

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DA MELHORIA DE SOLOS UTILIZANDO  
FRAGMENTOS DE BORRACHA**

**MARIANA RAMOS CHRUSCIAK**

**ORIENTADOR: GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, DSc.**

**DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-221/13**

**BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DA MELHORIA DE SOLOS UTILIZANDO  
FRAGMENTOS DE BORRACHA**

**MARIANA RAMOS CHRUSCIAK**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Gregório Luís Silva Araújo, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**Luis Fernando Martins Ribeiro, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**José Fernando Thomé Jucá, DSc (UFPE)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 21 de março de 2013.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

CHRUSCIAK, MARIANA RAMOS

Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha [Distrito Federal]  
2013

xviii, 91 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2013)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Pedaco de borracha de pneu            2. Resistência ao cisalhamento

3. Solo tropical                                4. Melhoria de solos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CHRUSCIAK, M. R. (2012). Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-221/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Mariana Ramos Chrusciak

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha

GRAU / ANO: Mestre / 2013

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Mariana Ramos Chrusciak

Av. Getúlio Vargas, 6550 - Centro

69.301-030 – Boa Vista/RR - Brasil

marychrusciak@gmail.com

*Dedico tudo a minha mãe, o melhor exemplo  
e ainda principal responsável por todo o meu sucesso.*

## AGRADECIMENTOS

Todas as conquistas são realizadas por um longo e árduo trabalho, e estas são possíveis apenas quando certas pessoas nos apoiam e nos dão força para continuar em qualquer circunstância. Primeiramente agradeço a Deus, pelo apoio espiritual e por destinar e me ajudar a trilhar todos os meus caminhos.

Agradeço a minha família, a **minha mãe Cremildes** que nunca poupou esforços para que eu conquistasse todos os meus sonhos, sempre me apoiou em todos os momentos e nunca deixou de acreditar no meu potencial. Às minhas irmãs, **Laís e Taís**, pela amizade, pelo companheirismo e por tudo! Esta temporada distante só mostrou-me o quanto eu as amo e o quanto são importantes para mim.

Agradeço ao meu amigo, namorado, noivo entre outros complementos **Alex**, por todo o apoio fornecido neste caminho, obrigada por tudo!

Agradeço ao meu orientador, **Prof. Gregório**, pela oportunidade deste trabalho que sem dúvida me fez amadurecer em todos os aspectos da minha vida, tanto profissional, como pessoal. Muito Obrigada!

A todos os amigos que fiz aqui, nossa amizade ultrapassou os limites da geotecnia e espero que ela continue para sempre, as *Doutoretas*: **Rosely, Camilla e Bruna**; aos amigos da turma 2011.1: **Gisele, Areosvaldo, Flavia e Igor**, aos amigos queridos **Ivonne e Jaime**, esta vitória não teria o mesmo sabor se não fosse por vocês!

Gostaria de agradecer em especial a **Rosely e Camilla**, que foram a minha família e me apoiaram sempre, em todos os momentos desta fase. Muito obrigada *flowers!*

Agradeço também as pessoas que de alguma forma me ajudaram e incentivaram na realização dos ensaios: **Janaina, Ivan, Lucía, Diego e Daniel Arthur**.

Agradeço a todos os Professores da Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, pelo total apoio nesta pesquisa. Em especial, **Prof. Ennio, Prof. Luis Fernando e Prof. Manoel**.

Agradeço aos Professores da Universidade Federal de Roraima, pela excelente base e pelo apoio na minha caminhada na área de pesquisa, **Prof.<sup>a</sup> Cláudia, Prof. Adriano, Prof. Dirceu, Prof. Silvestre, Prof. Neres, Prof.<sup>a</sup> Katri, Prof. Leon, Prof.<sup>a</sup> Ofélia, Prof.<sup>a</sup> Gioconda e Prof. Pedro**.

Um agradecimento em especial ao **Seu Arthur** que me ajudou no processo de montagem e consolidação do equipamento, ao **Kentinus e ao Robinson** que me auxiliaram nos ensaios durante a pesquisa. Vocês foram demais!

A Capes, CNPq e a Pós-Graduação em Geotecnia pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram nesta pesquisa. Muito, mas muito obrigada mesmo!

## RESUMO

Ao longo dos anos, a destinação de resíduos foi realizada em vários países de maneira inadequada, o que vem produzindo consequências ambientais capazes de colocar em risco os recursos naturais existentes e, conseqüentemente, a qualidade de vida das atuais e futuras gerações. Por sua vez, em inúmeras situações nas obras geotécnicas, os solos disponíveis na região da obra não atendem todas as exigências de projeto, tendo-se como alternativa para viabilização do seu uso a melhoria de suas características de resistência. No caso específico da região do Distrito Federal, há uma carência de matéria-prima para obtenção de agregados graúdos, elevando o custo da obra se o seu uso é necessário. Buscando-se solucionar este tipo de problema, propõe-se nesta dissertação o estudo de misturas do solo de Brasília (constituídos predominantemente de argila) e fragmentos de borracha advindos de resíduos de pneus. Embora existam alguns estudos sobre o assunto, pouco se refere a pesquisas quanto à mistura com solos tropicais e a fragmentos maiores, provavelmente devido à limitação dos equipamentos de ensaios tradicionais.

Para o estudo, é proposto à utilização de um equipamento de cisalhamento direto de média escala (30 cm x 30 cm x 17,5 cm) para estudar o comportamento destas misturas com fragmentos de até 3 cm. Foi realizada a caracterização dos materiais estudados (solo e borracha) e das misturas com os teores de 2,5%, 3,75%, 5% e 7,5% de resíduo de borracha triturada de pneu em relação ao peso. Em seguida foram realizados nas misturas os ensaios de compactação e cisalhamento direto em dimensões maiores que as convencionalmente utilizadas.

Baseando-se nos resultados obtidos, observou-se o potencial do uso deste tipo de material em aplicações geotécnicas e, para o caso estudado, o teor ideal foi o de 5% de teor de borracha triturada de pneu. Cabe salientar que esse não foi o maior teor de borracha utilizado. Isso se deve ao fato de alguns outros teores apresentarem trincas nas amostras ao final do processo de compactação. Por fim, conclui-se que, apesar de não haver grandes incrementos na resistência ao cisalhamento das misturas, o uso de resíduos de pneu pode ser realizado, sendo assim uma forma de minimização de geração de pneus inservíveis como uma destinação técnica no campo da engenharia civil.

## ABSTRACT

Over the years, the waste disposal was carried out improperly in several countries, which can lead to environmental consequences. This can endanger the natural resources and, consequently, the quality of life for current and future generations. In turn, in some situations in geotechnical engineering, soils are not available attending to design requirements and it is necessary to improve their strength characteristics as an alternative solution. In the specific case of the Distrito Federal region, there is a lack of raw material for coarse aggregate, raising the cost of the constructions if their use is necessary. Aiming to solve this kind of problem, it is proposed in this dissertation the study of mixtures of the Brasilia's soil and waste shred tires. Although there are some studies about this there is a few amounts of researches referred to tropical soils mixed with rubber fragments, probably due to the limitation of the size of traditional test equipment.

In this study it was proposed the use of a direct shear test apparatus with medium scale to study the behavior of these mixtures with fragments of up to 3 cm in its dimensions. It were performed characterization tests of the materials (Soil and shred tires) and the mixtures that used rubber levels of 2.5%, 3.75%, 5% and 7.5% of tire shreds relative to the weight. Mixtures were studied by means of compaction tests and direct shear on a medium scale.

Based on obtained results it was observed the potential use of this type of material in geotechnical applications and for the case studied the ideal content was 5% content of shred tire. It must be pointed out that 5% was not higher rubber level used in the research. This was due to some others levels had shown some cracks in the end of the compaction process. Finally, it is concluded that despite of there is not large increments in shear strength of the mixtures, the use of waste tires can be applied in geotechnical engineering and this solution can be one way to minimize the generation of waste tires.

# ÍNDICE

## *CAPÍTULO 1*

1 -	Introdução.....	1
1.1	Motivação da pesquisa.....	1
1.2	Objetivo geral .....	3
1.3	Objetivos específicos .....	3
1.4	Estrutura da dissertação .....	3

## *CAPÍTULO 2*

2 -	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Pneus inservíveis: histórico, reciclagem e destinação .....	5
2.1.1.	Histórico .....	5
2.1.2.	Técnicas para minimização da geração dos pneus inservíveis.....	6
2.1.3.	Processamento de pneus inservíveis .....	9
2.2	Ensaio de cisalhamento direto em diferentes escalas .....	10
2.3	Técnicas de melhoria de solos .....	14
2.4	Pesquisas realizadas com fragmentos de borracha .....	14
2.4.1.	Pesquisas utilizando lascas de pneus.....	15
2.4.2.	Pesquisas utilizando pedaços de pneus .....	26
2.4.3.	Pesquisas utilizando migalhas de pneus .....	28
2.4.4.	Pesquisas utilizando desbastes de pneus .....	31

## *CAPÍTULO 3*

3 -	Equipamentos e Materiais .....	35
3.1	Equipamentos utilizados.....	35
3.1.1.	Equipamento de cisalhamento direto em médias dimensões .....	35
3.1.2.	Pentapicnometro.....	40
3.2	Materiais utilizados.....	41
3.2.1.	Solo do campus experimental da Universidade de Brasília .....	41
3.2.2.	Resíduos de pneu.....	45

## *CAPÍTULO 4*

4 -	Metodologia da Pesquisa.....	49
4.1	Estudo dos teores de borracha .....	49
4.2	Ensaio de compactação.....	50
4.3	Ensaio de cisalhamento direto de médias dimensões .....	52

## *CAPÍTULO 5*

5 -	Apresentação e Discussão dos resultados .....	56
5.1	Ensaio de compactação .....	56
5.2	Ensaio de cisalhamento direto em médias dimensões .....	63

5.3	Considerações finais .....	81
<i>CAPÍTULO 6</i>		
6 -	Conclusões e Sugestões.....	84
REFERENCIAS .....		86

## LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 - Composição da banda de rodagem segundo Lund (1993).....	6
Figura 2.2 - Ciclo de vida dos pneus.....	7
Figura 2.3 - Típicos tipos de diferentes processamentos de pneus inservíveis, fora de escala (EDINÇLILER <i>et al.</i> , 2010).....	9
Figura 2.4 – Equipamento do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília para realização do ensaio de cisalhamento direto: (a) vista geral e (b) vista aproximada da amostra. ....	11
Figura 2.5 – Equipamento da Universidade de Brasília utilizado por Cardim (2008). ....	11
Figura 2.6 – Equipamento do Laboratório de Furnas: (a) caixa de 80 x 80 x 45 cm <sup>3</sup> e (b) caixa de 25 x 25 x 24 (DIAS (2001) <i>apud</i> SOUZA, 2011). ....	12
Figura 2.7 – Equipamento da Escola de Engenharia de São Carlos, dimensões 50 x 50 x 24 cm <sup>3</sup> (SANTOS (2007) <i>apud</i> SOUZA, 2011).....	12
Figura 2.8 – Equipamento Federal da Universidade de Minas Gerais sendo utilizado (MARTINS (2006) <i>apud</i> SOUZA, 2011). ....	13
Figura 2.9 – Equipamento da Universidade Federal de Pernambuco (a) equipamento global: (1) base envolvida com areia e (2) rótula para apoio do êmbolo do cilindro hidráulico e (b) dimensões da caixa (MOTTA, 2011). ....	13
Figura 2.10 – Envoltórias de ruptura para as lascas de pneus (HUMPHREY <i>et al.</i> , 1993).....	16
Figura 2.11 – Envoltórias de ruptura para as lascas de pneus: (a) para as misturas com areia e (b) para as misturas com silte (TATLISOZ <i>et al.</i> , 1998). ....	17
Figura 2.12 – Curvas tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (GHAZAVI <i>et al.</i> , 2011). ....	19
Figura 2.13 – Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (GHAZAVI <i>et al.</i> , 2011). ....	19
Figura 2.14 – Variação da máxima tensão de cisalhamento versus teor de lascas de pneu (GHAZAVI <i>et al.</i> , 2011). ....	20
Figura 2.15 – Relação entre o teor de borracha e as tensões de ruptura para as misturas de lascas de pneu e solo argiloso (CETIN <i>et al.</i> , 2006). ....	21
Figura 2.16 – Relação entre o teor de borracha e da coesão para as misturas de lascas de pneu e solo argiloso (CETIN <i>et al.</i> , 2006). ....	22
Figura 2.17 – Relação entre o teor de borracha e do ângulo de atrito para as misturas de lascas de pneu e solo argiloso (CETIN <i>et al.</i> , 2006). ....	22

