C_c$	Coeficiente de curvatura
$D_{10}$	Diâmetro efetivo
$D_{50}$	Diâmetro médio
$t_f$	Tempo mínimo de ruptura
$L$	Altura do corpo de prova
$N$	Velocidade de cisalhamento
'	Relativo a tensões efetivas
”	Polegadas
#	Número
$\epsilon_a$	Deformação axial
$\epsilon_f$	Deformação axial na ruptura
$\epsilon_v$	Deformação volumétrica
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\sigma_1, \sigma_3$	Tensões principais, maior e menor
$\sigma'_c$	Tensão de confinamento efetiva
$\Delta\sigma$	Tensão-desvio
$S_u$	Resistência não Drenada
$\phi'$	Ângulo de atrito
$c'$	Coesão

p'	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ (Tensão efetiva média normal)
q	$(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ (Tensão de desvio)
H	Altura final do corpo de prova.
h <sub>i</sub>	Altura inicial do corpo de prova.
%	Porcentagem
mm	Milímetro
cm	Centímetros
°C	Graus centígrados

# 1 Introdução

## 1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa

Com a presente pesquisa procura-se conhecer a viabilidade da utilização de borracha de pneu triturada (em diferentes granulometrias) como material de reforço em solos, através de ensaios de laboratório. A incorporação deste e de outros resíduos sólidos nos ciclos produtivos apresenta grandes vantagens em relação ao uso de materiais tradicionais, entre os quais destacam-se: (i) contribui na redução da exploração de recursos naturais não renováveis, o que por sua vez diminui os custos de compra de materiais, (ii) minimiza os riscos à saúde pública, eliminando os focos de reprodução de mosquitos transmissores de doenças e (iii) prolonga o tempo de vida útil dos aterros sanitários.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 416/2009 estabelece que, para cada pneu novo comercializado, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível (relação 1:1). Segundo o Relatório de Pneumáticos do ano 2015, o cumprimento da meta nacional de destinação de pneumáticos inservíveis chegou a 97,6%, indicando que tanto fabricantes quanto importadores têm se responsabilizado frente à problemática ligada a este tipo de resíduos. Dentro das práticas de destinação mais comuns encontram-se a utilização dos pneus inservíveis em fornos de clínquer, como substituto parcial de combustíveis (coprocessamento) e a fabricação de borracha moída em diferentes granulometrias (granulação). Contudo, o emprego deste material como técnica de reforço de solos continua sendo matéria de estudo, nacional e internacionalmente.

Este trabalho aborda o comportamento mecânico de solos reforçados com borracha de pneu reciclada, proveniente do processo de trituração de pneus

inservíveis, visando a sua utilização em projetos de engenharia, tais como aterros sobre solos moles, camadas de aterros sanitários, reforço de taludes e fundações superficiais e assim contribuir com a minimização dos problemas ambientais e sociais associados a este tipo de resíduos.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico de dois tipos de solos reforçados com resíduos de pneu triturados em duas diferentes granulometrias.

Este objetivo será alcançado através da análise do comportamento mecânico obtido nos ensaios de laboratório realizados nos solos puros e misturas de solo-borracha, apresentada na forma de chips e fibras.

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

- Determinar as propriedades mecânicas dos solos puros e misturas de solo – borracha de pneu, por meio de ensaios de compactação, ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados e ensaios de adensamento unidimensional;
- Analisar o comportamento mecânico dos solos puros e misturas solo – borracha em relação ao nível de tensão confinante efetiva aplicada nos ensaios de compressão triaxial;
- Avaliar o comportamento mecânico das misturas solo-borracha de pneu em relação ao teor de borracha de pneu inserido em cada tipo de solo;
- Comparar o efeito de reforço obtido nas misturas solo-borracha de pneu em relação à granulometria da borracha;
- Comparar a efetividade das inclusões de chips e fibras de pneu em relação ao tipo de solo.
- Comparar os resultados obtidos com estudos experimentais que utilizaram outras granulometrias de borracha de pneu.

### **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 apresentado o atual cenário de gerenciamento dos pneus inservíveis e também são citados alguns trabalhos científicos que demonstram o alto potencial de uso dos resíduos de pneu como material alternativo para o reforço de solos.

No Capítulo 3 é descrito detalhadamente o programa experimental seguido nesta pesquisa. Descrevem-se também os materiais utilizados, os equipamentos e os métodos dos ensaios realizados.

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 do teor e da forma dos resíduos de pneu inseridos nos solos.

Finalmente no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais baseadas na análise de resultados e são propostas futuras pesquisas para incrementar o conhecimento do comportamento mecânico das misturas solo-borracha de pneu.

## **2**

### **Revisão Bibliográfica**

#### **2.1.**

##### **Atual cenário de gerenciamento dos pneus inservíveis no Brasil**

##### **2.1.1.**

###### **Legislação ambiental**

Os primeiros esforços por reduzir os problemas ambientais gerados pelo acúmulo de pneus abandonados, queimados ou dispostos inadequadamente nos aterros sanitários começaram com a instituição da Resolução Conama n° 258/99, aprovada em 26 de agosto de 1999, a qual obrigava aos fabricantes e importadores a darem destinação final adequada aos pneus inservíveis. A coleta e destinação final ambientalmente adequada dos pneus inservíveis existentes no território nacional, devia ser na proporção relativa às quantidades fabricadas e importadas.

A partir da entrada em vigência da referida resolução, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), entidade que representa os fabricantes de pneus novos no Brasil, interessou-se por participar no gerenciamento deste tipo de resíduos através da iniciativa de criar um programa para coleta e adequada disposição de pneus que foi nomeado como Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis.

Sem ter muita atuação nos municípios, o programa não chegou a atender as metas de coleta e adequada destinação de pneus propostas na Resolução 258/99.

Em 2007, os fabricantes e importadores de pneus novos elaboraram um plano de gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação final dos pneus inservíveis que atualmente é conhecido como a Reciclanip.

Em 2009, devido ao não cumprimento das metas estabelecidas e o consequente aumento de passivos ambientais, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA revogou a resolução n° 258/99 por meio da resolução n° 416, de 30 de setembro de 2009 a qual determina aos fabricantes e importadores de pneus novos, com peso unitário superior a dois quilos, a coletarem e destinarem adequadamente os pneus inservíveis em relação 1:1, ou seja que para cada pneu

novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível. Além disso, exige a implementação de pontos de coleta de pneus inservíveis em todos os municípios com população superior a cem mil habitantes.

Após a aprovação da legislação, os fabricantes já tinham montado um sistema de coleta, pré-tratamento e destinação final, o número de empresas para coletar e destinar os pneus inservíveis aumentou em quase quinze vezes e já para 2010 eram 124 empresas cadastradas para a reciclagem, laminação e valorização energética dos pneus inservíveis.

Com o objetivo de colocar em prática o modelo de logística reversa, aplicado em países como Estados Unidos, Japão e na Europa foi estabelecida a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 2 de agosto de 2010, a qual determina que os fabricantes, distribuidores, importadores e comerciantes de agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, produtos eletrônicos e seus componentes, estão obrigados a desenvolverem um sistema de logística reversa para o retorno de produtos e embalagens no final da vida útil, que independe do serviço público de limpeza urbana. Além disso, determina que a gestão dos resíduos seja de responsabilidade de todos: governo federal, estados, municípios, empresas e sociedade.

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), a lei sancionada traz avanços para o setor e entre os pontos positivos são destacados, a logística reversa, a responsabilidade compartilhada e o princípio de hierarquia na gestão. Como ponto negativo, a lei não indica as fontes de recursos para custear as mudanças, nem aponta as linhas de financiamento, benefícios econômicos e fiscais para o setor. Deve ser feito um detalhamento para a implementação da logística reversa na prática, responsabilidade compartilhada e acordos setoriais (Lagarinhos, 2011).

Devido às dificuldades na implementação da PNRS, o gerenciamento deste tipo de resíduo continua sendo regulamentado pela resolução nº 416/09 onde a logística reversa já era exigida para o descarte de medicamentos – embalagens em geral – lâmpadas de mercúrio e de luz mista – eletroeletrônico.

Para o cumprimento da resolução CONAMA n° 416/09, os fabricantes, importadores e destinadores de pneus devem preencher o relatório de comprovação de destinação de pneus inservíveis e o cadastro dos pontos de coleta.

A PNRS estabeleceu o Cadastro Técnico Federal (CTF) do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) como um dos seus instrumentos para gerar informações para os entes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) para ações de controle, fiscalização e gestão ambiental. O gerenciamento das informações do CTF é realizado pela Diretoria de Qualidade Ambiental (Diqua). O IBAMA emite o relatório anual do CTF contendo as cifras e estatísticas da destinação dos pneus inservíveis realizada pelas empresas destinadoras, fabricantes e importadores.

De acordo com o informado no Relatório de Pneumáticos do ano 2015 correspondente a avaliação dos dados do ano 2014, o cumprimento da meta nacional de destinação de pneumáticos inservíveis chegou a 97,6%.

### 2.1.2.

#### **Principais destinações ambientalmente adequadas**

Apresentam-se as tecnologias mais usadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus inservíveis, praticadas pelas empresas que declaram anualmente as suas atividades de destinação no Relatório de Pneumáticos.

- **Coprocessamento:** 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 (Lagarinhos, 2006). O coprocessamento 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 coprocessamento 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 (Lagarinhos, 2006). Em 2014 foram coprocessados 300.510 mil toneladas de pneus inservíveis, 55,17% do total reciclado no ano.

- **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. (Lagarinhos, 2006). 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.
- **Granulação:** Processo industrial de fabricação de borracha moída, em diferente granulometria 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.
- **Industrialização do Xisto:** Processo industrial de coprocessamento do pneumático inservível conjuntamente com o xisto betuminoso, como substituo 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 (Lagarinhos, 2006). O Relatório de Pneumáticos, em 2015, informou que durante o ano 2014 esta tecnologia de destinação não foi utilizada.

- **Regeneração da borracha:** A regeneração é um processo de desvulcanização onde os pneus depois de triturados, são submetidos à temperatura, pressão, recebem oxigênio e vapor de produtos químicos, como álcalis e óleos minerais, dentro 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 passível 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. (Lagarinhos, 2006). Em 2014, foram utilizadas 316,28 toneladas de pneus inservíveis que corresponde ao 0,06% do total reciclado no mesmo ano.

- **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.

### 2.1.3 Trituração dos pneus

Para a aplicação das tecnologias acima descritas, muitas vezes é necessária 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 ou com resfriamento criogénico. 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 triturador 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, 2006).

De modo geral, o coprocessamento 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 figura 2.1 apresenta as tecnologias de destinação e sua representatividade (IBAMA, 2015).

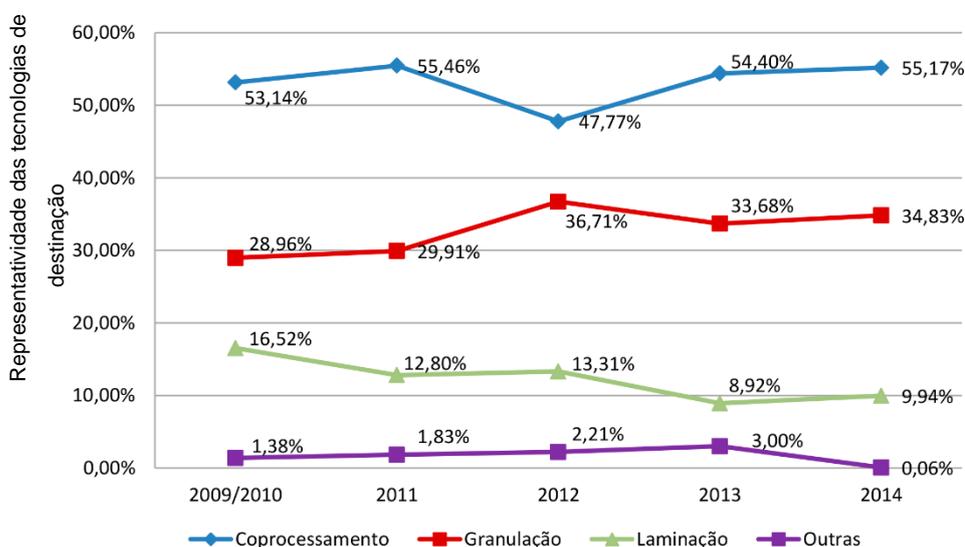


Figura 2.1 Tecnologias utilizadas na destinação de pneumáticos inservíveis (%) (IBAMA, 2015)

## 2.2.

### Uso da borracha de pneu como material alternativo para reforço de solos

O uso de inclusões (reforço) para melhorar as propriedades mecânicas dos solos em obras de terra, data desde tempos antigos, contudo, apenas nas três últimas décadas, estudos analíticos e experimentais levaram às atuais técnicas de reforço (Zornberg et al., 2004).

### **2.2.1. Classificação**

Através das diferentes técnicas de processamento, diferentes tamanhos e formas de resíduos de pneu podem ser obtidas: pedaços de pneu (*tire shreds*), variando de 2 a 12 polegadas, chips (*tire chips*) de 0,05 a 2 polegadas, granular (*tire crumb*) com tamanho de partícula inferior a 0,6 mm e por último a combinação de pedaços e chips, definida pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM D 6270) como *Tire Derivated Aggregate* (TDA), usada como alternativa para substituição de minerais convencionais ou como agregado em aplicações de engenharia.

### **2.2.2. Propriedades e aplicabilidade em obras de engenharia**

Os resíduos de pneu são materiais de baixo peso específico, quando comparados a outros materiais de preenchimento de aterros. Pesos específicos aparentes de 2,4 a 7 kN/m<sup>3</sup> foram relatados para pedaços de pneus (Franco, 2012).

Zornberg et al. (2004), encontraram um valor de massa específica dos sólidos dos pedaços de pneu igual a 11,5 kN/m<sup>3</sup>, que está dentro da faixa de valores estabelecida por (Edil e Bosscher, 1993), a qual varia de 11,3 a 13,6 kN/m<sup>3</sup> dependendo da quantidade de aço presente no pneu. Cabe ressaltar que pedaços de pneu sem aço apresentam valores de massa específica próximos a 11,5 kN/m<sup>3</sup>.

Devido ao seu baixo peso específico e a suas excelentes propriedades de durabilidade, resistência, resiliência, entre outras, os resíduos de pneu podem ser usados para diferentes propósitos de engenharia tais como rodovias e construções de terra como taludes e aterros, sistema de drenagem, tratamento de chorume e isolante térmico (Edinliler et al. 2010).

Resultados de ensaios de compressão simples sugerem que aterros preenchidos com resíduos de pneu podem alcançar resistência suficiente para atender as exigências da capacidade de carga enquanto ao mesmo tempo é reduzido o peso de sobrecarga sobre os solos subjacentes. Além disso o uso dos resíduos de pneu como material de baixo peso específico pode ajudar a reduzir os recalques do

solo por constituir-se como um material de preenchimento para aterros com menor densidade (Franco, 2012).

Foose et al. (1996) aborda diferentes projetos nos quais tem sido utilizado resíduos de pneu; por exemplo, O departamento de transporte de Oregon, USA usou 400.000 pneus, como material de preenchimento leve em conjunto com um contrapeso de solo, colocado acima de uma região onde houve um deslizamento de terra, com o objetivo de aumentar o fator de segurança de estabilidade do talude. Grandes projetos de terraplanagem sob solos moles têm sido construídos em Minnesota com 52.000 pneus usados, Pensilvânia e Vermont com 2.700 m<sup>3</sup> de pneus usados. Finalmente, comenta-se que (Bosscher et al., 1993) realizaram um detalhado estudo de campo de um aterro rodoviário construído com areia e pedaços de pneu submetido a um alto tráfego de veículos de carga pesada. A análise concluiu que após um período de 2 anos as seções construídas com pedaços de pneu puros consolidaram um pouco mais que as camadas construídas com solo puro.

É importante destacar que para usar os resíduos de pneu em obras de engenharia, se faz necessário contar com estudos que permitam verificar o comportamento das misturas solo-borracha de pneu, com descrição das propriedades mecânicas como será apresentado neste trabalho.

### **2.2.3.**

#### **Comportamento mecânico de misturas de solo – resíduos de pneu**

##### **2.2.3.1.**

##### **Compactação**

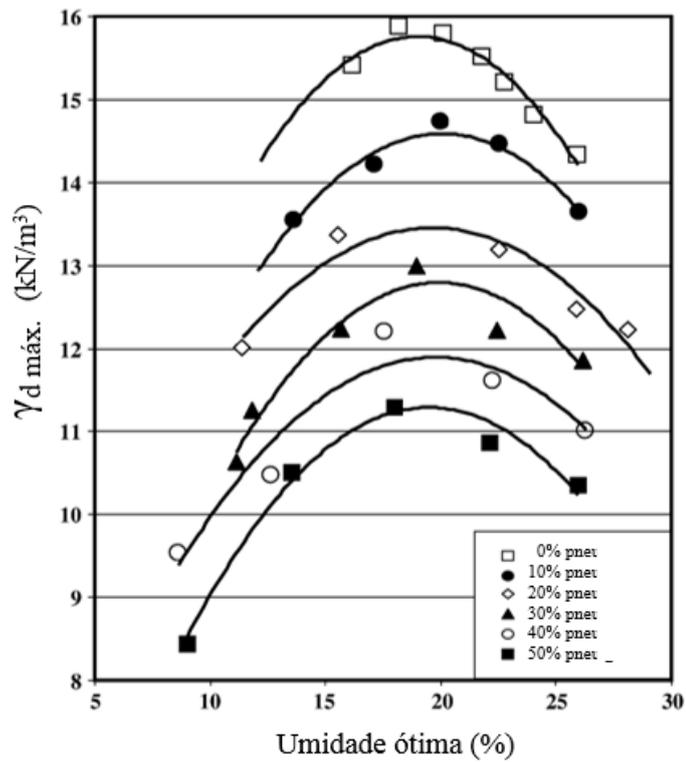
Desde que o uso particular dos resíduos de pneu envolva a construção de aterros para melhora das propriedades mecânicas, as características de distribuição e posicionamento desses materiais no aterro, tornam-se muito importantes. (Edil e Bosscher, 1994).

Bosscher et al., (1993); Ahmed e Lovell (1993); Humphrey e Manion (1992) realizaram ensaios de compactação em misturas de solo com pedaços de pneu, cujos resultados demonstraram que:

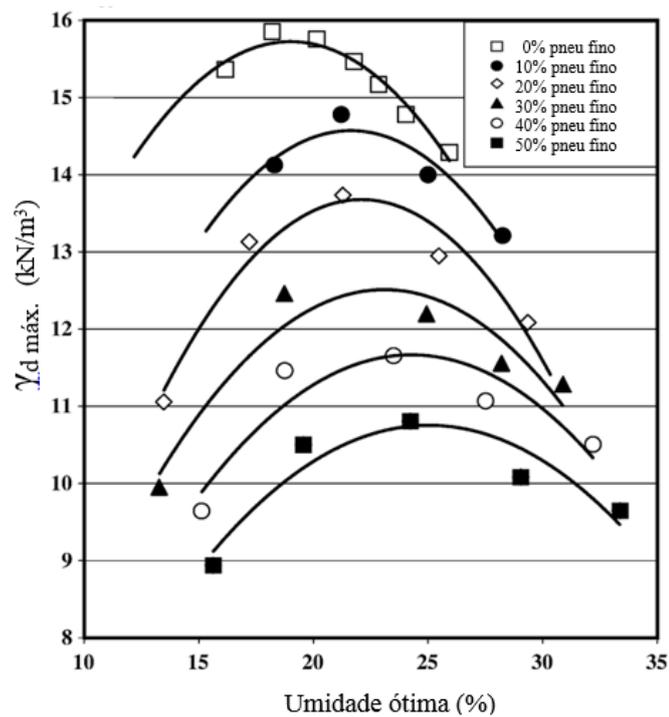
1. Os pedaços de pneu e misturas de solo-borracha de pneu podem ser compactados usando os procedimentos de compactação comuns;

2. O peso específico das misturas é controlado principalmente pelo conteúdo de solo, porém, a energia de compactação e a umidade usada na moldagem das amostras parecem ter uma pequena influência;
3. A compactação vibratória não é efetiva para compactar as misturas de solo-borracha de pneu.

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. Os resultados obtidos são mostrados na figura 2.2. Observa-se que para o solo puro, o peso específico seco máximo ( $\gamma_d \text{ máx}$ ) 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 e para 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 como a argila usada nesse trabalho.



(a) Chips de pneu finos



(b) Chips de pneu grossos

Figura 2.2 Curvas obtidas no ensaio de compactação proctor normal para argila pura e misturas com chips de pneu finos (a) e chips de pneu grossos (b) (Cetin et al., 2006)

Considerando que a maioria das pesquisas já realizadas tem utilizado apenas faixas de grãos de borracha finos (na faixa de 2 até 6 mm) e com isso pouco foi encontrado a respeito de lascas de borracha (tamanho entre 20 e 50 mm), (Chrusciak e Araújo, 2015) propuseram um estudo experimental do comportamento do solo de Brasília (constituído predominantemente de argila) e misturas do mesmo com fragmentos de borracha advindos da trituração de pneus inservíveis, por meio da realização de ensaios de caracterização e ensaios de compactação.

Os fragmentos utilizados foram classificados como pedaços de pneu (*tire shred*) por ainda apresentarem fios de aço, barbantes e seus demais componentes. Foram definidos inicialmente os teores de 5, 10 e 15% com relação ao peso. Porém durante a execução da compactação utilizando o primeiro teor de 5%, observou-se que existia uma grande dificuldade no processo de compactação com a borracha e quando desconfinadas as amostras apresentavam grandes fissuras. Foi então decidido que os teores estudados seriam de 2,5%, 3,75%, 5% e 7,5%.

Na figura 2.3 são apresentadas as curvas de compactação. Observa-se que, à medida que o teor de resíduo de borracha é acrescentado, ele exerce certa influência sobre o peso específico seco máximo das misturas, diminuindo em até 4,7% para misturas como teor de 7,5% com relação à mistura de solo puro. Quanto à variação da umidade, esta sofre pouca alteração, e, considerando em termos práticos a possível variação da umidade de 2% para mais ou menos, admitida em obras, esta umidade permaneceu praticamente a mesma. Em todas as porcentagens, os corpos de prova quando desconfinados apresentaram trincas entre o solo e os pedaços de borracha de pneu, quanto mais seco o solo, maiores eram estas. Isso deve ser levado em consideração durante o processo executivo de uma obra, pois seria necessário um maior controle na umidade ótima.

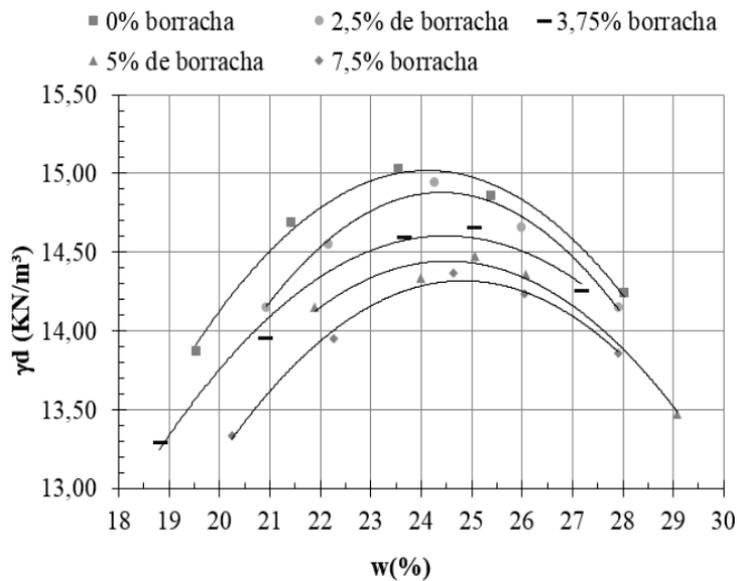


Figura 2.3 Curvas de compactação para todos os teores (Chrusciak e Araújo, 2015)

### 2.2.3.2. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento é a propriedade mecânica do solo que rege o desempenho da estabilidade de aterros. O comportamento de aterros rodoviários sob carga estática pode ser previsto e modelado usando parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação obtidos em grande escala ou em testes laboratoriais. O comportamento tensão – deformação medido a partir de ensaios de laboratório é utilizado para obter o comportamento do aterro sob carga estática (Franco, 2012).

Um modelo de aterro rodoviário foi construído por (Zornberg et al., 2004), utilizando uma areia siltosa e pedaços de pneu. O objetivo da pesquisa, foi avaliar a resposta mecânica de um aterro construído com misturas de solo e pedaços de pneu colocados em camadas intercaladas. Antes da execução do aterro definitivo, foi desenhado e executado um aterro experimental, o qual apesar de possuir dimensões menores, mantinha as características do aterro desejado. Com a construção do aterro experimental, avaliaram-se a quantidade e tamanho dos pedaços de pneu que deviam compor o aterro rodoviário; também foram estudados os processos de mistura e de compactação em campo.

O tamanho dos resíduos de pneu escolhido esteve dentro da faixa conhecida como pedaços de pneu (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. Segundo o estudo, a 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 acima descritas, com quantidade de borracha idêntica. A última seção, foi composta de solo puro para servir de referência.

O modelo de aterro rodoviário foi monitorado por 824 dias. Os resultados apontam 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.

Zornberg et al. (2004), também avaliaram o comportamento de misturas de areia com pedaços de pneu através de ensaios triaxiais drenados. Para este fim foram feitos recortes retangulares de borracha, fixando larguras de 12,7 e 25,4 mm e diferentes comprimentos. Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento aumentou com o incremento do teor de borracha na mistura, atingindo valores máximos para o teor de 35% de borracha, sendo que para teores maiores a resistência começou a decrescer. A figura 2.4 mostra uma representação esquemática ilustrando a variação da resistência ao cisalhamento das misturas com a porcentagem de pedaços de pneu (de 0 a 100%), mantidos constantes os demais parâmetros.