Figura 2.18 - Curva de compactação da argila, e de misturas com lascas de pneus de granulometria(a) finas e (b) grossas (CETIN <i>et al.</i> 2006).....	23
Figura 2.19 – Efeito das lascas de borracha na tensão de cisalhamento máxima para as duas areias (CABALAR, 2011).....	24
Figura 2.20 – Efeito das lascas de borracha no ângulo de atrito para as duas areias (CABALAR, 2011). ....	24
Figura 2.21 – Resultados de Laboratório versus resultados do Modelo para a areia fina e angular (CABALAR, 2011). ....	25
Figura 2.22 – Resultados de Laboratório versus resultados do Modelo para a areia grossa e arredondada (CABALAR, 2011). ....	25
Figura 2.23 – Pedacos de pneus com as diferentes relações: (a) n=1, (b) n=2, (c) n=4 e (d) n=8 (ZORNBERG <i>et al.</i> , 2004).....	27
Figura 2.24 – Curvas de compactação do solo puro e misturas solo-borracha (SZELIGA <i>et al.</i> , 2012).....	30
Figura 2.25 – Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo – resíduo de pneus (FRANCO, 2012).....	32
Figura 2.26 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento para diferentes porcentagens de resíduo de pneu (FRANCO, 2012).....	32
Figura 2.27 – Relação teor resíduo de pneu versus coesão (FRANCO, 2012).....	33
Figura 2.28 – Relação teor resíduo de pneu versus ângulo de atrito interno (FRANCO, 2012). ....	33
Figura 3.1 – Equipamento de arrancamento de geotêxteis.....	35
Figura 3.2 – Esquema das componentes da prensa de cisalhamento no corte frontal, medidas em metro (SOUZA, 2011).....	36
Figura 3.3 – Esquema das componentes da prensa de cisalhamento no corte superior, medidas em metro (SOUZA, 2011).....	37
Figura 3.4 – Visão geral do equipamento de cisalhamento direto montado. ....	38
Figura 3.5 – Visão geral dos sistemas mecânicos e de instrumentação: (a) e (b) horizontal e (c) vertical. ....	39
Figura 3.6 – Pentapicnometro modelo pentapyc 5200E. ....	40
Figura 3.7 – Dimensões e disposição das capsulas do Pentapicnometro. ....	40
Figura 3.8 – (a) Escavação manual e (b) Poço para coleta. ....	41
Figura 3.9 - Localização da coleta da amostra no Campus Experimental do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. (GOOGLE EARTH, 2012).....	42

Figura 3.10- Curva granulométrica do Solo do Campus.....	42
Figura 3.11- Curva de compactação do solo de Brasília.....	43
Figura 3.12- Curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal para o solo de Brasília.	44
Figura 3.13- Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio de cisalhamento direto (com dimensões 60 X 60 x 20 mm <sup>3</sup> ) para o solo de Brasília. ....	45
Figura 3.14- Resíduos de pneus triturados utilizados nesta pesquisa. ....	45
Figura 3.15- (a) Quarteamento dos resíduos de borracha da segunda etapa e (b) Visualização dos resíduos de pneu triturado que ficam retidos nas peneiras # 10, #16 e #30. ....	46
Figura 3.16- Curva Granulométrica dos pedaços de pneu utilizados.....	47
Figura 3.17- Ensaio de massa específica dos grãos: (a) equipamento e (b) a borracha utilizado. ....	48
Figura 4.1- Amostra com 5% de compactação, apresentação de fissuras.....	49
Figura 4.2- Ensaio de compactação, execução: (a) cilindro e soquete, (b) 1 <sup>a</sup> camada e (c) corte com tesoura das pontas de pedaços de pneu possíveis.....	52
Figura 4.3- Sequência de preparação das amostras para o ensaio de cisalhamento direto em médias dimensões: (a)detalhamento das alturas de cada camada na caixa. (b) deposição do material, (c) compactação estática, (d) camada compactada e (e) escarificação entre camadas. ....	53
Figura 4.4- Analogia utilizada por Palmeira (2009). ....	55
Figura 5.1- Curva de compactação para mistura com 2,5% de resíduos de pneu (T02).....	56
Figura 5.2- Curva de compactação para mistura com 3,75% de resíduos de pneu (T03).....	57
Figura 5.3- Curva de compactação para mistura com 5% de resíduos de pneu (T04).....	57
Figura 5.4- Curva de compactação para mistura com 7,5% de resíduos de pneu (T05).....	58
Figura 5.5- Curvas de compactação para todos os teores. ....	59
Figura 5.6- Curvas de índice de vazios para todos os teores.....	60
Figura 5.7- Corpos de prova dos ensaios de compactação, variando a umidade, para os teores: (a) T02 (teor de 2,5% de borracha), (b) T03 (teor de 3,75% de borracha), (c) T04 (teor de 5% de borracha) e (d) T05(teor de 7,5% de borracha). ....	61
Figura 5.8- Plano de fraqueza da mistura: entre o solo e os pedaços de borracha. ....	62
Figura 5.9- Relação entre o teor de borracha e a umidade. ....	62
Figura 5.10- Relação entre o teor de borracha e o peso específico aparente máximo. ....	63
Figura 5.11- Curvas de adensamento para T01.....	63
Figura 5.12- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para T01.....	64
Figura 5.13- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para T01. ....	64

Figura 5.14- Envoltória de Mohr-Coulomb para T01.....	65
Figura 5.15- Curvas de adensamento para T02.....	65
Figura 5.16- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para T02.....	66
Figura 5.17- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para T02. ....	66
Figura 5.18- Envoltória de Mohr-Coulomb para T02.....	67
Figura 5.19- Curvas de adensamento para T03.....	67
Figura 5.20- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para T03.....	68
Figura 5.21- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para T03. ....	68
Figura 5.22- Envoltória de Mohr-Coulomb para T03.....	69
Figura 5.23- Curvas de adensamento para T04.....	69
Figura 5.24- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para T04.....	70
Figura 5.25- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para T04. ....	70
Figura 5.26- Envoltória de Mohr-Coulomb para T04.....	71
Figura 5.27- Curvas de adensamento para T05.....	71
Figura 5.28- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para T05.....	72
Figura 5.29- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para T05. ....	72
Figura 5.30- Envoltória de Mohr-Coulomb para T05.....	73
Figura 5.31- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão confinante de 25 kPa para todos os teores. ....	75
Figura 5.32- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão confinante de 25 kPa para todos os teores. ....	75
Figura 5.33- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão confinante de 50 kPa para todos os teores. ....	76
Figura 5.34- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão confinante de 50 kPa para todos os teores. ....	76
Figura 5.35- Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão confinante de 80 kPa para todos os teores. ....	77
Figura 5.36- Deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão confinante de 80 kPa para todos os teores. ....	77
Figura 5.37- Relação entre a tensão de cisalhamento máxima e o teor de borracha para 25 kPa. ....	78
Figura 5.38- Relação entre a tensão de cisalhamento máxima e o teor de borracha para 50 kPa. ....	79

Figura 5.39- Relação entre a tensão de cisalhamento máxima e o teor de borracha para 80 kPa. .....	79
Figura 5.40- Relação entre a coesão e o teor de resíduo de pneu. ....	80
Figura 5.41- Relação entre o ângulo de atrito e o teor de resíduo de pneu. ....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de ângulo de atrito e coesão obtidos no ensaio de cisalhamento direto (HUMPHREY <i>et al.</i> , 1993).....	15
Tabela 2.2 – Valores de ângulo de atrito e coesão obtidos no ensaio de cisalhamento direto (TATLISOZ <i>et al.</i> , 1998). .....	17
Tabela 2.3 – Parâmetros de resistência das misturas de areia e lascas de pneus e das interfaces com geogrelha (GHAZAVI <i>et al.</i> , 2011). .....	20
Tabela 2.4 – Parâmetros de resistência das misturas de areia e pedaços de pneus (ZORNBERG <i>et al.</i> , 2004).....	27
Tabela 2.5 – Parâmetros de resistência das misturas de areia e migalhas de pneus (EDINÇLILER <i>et al.</i> , 2010).....	29
Tabela 3.1 – Dimensões das capsulas internas do Pentapicnometro.....	41
Tabela 3.2 – Determinação do $G_s$ por média das leituras do Pentapicnometro. ....	48
Tabela 4.1- Cálculo das quantidades de pedaços de pneus a serem acrescentadas ao solo. ...	51
Tabela 4.2 - Cálculo dos pesos da mistura para cada teor de borracha. ....	54
Tabela 5.1 - Valores dos pesos específicos secos máximos e umidades ótimas para os ensaios realizados.....	58
Tabela 5.2 - Valores dos índices de vazios para os ensaios de compactação. ....	59
Tabela 5.3 - Valores de tensão máxima de cisalhamento, coesão e ângulo de atrito para os ensaios realizados na caixa de médias dimensões.....	73
Tabela 5.4 - Variação da umidade para cada ensaio. ....	81

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A	Área de atuação da força normal
$A_L$	Área lateral de atuação da carga,
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Coesão
$C'$	Coesão efetiva
ca	Aderência
CBR	California Bearing Ratio
CEMPRE	Compromisso empresarial com a reciclagem
CH	Argila arenosa de média plasticidade
CL	Argila de baixa compressibilidade
cm	Centímetro
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
g	Gramas
$G_s = G_{s_{solo}}$	Massa específica dos sólidos do solo
$G_{s_{bor}}$	Massa específica dos sólidos de borracha
$G_{s_{eq}}$	Massa específica dos sólidos da mistura
$k_0$	coeficiente de empuxo no repouso
kg	kilogramas
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
m	Metro
min	Minuto
ML	Silte arenoso
mm	Milímetro
N	Newton
n	Relação entre as laterais das lascas de pneu
NBR	Norma Brasileira
Pa	Pascal
Q	Máxima força de cisalhamento

$R^2$	Coeficiente de determinação (compara y reais e y estimados).
RCD	Resíduo de construção e demolição
S	Saturação
SP	Areia mal graduada
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
t	tempo
T01	Teor com 0% de pedaços de pneu e 100% de solo
T02	Teor com 2,5% de pedaços de pneu e 97,5% de solo
T03	Teor com 3,75% de pedaços de pneu e 96,25% de solo
T04	Teor com 5% de pedaços de pneu e 95% de solo
T05	Teor com 7,5% de pedaços de pneu e 93,5% de solo
$X_{bor}$	Porcentagem de borracha
$X_{solo}$	Teor de solo da mistura
w	Umidade
$W_{ts}$	Peso das tiras de borracha
$W_{ot}$	Umidade ótima
$W_s$	Peso do solo seco
$w_s$	Força peso da parte superior ao plano de ruptura
°	Graus
$\varphi$	Ângulo de atrito
$\varphi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\varphi_{eq}$	Ângulo de atrito equivalente
$\varphi_{sw}$	Ângulo de atrito entre o solo e a parede da caixa
$\delta$	Ângulo de atrito na interface
$\delta_{eq}$	Ângulo de atrito equivalente na interface
$\rho$	Massa específica úmida da mistura (kg/cm <sup>3</sup> )
$\gamma_d$	Peso específico seco da mistura (kN/m <sup>3</sup> )
$\sigma'$	Tensão normal efetiva
$\sigma_n = \sigma$	Tensão normal
$\sigma_{np}$	Tensão normal no plano de ruptura
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\tau_{max}$	Tensão de cisalhamento máxima
$\tau_f$	Resistência ao cisalhamento

# 1 - INTRODUÇÃO

---

## 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O crescimento urbano que vem ocorrendo nos últimos anos traz consigo diversos problemas, tais como a urbanização desordenada, as inundações, a disposição de resíduos de maneira errônea, o consumo de matéria prima de maneira excessiva, entre outros. Na evolução tecnológica, a busca por soluções associadas à questão ambiental vem tomando uma grande proporção. Ainda assim, um dos assuntos que sem dúvida vem sendo bastante idealizado é a reciclagem e destinação final de resíduos gerados pela sociedade.

Ao longo dos anos, a destinação de resíduos foi realizada em vários países de maneira inadequada, o que vem produzindo consequências ambientais capazes de colocar em risco os recursos naturais existentes e, conseqüentemente, a qualidade de vida das atuais e futuras gerações.

Dentre as normas atualmente existentes que tratam do assunto, a NBR 10.004 (ABNT, 2004) é uma das principais. Esta define o resíduo como material gerado nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ela ainda apresenta um processo para classificação dos resíduos bem como exemplos de classificações em seu apêndice.

Neste grupo de resíduos, destacam-se os chamados pneus inservíveis pelo grande volume que ocupam (com 75% de vazios), riscos de incêndios, proliferação de insetos e degradação lenta. A NBR 10.004 (ABNT, 2004) os classifica como resíduos classe II A, ou seja, durante os testes pertinentes estes resíduos apresentam características de biodegradabilidade, combustibilidade e apresentaram componentes acima dos níveis de referencia na solubilidade em água.

Para se ter uma ideia do crescimento desse tipo de resíduo no Brasil, pode-se citar o crescimento da frota de veículos. Segundo dados do Departamento Nacional de Trânsito (Denatran), em 2001 o Brasil apresentava uma frota de 32 milhões de veículos, no final de 2011 o Brasil alcançava uma frota de 70,5 milhões de veículos, entre automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus, carretas e motocicletas, ou seja, o Brasil em dez anos apresentou um crescimento de 121%. Só no ano de 2012 foram fabricados e emplacados

aproximadamente 5,20 milhões de veículos (DENATRAN, 2013).

Inúmeros incidentes ocasionados por pneus inservíveis ocorreram ao longo dos últimos anos, tanto no contexto internacional, como os grandes incêndios de Everett em Washington 1980, e o de Hagersville no Canadá 1990, quanto no contexto nacional, podendo citar os ocorridos nas cidades de Bauru e Porto Ferreira em São Paulo, este último ocorrido em 2 de janeiro de 2013.

Existem ainda outros incidentes causados indiretamente pelo descarte inadequado destes resíduos como enchentes, causadas por entupimentos de boieiros, proliferação de mosquitos, pelo acúmulo de água na parte interna do pneu, entre outros.

Tais incidentes nos fazem refletir se a disposição destes resíduos ainda deve ser adotada, pois atualmente existem inúmeras outras destinações. São exemplos o reaproveitamento, processos de reforma como a recapagem, recauchutagem e a remoldagem, que visa o prolongamento da vida útil do pneu. Há ainda as inúmeras formas de reciclagem e reutilização como processos de regeneração, a reciclagem energética, a pirólise, a composição asfáltica entre outros que se mostram de melhor interesse social.

Estes processos estão sendo bastante difundidos no Brasil, devido ao alto nível de agressão ambiental que os pneus causam. Segundo organizações internacionais, a produção de pneus novos está estimada em cerca de dois milhões por dia em todo o mundo. Por sua vez, o descarte de pneus velhos chega a atingir, anualmente, a marca de quase 800 milhões de unidades. Estima-se que no Canadá e nos Estados Unidos é gerado um pneu por habitante por ano (SHALABY & KHAN, 2005). Só no Brasil, em 2010 foram produzidos cerca de 76 milhões de pneus (produção declarada) e estima-se que metade desse valor foi descartada no mesmo período (ABRAPNEUS, 2012).

Quanto a reciclagem de pneus no Brasil, em 2011, o índice foi de 85% em 2011, sendo 64% deste, utilizado como combustível alternativo para a indústria de cimento (co-processamento), os demais 36% reutilizados, após sua trituração, como tapetes de automóveis, mangueiras, solas de sapato, asfalto emborrachado, quadras poliesportivas, pisos industriais etc. (CEMPRE, 2013).

Em contrapartida, em inúmeras situações nas obras geotécnicas, os solos disponíveis na região da obra não atendem todas as exigências de projeto. Têm-se como alternativa para viabilização do seu uso a melhoria de suas características de resistência. No caso específico da região do Distrito Federal, há uma carência de matéria-prima para obtenção de agregados graúdos, elevando o custo da obra se o seu uso é necessário.

Assim, buscando solucionar este tipo de problema, propõe-se nesta dissertação o

estudo de misturas do solo de Brasília e resíduos de pneus. Embora existam alguns estudos destas misturas, pouco se refere a pesquisas quanto a dimensões maiores dos fragmentos, provavelmente devido à limitação dos equipamentos de ensaios tradicionais.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar os parâmetros de resistência da mistura do solo argiloso encontrado na Região do Distrito Federal com material reciclável de borracha de pneu para aplicação como material de preenchimento em estruturas de contenção.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos têm-se:

- a) Caracterizar o solo e os fragmentos de pneus utilizados;
- b) Estudar quais os teores de fragmentos de borracha que melhor se aplicam ao solo estudado, por meio de ensaios de compactação;
- c) Desenvolver o equipamento de cisalhamento direto de dimensões 0,30 m X 0,30 m X 0,175 m;
- d) Executar ensaios de cisalhamento direto no equipamento de cisalhamento de médias dimensões de misturas entre solo e borracha, a partir dos pesos específicos encontrados nas curvas de compactação.

## **1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A redação deste trabalho está apresentada em seis capítulos:

O Capítulo 1 consistiu na apresentação, introdução, justificativa e objetivos do tema deste estudo, onde é apresentado o problema de maneira geral e a justificativa para a realização da pesquisa.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica para o desenvolvimento deste presente trabalho, onde são abordados aspectos relativos ao desenvolvimento dos pneus, composição física e química, resumo das principais destinações dos pneus inservíveis. São também apresentados tópicos sobre a resistência ao cisalhamento de solos e sobre sua melhoria por inclusão de materiais. Metodologias e resultados de estudos já realizados

visando o melhoramento de solos com a utilização de resíduos de pneus são também apresentados.

O Capítulo 3 descreve os equipamentos utilizados. Nessa parte da dissertação, descreveu-se o equipamento de cisalhamento direto utilizado nesta pesquisa bem como o sistema que o compreende e os materiais utilizados.

A metodologia desta pesquisa é apresentada no Capítulo 4, onde são descritas todas as etapas, desde a preparação do solo e da borracha até a realização dos ensaios.

No capítulo 5 encontram-se as análises e discussões dos resultados obtidos neste trabalho de acordo com os ensaios especificados no capítulo anterior.

Por fim, o último capítulo deste trabalho (Capítulo 6), refere-se às conclusões obtidas nesta pesquisa e sugestões para os próximos trabalhos a serem realizados.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Esta seção apresenta um breve histórico das técnicas de destinação dos pneus inservíveis bem como técnicas de melhoria de solos por inclusão de materiais e principais estudos de utilização de pneu triturado para melhoria de solos.

### 2.1 PNEUS INSERVÍVEIS: HISTÓRICO, RECICLAGEM E DESTINAÇÃO

O pneu ou pneumático inservível, segundo a Resolução do Conama nº 258/99, é aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional. Tal Resolução define ainda o conceito de pneu ou pneumático, o pneu ou pneumático novo e o reformado e as classes de periculosidade, todos estes conceitos visam, dentro de Normas e Resoluções às diretrizes ideais para a melhor destinação final minimizando as questões ambientais e socioeconômicas, que estes artefatos geram caso sejam utilizados de maneira errada.

#### 2.1.1. HISTÓRICO

A tecnologia para fabricar a borracha sintética a partir do petróleo surgiu na Alemanha após a Primeira Guerra Mundial. Entretanto, como o material sintético é mais propenso à apresentar rachadura provocada pelo calor, houve a necessidade de se adicionar uma parcela de borracha natural. A resistência e durabilidade da borracha propiciaram o desenvolvimento da indústria automobilística no século XX, com o pneu tornando-se essencial e insubstituível no transporte de passageiros e cargas.

Um pneu é composto basicamente pela banda de rodagem, ou superfície de rolamento, e aro de aço, ou carcaça. Os pneus de carros de passeio ainda são compostos por cintas, talão e flancos. A Composição da banda de rodagem sugerida por Lund (1993) é apresentada na Figura 2.1. O aro de aço é a estrutura do pneu que contém reforço em arames de aço, é neste que se dividem os dois grupos de tipos de pneus, os convencionais e os radiais.

Como dito, de acordo com a carcaça, os pneus estão classificados em dois grupos, radiais e convencionais (ou diagonais). Os radiais possuem maior teor de borracha natural,

que lhes proporciona, aliado aos reforços estruturais e novos desenhos da banda de rodagem, maior resistência, durabilidade, aderência e estabilidade que os convencionais.

■ Carbono ■ Hidrogênio ■ Oxigênio ■ Enxofre ■ Cinzas ■ Outros

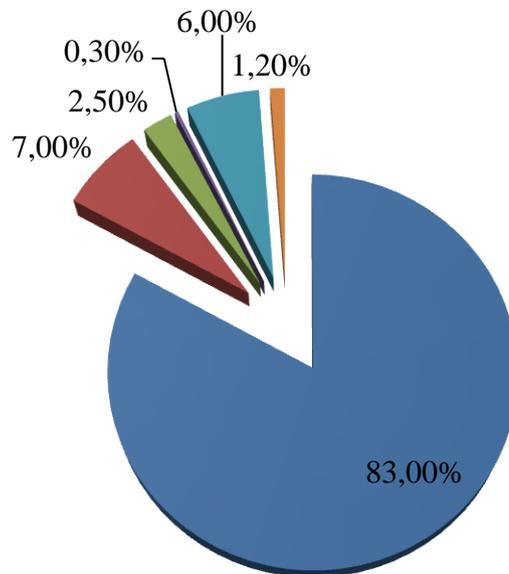


Figura 2.1 - Composição da banda de rodagem segundo Lund (1993).

Apesar de um custo superior, a tendência mundial é de somente serem usados os pneus radiais, que já dominam o mercado de automóveis de passeio, com 97% da produção mundial, e contam com uma participação expressiva no mercado de caminhões e ônibus, com 45% da produção total (BNDES, 1997). Essa diferença na produção pode ser justificada pelo fato de que os pneus para caminhões e ônibus necessitam de um teor maior de borracha natural (cerca de 40% em peso) e comparado com os teores dos pneus para carros de passeio, cerca de 15%, em peso (BNDES,1997).

### 2.1.2. TÉCNICAS PARA MINIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DOS PNEUS INSERVÍVEIS

Após a vida útil do pneu, este se torna uma complicada questão ambiental, pois sua disposição final sempre gera de alguma forma, grandes impactos, o que alavanca sempre a busca por soluções alternativas. O aumento da duração da vida útil de um pneu que prolonga a vida da carcaça é uma alternativa que permite reduzir o número de pneus novos a serem substituídos a cada ano e, conseqüentemente, o descarte de pneus usados que deverão ser dispostos corretamente.

Nos casos em que a carcaça apresenta condições insatisfatórias de uso, o recurso da recauchutagem, ou reaproveitamento, não pode ser aplicado, gerando boa parte dos pneus inservíveis. A Figura 2.2 ilustra as atividades que representam o ciclo de vida dos pneus.