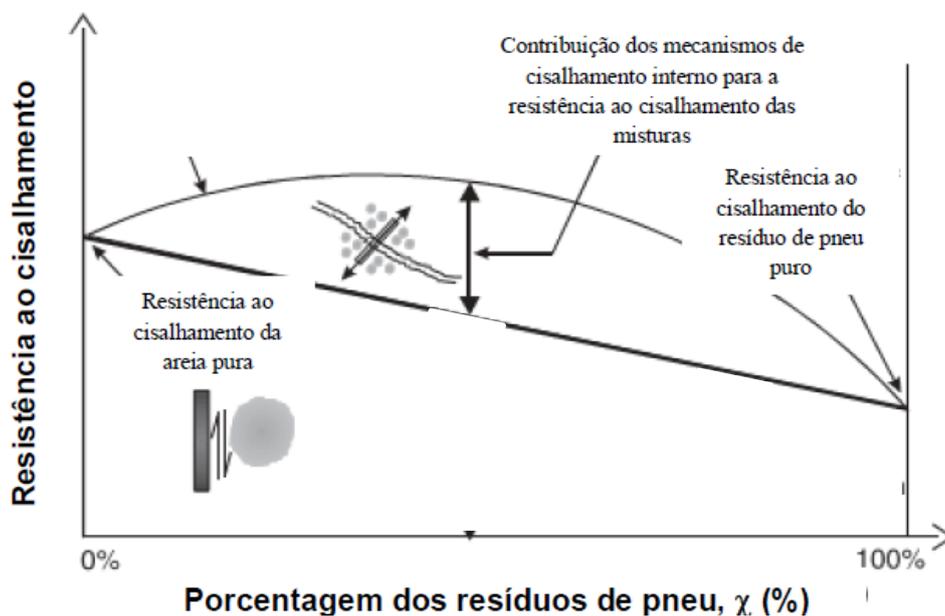


Figura 2.4 Representação esquemática da influência do teor de resíduos na resistência ao cisalhamento da mistura de solo – pedaços de pneu para uma constante densidade relativa da matriz do solo, (Zornberg et al., 2004)

Na figura, a linha interligando o valor da resistência ao cisalhamento do solo puro (0%) e do resíduo puro (100%) representa a contribuição dos mecanismos de cisalhamento do solo para a resistência ao cisalhamento das misturas. A resistência

ao cisalhamento acima desta linha resulta da contribuição dos mecanismos de reforço dos resíduos de pneus na resistência ao cisalhamento das misturas. Isto ocorre devido às forças de tração mobilizadas individualmente nos pedaços de pneus. O reforço fornecido pelo pneu melhorou significativamente a resistência ao cisalhamento das misturas em todos os níveis de confinamento.

Cetin et al. (2006) realizaram um estudo experimental, através de uma série de ensaios mecânicos, em argila reforçada com frações de pneu de diferentes tamanhos; chips de pneu grossos entre 2 mm e 4,75 mm (*coarse tire chips*) e chips de pneu finos (*fine tire chips*) de granulometria fina contendo partículas menores que 0,425 mm, utilizando teores de 10, 20, 30, 40 e 50%, a fim de conhecer a possibilidade do seu emprego como material de preenchimento em obras civis. Para determinar a resistência ao cisalhamento e as características de deformação do solo puro e misturas, foram realizados ensaios de cisalhamento direto consolidados no drenados, à valores de tensão normal de 54, 109, 163 e 327 kPa.

A figura 2.5, apresenta as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal obtidas para as misturas de solo-chips de pneu finos. Observa-se que para quase todas as amostras ensaiadas não houve picos de resistência pronunciados, indicando um comportamento de endurecimento dos compósitos. Nestes casos, os autores sugerem tomar como ponto de ruptura, a deformação vertical compreendida entre 10 e 20%, do ensaio de cisalhamento. Portanto, a ruptura dos corpos de prova foi admitida quando a deformação atinge um valor igual a 15%.

Os resultados advertem que as misturas com até 20% de chips de pneu grosso e com até 30% de chips de pneu fino, apresentaram um considerável ganho de resistência. Acima disto, a borracha não gerou ganhos significativos.

Em relação a deformação volumétrica ou vertical, as amostras com solo puro, ensaiadas à uma determinada tensão normal, revelaram um comportamento contrativo durante todo o ensaio, que é tipicamente observado em solos argilosos normalmente adensados.

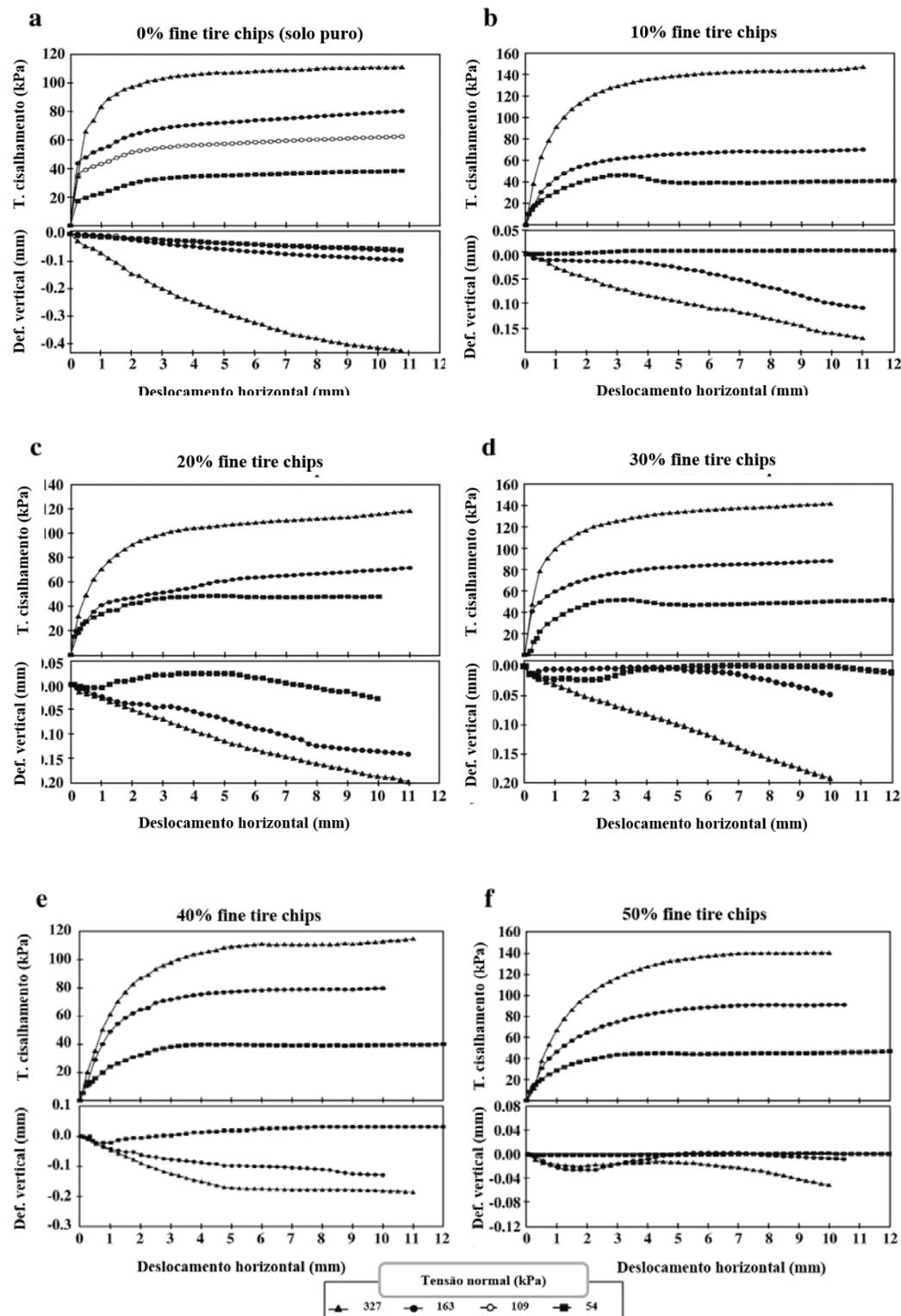


Figura 2.5 Tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e deformação vertical de a) solo argiloso puro e (b - f) misturas com chips de pneu fino (Cetin et al., 2006)

As misturas de solo com ambos os tamanhos de chips de pneu (fino e grosso), testadas a uma tensão normal de 54 kPa não apresentaram grandes mudanças em

termos de volume. Enquanto que no solo puro, evidenciou-se uma deformação de compressão durante todo o ensaio, as misturas com chips de pneu apresentaram compressão só no início do cisalhamento observando-se finalmente que a curva se aproxima a zero, indicando, portanto, que as amostras começaram a ter uma leve dilatância. As deformações volumétricas ou verticais negativas obtidas nas amostras com solo puro, submetidas a altas tensões, foram consideravelmente reduzidas a valores cerca de zero (positivas) para proporções de mistura com até 50% de chips de pneu.

Edinçliler et al. (2010), executaram ensaios de compressão triaxial drenados e não drenados para determinar a resistência ao cisalhamento de uma areia siltosa e misturas com resíduos de pneu. Foram utilizadas duas granulometrias de resíduo de pneu: borracha granulada com relação dimensional largura vs comprimento entre 1 e 1,5 e fibras de pneu com comprimentos menores que 5,8 mm, usadas nos teores de 5, 10, 20, 30 e 40% em relação ao peso do solo. Além de avaliar a influência da forma e quantidade de resíduo no comportamento do solo, os autores buscaram modelar a resposta obtida nos ensaios triaxiais utilizando redes neurais com as quais pudessem ser feitas previsões razoáveis de desempenho no cisalhamento dos compósitos.

Os resultados dos ensaios triaxiais não drenados realizados nas misturas de areia com resíduo de pneu indicaram que a máxima resistência foi obtida com a adição de 5% de fibras de pneu com relação dimensional entre 3,5 – 4, para a qual registraram-se valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito de 41,4° e 11,4 kPa, respectivamente. No caso das misturas de areia - borracha granulada, foram obtidos valores de intercepto coesivo entre 8,1 e 24,6 kPa, e ângulo de atrito interno entre 16,9° e 38,2°.

Nos ensaios triaxiais drenados, foram determinados valores similares para os parâmetros de resistência das misturas. Com a adição de 5% de borracha granulada, foram obtidos, intercepto coesivo de 16,1 kPa e ângulo de atrito interno de 39,4°; já nas misturas com 5% de fibras de pneu, foram obtidos, ângulo de atrito interno de 41,1° e intercepto coesivo de 5,5 kPa.

Com isto, foi verificado que as inclusões de fibras de pneu com relação dimensional entre 3,5 e 4, influenciaram melhor o comportamento mecânico do

solo, em comparação com as inclusões de borracha granulada com relação dimensional entre 1-1,5.

Após a fase de escolha do melhor modelo e arquitetura da rede neural, foi realizado seu treinamento utilizando como parâmetros de entrada a porcentagem incorporada de resíduo de pneu (em peso), forma (granulado ou fibroso), tipo de ensaio triaxial adotado, tensão efetiva e deformação axial. Ao finalizar, a rede neural fornecia como dados de saída os valores de tensão desviadora a uma determinada deformação axial. Os valores de tensão desviadora vs deformação axial obtidos nos ensaios de compressão triaxial drenados foram comparados com os encontrados pela rede neural, conforme mostrado na figura 2.6.

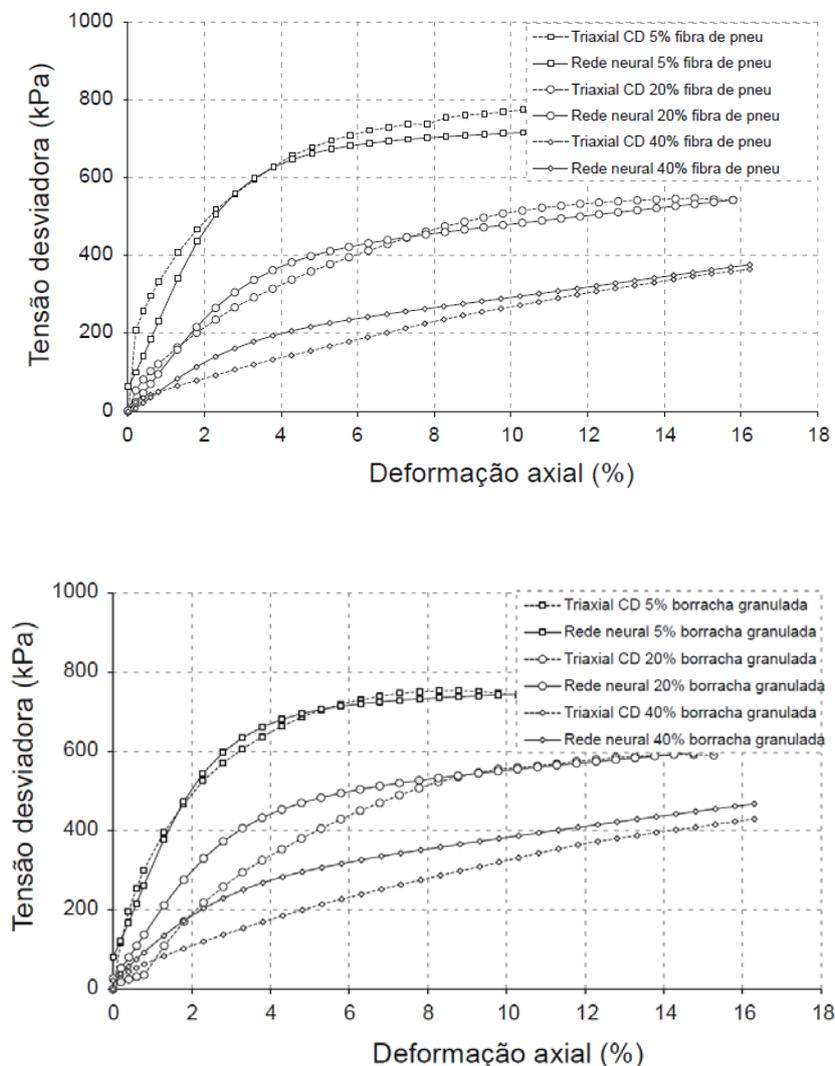


Figura 2.6 Comparação entre os resultados obtidos com ensaios triaxiais drenados e com a rede neural à tensão confinante efetiva de 200 kPa (Edinçliler et al., 2010)

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 e o nível de tensão confinante influenciam o comportamento mecânico final dos compósitos. Nos compósitos de solo argiloso a inserção de borracha foi mais efetiva 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%.

### **2.2.3.3. Compressibilidade**

Uma das soluções que garantem a estabilidade de taludes e reduzem os problemas de recalque em solos altamente compressíveis consiste em substituir os materiais existentes por materiais com pesos específicos mais baixos que possam ser usados como materiais de preenchimento leve. O uso de resíduos de pneu em obras rodoviárias provê grandes vantagens técnicas, ambientais e económicas. Entre os benefícios mais importantes ao respeito do uso destes resíduos encontram-se: redução do peso em aterros, aumento da estabilidade, diminuição de recalques, redução da pressão em estruturas de contenção e prevenção de deslizamento em taludes (Ahmed, 1993).

Com o objetivo de avaliar as características de compressibilidade de chips de pneu puro e misturas destes materiais com um solo argiloso de alto teor de matéria orgânica e um solo arenoso, (Ahmed, 1993) desenvolveu um importante estudo

laboratorial, usando diferentes estágios de carregamento e descarregamento que simulassem as condições de campo e ao mesmo tempo, permitissem conhecer a resposta mecânica das misturas de solo-chips de pneu. Considerando que o equipamento para execução do ensaio de compressibilidade, comumente empregado nos testes com solos finos e solos granulares, não era o adequado para o tamanho dos chips de pneu (entre 0,5 e 2 polegadas), foi necessário desenhar um novo aparelho composto de um molde de aço de 12 polegadas de diâmetro e 12,5 polegadas de altura, com uma espessura de parede de 0,4 polegadas e uma base de aço quadrada de 16 polegadas de lado, com espessura de parede de 1,25 polegadas, para que o molde se mantivesse firme na sua posição durante a compactação.

As amostras com resíduos de pneu puro foram submetidas a quatro estágios de carregamento/descarregamento, enquanto que os compósitos elaborados com teores variando de 0 a 100% de chips de pneu, foram submetidos a três estágios. As cargas foram aplicadas gradualmente utilizando uma razão de carga de um incremento. Nos primeiros dois estágios, as amostras foram carregadas até uma tensão efetiva máxima de cerca de 25 psi (172 kPa) e depois descarregadas até uma tensão efetiva de 0,12 psi (0,8 kPa). No terceiro estágio, as amostras foram carregadas até aproximadamente 15 psi (103 kPa) e posteriormente descarregadas até 1 psi (6,8 kPa). Finalmente no quarto estágio, as amostras foram recarregadas à máxima tensão efetiva e em seguida foram completamente descarregadas.

A figura 2.7 apresenta as curvas de compressibilidade obtidas nas misturas de solo argiloso – chips de pneu com tamanho de 2 polegadas para o primeiro estágio de carregamento/descarregamento. A partir dos resultados obtidos, foi observado que a compressão total das amostras aumenta com o incremento da porcentagem de chips de pneu, obtendo-se os mais altos valores de compressão nas amostras contendo uma maior quantidade de resíduo. As misturas de solo – chips de pneu apresentaram índices de vazios menores do que as amostras preparadas com chips de pneu puros, portanto, os compósitos causaram recalques menores no solo.

O autor conclui que em locais obra onde a maior preocupação seja tratar os problemas de compressibilidade do solo, pode ser considerado o uso de chips de pneu como material de preenchimento na proporção de mistura de 38% de chips de pneu, em relação ao peso da mistura.

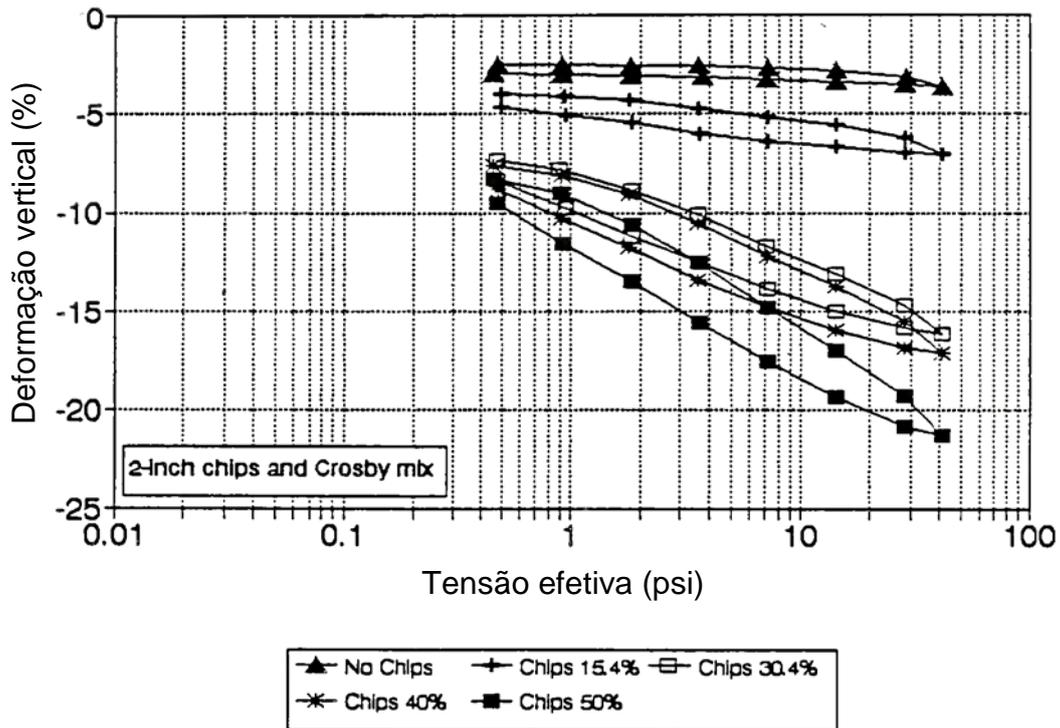


Figura 2.7 Curvas de compressibilidade das misturas de solo argiloso - chips de pneu de 2 polegadas para o primeiro estágio de carregamento/descarregamento (Ahmed, 1993)

Edil e Bosscher (1994) explicam que a alta compressibilidade dos chips de pneu obedece a sua elevada porosidade e alto conteúdo de borracha. A massa de chips de pneu irá contrair sob aplicação de carga, devido a dois mecanismos: a) mistura e reorientação dos pedaços de pneu dentro de uma estrutura mais compactada e b) a compressão individual sob determinada tensão.

#### 2.2.3.4. Permeabilidade

Cedergren (1989) e Ahmed (1993) destacam que o comportamento de aterros sob condições saturadas é fortemente influenciado pela característica de drenagem do material de preenchimento utilizado. Um bom material drenante irá impedir o desenvolvimento dos excessos de propressão durante o carregamento do aterro. Além disso acelerará o adensamento nos solos de fundação com baixa permeabilidade, através de caminhos preferenciais pelos quais a água fluirá mais facilmente, com o qual garante-se a estabilidade das estruturas.

Cetin et al. (2006) realizaram ensaios de permeabilidade em argila pura e misturas argila – chips de pneu, utilizando resíduos de pneu de granulometria fina (*fine tire chips*) e granulometria grossa (*coarse tire chips*). As amostras foram saturadas antes da medida da condutividade hidráulica. Valores de coeficiente de permeabilidade, determinados às tensões normais de 46, 93, 185, 287 e 370 kPa, encontram-se na figura 2.8. Valores de condutividade hidráulica da argila pura e misturas com chips de pneu encontram-se na ordem de  $10^{-7}$  e  $10^{-8}$  cm/s, sendo consistentes com os coeficientes de permeabilidade típicos de solos argilosos. Observa-se que a permeabilidade aumenta à medida que a porcentagem de resíduo de pneu nas misturas incrementa e a tensão normal decresce. Masad et al. (1996) determinaram valores de permeabilidade similares e sugerem que resíduos de pneu misturados a areia resultam altamente vantajosos como materiais de preenchimento para a construção de aterros.

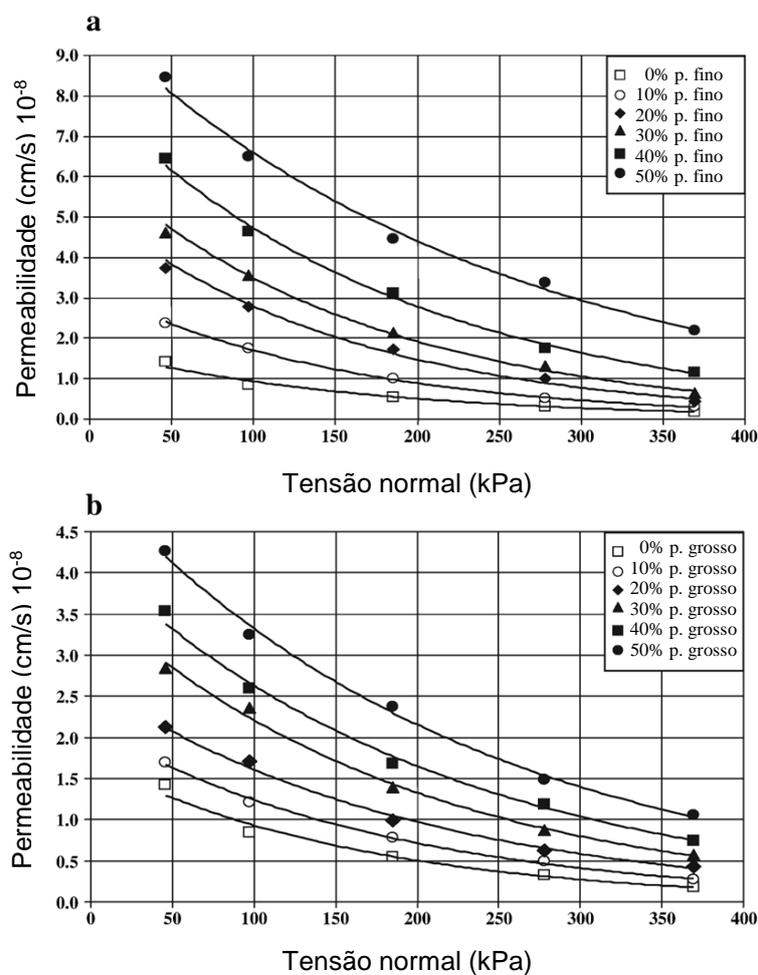


Figura 2.8 Coeficientes de permeabilidade vs tensão normal das misturas com a) chips de pneu finos e b) chips de pneu grossos (Cetin et al. 2006)

Özkul e Baykal (2007) avaliaram a resistência ao cisalhamento de misturas de um solo argiloso – fibras de pneu, por meio de ensaios triaxiais drenados e não drenados. As amostras compostas de argila caolinítica e 10% de fibra de pneu, em relação ao peso seco do solo, foram compactadas à energia proctor standard e proctor modificado. Com o objetivo de determinar a permeabilidade, realizou-se uma percolação de água nas amostras após a fase de adensamento e depois do cisalhamento, mantendo-se um gradiente hidráulico de 20 kPa. A tabela 2.1, apresenta os coeficientes de condutividade hidráulica medidos no solo puro e compósitos antes e após o cisalhamento. Os resultados revelaram que o coeficiente de condutividade hidráulica da argila pura antes do cisalhamento, foi encontrado na faixa de  $1,13$  a  $5,77 \times 10^{-7}$  cm/s e para as misturas com fibra de pneu, entre  $1,16$  a  $3,45 \times 10^{-7}$  cm/s. Nos ensaios não drenados, as diferenças de permeabilidade (antes e depois do cisalhamento) das amostras com solo argiloso puro e amostras de solo - fibra de pneu, foram similares devido a que as diferenças no índice de vazios também foram semelhantes; que não é o caso do ensaio drenado, onde a densificação das zonas fracas durante o cisalhamento leva a um decréscimo da permeabilidade a pesar de que em geral o índice de vazios aumente devido à dilatação das amostras. Segundo os autores, pode ser que o cisalhamento das amostras até 20% de deformação, gere um aumento do coeficiente de condutividade hidráulica, caso sejam desenvolvidos caminhos de menor resistência ao fluxo como por exemplo planos de deslizamento.