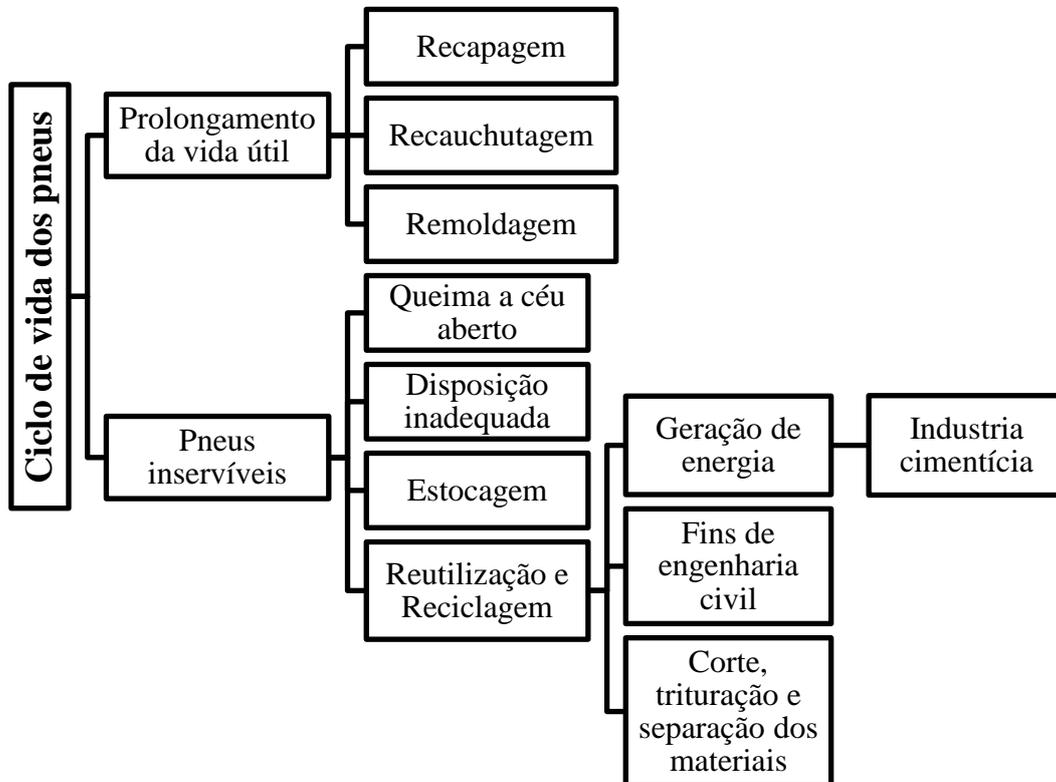


Figura 2.2 - Ciclo de vida dos pneus.

Existem várias técnicas que visam o prolongamento da vida útil de um pneu. Os processos industriais existentes são: recapagem, recauchutagem e remoldagem.

Segundo Andrade (2007), a recapagem consiste na reconstrução de um pneu através da substituição de sua banda de rodagem. Segundo a revista carga pesada (2013), o mercado brasileiro de recapagens de carga é de 7,5 milhões de unidades por ano contra 4 milhões de pneus novos”. Deste total, 75% dos pneus recapados são usados no transporte rodoviário de carga, 12% são pneus de movimentação de carga própria e dos demais se referem aos pneus de transporte de passageiros.

A recauchutagem consiste na reconstrução do pneu através da substituição da banda de rodagem e dos ombros. É realizada a remoção da banda de rodagem desgastada da carcaça do pneu para que através de um novo processo de vulcanização se coloque uma nova banda de rodagem.

A remoldagem é o processo de reconstrução do pneu através da substituição da banda

de rodagem, dos ombros e de toda a superfície de seus flancos. Este é um processo que se assemelha à recauchutagem, a diferença se dá em função da remoção da banda de rodagem e das partes laterais dos pneus, sendo assim, todo pneu recebe uma nova camada de borracha e passa por um novo processo de vulcanização.

Dentre os tipos de destinação relacionados ao descarte, a queima a céu aberto é um tipo de destinação que está ligada ao pneu desde o seu surgimento. Ela foi, por um longo tempo, a principal forma de destinação até estudos comprovarem que este tipo é extremamente inapropriado e de grande problema em questões como a ambiental e saúde pública.

A queima de pneu a céu aberto libera emissões e gera fumaça negra de forte odor, nas quais está presente o dióxido de enxofre e assim foi proibida em diversos países inclusive no Brasil. Existe ainda a técnica de queima de pneus para aquecer caldeiras que é regulamentada por Resolução do Conama.

Os principais usuários de pneus em caldeiras são as indústrias de papel e celulose e de produtos alimentícios, e em fornos rotativos são as fábricas de cimento, que podem usar até a carcaça inteira e aproveitam alguns óxidos contidos nos metais dos pneus radiais.

Existem inúmeras formas de reciclagem e reutilização da borracha dos pneus, trata-se aqui de destinações dentro da Engenharia Civil. As destinações mais comuns são: como material de enchimento de peso leve, drenagem em campo séptico, aterro em estradas, suporte de base de estrada, sistema de drenagem de gases em aterros sanitários, material para compostagem, estabilizadores de encostas, controle de erosão, diques e barragens, isolante térmico e acústico, drenagem em aterro sanitário, aditivos para pavimentos asfálticos e pistas esportivas, cobertura de parques infantis, concreto leve, entre outros.

O uso de pneus triturados, em vez dos materiais de construção convencionais, apresentam os seguintes benefícios: densidade reduzida, melhor propriedades de drenagem e, melhor isolamento térmico e acústico (BENSON, 1995).

Os pneus triturados como material de enchimento de peso leve ou misturados com solo podem ser usados como enchimento na parte posterior de estruturas de retenção próximos à estradas, tais como pilares para pontes e muros de arrimo. Devido ao menor peso dessas misturas comparadas com o solo apenas, menores pressões são exercidas sobre a estrutura de retenção. Com isto, as solicitações estruturais são reduzidas, refletindo em menores custos. Algumas misturas de pneus triturados e solo podem suportar até alturas de 6 metros. Em tais casos, a estrutura de contenção tem função apenas de proteger a mistura da erosão e melhorar a estética (BENSON, 1995).

### 2.1.3. PROCESSAMENTO DE PNEUS INSERVÍVEIS

Para a maioria dos destinos práticos, pneus e subprodutos de pneus funcionam como misturas homogêneas, porém o seu processamento pode causar alterações nas características físicas como tamanho e forma. Em geral, conforme proposta de Edinçliler *et al.* (2010), os pneus inservíveis são processados para formar pedaços de pneus (do inglês *tire shreds*), migalhas de pneus (do inglês *tire crumb*), lascas de pneus (do inglês *tire chips*) e desbastes de pneus (do inglês *tire buffings*) (Figura 2.3). Estes produtos são geralmente utilizados na engenharia civil como agregado leve.



Figura 2.3 - Típicos tipos de diferentes processamentos de pneus inservíveis, fora de escala (EDINÇLILER *et al.*, 2010).

Os pedaços de pneus (do inglês *tire shreds*) apresentam diversos tamanhos e formas, que variam, tipicamente, de 50 a 300 mm (ASTM D6270, 1998), que dependem do tipo de máquina de processamento. O tamanho nominal máximo para uso na engenharia civil geralmente atingem 150 a 300 mm. Estes são usados comumente como material para drenagem.

A pesquisa de Edil e Bosscher (1994) mostrou que na construção de aterros com

misturas de solo e resíduo de pneus é mais desejável que sejam usados pedaços de pneus inferiores a 50 mm, a fim de evitar problemas com a compactação.

Assim como os pedaços de pneus, as lascas de pneus (do inglês *tire chips*) envolvem trituração primária. Porém as lascas de pneus resíduos de pneus que têm geometria retangular ou quadrada e possuem tamanho que variam de 12 mm a 50 mm com a maioria dos fios de aço retirados (ASTM, 2008).

Por sua vez, as migalhas de pneus (do inglês *tire crumb*) possuem formato arredondado e não possuem tiras de aço. Várias são as técnicas de redução do seu tamanho que atingem uma ampla gama de partículas de até 0,6 mm ou menos. Este tipo é muito usado para a obtenção das misturas asfálticas modificadas.

Já os desbastes de pneus (do inglês *tire buffings*), diferentes dos outros tipos, são subprodutos da recapagem de pneus. Em contraste com os pedaços, lascas e migalhas de pneus, os desbastes de pneu possuem pequeno diâmetro e da forma de fibra o que os tornam um material ideal para formar composição com o solo. Os desbastes são geralmente usados como aditivo, e sua aplicação em construção de aterro não é interessante devido aos menores parâmetros de resistência ao cisalhamento.

## **2.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM DIFERENTES ESCALAS**

O ensaio de cisalhamento direto é o procedimento mais antigo para a determinação da resistência ao cisalhamento é baseado diretamente no Critério de Coulomb. A amostra é colocada em uma caixa bipartida, onde é aplicada uma tensão normal ao plano horizontal e em seguida é verificada a tensão provocada no plano de ruptura imposto, esta movimentação ocorre em velocidade constante e provoca o deslocamento relativo entre as partes da caixa. O campo de deformações não é uniforme. A Figura 2.4 apresenta um modelo do equipamento de cisalhamento direto do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

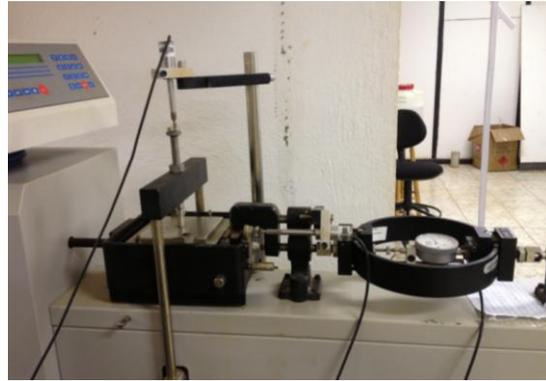
As vantagens deste ensaio são sua praticidade e simplicidade, facilidade na moldagem de amostras de areia (quando comparados com a moldagem no triaxial), rapidez no ensaio em solos permeáveis, é possível a realização de ensaios na condição inundada, possibilita grandes deformações apenas dependendo da caixa.

A principal desvantagem é que não é possível controlar a drenagem durante o ensaio, como consequência não se tem a certeza da total dissipação da poropressão e ainda para solos de baixa permeabilidade o ensaio deve ser muito lento. Ele não permite obter parâmetros de

deformação e como o plano de ruptura é imposto, este pode não ser o de maior fraqueza.



(a)



(b)

Figura 2.4 – Equipamento do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília para realização do ensaio de cisalhamento direto: (a) vista geral e (b) vista aproximada da amostra.

Por ser o ensaio mais antigo, este é o mais estudado e várias são as modificações e estudos voltados para melhorias deste ensaio. Quanto à escala, a própria D3080-1998 (ASTM, 1998) apresenta a limitação de que o diâmetro do grão deve ser inferior a um décimo do diâmetro ou lado da amostra ensaiada, e esta limitação motivou vários estudos em torno de equipamentos mais robustos e capazes de realizar ensaios em materiais com granulometria superior.

Na Universidade de Brasília, existe um equipamento de cisalhamento direto de grande escala, de dimensões 2,40 x 1,00 x 2,00 m (comprimento, largura e altura), que foi utilizado por Cardim (2008) para o estudo de resistência ao cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Unidade de Tratamento de Lixo da avenida L4 Sul da cidade de Brasília. A Figura 2.5 mostra o ensaio sendo executado na caixa.



Figura 2.5 – Equipamento da Universidade de Brasília utilizado por Cardim (2008).