E. compactação	T. efetiva kPa	Condutividade hidráulica $\times 10^{-7}$ cm/s			
		Argila pura		Argila - fibra de pneu	
		Antes	Depois	Antes	Depois
Modif		Ensaio drenado			
	50	4.49	2.84	2.61	2.96
	100	2.77	3.36	2.38	2.25
	200	2.85	2.45	1.81	1.51
	300	2.05	1.80	1.16	0.26
	Média	3.04	2.61	1.99	1.75
Modif		Ensaio não drenado			
	100	1.68	5.27	3.35	9.39
	200	1.31	1.11	3.12	11.53
	300	1.58	5.86	2.48	7.81
	Média	1.52	4.08	2.98	9.58
Standard		Ensaio não drenado			
	100	1.13	5.69	3.45	2.51
	200	4.82	2.94	2.84	2.16
	300	5.77	4.01	3.05	1.97
	Média	3.91	4.21	3.11	2.21

Figura 2.9 Coeficientes de condutividade hidráulica para a argila pura e misturas medidos antes e depois do cisalhamento (Özkul e Baykal, 2007)

### **2.2.3.5.**

#### **Análise química dos resíduos de pneu e impactos na qualidade da água**

Moo-Young et al. (2003) realizaram ensaios de 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. Os ensaios de coluna foram executados para a condição de livre drenagem com as válvulas de entrada e saída de água abertas e para a condição de drenagem inibida na qual interrompeu-se o fluxo de água na entrada e na saída do sistema. O programa experimental iniciou-se com a execução dos ensaios de coluna para a condição de livre drenagem 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. (1997) 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.

#### **2.2.4. Considerações finais**

A partir dos trabalhos encontrados na literatura em relação aos benefícios do uso da borracha de pneu como material alternativo para o reforço de solos, analisa-se que o desempenho mecânico das misturas solo-borracha não depende da técnica de compactação utilizada em campo, visto que os atuais procedimentos permitem realizar um maior controle do grau de compactação e saturação estabelecidos para a execução de determinada obra. No entanto, as pesquisas demonstram que dentro dos fatores que influenciam altamente o comportamento mecânico dos solos reforçados com borracha de pneu destacam-se (i) o tipo de solo, sendo que a borracha pode se adaptar melhor a uma certa estrutura de solo, (ii) o tamanho da borracha de pneu, para o qual recomendasse definir relações dimensionais de largura vs comprimento que possibilitem o emprego da borracha em diversos formatos, (iii) o teor de mistura, com o qual se espera que a resistência ao cisalhamento do solo atinja uma melhora significativa e finalmente, (iv) a tensão de confinamento efetiva a qual a mistura solo-borracha é submetida num ensaio de compressão triaxial.

### 3 Programa Experimental

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Areia

A areia utilizada neste trabalho, apresentada na figura 3.1, corresponde a uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme. As amostras de areia foram coletadas em uma jazida localizada no município de Itaboraí/RJ. Ensaio de caracterização foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio, para determinar os índices físicos do solo arenoso. Os resultados são apresentados no item 4.1.1.



Figura 3.1 Areia utilizada

### 3.1.2. Solo argiloso

O solo argiloso (figura 3.2), consiste em um solo coluvionar ou coluvial de tonalidade vermelho amarelo, localizado na encosta do campus principal da PUC-Rio. Este solo tem sido objeto de diversas pesquisas (e.g. Soares, 2005; Durán, 2012; Escalaya, 2015) nas quais foram realizados ensaios convencionais e especiais para testar novos materiais de reforço e de estabilização. O solo argiloso é constituído basicamente por argilominerais (caulinita principalmente), quartzo e óxidos de ferro e alumínio, como produtos do intemperismo dos minerais primários da biotita gnaisse (Soares, 2005). A amostragem deste solo foi feita no Campo Experimental II da PUC-Rio, à profundidade aproximada entre 20 cm e 50 cm, tendo-se cuidado de remover a camada superficial de solo orgânico e evitando-se a presença de raízes.



Figura 3.2 Solo argiloso utilizado nesta pesquisa

As propriedades índice básicas deste material, como a granulometria, umidade, massa específica dos grãos, entre outras, foram determinadas através de ensaios de caracterização física, realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Os resultados são apresentados no item 4.1.2.

### 3.1.3. Borracha de pneu

Os resíduos de pneu usados neste trabalho são provenientes da trituração de pneus inservíveis de caminhão. A borracha em raspa de pneus é coletada em moedoras mecânicas, passando por um processo de seleção e classificação do material, peneirado em medidas de 2 a 8 mm. Este material foi obtido através da empresa de reciclagem de pneus Borracha Reciclada Ltda.

Com o objetivo de avaliar a influência do tamanho e/ou forma da borracha de pneu no comportamento mecânico dos solos, decidiu-se empregar as formas de, separadamente em misturas com ambos os solos (areia e argiloso). A seleção do tamanho dos chips e fibras de pneu foi realizada de acordo com a classificação estabelecida pela ASTM D 6270, sendo necessário efetuar a análise granulométrica da borracha recebida (apresentada no item 4.1.4), a partir da qual escolheu-se usar partículas com tamanhos de 4,76 mm e 2,0 mm, para os chips e fibras de pneu respectivamente, conforme mostrado nas figuras 3.4 e 3.5.



Figura 3.3 Chips de pneu com tamanho 4,76 mm



Figura 3.4 Fibras de pneu com tamanho 2,0 mm

#### **3.1.4. Água**

A preparação dos corpos de prova (solo puro e misturas) dos ensaios triaxiais e ensaios de compactação necessitou de uma certa quantidade de água destilada, a qual é disponibilizada em tanques reservatórios, dentro das salas de caracterização e ensaios mecânicos do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Esta água é proveniente da rede de abastecimento pública da cidade do Rio de Janeiro.

#### **3.1.5. Misturas solo-borracha de pneu**

Para cada tipo de solo e resíduo de borracha de pneu foram preparadas duas misturas, com o objetivo de analisar o comportamento mecânico dos compósitos em relação ao teor de resíduo empregado. Em ambos os solos se utilizaram os teores de 5% e 10% de resíduos de pneu (chips e fibras), calculados em relação ao peso

do solo seco, com exceção da mistura de solo argiloso com 10% de chips de pneu, com a qual não foi possível moldar o corpo de prova cilíndrico para o ensaio triaxial.

A escolha destes teores foi baseada nos resultados observados em pesquisas anteriores que utilizaram tamanhos de partículas similares para estudarem o efeito do teor de borracha nos parâmetros de resistência de solos reforçados com resíduos de borracha de pneu.

A massa de chips e fibras de pneu utilizados em cada mistura, foi calculada em relação ao peso total do solo seco. A água foi adicionada em função da umidade ótima obtida nos ensaios de Compactação Proctor Normal no caso do solo argiloso, e no caso do solo arenoso, as misturas foram preparadas com umidade de 10% (teor ótimo utilizado por Ramirez (2012), Szeliga (2014) que determinaram este teor de umidade através da análise de resultados de cisalhamento direto executados em amostras com areia pura submetidas a uma mesma tensão normal com a variação de teores de umidade.

## **3.2. Métodos e procedimentos de ensaio**

### **3.2.1. Ensaio de caracterização física**

Para a determinação das propriedades índice das amostras de solo, foram realizados ensaios de caracterização física. As amostras foram preparadas de acordo com o procedimento de secagem prévia, conforme a norma técnica NBR 6457/1986 estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

#### **3.2.1.1. Índice de vazios máximo e mínimo**

Para a obtenção dos índices de vazios máximo e mínimo do solo arenoso, foram realizados os ensaios de caracterização estabelecidos pelas normas NBR 1204/1990 e NBR 12051/1991, respectivamente.

### **3.2.1.2. Análise granulométrica**

A análise granulométrica dos solos foi realizada conforme a norma técnica NBR 7181/1984, pela combinação de ensaios de sedimentação e peneiramento. O reconhecimento do tamanho dos resíduos de pneu foi realizado por ensaio de peneiramento, utilizando para a fração grossa, diâmetros de malha de 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm e para a fração fina, os mesmos diâmetros usados na distribuição granulométrica dos solos. As curvas granulométricas dos três materiais são apresentadas na figura 4.1.

### **3.2.1.3. Densidade real dos grãos**

A determinação da densidade real dos grãos,  $G_s$ , em ambos os solos foi realizada seguindo o procedimento indicado na norma técnica NBR 6508/1984, com algumas modificações. O material previamente seco ao ar, foi destorroado e passado na peneira nº 40 (0,42 mm). Amostras com 25 g de solo cada uma, foram transferidas diretamente para picnômetros de 250 ml, sem serem levadas antes para o copo dispersor durante 15 minutos, conforme recomendado pela norma, devido à dificuldade de transferir uma amostra do copo dispersor para um picnômetro de volume pequeno.

O valor da densidade real dos grãos foi calculado como a média de quatro determinações sob as mesmas condições. Os resultados obtidos para ambos os solos estudados, são mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2.

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  $1,15 \text{ g/cm}^3$ . (Franco, 2012) obteve um valor de  $1,11 \text{ g/cm}^3$  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  $G_s$  de  $1,11 \text{ g/cm}^3$ .

#### **3.2.1.4. Limites de Atterberg**

Os limites de Atterberg, liquidez e plasticidade, foram determinados no solo argiloso, segundo as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 respectivamente. Os resultados destes ensaios foram extraídos de (Escalaya, 2015), apresentados na tabela 4.2.

#### **3.2.2. Ensaio mecânicos**

##### **3.2.2.1. Ensaio de compactação proctor standard**

Ensaio de compactação com energia proctor normal foram realizados no solo argiloso puro e em misturas com 5% e 10% de resíduos de pneu, com a finalidade de se determinar a umidade ótima de compactação ( $w_{ótima}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) do solo puro e compósitos. Estes ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7182/1986, sem reuso de material.

Após secagem em estufa a 60°C, as amostras foram destorroadas e peneiradas na peneira nº 4 (4,76 mm). Em seguida, adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, a fim de que este ficasse com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima, estimada inicialmente através dos resultados do ensaio de limite de plasticidade.

O material homogeneizado, foi colocado dentro de um molde cilíndrico pequeno de dimensões 10 cm x 12,7 cm (diâmetro x altura), dividindo o seu volume em três partes iguais, para distribuição do material em camadas. Utilizando-se um soquete pequeno, de peso igual a 2,5 kg, aplicaram-se 26 golpes por camada de material, a uma altura de queda de 30,5 cm aproximadamente. Após completar as três camadas, atingiu-se uma altura maior que a do molde, devido a utilização de um anel complementar, com o qual garante-se a altura total necessária. O excesso de material foi removido ao final do ensaio, acertando-se o volume de solo em relação à altura do molde.

Finalizado o processo de compactação, pesou-se o cilindro juntamente com o solo e determinou-se o peso específico total. Após secagem em estufa de três

amostras retiradas do interior do corpo de prova (no seu centro), determinou-se sua umidade média e calculou-se, então, o peso específico seco do material.

Para a construção da curva de compactação foi feita uma série de seis compactações, aumentando-se a umidade em 2%, a fim de se obterem, seis pontos com diferentes valores de umidade ( $w$ ) e peso específico seco ( $\gamma_d$ ).

Com todos os pontos obtidos, foi plotado um gráfico de peso específico seco versus umidade, obtendo-se então a curva de compactação. Os valores de  $w_{ótima}$  e  $\gamma_{dmáx}$  obtidos corresponderam as coordenadas do ponto máximo da curva, e foram utilizados para moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais CID.

Cabe ressaltar que este ensaio foi realizado somente para o solo argiloso e misturas deste solo com chips e fibras de pneu. A figura # apresenta as curvas de compactação obtidas para o solo puro e compósitos.

### **3.2.2.2. Ensaio triaxiais CID**

Os ensaios triaxiais realizados no presente trabalho são do tipo consolidado isotropicamente drenado (CID). Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Descreve-se a seguir o equipamento utilizado nestes ensaios, bem como as metodologias empregadas, na preparação dos corpos de prova, processo de saturação e cisalhamento.

#### **a) Equipamento utilizado**

A prensa mecânica utilizada para os ensaios triaxiais CID, mostrada na figura 3,6, é da marca Wykeham-Ferrance, de velocidade de deslocamento controlada e capacidade de 10 toneladas. O ajuste da velocidade de deslocamento do pistão é determinado mediante a seleção adequada de pares de engrenagens e a respectiva marcha.

A câmara triaxial empregada permite a instalação de corpos de prova de até 4,0 cm de diâmetro e possui em volta um corpo de acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 700 kPa.

Na aplicação da pressão confinante e da contrapressão, utilizou-se um sistema de ar comprimido controlado por um painel de válvulas reguladoras de pressão, ligado à rede de ar comprimido do laboratório que fornece uma pressão máxima na linha de 1000 kPa.

A medição da força aplicada foi realizada através da célula de carga instalada no interior da câmara triaxial. No presente trabalho utilizou-se uma célula de carga de 5 kN de capacidade máxima, da marca ELE International Ltda.

O deslocamento axial foi monitorado com um transdutor de deslocamento resistivo, tipo LSCDT (*Linear Strain Conversion Displacement Transducer*) de 25 mm de faixa de deslocamento, do fabricante Wykeham-Ferrance.

Para mensurar as pressões aplicadas, utilizou-se um transdutor, instalado na base da câmara triaxial, da marca Schaevitz, com capacidade máxima de 1034 kPa.

A variação volumétrica foi medida com um transdutor de variação de volume do tipo Imperial College, fabricado na PUC-Rio, que consiste de uma câmara, limitada por diafragmas tipo “Bellofram”, fixados a um cilindro maciço de PVC. Com a entrada ou saída de água do corpo de prova, ocorre a movimentação do diafragma. O medidor de variação volumétrica (MVV), mostrado na figura 3.7, tem uma capacidade máxima de 100 cm<sup>3</sup> e faixa de deslocamento de 50 mm.

Para a gravação dos dados lidos nos transdutores, foi utilizado o sistema de aquisição de dados composto pelo hardware QuantumX de oito canais da empresa alemã HBM e pelo software CatmanEasy. Dessa forma, foi monitorado o comportamento dos corpos de prova durante todo o ensaio.



Figura 3.5. Prensa mecânica utilizada



Figura 3.6 Medidor de variação de volume do tipo Imperial College

### **b) Preparação dos corpos de prova do solo arenoso**

A fabricação dos corpos de prova do solo arenoso puro e misturas com 5% e 10% de resíduos de pneu, foi realizada por compactação, diretamente num molde cilíndrico tripartido com 4 cm de diâmetro e 9,12 cm de altura, (figura 3.7a).

A compactação do material foi realizada manualmente em três camadas. Tanto na areia pura quanto nas misturas, a umidade e peso específico seco adotados foram de 10% e 1,55 gr/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Estes valores correspondem a uma densidade relativa de 50% e índice de vazios de 0,81. Os parâmetros de compactação mencionados anteriormente foram os mesmos adotados por (Ramirez 2012), que realizou ensaios triaxiais em misturas de areia e borracha moída de pneus.

A seguir detalha-se passo a passo a montagem dos corpos de prova com a areia pura e misturas com resíduos de pneu:

1. A partir do peso específico seco do solo, obtinha-se a massa do solo puro ou mistura na condição seca, necessária para preencher o molde cilíndrico. No caso das misturas pesava-se por separado a quantidade de solo e resíduos de pneu que constituirão o corpo de prova;
2. Após a mistura dos materiais na condição seca, adicionava-se a quantidade de água requerida para homogeneização dos materiais, de acordo com o valor de umidade estabelecido;
3. Antes da montagem do corpo de prova, saturavam-se as linhas através das quais a água fluía no interior das amostras, com o fim de expulsar o ar dentro delas;
4. A montagem, iniciava-se colocando no pedestal da prensa a pedra porosa, papel filtro e por fim inseriu-se a membrana, prendendo-a com dois anéis elásticos (figura 3.7b);
5. Seguidamente, colocou-se o molde tripartido, fixado com uma abraçadeira metálica (figura 3.7c);
6. Posteriormente, vedaram-se as ranhuras do molde tripartido com fita e colocaram-se outros dois anéis elásticos na parte superior do molde tripartido. Depois disso, dobrou-se a membrana para fora, de forma que fique o mais colada possível ao molde cilíndrico, deixando-a pronta para realizar a sucção do ar contido entre esta e as paredes do molde;
7. Antes da sucção do ar ser executada, impedia-se a entrada ou saída de ar em dois dos furos localizados na parte externa do molde tripartido, para o qual utilizaram-se duas válvulas de bloqueio de fluxo; em

- seguida, a máquina de vácuo foi acoplada no terceiro furo do molde (figura 3.7d);
8. Após o acoplamento, a bomba foi ligada para exercer a sucção e permitir que a membrana se colara às paredes do molde tripartido (figura 3.7e);
  9. Logo depois, ainda com a bomba aplicando sucção colocou-se o material dentro do molde, em três camadas, compactadas com auxílio de um pequeno disco circular unido a uma haste metálica.
  10. Terminado o preenchimento do molde, inseriram-se, o papel filtro, a pedra porosa e o *cap* na parte superior do corpo de prova (figura 3.7f);
  11. Em seguida subiu-se a membrana, desunindo-a do borde superior do molde cilíndrico e junto com ela, os dois anéis elásticos colocados na parte superior do molde, segurando a membrana e o *cap* (figura 3.7g);
  12. Desmontaram-se todos os elementos utilizados para moldar o corpo de prova e acomodou-se a membrana de forma que os anéis elásticos colocados na parte superior e inferior da amostra, não fiquem visíveis (figura 3.7h);
  13. Finalmente, colocou-se a câmara triaxial, para ser preenchida com água destilada (figura 3.7i).

### **c) Preparação dos corpos de prova do solo argiloso**

Para a confecção dos corpos de prova do solo argiloso puro e misturas com 5% e 10% de resíduos de pneu, foram usados os valores de umidade ótima e peso específico seco máximos, obtidos diretamente das curvas de compactação.

O dimensionamento das amostras com solo argiloso, foi realizado de acordo com os tamanhos de corpos de prova citados por (Ramirez, 2012), que moldou amostras de solo argiloso puro e misturas deste com borracha moída de pneu, utilizando um aparelho de fabricação própria do laboratório, obtendo-se dimensões de 7,80 cm de altura e 3,80 cm de diâmetro.



Figura 3.7 Preparação do corpo de prova de areia

A seguir detalha-se passo a passo a montagem dos corpos de prova com o solo argiloso puro e misturas com resíduos de pneu:

1. A partir da relação, massa de solo seco sobre volume, igual a peso específico seco, calculava-se a quantidade de solo ou mistura, na condição seca, que satisfaz o volume do corpo de prova desejado;
2. Seguidamente, determinava-se a massa de resíduos de pneu, usando as proporções de 5% e 10% em relação ao peso do solo seco;

3. Utilizando o valor da umidade ótima, obteve-se a massa de água a ser adicionada na mistura;
4. As quantidades anteriormente calculadas, dividiam-se no número de camadas, com o fim de facilitar a compactação dos materiais dentro do molde tripartido (figura 3.8a);
5. Montava-se o molde tripartido diretamente na bancada do laboratório, fixado pela abraçadeira metálica (figura 3.8b);
6. Colocava-se o material dentro do molde utilizando uma colher pequena, tendo-se a precaução de compactar a cada duas colheres de material inserido;
7. Em seguida, compactava-se a camada de material com auxílio de um proctor normal de escala reduzida, para o qual aplicaram-se 26 golpes por camada, a uma altura de queda próxima a 15 cm (figuras 3.8 c e d);
8. Após o preenchimento do molde, desmontavam-se cuidadosamente todos os elementos começando pela abraçadeira metálica e depois cada parede do tripartido (figura 3.8e);
9. Posteriormente, colocou-se a membrana e transferiu-se o corpo de prova para a base do pedestal da prensa triaxial, onde finalmente foram colocados os anéis elásticos e o *cap* (figura 3.8f).
10. Inicialmente, misturavam-se os materiais na condição seca e depois adicionava-se água para sua completa homogeneização;

Preparação dos corpos de prova do solo argiloso		
		
(a) Divisão de material	(b) Molde tripartido	(c) compactação proctor
		
(d) Camada de material compactada	(e) Corpo de prova finalizado	(f) Corpo de prova instalado no pedestal da prensa

Figura 3.8 Preparação dos corpos de prova do solo argiloso

#### d) Procedimento de saturação dos corpos de prova

A saturação dos corpos de prova foi executada alternando dois procedimentos: percolação de água na amostra e a aplicação de incrementos de pressão confinante e contrapressão.

Percolação de água: A saturação por percolação foi o procedimento empregado logo após a preparação da amostra, com a finalidade de preencher os vazios do solo/misturas com água. Esta foi executada mantendo uma diferença de pressões entre a base e o topo de 5 kPa; dessa forma a água fluía da base para o topo do corpo de prova. A água drenada durante a percolação foi armazenada no reservatório do topo. A percolação foi mantida até atingir um volume de água percolado de 70 ml.

Aplicação da contrapressão: Este procedimento de saturação foi realizado com a finalidade de promover a completa saturação da amostra, através da dissolução do

ar na água. Após realizar um acréscimo de 50 kPa na tensão confinante, ajustou-se a contrapressão, com uma diferença entre tensões de 10 kPa, mantendo as drenagens do topo e da base, ligadas ao medidor de variação de volume. O critério adotado para determinar o tempo de aplicação de cada incremento de contrapressão, foi a estabilização do MVV.

Ao final de cada procedimento de saturação empregado, determinava-se o parâmetro de poropressão  $B$ , considerando-se o solo saturado para valores de  $B \geq 0,96$ .

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

$\Delta u$ : excesso de poropressão gerado,

$\Delta \sigma_c$ : acréscimo de tensão confinante aplicado.

### e) Adensamento

Atingido um valor de  $B \geq 0,96$ , iniciava-se a fase de adensamento, a qual é realizada para levar o copo de prova a um estado de tensões efetivas semelhante ao da condição de campo. O procedimento de adensamento começava aumentando-se a tensão confinante, até que a diferença desta com a contrapressão seja igual à tensão efetiva desejada. Em seguida, abriam-se as válvulas de drenagem, do topo e da base, até que a variação de volume do corpo de prova, igual a variação do volume de água, não fosse mais significativa, com ao menos, 95% do excesso de poropressão dissipado.

O término do adensamento dos corpos de prova, foi observado na curva de variação de volume em ( $\text{cm}^3$ ) versus raiz quadrada do tempo em (minutos), construída seguindo as recomendações de Head (1986), na qual prolonga-se o trecho retilíneo inicial até encontrar a prolongação do trecho horizontal, que representa à estabilização das variações de volume. O valor de intercepto de tempo, multiplica-se por se mesmo e obtém-se o valor de  $t_{100}$ , correspondente ao tempo de

finalização do processo de adensamento, utilizado na determinação da velocidade de cisalhamento.

### f) Cisalhamento

Após o adensamento da amostra, executou-se o cisalhamento sob uma velocidade constante de deslocamento axial. Nesta fase, as tensões de confinamento e contrapressão são mantidas constantes enquanto que a tensão axial é aumentada lentamente de forma a permitir a equalização dos excessos de poropressão gerados ao longo do corpo de prova.

De acordo com (Head, 1986) a expressão utilizada para o cálculo da velocidade de cisalhamento em ensaio triaxial CD (adensado drenado) é a seguinte:

$$v = \frac{\epsilon_f \cdot L}{100 \cdot t_f} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

v: velocidade máxima de cisalhamento em mm/min,

L: altura do corpo de prova em mm,

$\epsilon_f$ : deformação axial estimada na ruptura em %,

$t_f$ : tempo mínimo de ruptura em minutos.

O valor de  $t_f$  para ensaio triaxial CD sem drenagem radial é calculado como 8,5 vezes o valor de  $t_{100}$ . Contudo, se valor de  $t_f$  for inferior a 120 minutos, deverá se adotar o valor mínimo de 2 horas.

Todos os valores de  $t_f$  obtidos para os corpos de prova, foram menores que 120 minutos. Portanto, adotou-se um valor de  $t_f$  igual a 120 minutos. Assim para ambos os solos, utilizou-se a velocidade de 0,032 mm/min. A compressão axial nos corpos de prova foi normalmente continuada até atingir cerca de 20% da deformação axial.

### 3.2.2.3. Ensaios de adensamento unidimensional

As propriedades de adensamento do solo argiloso e misturas de 5% de resíduo de pneu foram caracterizadas por meio de ensaios de adensamento unidimensional, realizados de acordo com a NBR 12007/1990. Os corpos de prova foram preparados diretamente no anel de adensamento com dimensões de 7,12 cm de diâmetro e 2 cm de altura. O material foi compactado no anel de adensamento (figura 3.24) em três camadas, usando a umidade ótima e peso específico seco máximo, obtidos no ensaio de compactação.

Após o acoplamento do anel na célula de adensamento, iniciou-se o processo de carregamento com cargas variando de 2,5 a 150 kPa, colocadas num total de cinco estágios. No descarregamento, ditas cargas foram gradualmente retiradas utilizando-se quatro estágios. Com os valores das pressões de adensamento e os respectivos índices de vazios, plota-se a curva “índice de vazios versus *log* da tensão efetiva”, a partir da qual, obtém-se parâmetros de adensamento tais como: coeficiente de adensamento vertical, condutividade hidráulica e módulo oedométrico. Os resultados deste ensaio são discutidos no item 4.2.3.



Figura 3.9 Mistura de argila – 5% chips de pneu compactada no anel de adensamento utilizado

## 4 Resultados e análises

### 4.1. Ensaio de caracterização física

#### 4.1.1. Areia

Ensaio de caracterização física foram realizados em amostras de areia para determinar suas propriedades básicas.