No Brasil, existem alguns equipamentos de cisalhamento direto com grandes dimensões, como dois existentes no Laboratório de Furnas cujas dimensões do primeiro são 80 x 80 x 45 cm<sup>3</sup> e capacidade de suporte do macaco de 200 toneladas (Figura 2.6 (a)) e uma segunda de 25 x 25 x 24 cm<sup>3</sup> e macacos com capacidade de 75 toneladas (Figura 2.6 (b)).



(a)



(b)

Figura 2.6 – Equipamento do Laboratório de Furnas: (a) caixa de 80 x 80 x 45 cm<sup>3</sup> e (b) caixa de 25 x 25 x 24 (DIAS (2001) *apud* SOUZA, 2011).

Segundo Souza (2011), outro equipamento desse tipo é da Escola de Engenharia de São Carlos. Ele possui dimensões de 50 x 50 x 24 cm<sup>3</sup> (Figura 2.7), e foi desenvolvido na pesquisa de Santos (2007) para realização de ensaios de cisalhamento em RCD-R.



Figura 2.7 – Equipamento da Escola de Engenharia de São Carlos, dimensões 50 x 50 x 24 cm<sup>3</sup> (SANTOS (2007) *apud* SOUZA, 2011).

Na Universidade Federal de Minas Gerais, há também um ensaio diferenciado que foi

desenvolvido nos estudos de Martins (2006) para analisar RSU. Este equipamento tem dimensões de 70 x 70 x 50 cm<sup>3</sup> (Figura 2.8).

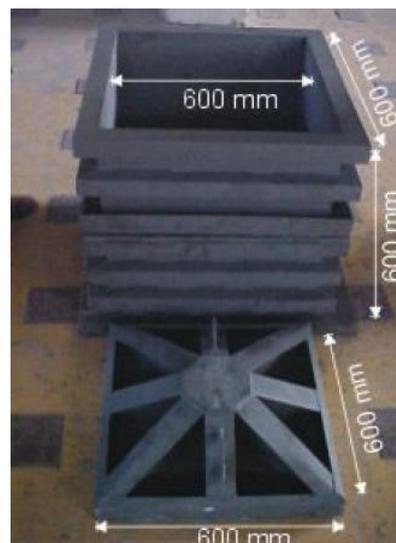


Figura 2.8 – Equipamento Federal da Universidade de Minas Gerais sendo utilizado (MARTINS (2006) *apud* SOUZA, 2011).

Na pesquisa de Motta (2011) foi utilizado um equipamento de cisalhamento direto com dimensões de 600 x 600 x 600 mm para estudar a resistência de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto. A Figura 2.9 apresenta o equipamento utilizado nesta pesquisa.



(a)



(b)

Figura 2.9 – Equipamento da Universidade Federal de Pernambuco (a) equipamento global: (1) base envolvida com areia e (2) rótula para apoio do êmbolo do cilindro hidráulico e (b) dimensões da caixa (MOTTA, 2011).

## **2.3 TÉCNICAS DE MELHORIA DE SOLOS**

Segundo Mitchel e Katti (1981) *apud* Feuerharmel (2000), o engenheiro geotécnico possui várias alternativas para a melhoria das propriedades do solo quando estes não são capazes de cumprir adequadamente as exigências de projeto, são elas: a compactação, o adensamento por pré-carregamento e/ou drenos verticais, a injeção de materiais estabilizantes, a estabilização por processos físico-químicos e reforço de solo com a inclusão de elementos resistentes (geossintéticos, fibras, tiras, grelhas, etc.).

Estas opções podem ser resumidas em estabilização e reforço. Define-se estabilização dos solos como sendo o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas, ao desgaste ou à erosão, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade, ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos (VARGAS, 1977). Ou seja, a estabilização está ligada a características químicas.

Já o reforço é mais associado à uma inclusão de materiais na massa de solo, tendo uma característica mais física. A associação do solo com os reforços leva o material composto a apresentar melhores características mecânicas (EHRLICH *et al.*, 2009).

Devido à tendência ambiental dos últimos anos, muitos estudos têm sido voltados à utilização de materiais alternativos, como RCD, pneus, fibras naturais como cabelo etc. Pesquisas como as de Jiménez (2011), Feuerharmel (2000), Sales (2012), Muñeton (2009), Rezende (1999), Fijii (2012) entre outros apresentaram resultados sobre o assunto, e mostram o verdadeiro potencial de materiais alternativos reciclados.

Uma metodologia que vem sendo aplicada e está apresentando valores interessantes é o da utilização de subprodutos de pneus inservíveis cuja algumas pesquisas são citadas no a seguir.

## **2.4 PESQUISAS REALIZADAS COM FRAGMENTOS DE BORRACHA**

Existe uma gama de pesquisas que visam à reutilização de borrachas de pneus. O campo mais estudado dentro desta diretriz sem dúvida é o da pavimentação asfáltica, e em geral as migalhas de pneus são os materiais mais usados nesta área.

Durante muitos anos, engenheiros e químicos tem trabalhado misturando borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) em ligantes asfálticos na tentativa de melhorar

as propriedades elásticas do ligante asfáltico, mas apenas na década de 40 se iniciou a história da adição de borracha reciclada de pneus em materiais para pavimentação.

O campo de misturas solo-borracha iniciou-se pela década de 90 com os primeiros estudos nos trabalhos de Humphrey *et al.* (1993), Ahmed e Lovell (1993) e Foose *et al.* (1996). Existem ainda trabalhos mais recentes, como Cabalar (2011), Edinçlicler *et al.* (2010) e Ghazavi (2004) que trataram sobre misturas com solos arenosos e Cetin *et al.* (2006) que tratou de misturas com solo argilosos. No Brasil ainda existem poucos estudos e os existentes são muito recentes como o de Franco (2012) e Szeliga *et al.* (2012).

#### 2.4.1. PESQUISAS UTILIZANDO LASCAS DE PNEUS

Humphrey *et al.* (1993) estudaram lascas de pneus de quatro diferentes empresas e realizaram ensaios voltados para o estudo apenas das tiras sem misturas com solo. Foram realizados ensaios de curva granulométrica, densidade dos grãos, compactação, cisalhamento direto de grande escala, adensamento e permeabilidade.

Nos ensaios de compactação foram obtidos os pesos específicos máximos de 6,06 kN/m<sup>3</sup> para as lascas da F&B Enterprises, 6,07 kN/m<sup>3</sup> para as de Palmer Shredding, 6,08 kN/m<sup>3</sup> para as de Pine State Recycling, e 6,13 kN/m<sup>3</sup> para as de Sawyer Environmental.

Os mesmos autores realizaram ensaios de cisalhamento direto para lascas com tamanhos estudados menores que 76 mm e relataram ângulos de atrito que variam entre 19° e 25° e coesão de 7,7 a 8,6 kPa, como mostra a Tabela 2.1. As envoltórias de ruptura podem ser vistas na Figura 2.10.

Tabela 2.1 – Valores de ângulo de atrito e coesão obtidos no ensaio de cisalhamento direto (HUMPHREY *et al.*, 1993).

Lascas	Ângulo de atrito	Coesão (kPa)
F&B Enterprises	25°	8,6
Palmer Shredding	19°	11,5
Pine State (caixa de 305 mm)	21°	7,7
Pine State (caixa de 406 mm)	26°	4,3

De acordo com Humphrey *et al.* (1993), a utilização de lascas de pneus em aplicações de Engenharia Civil são vantajosas devido à sua baixa densidade, elevada durabilidade, elevado isolamento térmico e em muitos casos, menor custo em comparação com a de outros

materiais de enchimento.

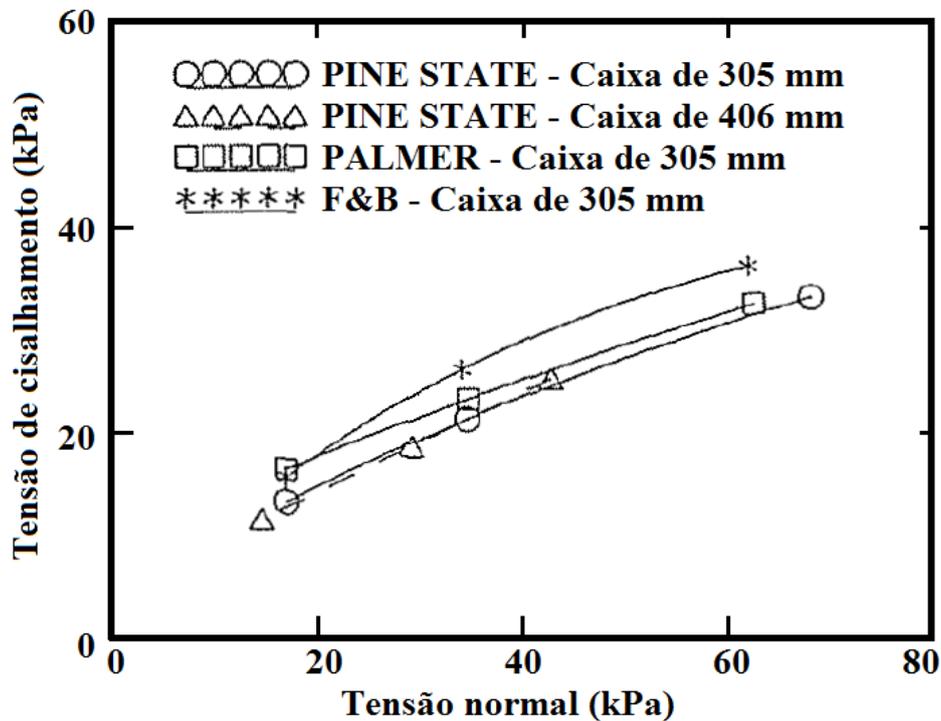
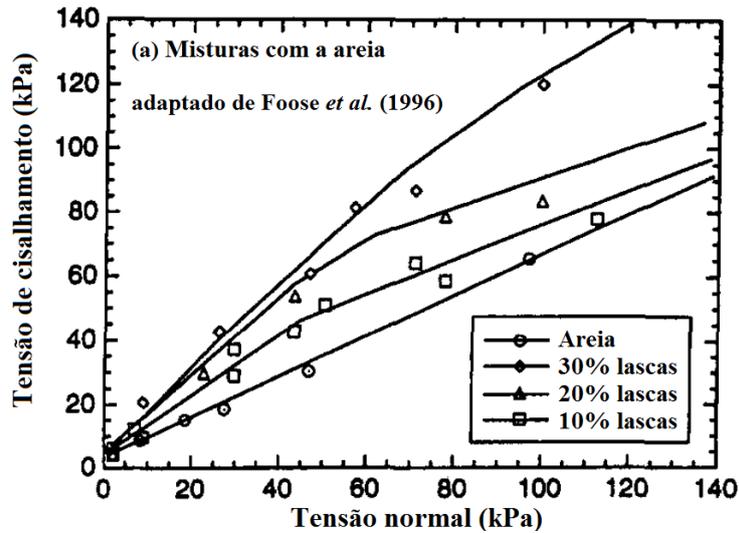


Figura 2.10 – Envoltórias de ruptura para as lascas de pneus (HUMPHREY *et al.*, 1993).

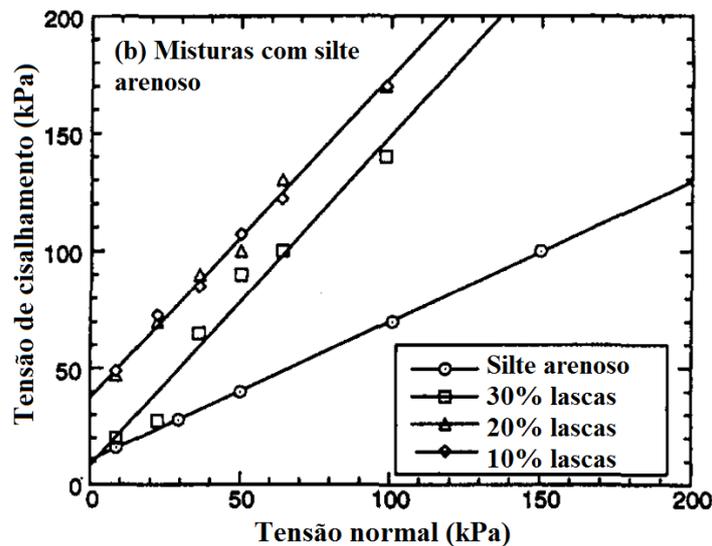
No estudo de Tatlısoz *et al.* (1998), foram analisadas as propriedades geotécnicas de dois tipos de solo: uma areia e um silte arenoso, classificados como SP (areia mal graduada) e ML (silte arenoso) pelo Sistema de Classificação Unificada de solos (SUCS), respectivamente, misturados a lascas de pneus e a interação destas misturas com geotêxtil e duas geogrelhas. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões (amostras com 280 mm de diâmetro e 300 mm de altura) e de arrancamento (amostras com 1630 de comprimento, 610 de largura e 410 de altura).

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com várias tensões normais e com porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30% de lascas de pneus e os dois tipos de solo. A Figura 2.11 apresenta os resultados destes ensaios e a Tabela 2.2 apresenta a coesão e ângulo de atrito determinados.

Estes autores concluíram que as misturas de solo e lascas de pneu tem a tensão de cisalhamento significativamente mais elevada em relação a ensaios utilizando apenas o solo. Além disso, as misturas de solo e lascas de pneu não exibem pico na tensão de cisalhamento e a resistência tende a aumentar com o aumento do deslocamento.



(a)



(b)

Figura 2.11 – Envoltórias de ruptura para as lascas de pneus: (a) para as misturas com areia e (b) para as misturas com silte (TATLISOZ *et al.*, 1998).

Tabela 2.2 – Valores de ângulo de atrito e coesão obtidos no ensaio de cisalhamento direto (TATLISOZ *et al.*, 1998).

Material	Teor de lascas de pneus	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão <sup>a</sup> (kPa)	Ângulo de atrito <sup>a</sup> (graus)
Lascas de pneus	100	5,9	0	30
Areia	0	16,8	2	34
Areia-lascas de pneus	10	15,6 <sup>b</sup>	2	46
Areia-lascas de pneus	12	14,5 <sup>b</sup>	2	50
Areia-lascas de pneus	30	13,3 <sup>b</sup>	2	52

Silte arenoso	0	18,3	11	30
Silte arenoso-lascas de pneus	10	17,6	8	55
Silte arenoso-lascas de pneus	20	17,0	38	54
Silte arenoso-lascas de pneus	30	16,3	39	53

<sup>a</sup> Parametros das misturas corespondentes a um deslocamento de 100 mm.

<sup>b</sup> Peso específico dos grãos da areia = 16,8 kN/m<sup>3</sup>

Ghazavi *et al.* (2011) estudaram procedimentos de ensaio para avaliar as propriedades de interação de lascas de pneus e misturas areia e lascas com geossintéticos por meio de ensaios de arrancamento e cisalhamento direto. Foram estudados os parâmetros de resistência ao cisalhamento na interface de lascas de pneus, areia e geogrelha, utilizando um aparelho de ensaio de cisalhamento direto de dimensões 300 mm X 300 mm.

As misturas utilizadas com lascas de pneus e areia tiveram a seguinte proporção 0:100, 15:85, 25:75, 30:70, 35:65 e 100:0, em relação ao peso.

Os materiais utilizados foram uma areia relativamente uniforme com forma das partículas angular classificada pelo SUCS como SP, areia mal graduada. As lascas de pneu utilizadas tinham densidade específica de 1,20 e não apresentavam aço, também foi usada uma geogrelha. Foram aplicadas tensões normais de 2, 30, 60 e 90 kPa, com velocidade constante para todos os ensaios de 1 mm/min.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados nas misturas de lascas de pneus-areia para avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura (coesão "c" e ângulo de atrito " $\phi$ "), e em amostras reforçadas com geogrelha para avaliar os parâmetros de interface entre geogrelha e a mistura lascas de pneu e areia (aderência "ca" e ângulo de atrito da interface " $\delta$ ").

É apresentada na Figura 2.13 e Figura 2.13 as curvas de tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e variação do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal da mistura lascas de pneu-areia para a tensão normal de 90 kPa. Com o aumento do teor de lascas de pneus verificou-se um aumento na tensão de cisalhamento, exceto para as misturas com 100% de lascas de pneu.

Na sequência é apresentada a Figura 2.14 que mostra a variação da tensão máxima de cisalhamento com o teor de lascas de pneu. Observa-se um aumento da tensão de cisalhamento com o aumento do teor de pneu até uma porcentagem de volume ótimo de 30%. Após este, a resistência ao cisalhamento diminui, especialmente para valores de alta pressão normal.

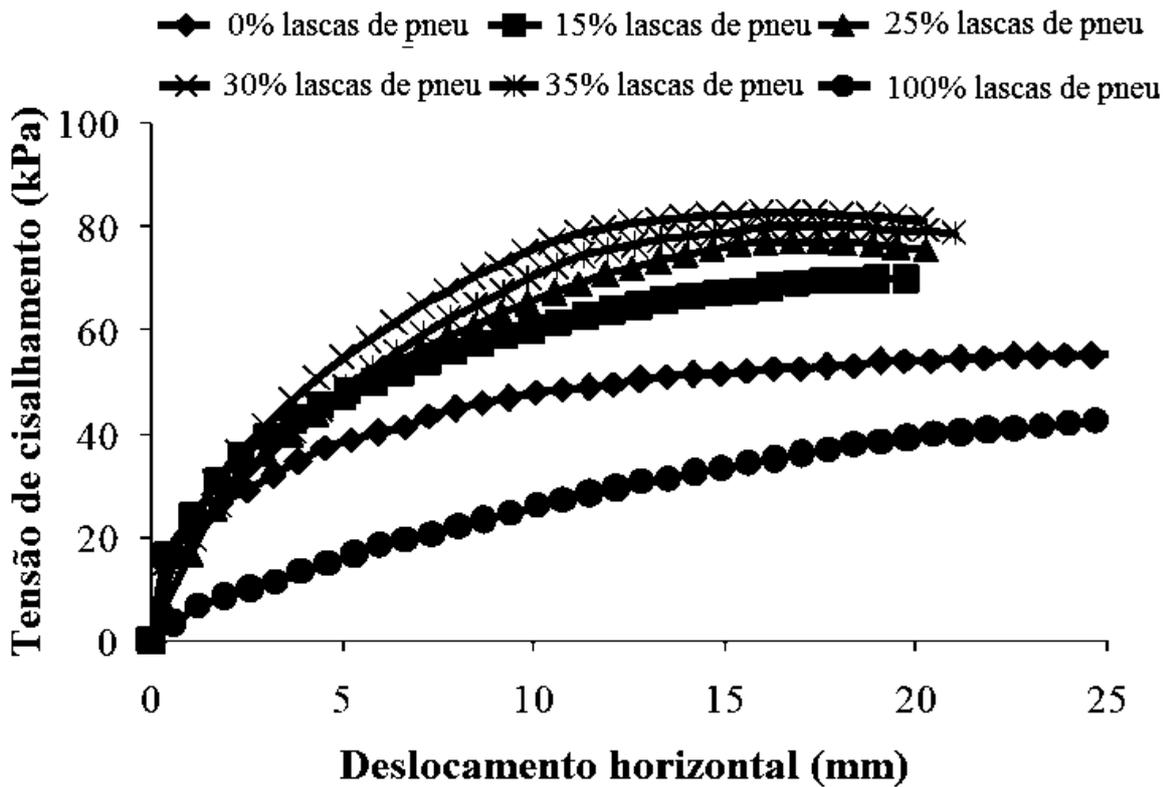


Figura 2.12 – Curvas tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (GHAZAVI *et al.*, 2011).

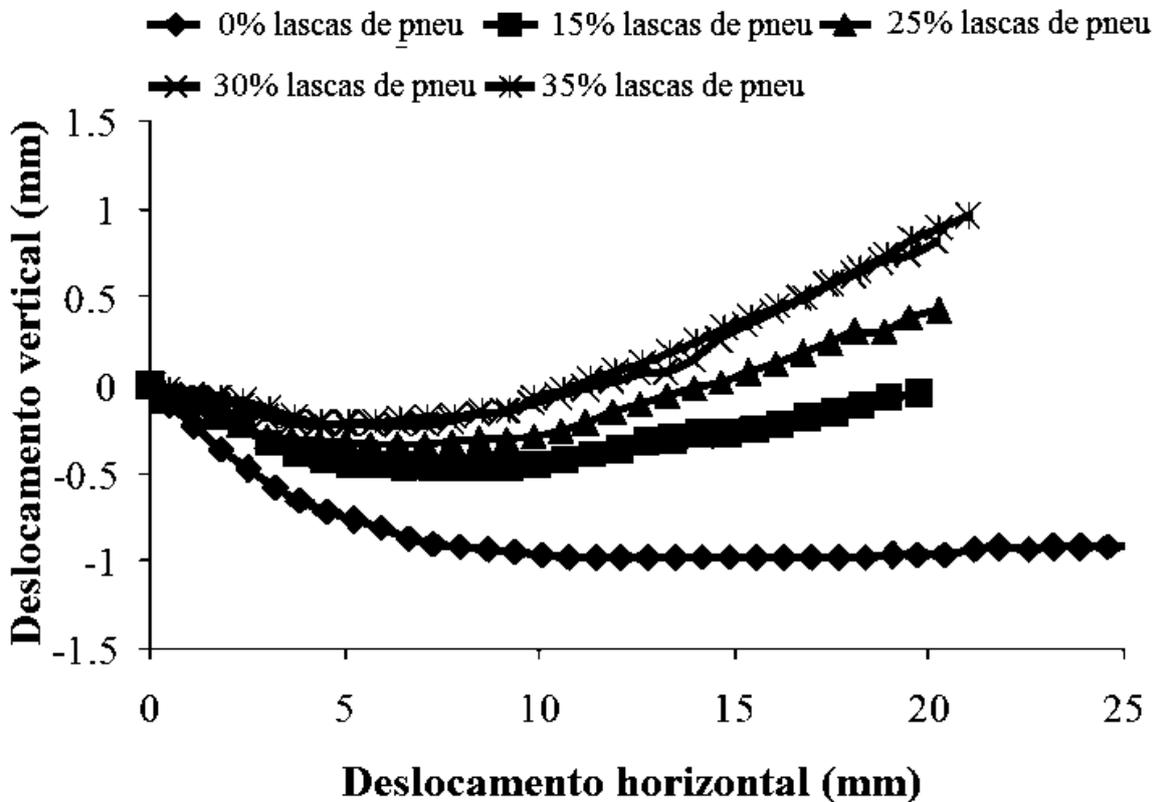


Figura 2.13 – Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (GHAZAVI *et al.*, 2011).