A distribuição granulométrica deste solo é mostrada na figura 4.1, em que o eixo das abcissas representa os diâmetros das partículas em mm e o eixo das ordenadas, a porcentagem que passa. Observa-se que 50% das partículas que passam ( $D_{50}$ ) têm diâmetro igual ou inferior a 0,6 mm. A partir da curva granulométrica, foram calculados os valores de coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) de 2,9 e 1,0 respectivamente. Usando estes valores e o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), a areia em questão pode ser classificada como SP, areia mal graduada. Os índices físicos da areia são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 índices físicos do solo arenoso

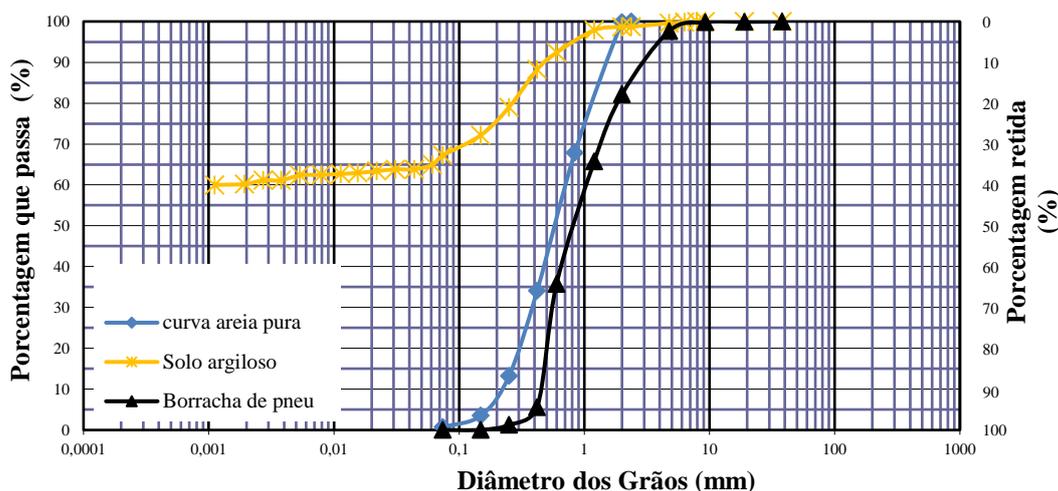
Índices físicos	Solo arenoso
Massa específica dos grãos (Gs)	2,65
Diâmetro efetivo (D10)	0,238 mm
Diâmetro médio (D50)	0,60 mm
Índice de vazios ( <i>emínimo</i> )	0,71
Índice de vazios ( <i>emáximo</i> )	0,96
Classificação SUCS	SP – mal graduada

#### 4.1.2. Solo argiloso

O solo argiloso usado neste estudo é um solo coluvionar com limite líquido de 61,3%, limite plástico de 33,1% e massa específica de 2,72. A curva granulométrica do solo argiloso obtida com a combinação de ensaios de sedimentação e peneiramento é ilustrada na figura 4.1. De acordo com o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), este solo pode ser classificado como CH (argila inorgânica de alta plasticidade). Os índices físicos do solo argiloso são apresentados na tabela 4.2

Tabela 4.2 índices físicos do solo argiloso

Índices físicos	Solo argiloso
Límite líquido (%)	61,3
Límite plástico (%)	33,1
Índice de plasticidade	28,0
Massa específica dos grãos (Gs)	2,72
Classificação SUCS	CH



ABNT	Argila	Silte	Areia			Pedregulho			Calhau	Matacão
			fina	média	grossa	fino	médio	grosso		
SUCS	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
			fina	média	grossa	1	2	3	4	
MIT	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
			fina	média	grossa					

Figura 4.1 curva granulométrica dos solos e da borracha de pneu

## 4.2. Ensaio mecânicos

### 4.2.1. Ensaio de compactação proctor standard

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam as curvas de compactação proctor standard obtidas para o solo argiloso puro e para as misturas chips e fibras de pneu, respectivamente. Das figuras observa-se que a inserção de 5%, tanto de chips como de fibras de pneu, provoca um pequeno aumento no valor do peso específico seco máximo, saindo-se do padrão de comportamento registrado por (Chrusciak e Araújo 2015) que realizaram ensaios de compactação com a mesma porcentagem de resíduo e evidenciaram que o peso específico máximo das misturas diminuiu em relação ao peso específico seco máximo do solo puro. Observa-se que só a partir do teor de 10%, o peso específico seco máximo das misturas começa a ser menor em relação ao do solo puro. O incremento do peso específico seco máximo da mistura solo-borracha na porcentagem de 5% pode ser devido a que durante o processo de compactação ocorreram mudanças na orientação e organização dos pedaços de pneu dentro da camada de solo que provocaram um aumento no índice de vazios e permitiram que uma maior massa de mistura composta na sua maioria por solo argiloso passara a ocupar os vazios formados entorno dos pedaços de pneu.

Os valores de umidade ótima, também foram alterados, diminuindo em até 24% para a mistura com 10% de fibras de pneu com relação ao solo puro. Nas tabelas 4.3 e 4.4 apresenta-se um resumo dos valores de umidades ótimas ( $w_{ót}$ ) e pesos específicos secos máximos ( $\gamma_{dmáx}$ ) obtidos.

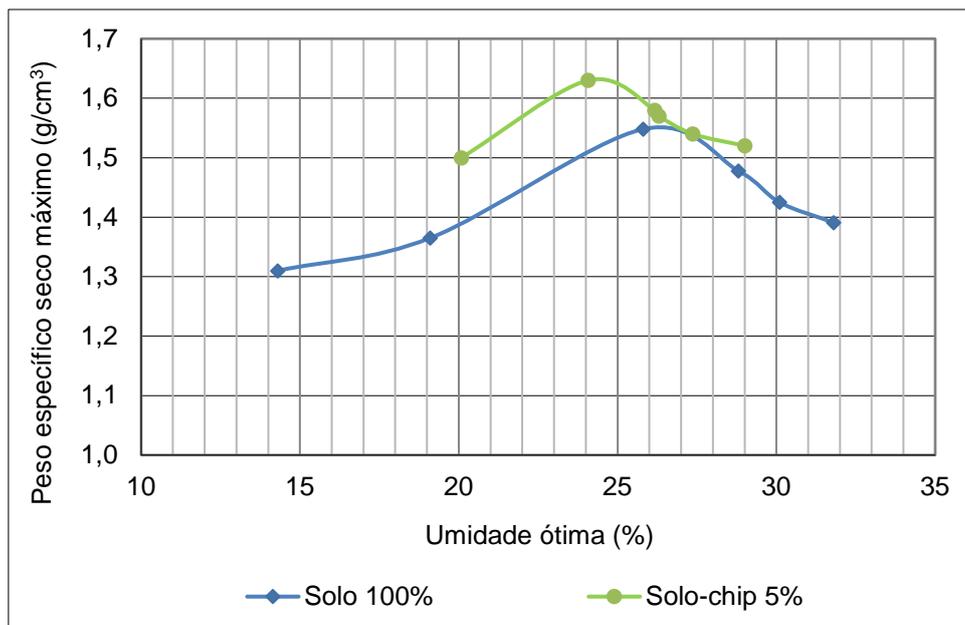


Figura 4.2 Curvas de compactação do solo argiloso puro e misturas com chip de borracha de pneu

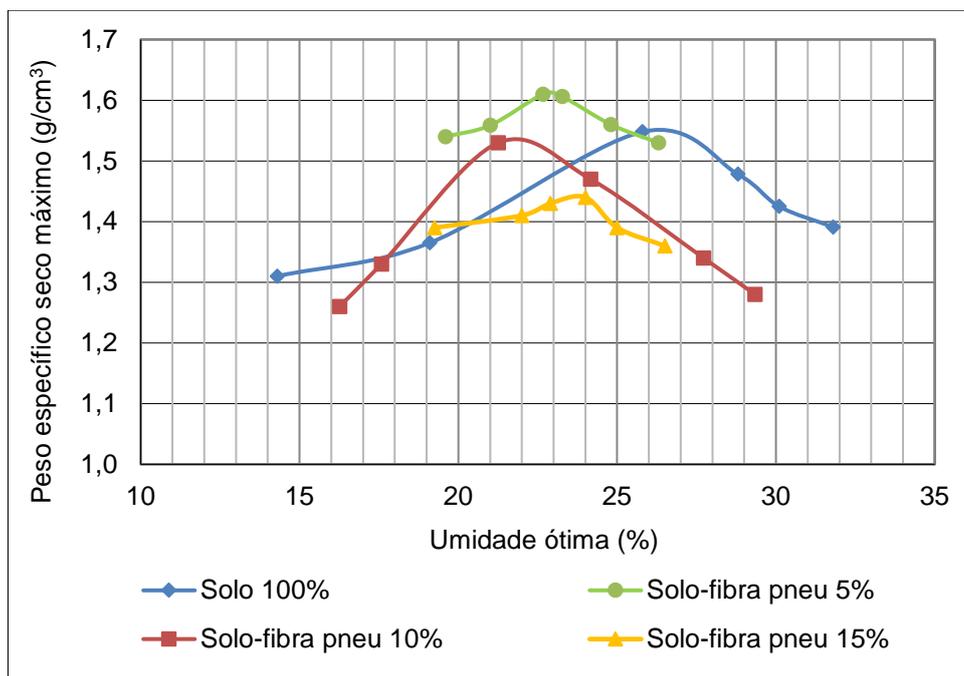


Figura 4.3 Curvas de compactação do solo argiloso puro e misturas com fibra de borracha de pneu

Tabela 4.3 Parâmetros de compactação obtidos para o solo argiloso e misturas com chips de pneu

Mistura	W <sub>ót</sub> m (%)	γ <sub>d</sub> máx (g/cm <sup>3</sup> )
Solo 100%	26,3	1,56
Solo – 5% chips de pneu	24,3	1,63

Tabela 4.4 Parâmetros de compactação obtidos para o solo argiloso e misturas com fibras de pneu

Mistura	W <sub>ót</sub> m	γ <sub>d</sub> máx
Solo 100%	26,3	1,56
Solo – 5% fibras de pneu	23,0	1,61
Solo – 10% fibras de pneu	21,7	1,54
Solo – 15% fibras de pneu	23,8	14,4

#### 4.2.2. Ensaio triaxiais CID

Como parte do programa experimental do presente trabalho, foram realizados ao total, trinta (30) ensaios de compressão triaxial convencional. Os testes foram executados em amostras dos solos puros e misturas destes com resíduos de pneu nos teores de 5%, 10% e 15% em relação ao peso do solo seco. As tensões efetivas aplicadas para a fase de adensamento e cisalhamento das amostras foram de 50, 100 e 150 kPa. A escolha das tensões efetivas baseou-se em que a borracha de pneu visa empregar-se em obras superficiais. Os resultados destes ensaios serão discutidos neste item.

Trajetórias de tensão efetiva: Os dados do ensaio triaxial podem ser apresentados em termos de invariantes de tensão, de tal modo que um determinado conjunto de tensões efetivas possa ser representado por um único ponto com o raio e centro do círculo de Mohr, como coordenadas. O raio do círculo conhecido como invariante de tensão de desvio ( $q$ ) e o ponto central, conhecido como invariante de tensão média ( $p'$ ), foram calculados usando as formulações do Lambe, apresentadas a seguir:

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \quad \text{Equação 3}$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad \text{Equação 4}$$

Os parâmetros de resistência do solo e misturas foram calculados no espaço Mohr Coulomb ( $\varphi' - c'$ ), para o qual utilizaram-se os valores da envoltória de resistência ( $\alpha'$ ) e da coesão ( $a'$ ) obtidos no espaço  $p': q$ .

$$\tan(\alpha') = \text{sen}(\varphi') \quad \text{Equação 5}$$

$$a' = c' \cdot \cos(\varphi') \quad \text{Equação 6}$$

onde:  $\alpha'$ : inclinação da envoltória de resistência no espaço  $p': q$ .

$a'$ : intercepto com o eixo  $q$  da envoltória de resistência no espaço  $p': q$ .

$\varphi'$ : inclinação da envoltória de resistência do espaço  $\sigma:\tau$  (Mohr Coulomb).

$c'$ : intercepto da envoltória de resistência do espaço  $\sigma:\tau$  (Mohr Coulomb).

#### 4.2.2.1. Areia

##### **Comportamento tensão - deformação**

Na figura 4.4 é apresentado um conjunto com quatro gráficos obtidos para os ensaios triaxiais CID realizados no solo arenoso puro: a)  $q$  vs  $\varepsilon_a$ , b)  $q$  vs  $p'$ , c)  $\varepsilon_v$  vs  $\varepsilon_a$ , d)  $1+e$  vs  $p'$ , onde  $q$  = tensão de desvio,  $p'$  = tensão efetiva média,  $\varepsilon_a$  = deformação axial,  $\varepsilon_v$  = deformação volumétrica,  $e$  = índice de vazios.

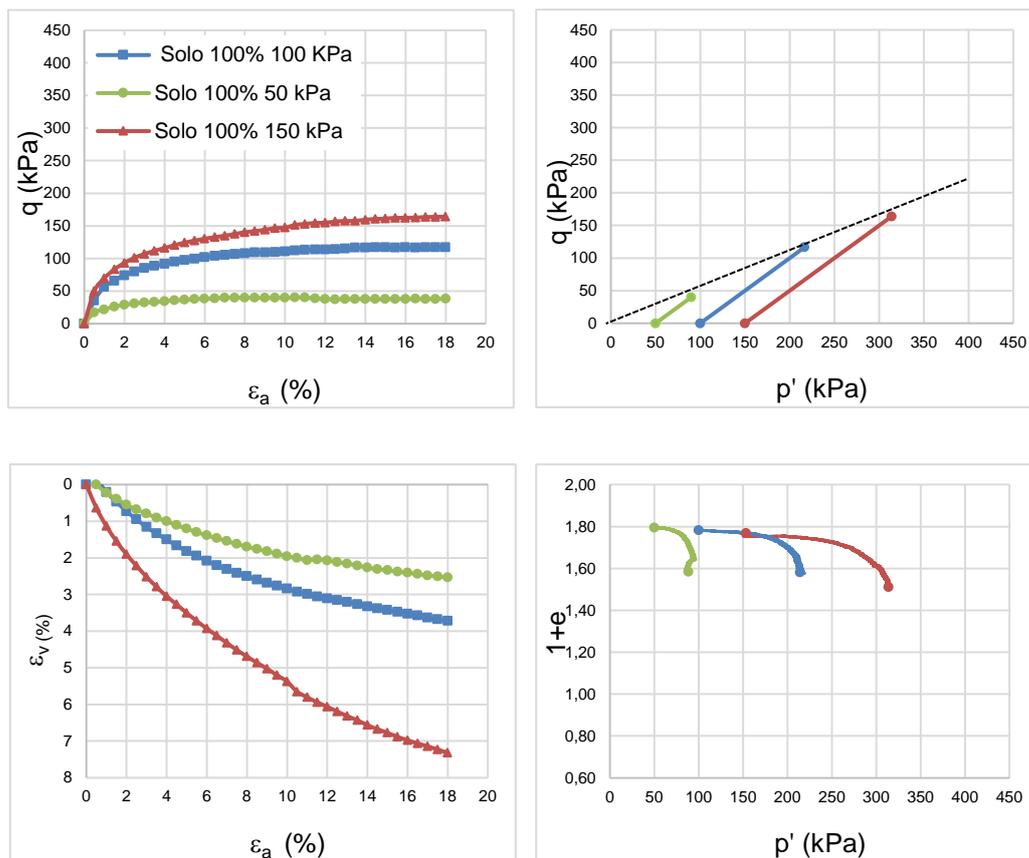


Figura 4.4 Resultados dos ensaios triaxiais CID da areia

As curvas  $q$  vs  $\epsilon_a$  da areia puro mostram um comportamento de endurecimento com o aumento da deformação (*strain-hardening*), nas três tensões efetivas utilizadas. Esta resposta é típica de areias fofas a medianamente compactas, com densidades relativas entre 30 e 70%, nas quais ocorre uma redução de volume durante o cisalhamento. Além disso, nota-se que tanto a resistência ao cisalhamento como a variação de volume das amostras são influenciadas pelo nível de tensão confinante aplicado, à medida que a tensão confinante aumenta, a resistência ao cisalhamento e a contração volumétrica das amostras aumentam. Percebe-se que os corpos de prova continuam a contrair com o aumento da deformação axial, indicando que a variação volumétrica não atingiu ainda um valor estável, a partir do qual o volume das amostras não varia mais.

Para estes casos, onde não existe um pico de resistência, (Cetin et al. 2006) sugerem que a ruptura do solo ocorre para níveis de deformação de 10 a 20%. Deste modo, adotou-se como ponto de ruptura, o máximo valor de resistência alcançado durante o ensaio, encontrado no nível de deformação de 18%.

A variação do índice de vazios com a tensão efetiva média é apresentada nas curvas  $1+e$  vs  $p'$ . Os pontos iniciais correspondem aos índices de vazios das amostras após a fase de adensamento e os pontos finais referem-se aos índices de vazios depois do cisalhamento. Observa-se novamente que o índice de vazios final depende da tensão de confinamento à qual a amostra foi submetida. Assim, a medida que a tensão de confinamento aumenta, obtém-se um menor o índice de vazios no final do ensaio.

### **Parâmetros de resistência**

O gráfico  $q$  vs  $p'$  da figura 4.4, apresenta a envoltória de resistência de Mohr – Coulomb para a areia, plotada no espaço  $p': q$ . Os parâmetros de resistência  $c'$  e  $\varphi'$  calculados foram 0 kPa (coesão nula) e  $31,50^\circ$  respectivamente. Estes valores são consistentes com os reportados por (Ramirez, 2012). O ângulo de atrito das areias durante o cisalhamento é influenciado pelo deslizamento e pelo rolamento entre grãos; no primeiro caso, os grãos de areia podem deslizar uns sobre os outros, provocando atrito e no segundo, os grãos podem rolar uns sobre os outros influenciando o atrito entre partículas.

#### **4.2.2.2. Misturas de areia – chips de borracha de pneu**

##### **Comportamento tensão – deformação**

Nas figuras 4.5 e 4.6 apresenta-se um conjunto com quatro gráficos obtidos para os ensaios triaxiais CID realizados para as misturas de areia-5% chips de pneu e areia-10% chips de pneu, respectivamente. a)  $q$  vs  $\varepsilon_a$ , b)  $q$  vs  $p'$ , c)  $\varepsilon_v$  vs  $\varepsilon_a$ , d)  $1+e$  vs  $p'$ , onde  $q$  = tensão de desvio,  $p'$  = tensão efetiva média,  $\varepsilon_a$  = deformação axial,  $\varepsilon_v$  = deformação volumétrica,  $e$  = índice de vazios.

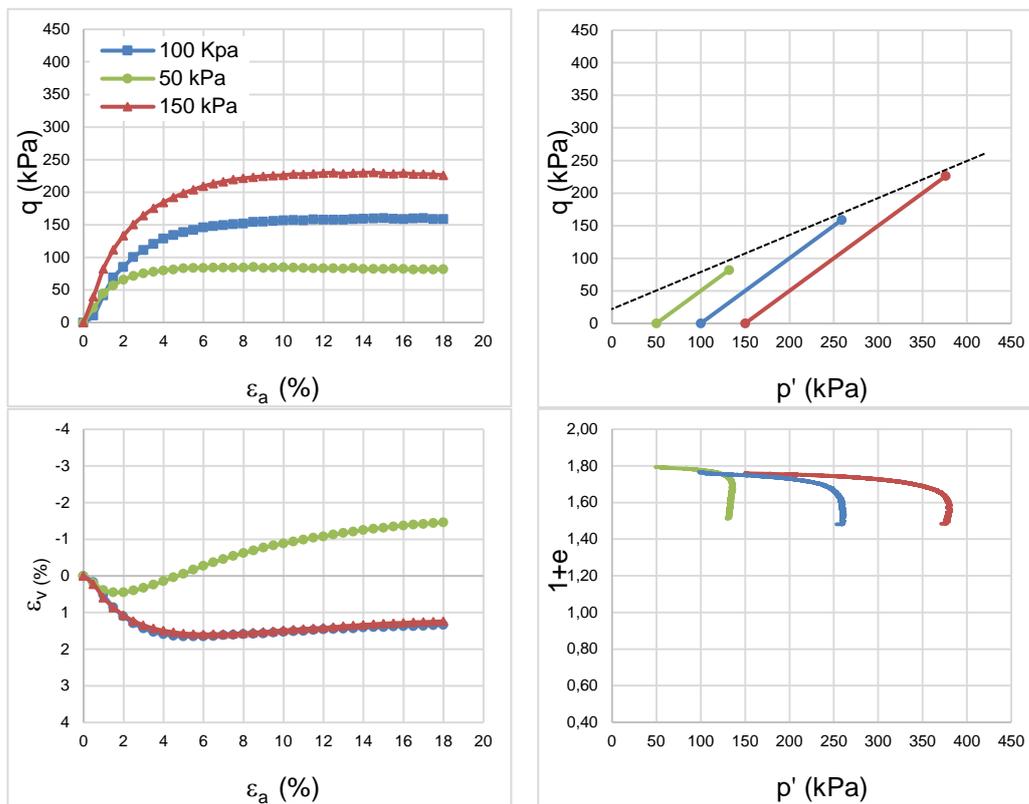


Figura 4.5 Resultados dos ensaios triaxiais CID das misturas areia-5% chips de pneu

As curvas  $q$  vs  $\varepsilon_a$ , das figuras 4.5 e 4.6, apresentam as relações de tensão – deformação obtidas para as misturas de areia com 5% e 10% de chips de pneu, respectivamente. Observa-se que na medida em que vai se acrescentando a porcentagem de chips de pneu misturados ao solo puro, obtém-se um aumento na resistência ao cisalhamento do solo, atingindo-se um valor máximo de 254,89 kPa com o teor de borracha de 10%, ensaiado a uma tensão efetiva de 150 kPa. Analisa-se que o comportamento mecânico das misturas, além de depender da porcentagem de borracha, depende também do nível de confinamento aplicado durante o ensaio. Portanto, os valores de resistência máxima de determinada mistura são altamente influenciados pela magnitude da tensão efetiva empregada. Por exemplo, a resistência máxima de uma amostra preparada com o teor de 10% de chips de pneu atinge um valor de 95,79 kPa quando testada a uma tensão efetiva de 50 kPa, 176,15 kPa a 100 kPa e 254,89 kPa a 150 kPa. Verifica-se novamente o comportamento

(*strain-hardening*), no qual a resistência ao cisalhamento continua a aumentar com a deformação. Venkatappa e Dutta (2006) relatam um comportamento similar nas curvas de tensão desviadora vs deformação axial obtidas para diferentes misturas de areia-chips de pneu ensaiadas a diferentes tensões de confinamento.

No gráfico de deformação volumétrica vs deformação axial se evidencia que ao usar a tensão de confinamento de 50 kPa nas misturas de areia com 5% e 10% de chips de pneu, as amostras contraem apenas no início do cisalhamento e continuam dilatando até o final do ensaio. Já nas tensões de 100 kPa e 150 kPa, observa-se que o comportamento durante toda a fase de cisalhamento é de compressão. O fenômeno da dilatação dos copos de prova se deve ao rearranjo das partículas de solo em torno dos chips de pneu. Edil e Bosscher (1994) explicam que uma determinada massa de chips de pneu contrai sob aplicação de carga, principalmente devido aos mecanismos de flexão, reorientação e compressão individual. Lee et al. (1999) indicam que o mecanismo de flexão só poderá atuar no solo reforçado, reduzindo a necessidade das partículas se movimentarem em torno dos fragmentos de pneu, para tensões de confinamento acima de 190 kPa.

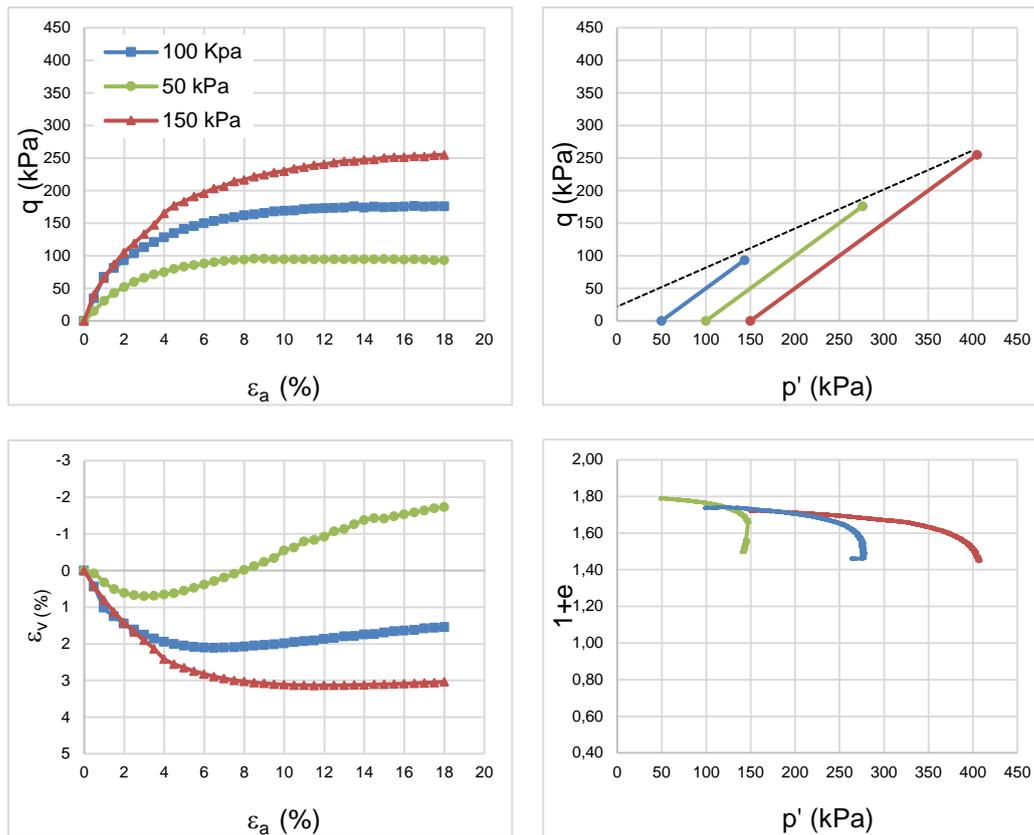


Figura 4.6 Resultados dos ensaios triaxiais CID das misturas areia-10% chips de pneu

As curvas tensão-deformação das misturas de areia com 0%, 5% e 10% de chips de pneu, apresentam-se na figura 4.7. Observa-se que as misturas, de 5% e 10% apresentam maior crescimento da resistência com a deformação do que o solo puro; já quando comparadas entre elas o resultado indica que a mistura de 10% apresenta maior crescimento da resistência do que a mistura de 5%.

Com relação a deformação volumétrica das amostras, evidencia-se um comportamento de compressão exceto para as misturas de solo-chips de borracha de pneu, testadas a uma tensão confinante de 50 kPa.