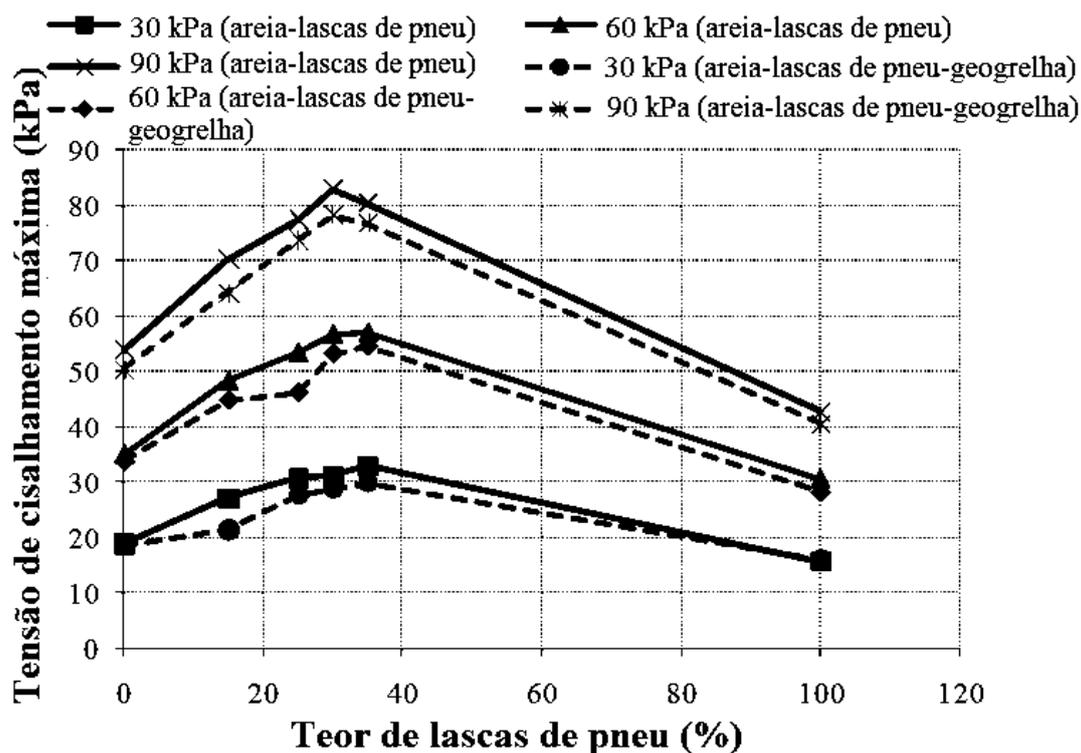


Figura 2.14 – Variação da máxima tensão de cisalhamento versus teor de lascas de pneu (GHAZAVI *et al.*, 2011).

Ghazavi *et al.* (2011) calcularam um ângulo de atrito ( $\phi$ ) e a coesão ( $c$ ) após traçada a envoltória de Mohr-Coulomb e um ângulo de atrito equivalente ( $\phi_{eq}$ ,  $\delta_{eq}$ ), que foi calculado considerando a coesão como sendo zero. Estes dados podem ser usados para simplificar a comparação entre as razões de mistura diferentes. A Tabela 2.3 apresenta o ângulo de atrito interno das misturas de lascas de pneu-areia e da interface lascas de pneu, areia e geogrelha.

Tabela 2.3 – Parâmetros de resistência das misturas de areia e lascas de pneus e das interfaces com geogrelha (GHAZAVI *et al.*, 2011).

Material	Parâmetro	Porcentagem de lascas de pneu (% pelo volume)					
		0	15	25	30	35	100
Areia-lascas de pneu	c (kPa)	0,8	5,1	6,8	7,3	9,4	2,5
	$\phi$ (graus)	30,2	35,8	38,2	39,7	38,2	24,2
	$\phi_{eq}$ (graus)	30,7	38,4	41,3	43	42,6	25,9
Areia-lascas de pneu	c (kPa)	2,3	3,3	4,5	5,8	8,3	3,7
	$\phi$ (graus)	27,9	34	36,7	38,5	37,2	22,2
	$\phi_{eq}$ (graus)	29,2	35,9	39	41,4	41,4	24,7
-	Tan $\delta_{eq}/\tan \phi_{eq}$	0,94	0,9	0,92	0,94	0,96	0,94

Com base nos resultados dos ensaios, Ghazavi *et al.* (2011) concluíram que mesmo em condições iguais de tensão normal, a tensão de cisalhamento nas misturas lascas de pneu e areia é maior do que a de apenas areia.

Ghazavi *et al.* (2011) também observaram características de dilatância em misturas de lascas de pneus e areia e misturas de areia, lascas de pneus e geogrelha, especialmente em amostras com maior teor de lascas de pneu. Notou-se ainda que a relação do ângulo de atrito de interface com o ângulo de atrito interno de misturas de areia e lascas de pneu ( $\tan \delta / \tan \phi$ ) aumenta com o aumento do teor das lascas de pneu.

Cetin *et al.* (2006) estudaram as propriedades geotécnicas de lascas de pneus de granulometria fina e grossa e suas misturas (10, 20, 30, 40 e 50% em relação ao peso) com um solo argiloso coesivo. Foi realizada uma série de ensaios, tais como granulometria, análise dos limites de Atterberg, permeabilidade, cisalhamento direto e ensaios de compactação no solo argiloso. Os ensaios foram realizados nas tiras de pneus, tanto na granulometria fina quanto na grossa, apenas no solo argiloso e nas misturas desses materiais.

Notou-se que, para todas as amostras, as curvas não apresentaram picos claros. Na Figura 2.15 são apresentadas as tensões de ruptura para cada tipo de lasca de pneu e o teor da mistura. Observa-se claramente um aumento das tensões de ruptura em misturas com teor de até 20% de lascas grossas e até 30% para as lascas finas. A Figura 2.16 e Figura 2.17 apresentam as relações de coesão e ângulo de atrito com o teor de lascas de pneu.

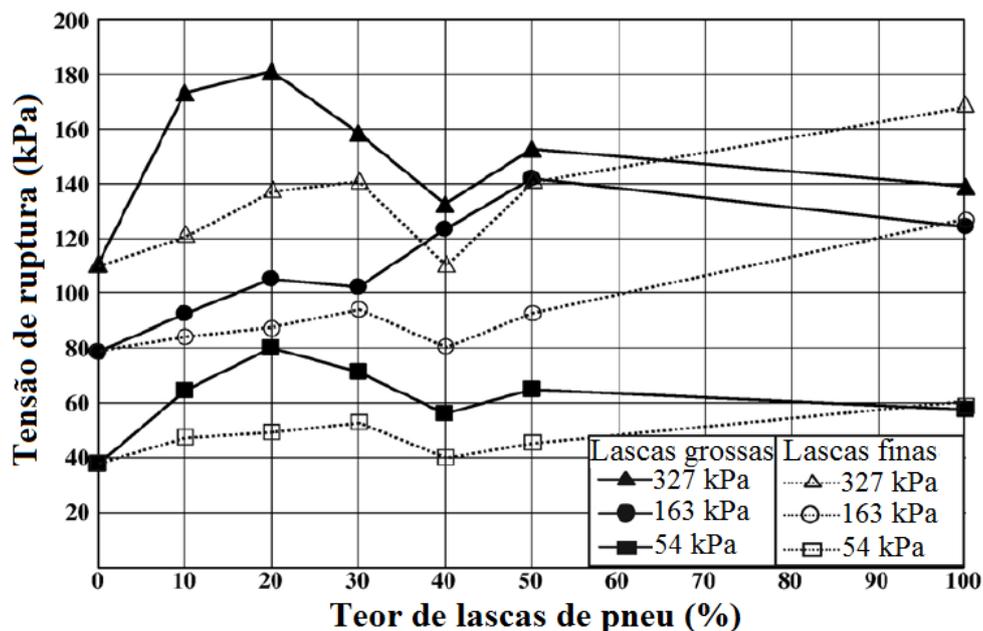


Figura 2.15 – Relação entre o teor de borracha e as tensões de ruptura para as misturas de lascas de pneu e solo argiloso (CETIN *et al.*, 2006).

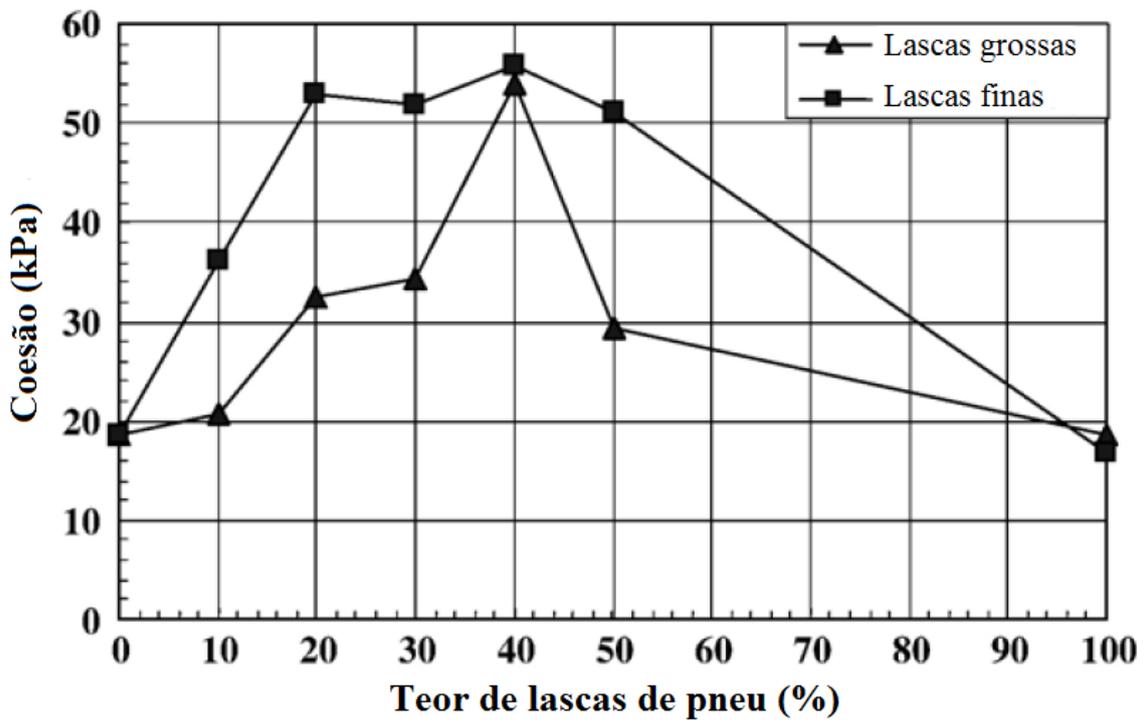


Figura 2.16 – Relação entre o teor de borracha e da coesão para as misturas de lascas de pneu e solo argiloso (CETIN *et al.*, 2006).

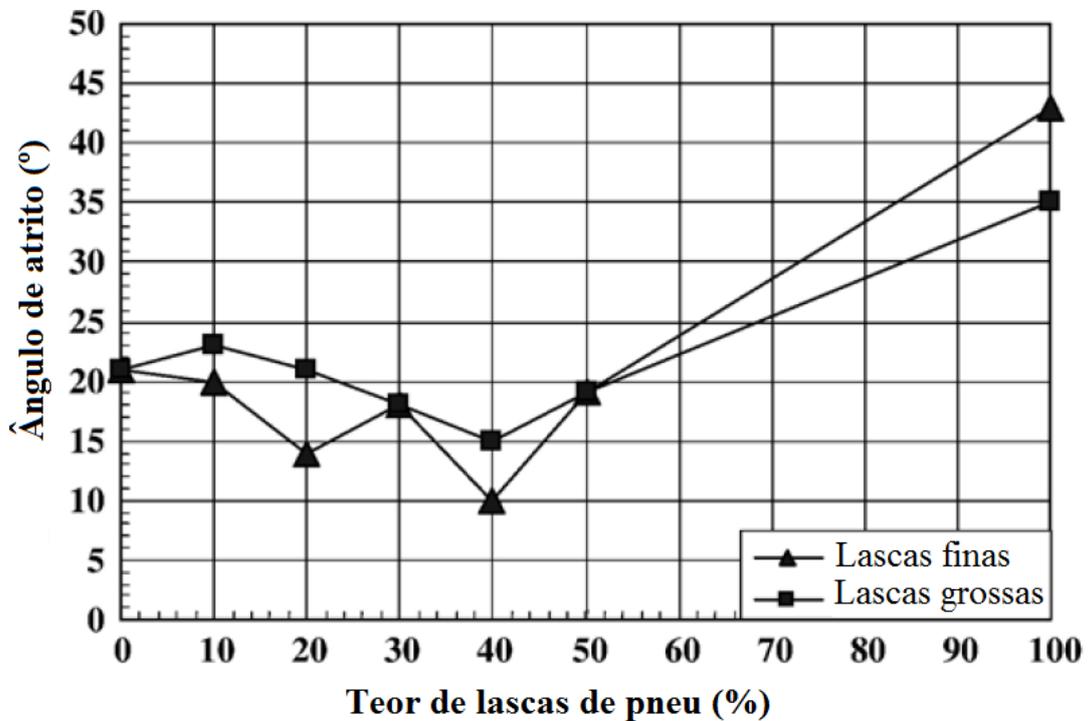


Figura 2.17 – Relação entre o teor de borracha e do ângulo de atrito para as misturas de lascas de pneu e solo argiloso (CETIN *et al.*, 2006).