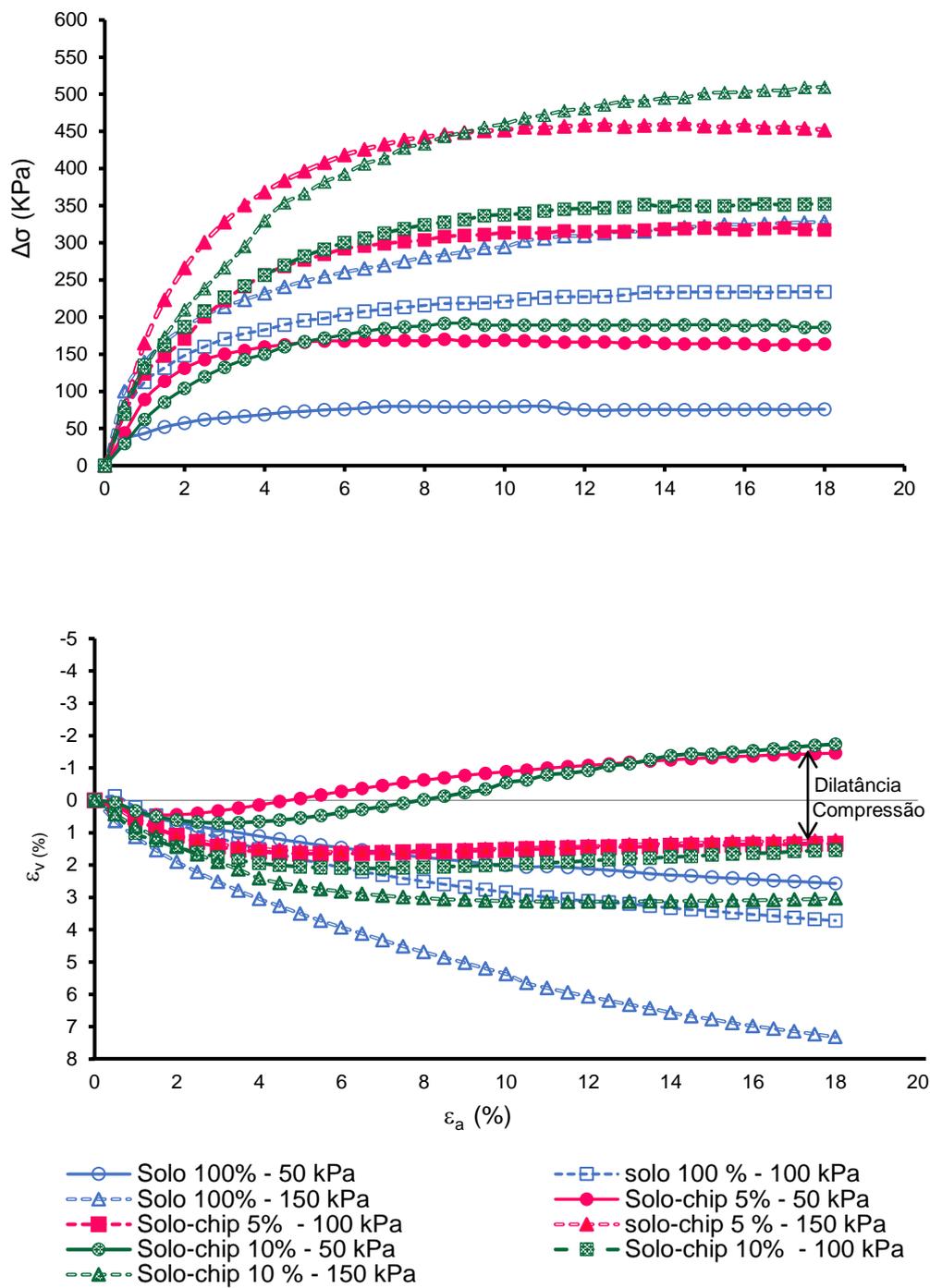


Figura 4.7 Comportamento tensão-deformação das misturas areia-chips de pneu

### Parâmetros de resistência

As envoltórias de resistência das misturas areia-chips de pneu são ilustradas na figura 4.8. Observa-se que os parâmetros de resistência ao cisalhamento definidos no critério de ruptura de Mohr-Coulomb como são o intercepto coesivo e ângulo de fricção interna, aumentam assim que o teor de chips de pneu é incrementado nas misturas. Portanto, verifica-se que com a mistura de 10% de chips de pneu (em relação ao peso seco do solo) obtém-se a melhor resposta nas propriedades mecânicas do solo.

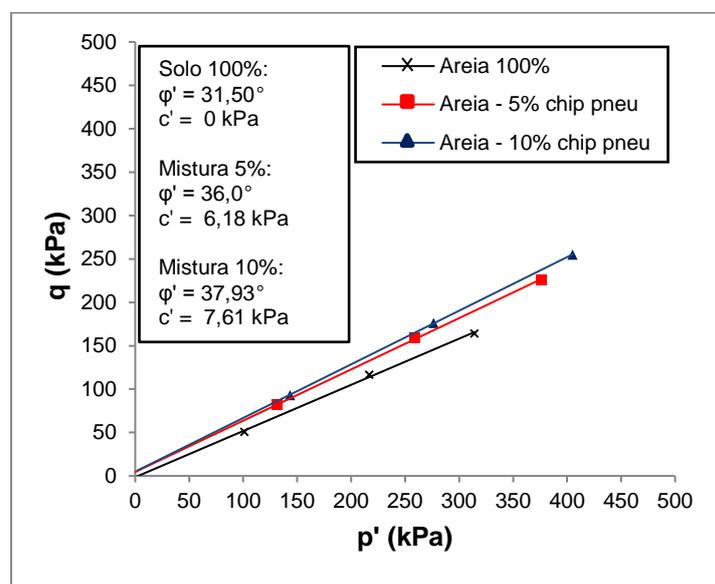


Figura 4.8 Comparação das envoltórias de resistência para as misturas areia-chips de pneu

### Energia de deformação absorvida

A figura 4.9 mostra a variação das energias de deformação absorvidas para o solo puro e para as misturas areia-chips de pneu, com a variação das tensões confinantes efetivas, medidas a 18% de deformação axial. Os valores de energia de deformação absorvida são apresentados na tabela 4.5. Observa-se que a inclusão dos chips de pneu nos teores de 5% e 10% estudados, causa um aumento da energia de deformação absorvida, em relação à obtida com o solo arenoso puro em todas as tensões confinantes efetivas. Isso indica que a adição de chips eleva a tenacidade do solo.

Ao se compararem os valores de energia de deformação absorvida das misturas de areia-chips de pneu, evidencia-se uma certa proximidade entre eles. No entanto, o aumento no teor de resíduo, provoca acréscimos maiores nas energias absorvidas para quase todas as tensões confinantes utilizadas.

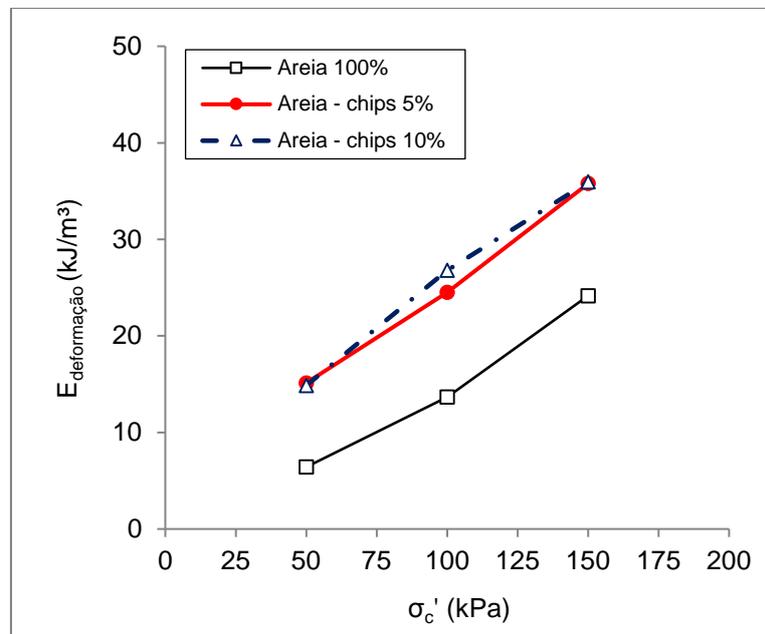


Figura 4.9 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial das misturas de areia-chips de pneu

Tabela 4.5 Valores de energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial das misturas areia-chips de pneu

$\sigma'_c$	Areia 100%	Mistura 5%	Mistura 10%
	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)
50	6,2	15,13	14,86
100	13,65	24,5	26,79
150	24,16	35,77	35,94

### 4.2.2.3. Misturas areia-fibras de pneu

#### Comportamento tensão-deformação

Nas figuras 4.10 e 4.11 apresenta-se um conjunto com quatro gráficos obtidos para os ensaios triaxiais CID realizados para as misturas de areia-5% fibras de pneu e areia-10% fibras de pneu, respectivamente. a)  $q$  vs  $\varepsilon_a$ , b)  $q$  vs  $s'$ , c)  $\varepsilon_v$  vs  $\varepsilon_a$ , d)  $1+e$  vs  $p'$ , onde  $q$  = tensão de desvio,  $p'$  = tensão efetiva média,  $\varepsilon_a$  = deformação axial,  $\varepsilon_v$  = deformação volumétrica,  $e$  = índice de vazios.

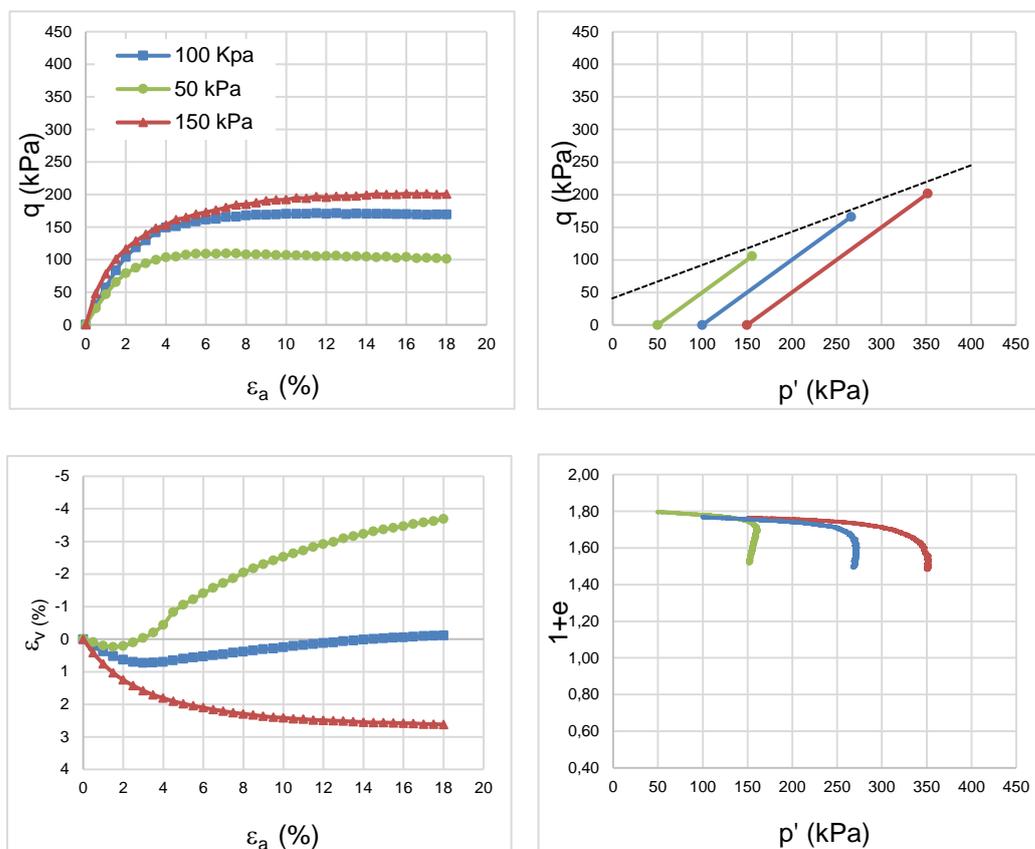


Figura 4.10 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura areia-5% fibras de pneu

No comportamento mecânico das misturas de areia-fibras de pneu, ilustrado nas figuras 4.10 e 4.11, se observam diferenças com relação à influência da porcentagem de borracha e o nível de tensão confinante aplicado, nas características de resistência e deformação do solo: ambas as misturas se comportam da mesma maneira do que a areia pura, aumentando a resistência ao cisalhamento à medida

que os corpos de prova são deformados. No entanto, inserção do 10% de fibras de pneu provoca um rápido crescimento na resistência do solo, aumentando-a em cerca de 37,5%, para todas as tensões efetivas utilizadas.

Apesar da mistura de 10% ser considerada melhor do que a mistura de 5% em relação ao aumento da resistência, nota-se que no início do cisalhamento as amostras com menor quantidade de chips de pneu deformam menos, ou seja, apresentam maior rigidez do que as amostras com o teor de 10% de resíduo, isto pode-se apreciar melhor na figura 4.12, na qual são apresentadas todas as curvas tensão-deformação.

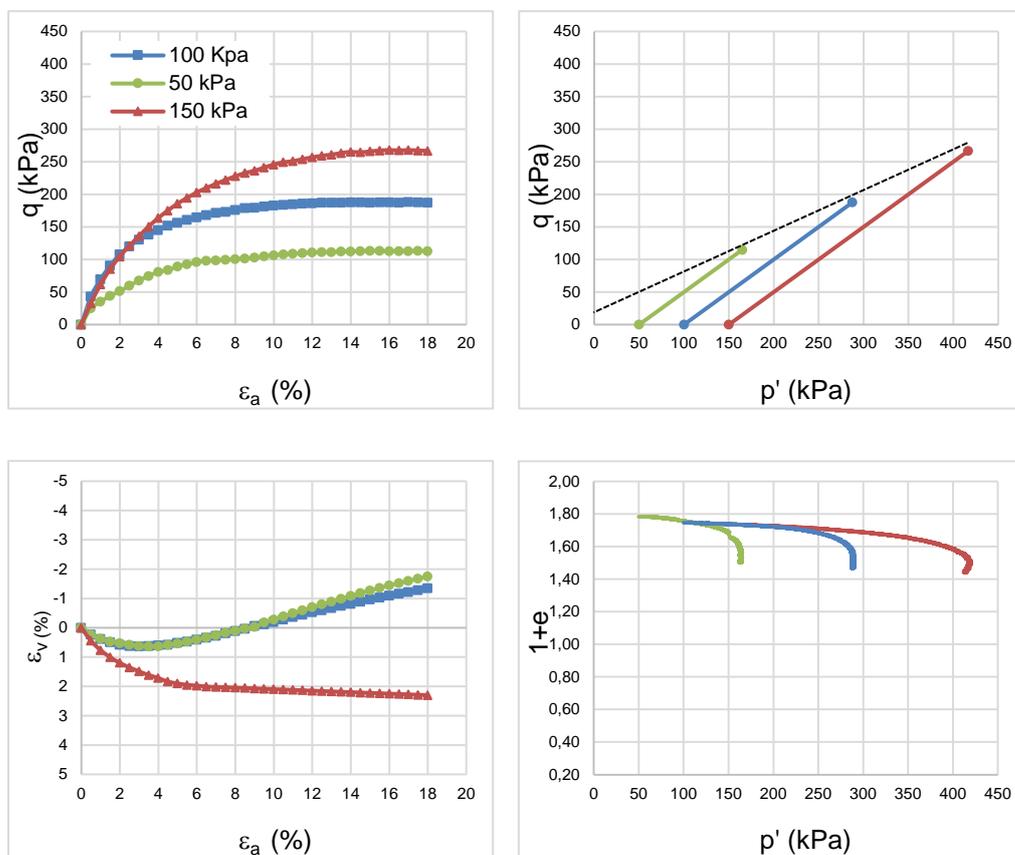


Figura 4.11 Resultados do ensaio triaxial CID da mistura areia-10% fibras de pneu

Nas curvas de deformação volumétrica vs deformação axial mostradas nas figuras 4.10 e 4.11, evidencia-se para as tensões de confinamento de 50 kPa a 100 kPa no solo reforçado, as amostras contraem-se apenas no início do cisalhamento e continuam dilatando até o fim do ensaio.

Özkul e Baykal (2007) registraram um comportamento similar num estudo experimental com fibras de pneu e indicam que dita contração inicial poderia ser o resultado de diferenças do conteúdo de água na matriz do compósito e/ou devido a compressão das fibras de borracha entre elas mesmas.

Nas curvas  $1+e$  vs  $p'$ , observa-se que a variação do índice de vazios com a tensão efetiva média durante a fase de cisalhamento é similar para ambas as misturas. Ao comparar as relações de vazios obtidas com as do solo puro, analisa-se que a inserção de fibras de pneu não causou grandes alterações nesta característica, que depende mais do nível de tensão confinante aplicado.

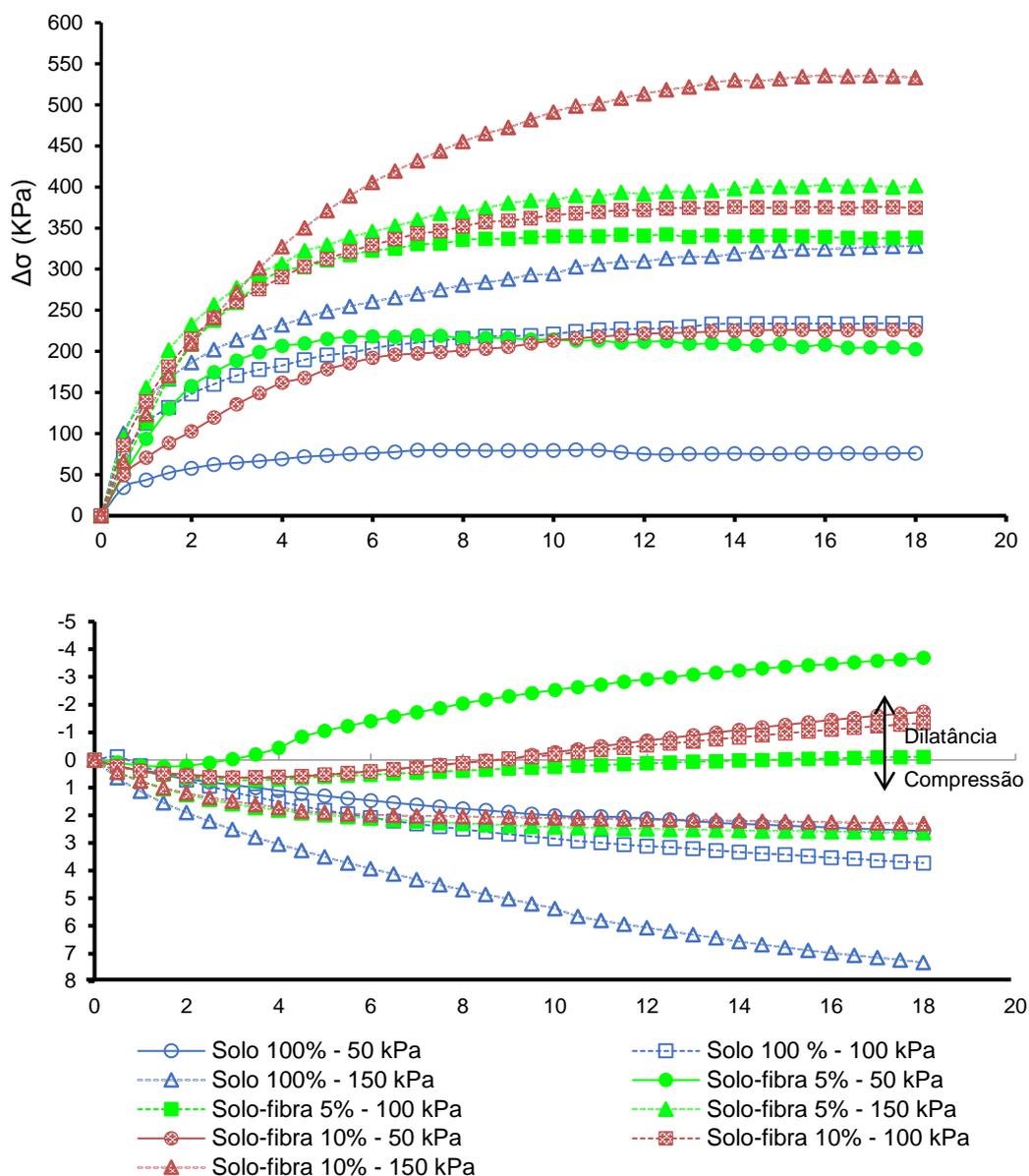


Figura 4.12 Comportamento tensão-deformação das misturas areia-fibra de pneu

### Parâmetros de resistência

A figura 4.13, mostra as envoltórias de resistência das misturas plotadas no espaço  $p'$ :  $q$ . Observa-se que ambas as envoltórias apresentam um comportamento linear. No solo arenoso foi encontrado um ângulo de atrito interno de  $31,50^\circ$  e intercepto coesivo nulo. Ao inserir 5% de fibra de borracha de pneu no solo puro, obtém-se um ângulo de atrito interno de  $27,35^\circ$ , que é um valor inferior ao registrado no solo puro, porém, evidencia-se um aumento no intercepto coesivo, passando de 0 a 33,78 kPa.

Para a mistura com 10% de fibra de borracha de pneu, ambos os parâmetros de resistência registram valores acima dos obtidos no solo puro,  $36,29^\circ$  e 18,61 kPa respectivamente. No entanto observa-se que o intercepto coesivo diminuiu a metade em relação ao valor obtido para a mistura com 5% de fibra de borracha de pneu.

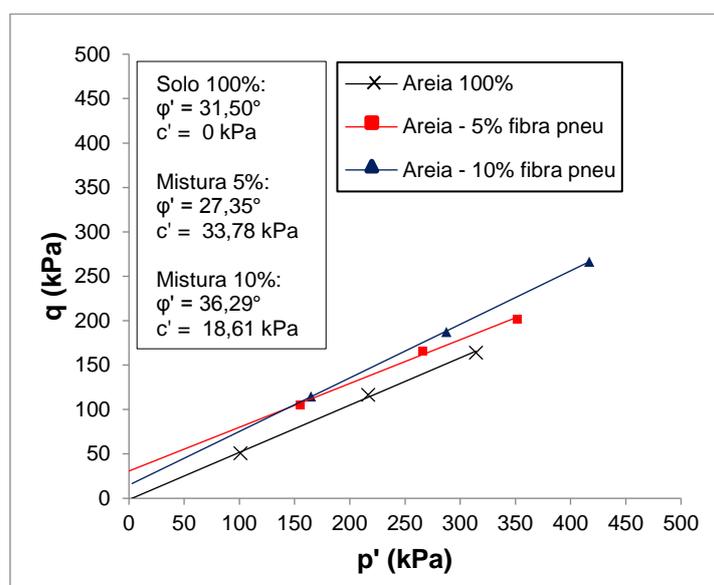


Figura 4.13 Comparação das envoltórias de resistência para as misturas areia - fibras de pneu

### Energia de deformação absorvida

A figura 4.14, mostra a variação das energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial, com as tensões confinantes efetivas utilizadas, para o solo puro e para as misturas de areia - fibras de pneu.

Da figura 4.14, observa-se que ambos os teores de mistura, superam as energias de deformação absorvidas pelo solo arenoso puro. Analisa-se que para a porcentagem de 5% de fibras de pneu adicionada ao solo arenoso, o acréscimo na energia absorvida produzido para a tensão confinante de 150 kPa fica próximo do valor obtido para a tensão de 100 kPa, com uma diferença entre eles de apenas 12%, enquanto que para a mistura de 10% de fibras de pneu, a variação das energias de deformação absorvidas, mantem-se em aumento de acordo com o nível de tensão confinante aplicado no ensaio. Os valores de energias de deformação absorvidas são apresentados na tabela 4.6.

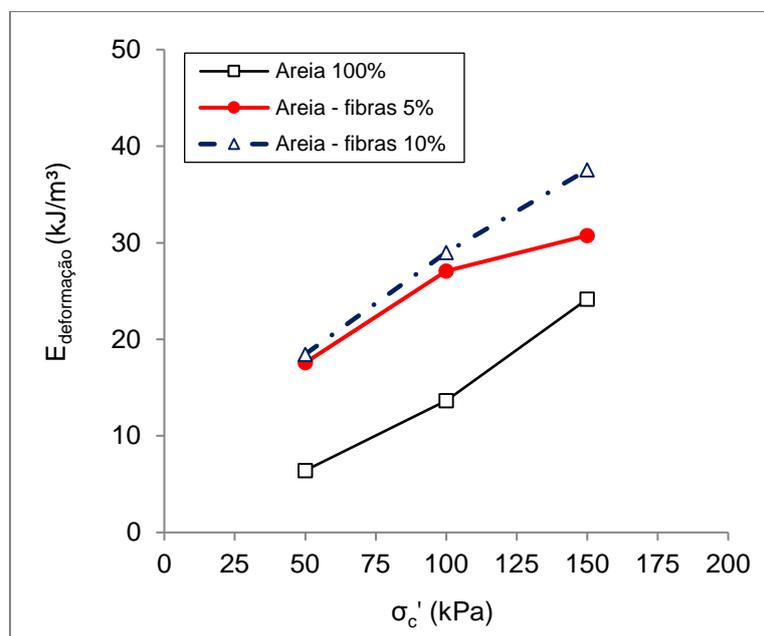


Figura 4.14 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial, das misturas de areia-fibras de pneu

Tabela 4.6 Valores de energias de deformação absorvidas para 18% da deformação axial nas misturas areia-fibras de pneu

$\sigma'_c$	Areia 100%	Mistura 5%	Mistura 10%
	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)
50	6,42	17,58	18,46
100	13,65	27,07	28,98
150	24,16	30,75	37,55

#### 4.2.2.4. Solo argiloso

##### **Comportamento tensão - deformação**

Os gráficos  $q$  vs  $\varepsilon_a$ ,  $q$  vs  $p'$ ,  $\varepsilon_v$  vs  $\varepsilon_a$ ,  $1+e$  vs  $p'$ , obtidos dos ensaios triaxiais CID realizados com o solo argiloso puro, são mostrados na figura 4.15.

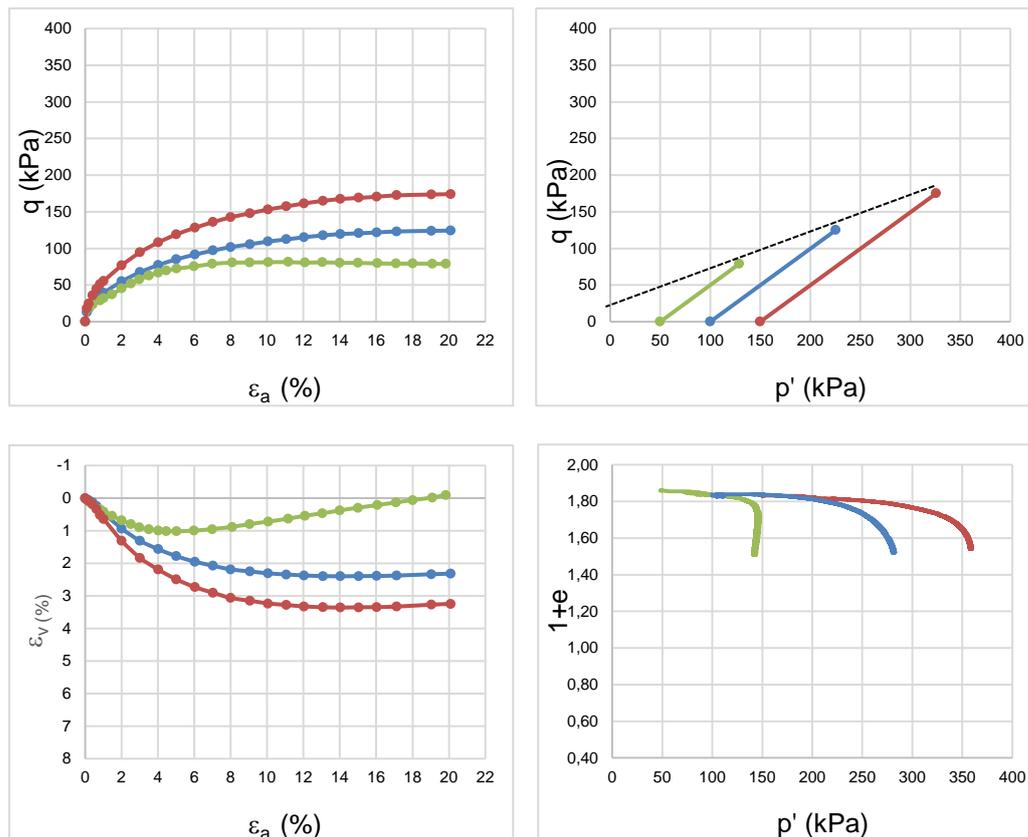


Figura 4.15 Resultados do ensaio triaxial CID do solo argiloso puro

Das curvas tensão-deformação obtidas para o solo argiloso puro, analisa-se que nos corpos de prova ocorre uma ruptura dúctil em todas as tensões efetivas utilizadas.

A resistência ao cisalhamento tende a aumentar com a deformação axial e não se observa um claro pico de resistência. Verifica-se também que tanto na areia como no solo argiloso, a resistência ao cisalhamento aumenta com a tensão efetiva.

Das curvas  $\varepsilon_v$  vs  $\varepsilon_a$ , observa-se que a deformação volumétrica das amostras, é de compressão quando submetidas as tensões de 100 kPa e 150 kPa, enquanto que

para a tensão de 50 kPa, a amostra expande a partir de aproximadamente 5% da deformação axial. Este comportamento também foi evidenciado por Ramirez (2012).

Do gráfico  $1+e$  vs  $p'$ , percebe-se que todas as amostras tendem para um mesmo índice de vazios final. Para a tensão de 50 kPa, a pesar de ter acontecido uma expansão, não houve um aumento no índice de vazios final.

### **Parâmetros de resistência**

As trajetórias de tensão para o solo argiloso puro, são apresentadas na figura 4.15. Estas foram plotadas usando os valores de  $q$  e  $p'$  calculados para 18% de deformação axial. A envoltória de ruptura obtida foi considerada linear. Os parâmetros de resistência  $c'$  e  $\varphi'$  calculados foram 20,54 kPa e  $28,81^\circ$  respectivamente.

#### **4.2.2.5. Misturas de solo argiloso-chips de borracha de pneu**

##### **Comportamento tensão – deformação**

Os gráficos  $q$  vs  $\varepsilon_a$ ,  $q$  vs  $p'$ ,  $\varepsilon_v$  vs  $\varepsilon_a$ ,  $1+e$  vs  $p'$ , obtidos dos ensaios triaxiais CID realizados para a mistura de solo argiloso-5% de chips de pneu, são mostrados na figura 4.16.

As relações de tensão – deformação mostradas na figura 4.16, denotam um rápido crescimento na resistência ao cisalhamento, sem a ocorrência de picos pronunciados. Observa-se que para a tensão efetiva de 50 kPa o valor de resistência máxima determinado mantêm-se estável a partir de 7% de deformação axial, enquanto que as amostras submetidas as tensões efetivas de 100 kPa e 150 kPa sofrem endurecimento com o aumento da deformação axial (*strain – hardening*).

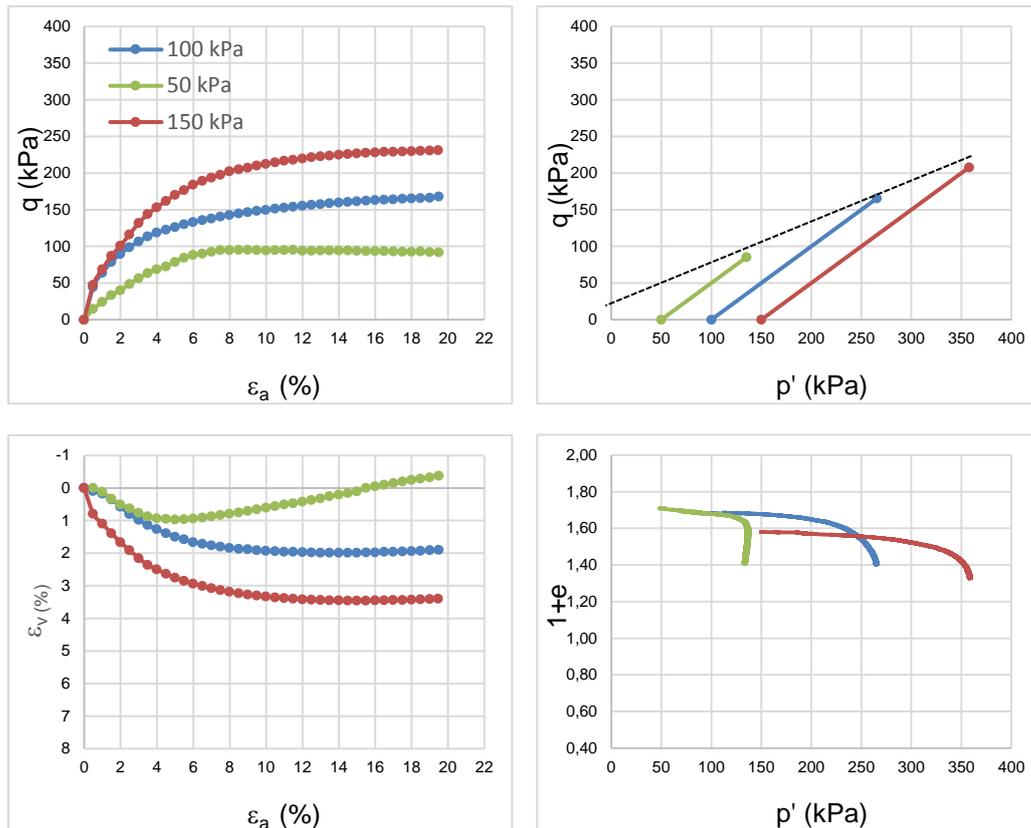


Figura 4.16 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila – 5% chip de pneu

A influência do teor de 5% de chips de pneu no comportamento tensão-deformação do solo argiloso, pode-se apreciar na figura 4.17, na qual mostram-se comparativamente as curvas  $q$  vs  $\varepsilon_a$  do solo puro e a mistura de 5% de chips de pneu.

As curvas de deformação volumétrica versus deformação axial, indicam um comportamento de compressão, exceto para a tensão efetiva de 50 kPa, à qual a amostra dilata.

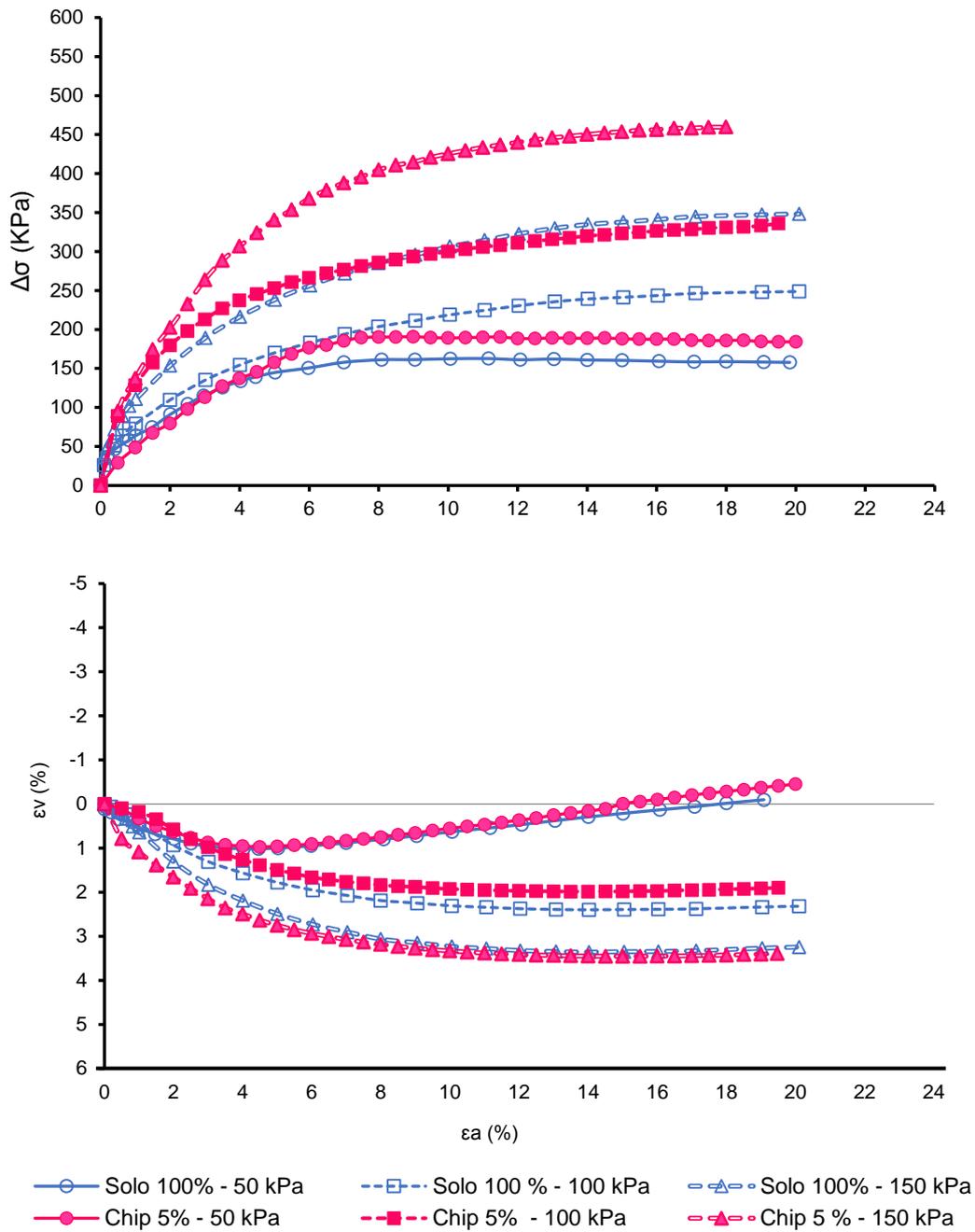


Figura 4.17 comportamento tensão – deformação da mistura argila-5% chip de pneu

### Parâmetros de resistência

As trajetórias de tensão da mistura de argila-5% chip de pneu são mostradas no gráfico  $q$  vs  $s'$  apresentado na figura 4.16. O efeito da inserção dos chips de pneu nos parâmetros de resistência do solo argiloso é ilustrado na figura 4.18, na qual apresenta-se uma comparação das envoltórias obtidas para a mistura de argila-5% chips de pneu e o solo puro.

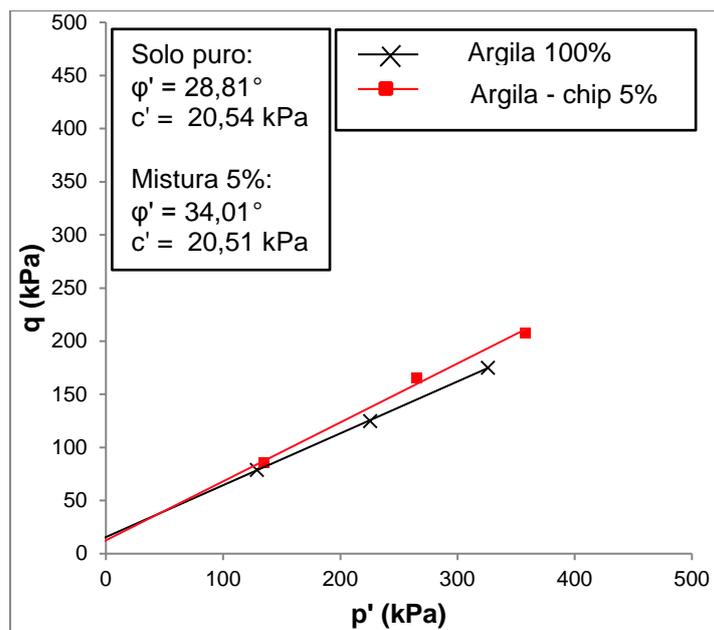


Figura 4.18 Comparação das envoltórias de resistência do solo puro e mistura argila-5% chip de pneu

Da figura 4.18 analisa-se que a adição dos chips de pneu influencia positivamente os parâmetros de resistência, especialmente o ângulo de atrito interno, que aumenta em 18%. No caso do intercepto coesivo observa-se que o valor obtido se mantém próximo do solo argiloso puro.

### Energia de deformação absorvida

A figura 4.19 mostra a variação das energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial nas tensões efetivas utilizadas. Observa-se que para todas as tensões efetivas a mistura argila-5% chips de pneu causa uma redução na energia

de deformação absorvida em comparação com o solo argiloso puro. Os valores de energia absorvida são apresentados na tabela 4.7.

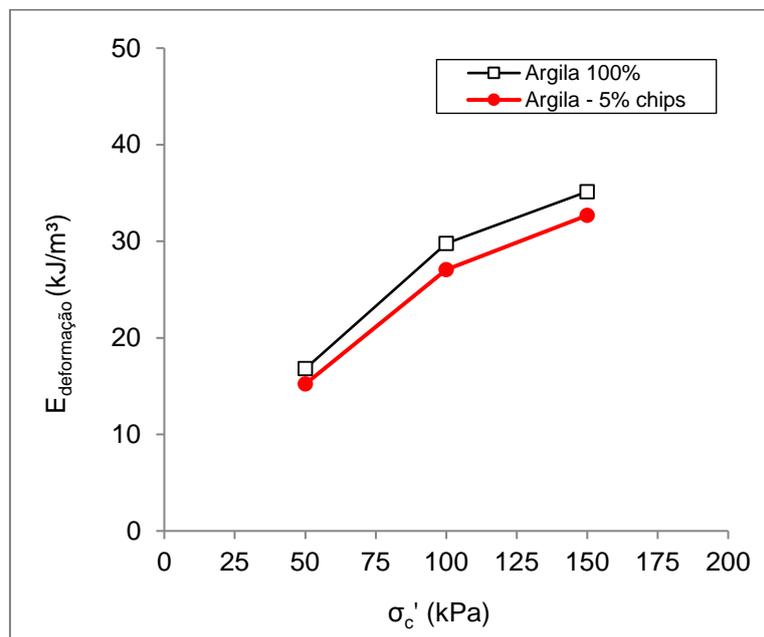


Figura 4.19 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial, do solo puro e mistura argila-5% chip de pneu

Tabela 4.7 Valores de energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial do solo puro e mistura argila-5% chip de pneu

$\sigma'_c$	Argila 100%	Mistura 5%
	$E_{def18\%}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$E_{def18\%}$ (kJ/m <sup>3</sup> )
50	16,79	15,21
100	29,78	27,06
150	35,14	32,68

#### 4.2.2.6. Misturas de solo argiloso-fibras de pneu

##### Comportamento tensão-deformação

Os gráficos  $q$  vs  $\varepsilon_a$ ,  $q$  vs  $p'$ ,  $\varepsilon_v$  vs  $\varepsilon_a$ ,  $1+e$  vs  $p'$ , obtidos dos ensaios triaxiais CID realizados para as misturas argila-fibras de pneu nos teores de 5, 10 e 15%, são mostrados nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22 respectivamente.

Das curvas tensão-deformação obtidas para a mistura argila-5% fibras de pneu, analisa-se que os valores de resistência ao cisalhamento máxima atingidos para as três tensões de confinamento aplicadas são comparáveis ou apenas um pouco mais altos do que os obtidos para o solo puro.

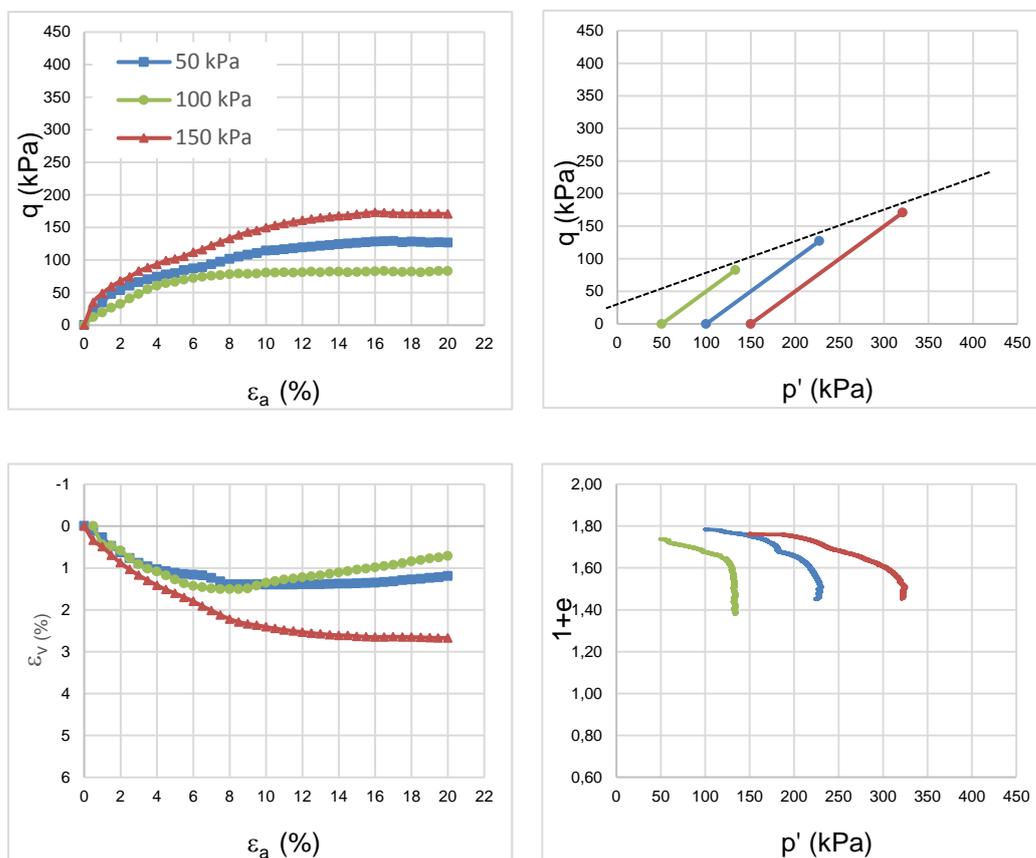


Figura 4.20 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila-5% fibras de pneu

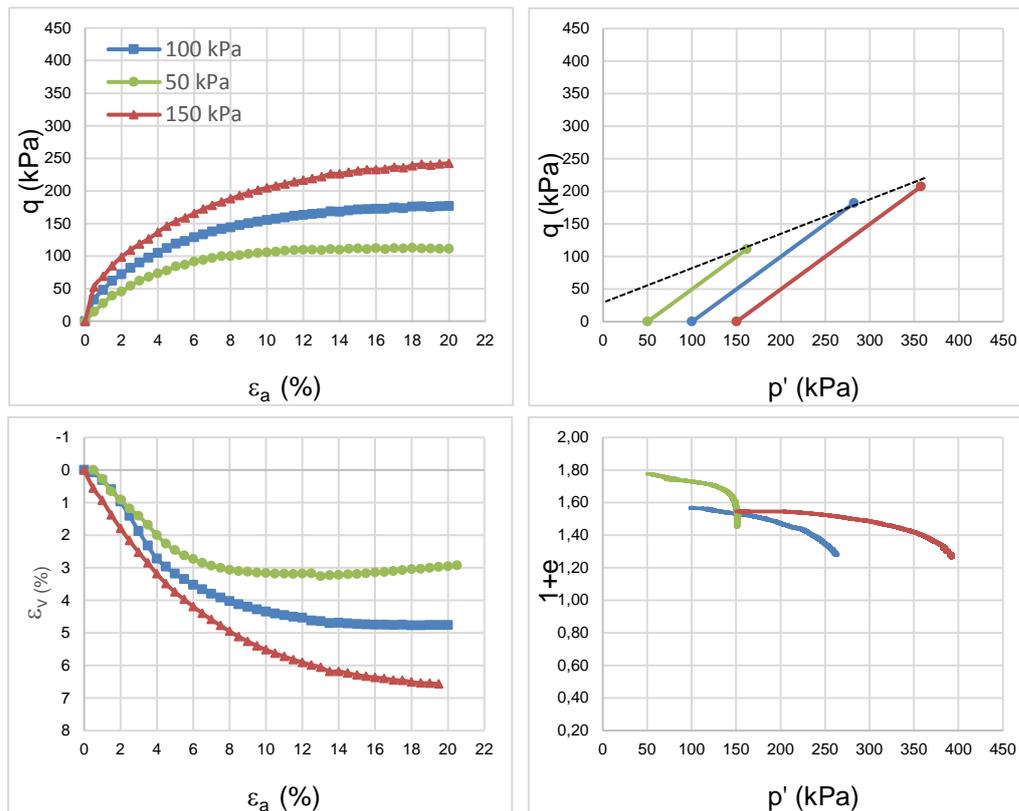


Figura 4.21 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila-10% fibras de pneu

Neste teor de fibra de pneu, os corpos de prova se deformam reduzindo o seu volume quando submetidos as tensões de confinamento de 100 kPa e 150 kPa. Este comportamento de compressão acontece acompanhado de uma diminuição do índice de vazios durante o cisalhamento como observado no gráfico  $1+e$  vs  $p'$ . No entanto, a variação volumétrica da mistura testada a uma tensão confinante de 50 kPa mostra um comportamento dilatante que não é refletido na variação do índice de vazios. Como mencionado anteriormente, este fenômeno pode estar relacionado a uma baixa poropressão na amostra que causou fluxo de água para o interior da mesma, preenchendo os vazios do solo.

Para as misturas preparadas com 10% e 15% de fibras de pneu, percebe-se um aumento significativo na resistência ao cisalhamento do solo, em razão da tensão confinante efetiva aplicada. Porém, no teor de 15% evidencia-se que as curvas tensão-deformação plotadas para as tensões de 100 kPa e 150 kPa ficam próximas uma da outra, sendo que para deformações inferiores a 6%, não pode se

estabelecer uma clara diferença no comportamento mecânico obtido com a variação da tensão efetiva. Desta proximidade, analisa-se que para altas tensões de confinamento, a adição de 15% de fibras de pneu em relação ao peso do solo seco, causa uma melhora na resistência ao cisalhamento do solo igual ou comparável à obtida para uma tensão apenas inferior.

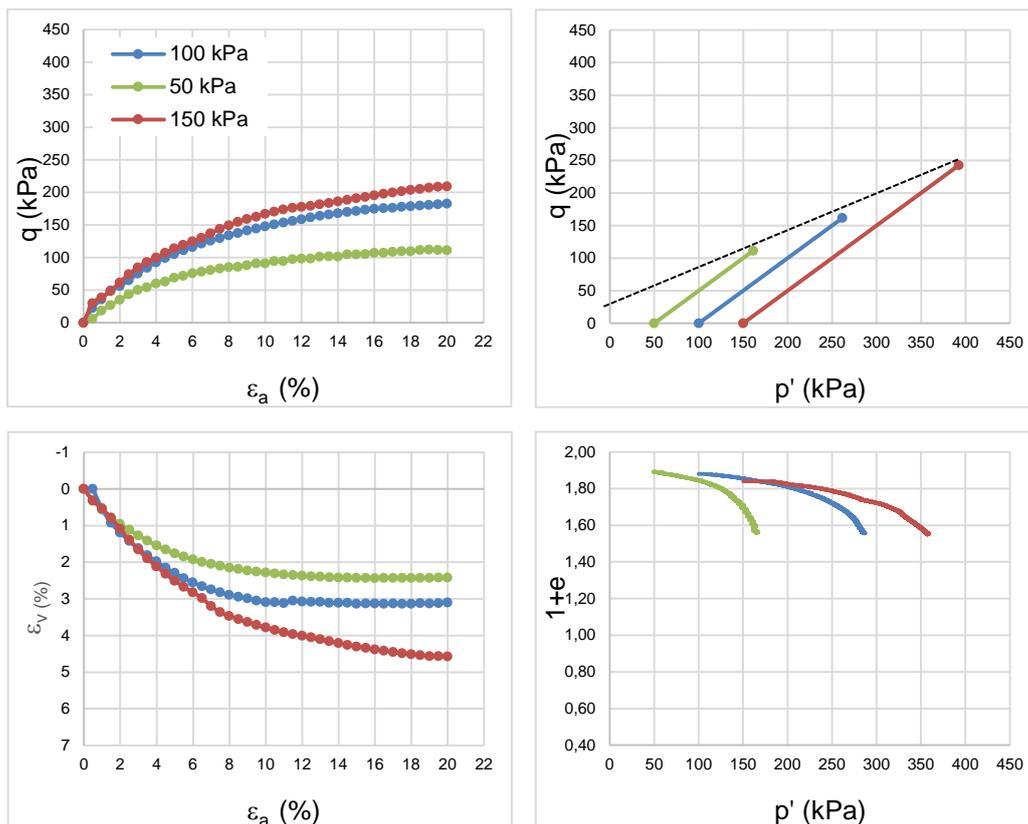
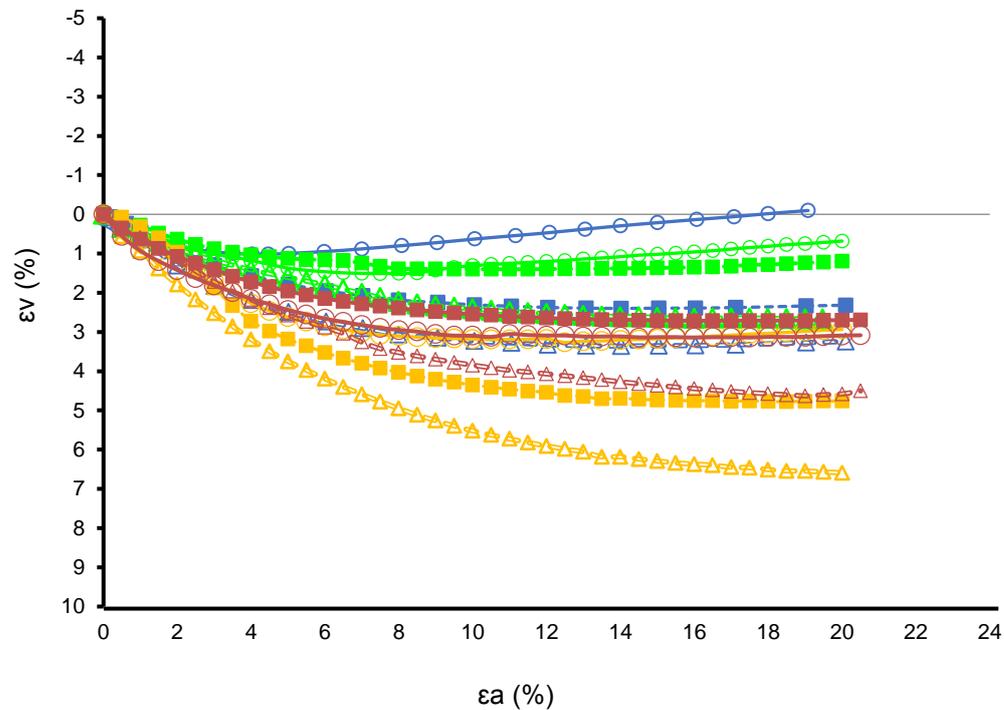
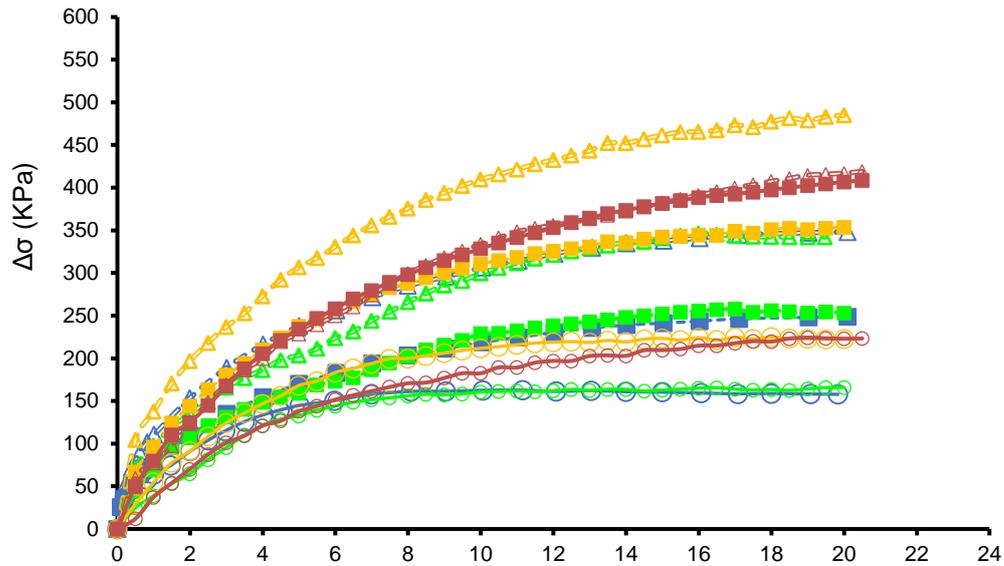


Figura 4.22 Resultados dos ensaios triaxiais CID da mistura argila-15% fibras de pneu

Do gráfico de deformação volumétrica versus deformação axial das misturas com 10% e 15% de fibras de pneu, observa-se que para as três tensões efetivas utilizadas, as amostras comprimem durante todo o cisalhamento. Nos corpos de prova submetidos as tensões de 50 kPa e 100 kPa dita contração atinge uma certa estabilização a partir de 14% e 12% da deformação axial para os teores de 10% e 15% de fibras de pneu, respectivamente. Já para a tensão confinante de 150 kPa, os

corpos de prova preparados com ambos os teores continuam a comprimir até o final do ensaio.

A figura 4.23 apresenta uma comparação das curvas tensão-deformação e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para o solo puro e para as misturas de solo argiloso – fibras de pneu, através da qual verifica-se que a inserção de fibras de pneu melhora a resistência ao cisalhamento, seguindo mesma tendência de comportamento mecânico do solo puro.



- Solo 100% - 50 kPa      - -■- - Solo 100% - 100 kPa      - -△- - Solo 100% - 150 kPa
- Fibra 5% - 50 kPa      - -■- - Fibra 5% - 100 kPa      - -△- - Fibra 5% - 150 kPa
- Fibra 10% - 50 kPa      - -■- - Fibra 10% - 100 kPa      - -△- - Fibra 10% - 150 kPa
- Fibra 15% - 50 kPa      - -■- - Fibra 15% - 100 kPa      - -△- - Fibra 15% - 150 kPa

Figura 4.23 Comportamento tensão – deformação das misturas argila - fibras de pneu

### Parâmetros de resistência

A figura 4.24 mostra a comparação das envoltórias de resistência obtidas para as misturas argila – fibras de pneu nos teores de 5%, 10% e 15%. Nota-se que a adição de fibras de pneu influencia positivamente os parâmetros de resistência do solo a partir do teor de 10%. Porém, o ângulo de atrito interno da mistura com 15% diminuiu, indicando que nem sempre o aumento da quantidade de borracha gera uma melhora na resistência ao cisalhamento. Isto pode ser devido a que o aumento da massa de fibras de pneu misturados ao solo puro reduz a interação entre os dois materiais dificultando o efeito de reforço esperado.

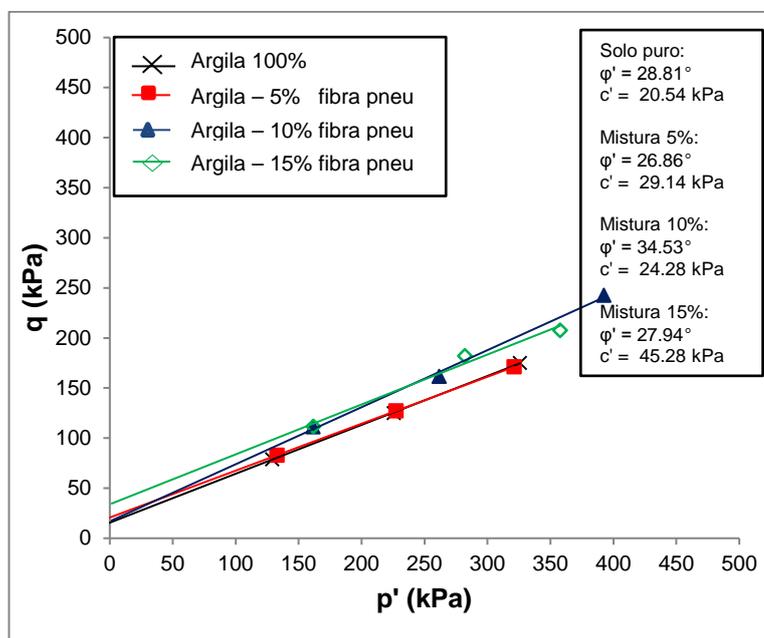


Figura 4.24 Comparação das envoltórias de resistência obtidas para as misturas argila-fibras de pneu

### Energia de deformação absorvida

A figura 4.25 apresenta a variação das energias de deformação absorvidas a 18% da deformação axial para as tensões confinantes efetivas utilizadas, para o solo puro e para as misturas com 5%, 10% e 15% de fibras de pneu em relação ao peso do solo seco.

Os resultados obtidos demonstram que o compósito de argila-10% de fibras de pneu possui melhor capacidade de absorção de energia de deformação em relação ao solo puro e as misturas de 5% e 15% de resíduo. Verifica-se novamente que a mistura de 15% de fibras de pneu, testada a altas tensões de confinamento afeta negativamente o desenvolvimento da resistência ao cisalhamento do solo argiloso. Na variação das energias absorvidas pela mistura com 5% de resíduo não se observam diferenças com relação ao solo puro. Os valores de energias de absorção absorvidas para o solo puro e para as misturas argila – fibras de pneu são mostrados na tabela 4.8.

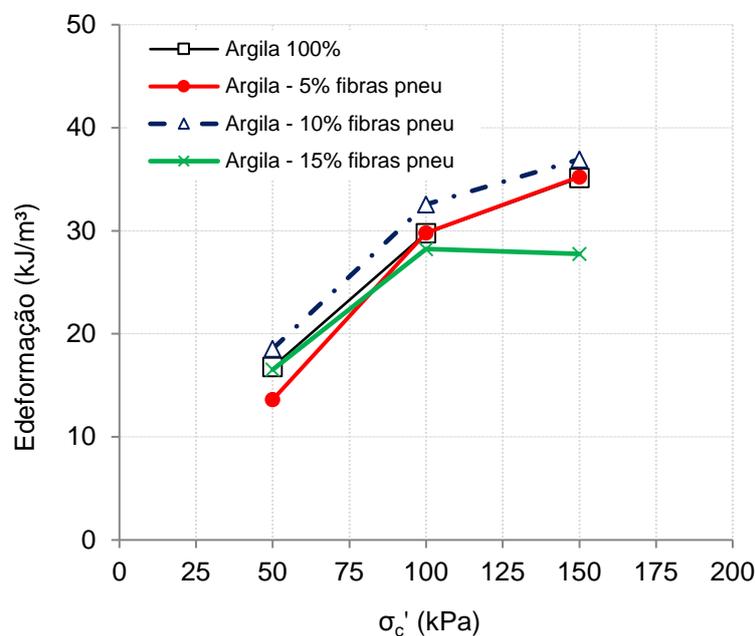


Figura 4.25 Energias de deformação absorvidas para 18% da deformação axial, das misturas argila-fibra de pneu

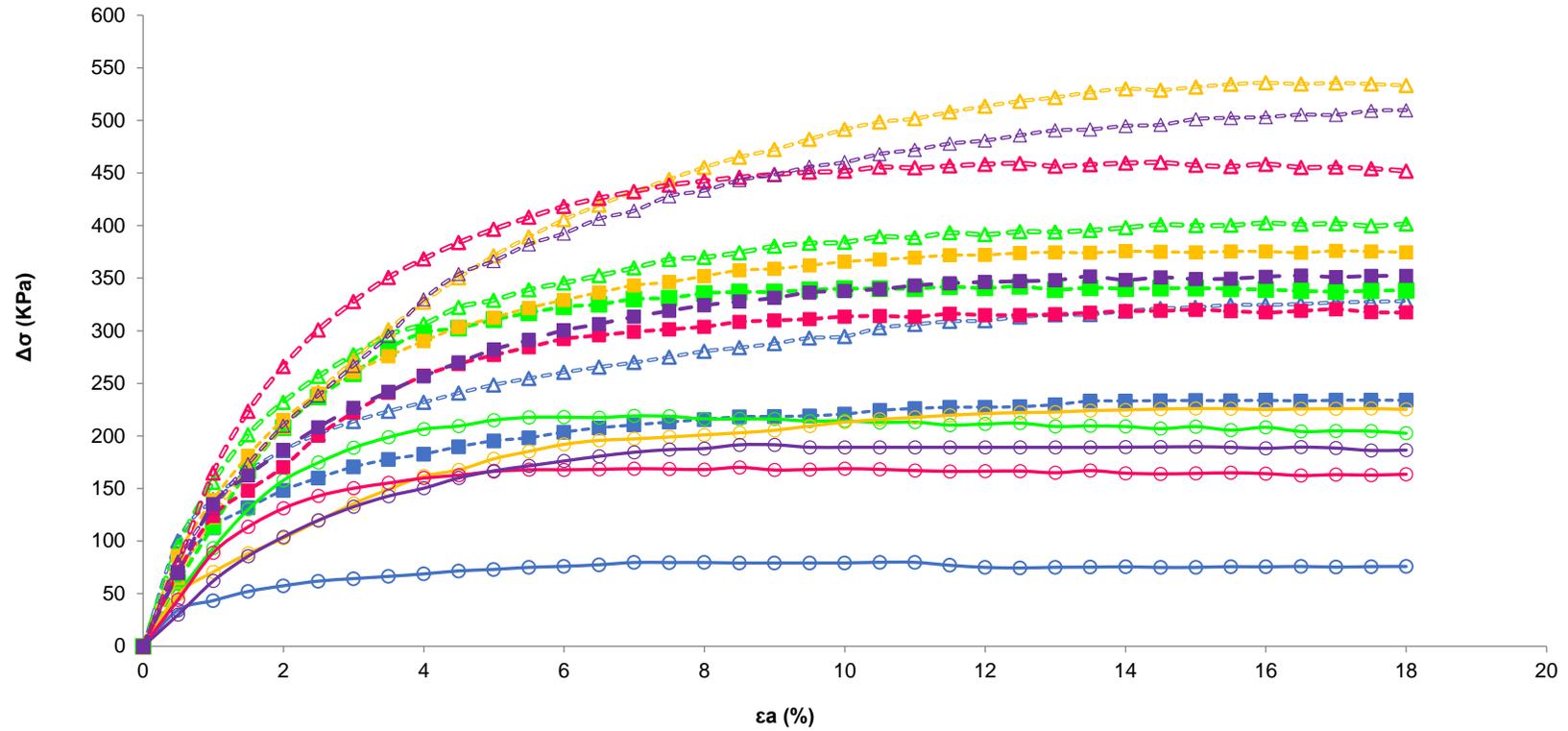
Tabela 4.8 Energias de deformação absorvidas para 18% de deformação axial, das misturas argila – fibras de pneu

$\sigma'_c$	Argila 100%	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 15%
	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)	$E_{def18\%}$ (kJ/m³)
50	16,8	13,62	18,55	16,53
100	29,78	29,79	32,55	28,24
150	35,14	35,24	36,94	27,76

#### **4.2.2.7. Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas em areia em relação ao teor e granulometria da borracha empregada**

A figura 4.26 apresenta as curvas tensão-deformação das misturas areia-borracha de pneu, representadas pela tensão-desvio versus deformação axial, para as tensões de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa. Do gráfico analisa-se que para todas as amostras, o aumento da tensão de confinamento melhora a resposta mecânica das mesmas, evidenciado pelo aumento da tensão-desvio. Além disso, observa-se que as misturas de solo-borracha de pneu conservam a mesma tendência de comportamento da areia pura, indicando que a inserção de chips e fibras de borracha de pneu não causa alterações significativas na matriz do solo. Em relação ao teor de borracha adicionada, verifica-se que o aumento da porcentagem de resíduo, provoca uma melhora da tensão-desvio das misturas. Em termos de rigidez, ao aumentar juntamente o teor de borracha de pneu inserido no solo e a tensão de confinamento, analisa-se que o rápido crescimento da resistência no início do cisalhamento diminui a rigidez das amostras. Isto é evidenciado pelo aumento da deformação axial das misturas com 10% de chips e fibras de pneu testadas a uma tensão confinante de 150 kPa. Com relação a granulometria da borracha de pneu empregada nas misturas elaboradas para a areia, percebe-se que os máximos valores de tensão-desvio, para as três tensões efetivas estudadas, foram obtidos com as amostras contendo solo-fibra de borracha. Sendo que a melhora mais significativa da resistência ao cisalhamento foi obtida com o teor de 10% de fibra de borracha de pneu.

As curvas de deformação volumétrica versus deformação axial das misturas com 5% e 10% de fibra de borracha de pneu indicam dilatação para as tensões de 50 kPa e 100 kPa e compressão para a tensão de 150 kPa. Özkul e Baykal (2007) explicam que a dilatação das amostras de solo-fibras de borracha ocorre devido a mobilização da resistência à tração das fibras de borracha. No entanto, as misturas de areia-chip de borracha de pneu apresentam um comportamento contrativo durante todo o cisalhamento, exceto para a tensão de 50 kPa a qual as amostras dilatam. Desta análise, conclui-se que a borracha de pneu na granulometria de fibra apresenta um maior ganho na resistência ao cisalhamento em comparação com a forma de chip também avaliada nas misturas com areia. O teor de fibra de borracha com o qual foi obtido o aumento mais significativo corresponde a 10% de resíduo.



- |                           |                              |                             |                             |                            |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| —○— Solo 100% - 50 kPa    | - -■- - solo 100 % - 100 kPa | - -△- - Solo 100% - 150 kPa | —○— Fibra 5% - 50 kPa       | - -■- - Fibra 5% - 100 kPa |
| —△— Fibra 5% - 150 kPa    | —○— Fibra 10% - 50 kPa       | - -■- - Fibra 10% - 100 kPa | - -△- - Fibra 10% - 150 kPa | —○— Chip 5% - 50 kPa       |
| - -■- - Chip 5% - 100 kPa | - -△- - Chip 5% - 150 kPa    | —○— Chip 10% - 50 kPa       | - -■- - Chip 10% - 100 kPa  | - -△- - Chip 10% - 150 kPa |

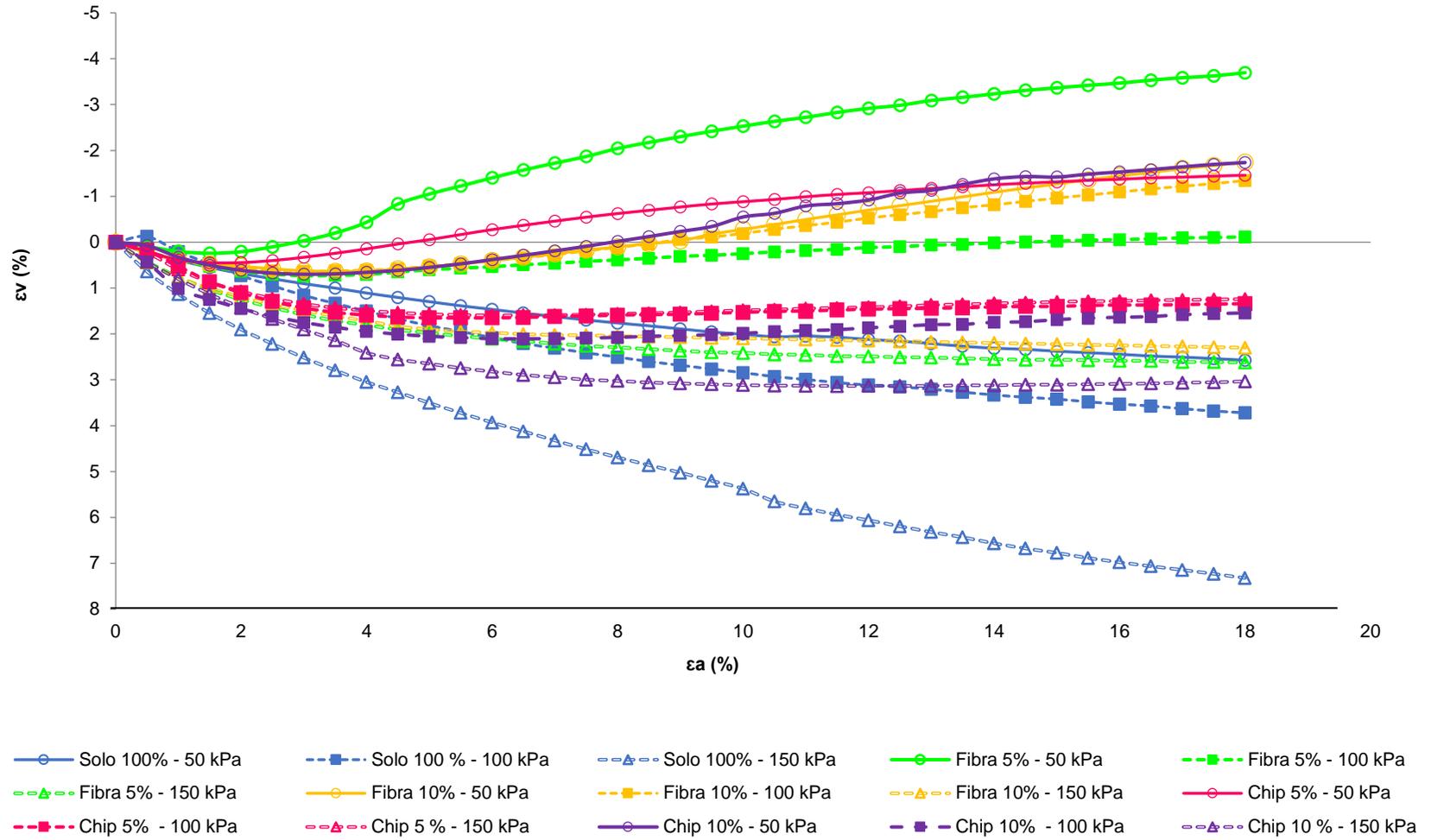
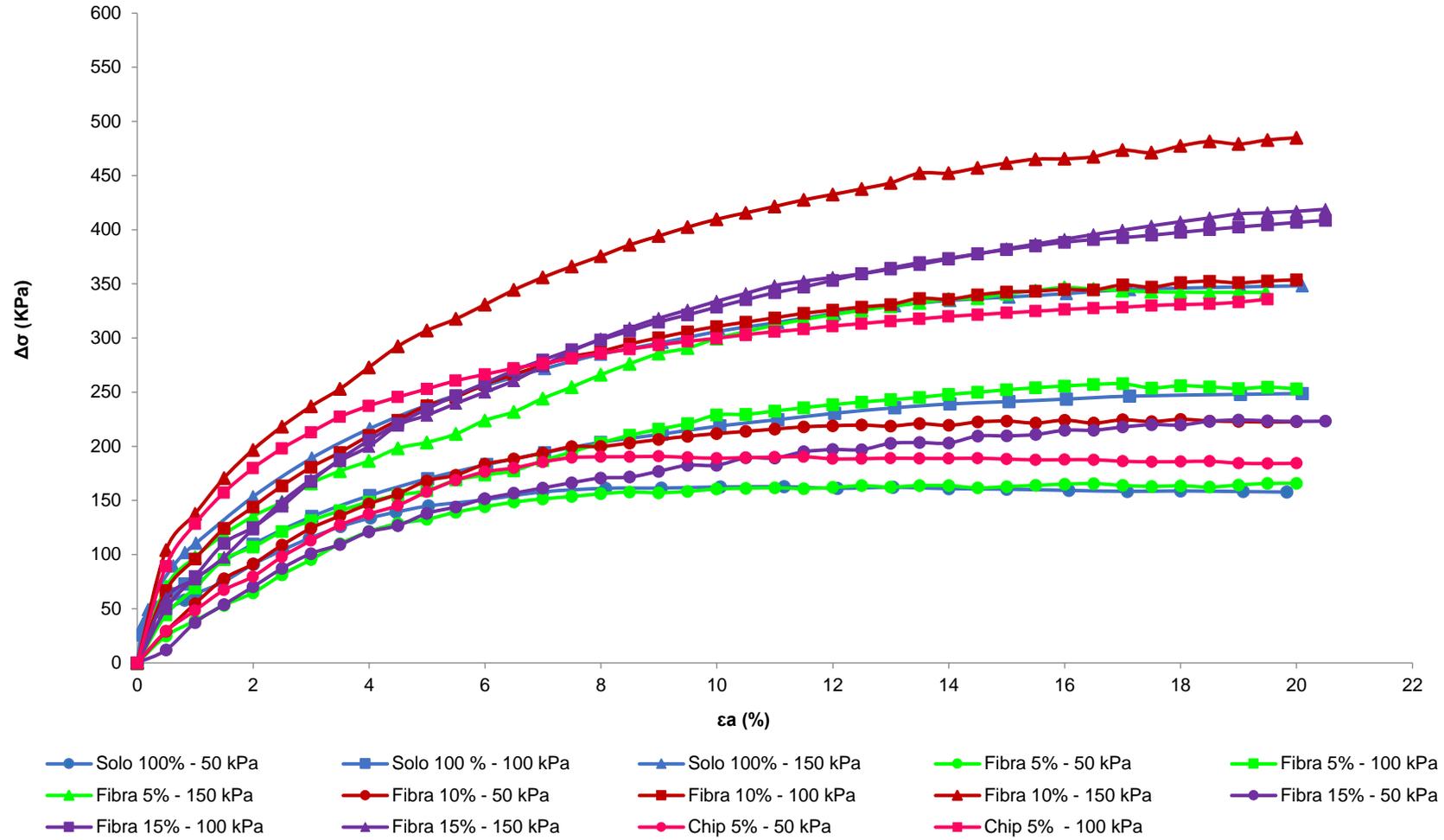


Figura 4.26 Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas areia-borracha de pneu

#### **4.2.2.8. Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas em solo argiloso em relação ao teor e granulometria da borracha empregada**

A figura 4.27 apresenta as curvas tensão-deformação das misturas de solo argiloso-borracha de pneu, representadas pela tensão-desvio versus deformação axial, para as tensões de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa. Observa-se que a tensão-desvio aumenta à medida que é incrementada a tensão de confinamento efetiva. Detalha-se para as tensões de 50 kPa e 100 kPa, as misturas de solo-borracha de pneu seguem a mesma tendência de comportamento obtida para o solo puro, enquanto que para a tensão de 150 kPa, as curvas tensão-deformação representando as misturas de solo argiloso-borracha de pneu podem cruzar entre elas. Este fenômeno foi observado também nos compósitos elaborados com areia onde analisou-se que ao submetê-los a uma tensão de confinamento de 150 kPa, os compósitos podem apresentar uma perda de rigidez no início do cisalhamento ao tempo a mistura desenvolve um rápido crescimento da resistência. Percebe-se que a melhora da resistência depende também do teor e granulometria da borracha utilizada nas misturas. A fibra de borracha parece interagir melhor com os grãos de solo argiloso em comparação com as misturas de solo-chips de pneu. Em termos do teor ótimo para as inclusões com fibra, pode ser que a porcentagem de 10% de borracha em relação ao peso do solo seco seja a quantidade de resíduo com a qual o solo desempenhe um melhor comportamento. Contudo, recomenda-se testar com teores de fibra acima de 15%, para verificar se o efeito de reforço é mais significativo utilizando a porcentagem de 10%.

As curvas de deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para as misturas de solo argiloso-borracha de pneu mostram um comportamento contrativo para quase todos os teores de mistura estudados, exceto, para os corpos de prova elaborados com solo puro e com 5% de chips de borracha de pneu, submetidos a uma tensão confinante de 50 kPa, a qual estes se dilatam. De todo o anterior, conclui-se que a granulometria e o teor de borracha que beneficiam mais o comportamento mecânico do solo argiloso correspondem a fibra de pneu no teor de 10%.



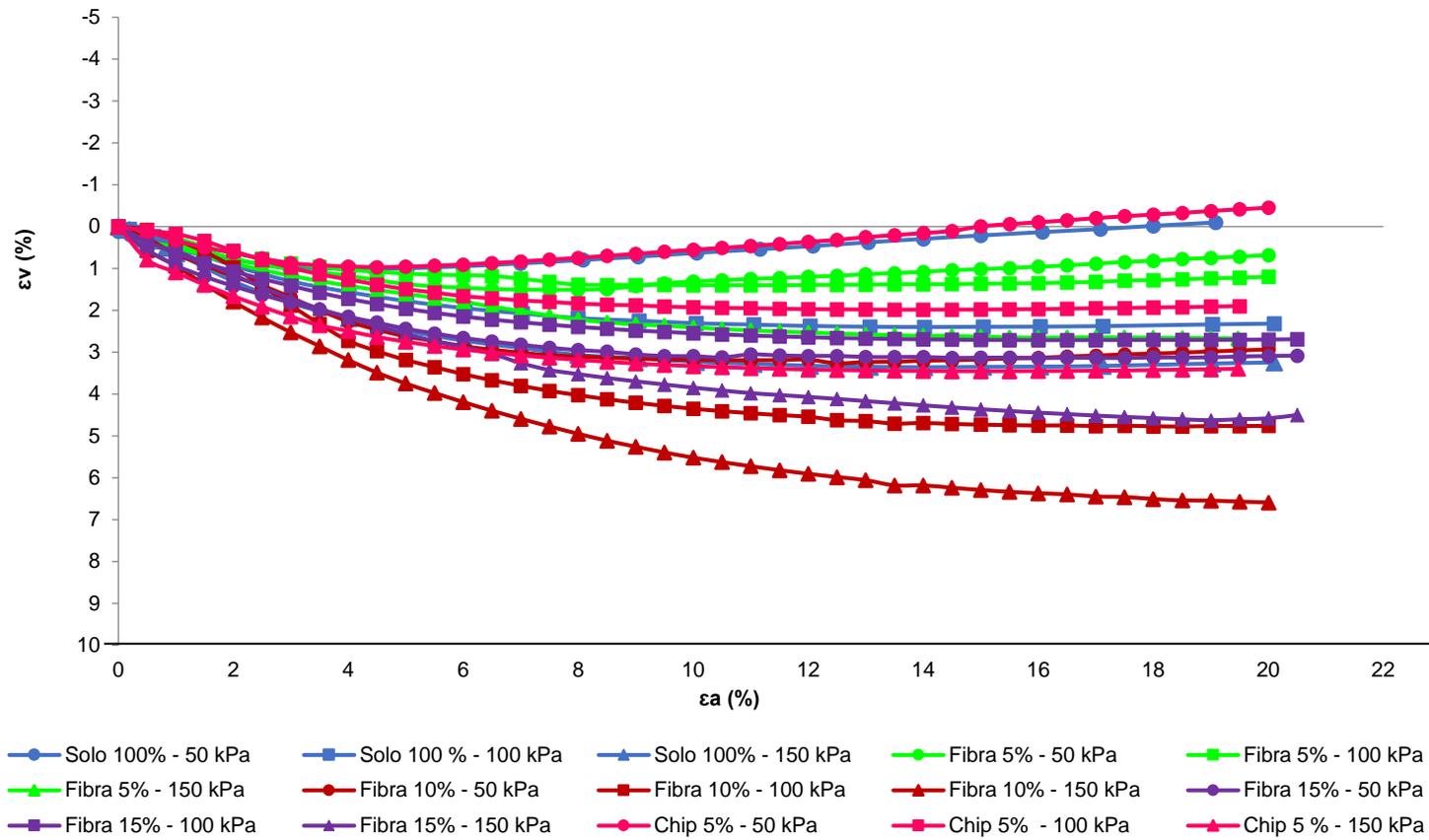


Figura 4.27 Comparação do comportamento tensão-deformação das misturas areia-borracha de pneu

Tabela 4.9 Parâmetros de resistência determinados para as misturas de ambos os solos (areia e argiloso) com chips e fibras de borracha de pneu

Mistura	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)
Areia 100%	31,50	0
Areia-5% chip pneu	36,00	6,18
Areia-10% chip pneu	37,91	7,61
Areia-5% fibra pneu	27,35	33,78
Areia-10% fibra pneu	36,29	18,61
S. argiloso 100%	28,81	20,54
S. argiloso-5% chip pneu	34,01	20,51
S. argiloso-5%fibra pneu	26,86	29,14
S. argiloso-10%fibra pneu	34,53	24,28
S. argiloso-15% fibra pneu	32,46	22,13

#### 4.2.3.

#### Comparação com os resultados de pesquisas anteriores

Os efeitos da inserção da borracha de pneu no comportamento mecânico de uma areia pura e um solo argiloso, foram discutidos ao longo deste capítulo estabelecendo notáveis diferenças entre os resultados obtidos com a aplicação do chip e da fibra de borracha de pneu misturados aos solos puros. Desta comparação concluiu-se que a granulometria mais fina proporciona um melhor desenvolvimento da resistência ao cisalhamento em ambos os solos estudados. No entanto, buscou-se comparar estes resultados com trabalhos que também avaliaram misturas de solo-borracha de pneu em granulometrias mais finas através de ensaios triaxiais do tipo consolidado e isotropicamente drenado. Com este fim selecionou-se a dissertação de mestrado de Ramirez (2012), que usou o mesmo solo argiloso utilizado na presente pesquisa, misturado com borracha moída de pneu nos teores de 5%, 10%, 20%, 30% e 40% em relação ao peso do solo seco. A comparação foi realizada apenas para as porcentagens de 5% e 10% considerando que neste trabalho não foi possível preparar corpos de prova com teores de chip/fibra mais altos.

As figuras 4.28 e 4.29 apresentam as curvas tensão-deformação e deformação axial vs deformação volumétrica obtidas para os teores de 5% e 10% de borracha de pneu respectivamente, com a variação da granulometria da borracha de pneu empregada.

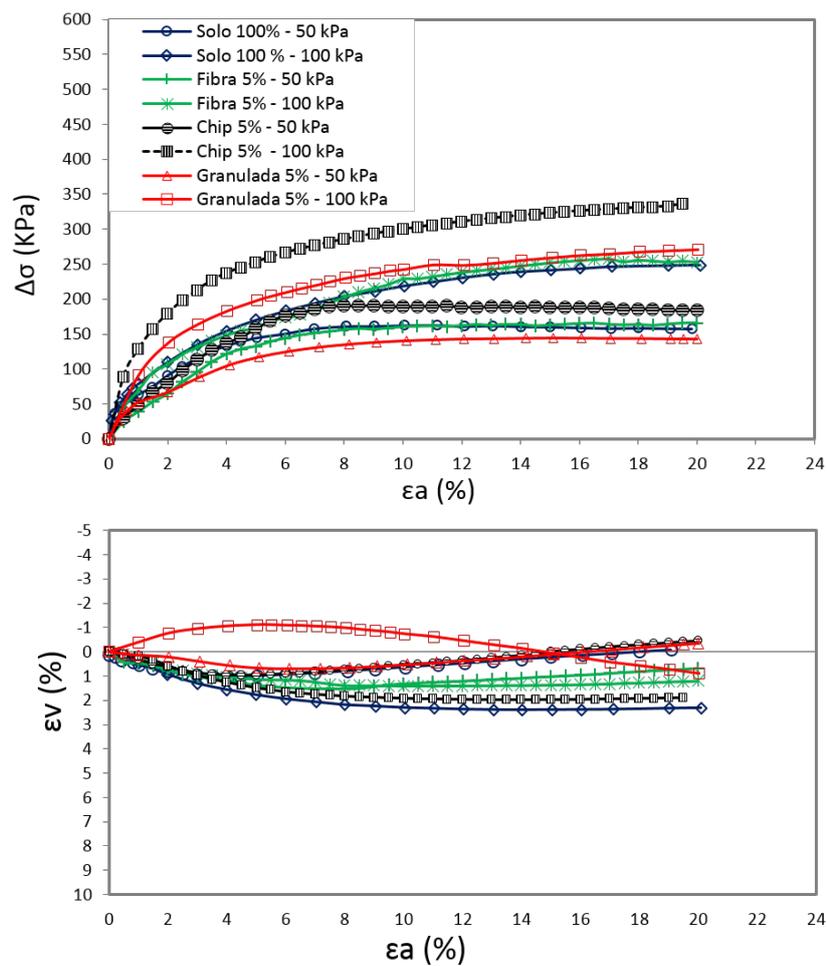


Figura 4.28 Comparação entre as relações tensão-deformação obtidas para a misturas de solo argiloso com chip, fibra e borracha moída de pneu no teor de 5%

Da figura 4.28 observa-se que a inserção da borracha em qualquer das granulometrias utilizadas não modifica o padrão de comportamento obtido para o solo argiloso puro. Evidencia-se que a diferença entre usar uma u outra granulometria se deve essencialmente à melhora da resistência e a deformação volumétrica alcançadas. A mistura com 5% de borracha moída de pneu testada a uma tensão efetiva de 50 kPa apresenta um decréscimo na resistência ao cisalhamento em relação ao solo argiloso puro. Já quando submetida a 100 kPa, a curva tensão-deformação se localiza acima do solo puro e inclusive supera a resistência atingida pela mistura com 5% de fibra de borracha. Contudo é claro que para este teor de mistura, o chip de pneu em ambas as tensões efetivas de 50 kPa e

100 kPa, apresenta um maior ganho na resistência em comparação com a obtida nas misturas com fibra e a borracha moída de pneu.

Na deformação volumétrica todos os corpos de prova ensaiados a 50 kPa se contraem no início do ensaio e posteriormente dilatam, exceto na mistura solo-fibra de pneu na qual se evidencia um comportamento de compressão até o final do cisalhamento. A deformação volumétrica obtida sob a tensão de 100 kPa mostra dilatação exclusivamente para a mistura elaborada com borracha moída de pneu.

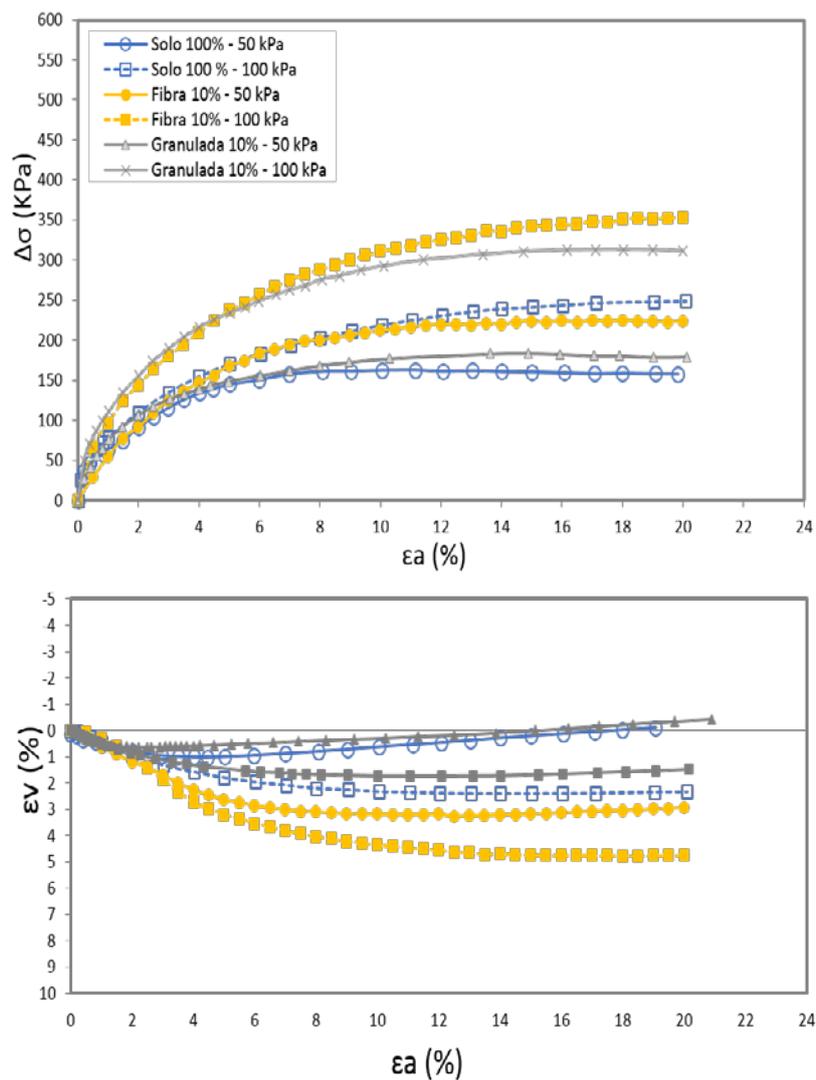


Figura 4.29 Comparação entre as relações tensão-deformação obtidas para as misturas de solo argiloso com fibra e borracha moída de pneu no teor de 10%

Da figura 4.29 observa-se que o aumento do teor de borracha móida de pneu inserido no solo argiloso favoreceu o comportamento mecânico da mistura, testado sob tensão de 50 kPa. Sendo que depois de aproximadamente 7% de deformação axial a curva tensão-deformação da mistura se separa da curva do solo argiloso puro desenvolvendo uma maior resistência ao cisalhamento. Contudo a comparação entre as relações tensão-deformação para o teor de 10% de borracha, indica que das granulometrias empregadas, a fibra é a que melhor reforça o desempenho mecânico do solo argiloso.

#### **4.2.4. Ensaio de adensamento unidimensional**

Os resultados do ensaio de adensamento unidimensional constituem uma peça fundamental no desenho de aterros com limite de recalques (Edil e Bosscher, 1994).

A figura 4.30, apresenta os resultados dos ensaios de adensamento unidimensional realizados para o solo puro e para as misturas com chips e fibras de pneu no teor de 5%. Observa-se que na fase de carregamento as amostras exibem um comportamento de compressão que varia principalmente com o tamanho e a forma dos resíduos de pneu inseridos no solo. Evidencia-se que a compressibilidade do solo é mais proeminente na mistura com 5% de fibras de pneu, na qual nota-se uma grande redução do índice de vazios inicial da amostra, desde o primeiro estágio de carregamento. Franco (2012), indica que o alto nível de compressão destes resíduos é usualmente atribuído a sua alta porosidade e compressão individual do pneu.

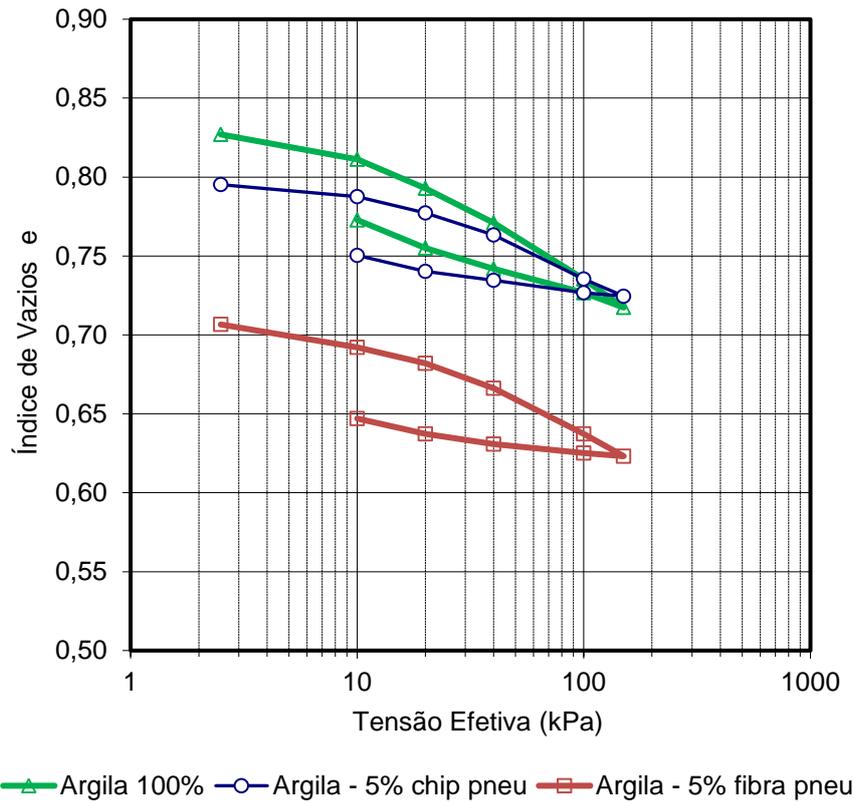


Figura 4.30 Resultados do ensaio de adensamento unidimensional realizados para o solo puro e misturas de solo argiloso com chips e fibras de pneu

No descarregamento, observa-se que tanto no solo puro como nas misturas, as curvas, não seguem a mesma trajetória de tensão da fase de carregamento, indicando a ocorrência de deformações plásticas irreversíveis.

Uma amostra de solo indeformada se comportará como pré-adensada enquanto o valor da máxima tensão a que já esteve submetida em campo ou pressão de pré-adensamento não for ultrapassada pela tensão vertical efetiva induzida pelo carregamento. Na presente pesquisa, a determinação das pressões de pré-adensamento do solo puro e misturas, foi realizada empregando método de Casagrande. Os valores encontrados correspondem a 18 kPa (solo puro), 20 kPa (mistura com 5% chips) e 20 kPa (mistura com 5% de fibras). As pressões de pré-adensamento determinadas, indicam que o solo puro e as misturas comportam-se como um material normalmente adensado.

A tabela 4.10, mostra os valores de coeficiente de adensamento vertical ( $C_v$ ), condutividade hidráulica ( $k$ ), e módulo oedométrico ( $E_{oed}$ ), obtidos para o solo puro e para as misturas de argila com chips e fibras de pneu no teor de 5%, para as tensões

efetivas de 40 kPa, 100 kPa e 150 kPa as quais as amostras foram submetidas na fase de carregamento. Dos parâmetros de adensamento determinados, analisa-se que os valores de coeficiente de adensamento vertical e de condutividade hidráulica para o solo reforçado com 5% de chips de pneu são semelhantes aos obtidos para o solo puro, enquanto que para a mesma mistura com fibras de pneu, obtêm-se coeficientes de adensamento vertical e permeabilidade menores. Já o módulo oedométrico aumenta para ambas as formas de pneu utilizadas em relação ao solo puro, sendo este maior no solo reforçado com chips de pneu.

Tabela 4.10 Parâmetros de adensamento obtidos para o solo puro e para as misturas de argila com chips e fibras de pneu

Mistura	Parâmetros	Tensão efetiva (kPa)		
		40	100	150
<b>Argila 100%</b>	Cv (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 <sub>oed</sub> (kPa)	4,36E+02	6,73E+02	5,45E+03
<b>Argila – 5% chips pneu</b>	Cv (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 <sub>oed</sub> (kPa)	2,67E+03	4,03E+03	8,56E+03
<b>Argila – 5% fibras pneu</b>	Cv (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 <sub>oed</sub> (kPa)	2,39E+03	3,91E+03	6,62E+03

## 5 Considerações finais

### 5.1. Conclusões

A partir dos resultados apresentados e das análises realizadas na presente pesquisa é possível concluir que:

- Os parâmetros de compactação do solo argiloso, como são peso específico seco máximo e a umidade ótima são altamente influenciados pela quantidade de chips e fibras de pneu inserida na mistura. Sendo que para baixos teores de mistura, o peso específico seco dos compósitos chega a ser maior do que o obtido para o solo puro, enquanto que para as porcentagens de 10% e 15% de fibras de pneu, o peso específico seco da mistura, atinge valores menores do que o solo puro.
- O comportamento mecânico das misturas dos solos com resíduos de pneu, mostra a tendência de melhorar a resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de resíduo de pneu inserido no solo. No entanto, verifica-se que a tensões maiores pode prejudicar a resposta mecânica das misturas contendo maior quantidade de resíduo.
- Apesar das curvas tensão-deformação das misturas de solo – resíduos de pneu estudadas não terem alcançado um pico de resistência, registram-se valores de resistência máxima para 18% de deformação axial, para as misturas elaboradas com areia e solo argiloso.
- Com relação ao tamanho e forma dos resíduos empregados, constata-se que para ambos os solos, os compósitos elaborados com fibras de pneu desenvolveram um melhor crescimento da resistência ao cisalhamento em comparação com as misturas de solo-chips de pneu, evidenciado nos parâmetros de resistência  $\phi'$  e  $c'$  obtidos para ambos os solos.

- O efeito positivo na resistência ao cisalhamento, causado pelo incremento do teor de fibras de pneu, se mostra mais significativo para a areia, ao se compararem os resultados do comportamento tensão-deformação obtidos nas misturas com fibras de pneu preparadas para ambos os solos.
- A deformação volumétrica obtida para as misturas dos solos com resíduos de pneu depende do nível de tensão confinante efetiva a que as amostras são submetidas. Para baixas tensões de confinamento os corpos de prova dilatam, e para altas tensões de confinamento estes se contraem.
- Tanto para os compósitos elaborados com solo argiloso quanto para os de areia, o teor de mistura com melhor desempenho mecânico corresponde ao de 10% de fibras de pneu, em relação ao peso do solo seco.
- Dos ensaios de adensamento unidimensional realizados para o solo argiloso e misturas deste com resíduos de pneu, conclui-se que a adição de chips não altera significativamente a compressibilidade do solo. Já a inserção das fibras, reduz o coeficiente do adensamento vertical e diminui a permeabilidade.
- Os chips e fibras de pneu inseridos em ambos os solos aumentaram a capacidade de absorção de energia de deformação no solo. À medida que a tensão confinante efetiva e o teor de resíduo adicionado aos solos puros são incrementados, elevam-se também as energias de deformação absorvidas pelos compósitos.
- Da comparação realizada com os resultados de pesquisas anteriores conclui-se que o uso da borracha de pneu em obras de engenharia como material de reforço de solos, apresenta uma alta viabilidade, podendo ser aplicada em diferentes granulometrias a fim de aproveitar uma maior quantidade deste resíduo.

## 5.2. Sugestões para pesquisas futuras

A seguir citam-se algumas sugestões para ampliar o conhecimento e continuar com o desenvolvimento de pesquisas ao respeito da viabilidade do emprego de resíduos de pneu como materiais de reforço de solos:

- Realizar ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados com amostras maiores que permitam avaliar outros teores de mistura mais.
- Realizar ensaios “*ring shear*” para avaliar a resistência residual das misturas de solo-resíduo de pneu a grandes deformações.
- Desenvolver modelos numéricos para a previsão do comportamento tensão-deformação das misturas de solo-resíduos de pneu, nos quais possam ser simulados os efeitos de tamanho, forma e teor de resíduo, no comportamento mecânico do solo.
- Construir um modelo físico reduzido de solo-borracha, a fim de estudar o comportamento carga-recalque através de ensaios de carga em placa.
  - Estudar a influência da temperatura no comportamento mecânico das misturas solo-borracha de pneu.

## 6 Referências bibliográficas

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. (1986) **ABNT NBR 6457**: AMOSTRAS DE SOLOS – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. 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 7182**: SOLO – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro/RJ.

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

AHMED, I.; LOVELL, CW. **Rubber soils as a lightweight geomaterials**. Transportation Research Record, n.1422, p. 61-70, 1993.

BOSSCHER, P.J.; EDILL, T.B.; EDLIN, N.N. **Construction and performance of a shredded waste tire test embankment**. Transportation Research Record, n.1345, p 44-52, 1993.

CETIN, H.; FENER, M.; GUNAYDIN, O. **Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material**. Engineering Geology, n.88, p. 110-120, 2006.

CHRUSCIAK, M. E ARAÚJO G. **Estudo da compactação de misturas de pedaços de pneu com solos finos**. VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2015) e VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (GEOSSINTÉTICOS 2015). Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). Brasília. 7p

EDIL, T. E BOSSCHER, P. **Engineering properties of tire chips and soil mixtures**. Geotechnical Testing Journal, v. 17, n.4, p. 453–464, 1994.

EDINCLILER, A.; CABALAR, F.; CAGATY, A. **Triaxial compression behavior of sand and tire wastes using neural network**. Neural computation and application, v.21, p.441-452, 2010.

FOOSE, G. J.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. **Sand reinforced with shredded waste tires**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.122, n.9, p.760-767, 1996.

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.

GHAZAVI, M. E AMEL, M. **Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand**. International Journal of Geomechanics. v.5, n.1, p. 58-65, 2005.

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.

LEE, J.; SALGADO, R.; BERNAL, A. E LOVELL, C. **Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v. 125, n.2, p. 132–141, 1999.

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.

ÖZKUL, Z. H.; BAYKAL, G. **Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v. 133, n.7, p.767-781, 2007.

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.

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