Ainda nesse estudo, para os ensaios de compactação foi adotada a metodologia Proctor normal padrão e as curvas são apresentadas na Figura 2.18.

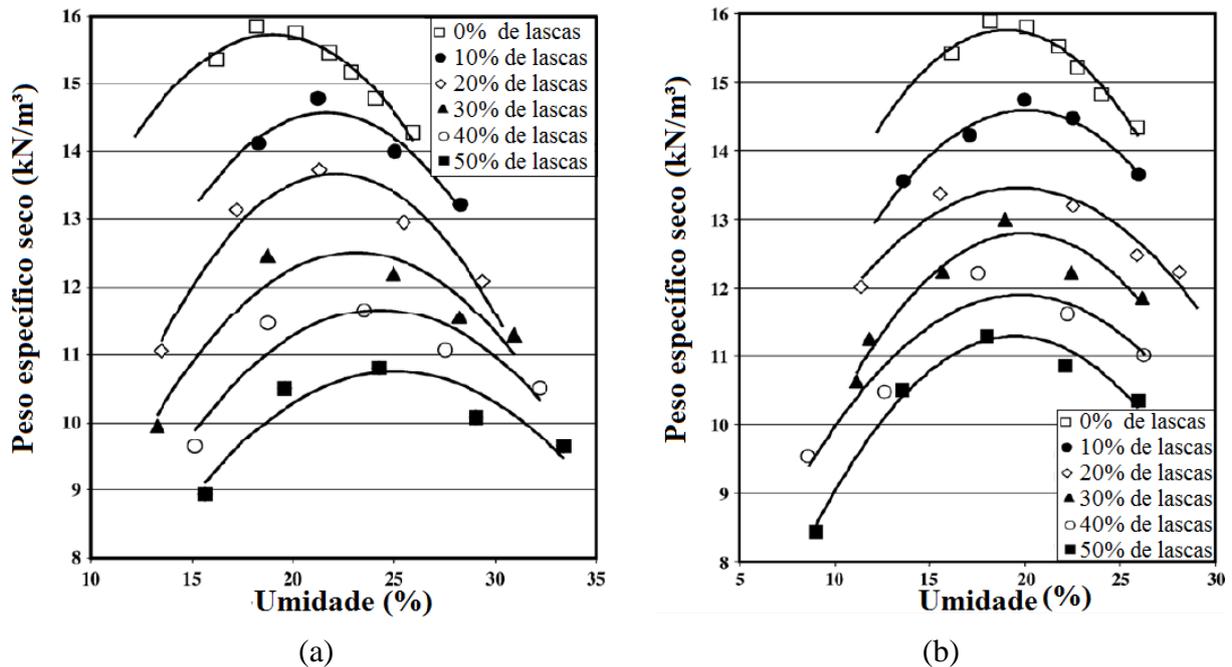


Figura 2.18 - Curva de compactação da argila, e de misturas com lascas de pneus de granulometria(a) finas e (b) grossas (CETIN *et al.* 2006).

Observa-se que, para as misturas com lascas de pneu com granulometria fina, à medida que se aumentou o teor de lascas, o valor umidade ótima também aumentou e, para as misturas com lascas de pneu com granulometria grossa, com o aumento dos teores de lascas a umidade ótima apresentou pouca alteração.

Os autores concluíram que os resultados indicam que a utilização de tiras de pneus usados misturados com solos argilosos como um material de enchimento é possível, ocorrendo a diminuição do peso específico e o aumento da resistência ao cisalhamento em até 20% para as misturas com lascas finas e 30% para a mistura com as lascas grossas.

No estudo de Cabalar (2011) foi verificado o comportamento de misturas de lascas de pneu com dois tipos de areia: uma fina e angular e a outra grossa arredondada. Foram feitas misturas com quatro diferentes percentuais de partículas de borracha: 5, 10, 20 e 50% em relação ao peso seco.

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com tensões normais de 28, 42 e 68 kPa e ainda foi proposto um modelo de previsão utilizando o método de regressão stepwise (SR) para calcular a tensão de cisalhamento de areias com teor de borracha crescente. A Figura 2.19 e Figura 2.20 apresentam alguns resultados, onde se pode observar que, com o

aumento do teor de borracha, ocorreu um decréscimo do ângulo de atrito.

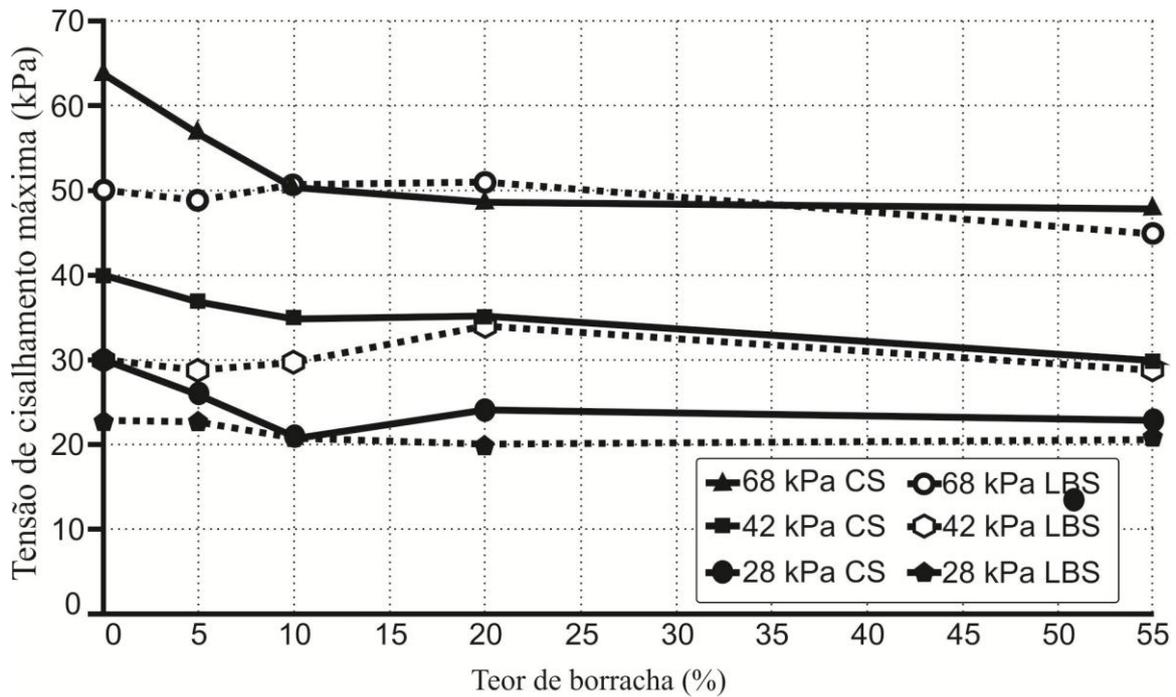


Figura 2.19 – Efeito das lascas de borracha na tensão de cisalhamento máxima para as duas areias (CABALAR, 2011).

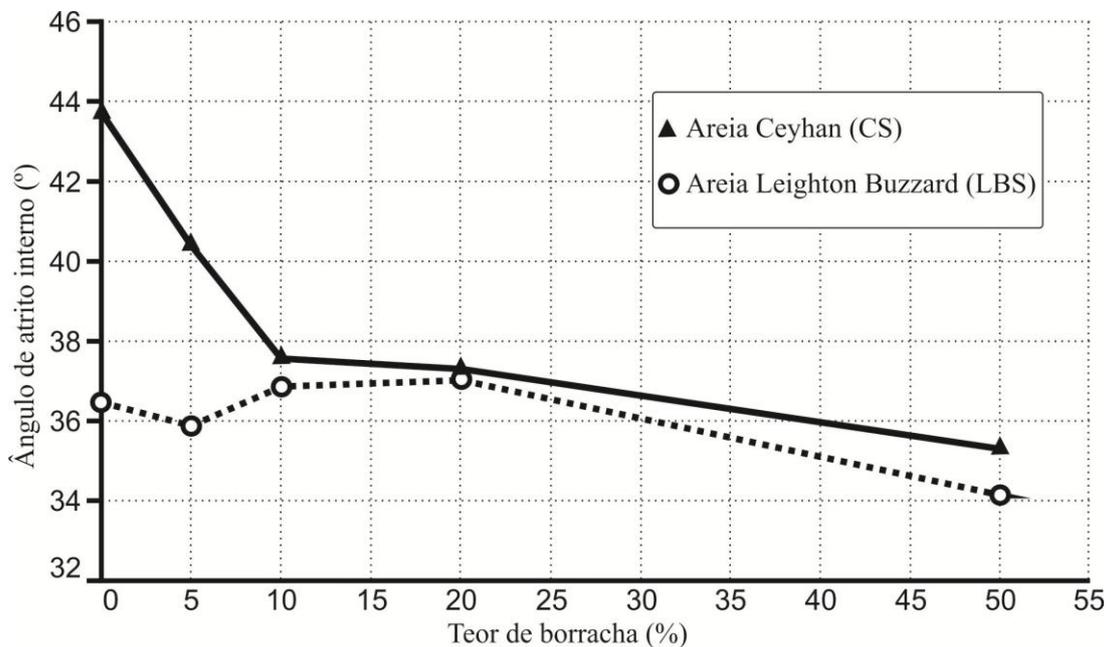


Figura 2.20 – Efeito das lascas de borracha no ângulo de atrito para as duas areias (CABALAR, 2011).

Como continuidade do trabalho foi proposto um modelo de previsão de resistência ao cisalhamento para as misturas de areia e lascas de pneus e a Figura 2.21 e Figura 2.22

apresentam os resultados experimentais versus o modelo proposto para a areia fina e angular e a grossa arredondada, respectivamente.

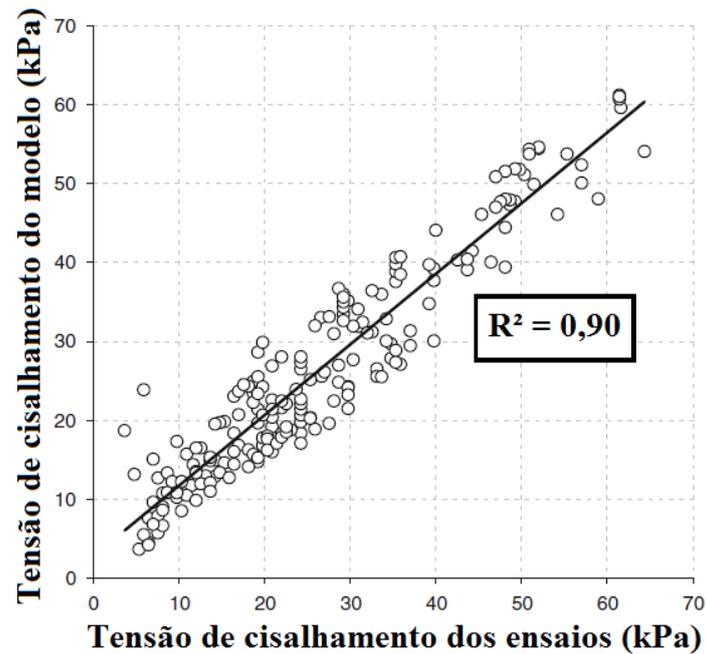


Figura 2.21 – Resultados de Laboratório versus resultados do Modelo para a areia fina e angular (CABALAR, 2011).

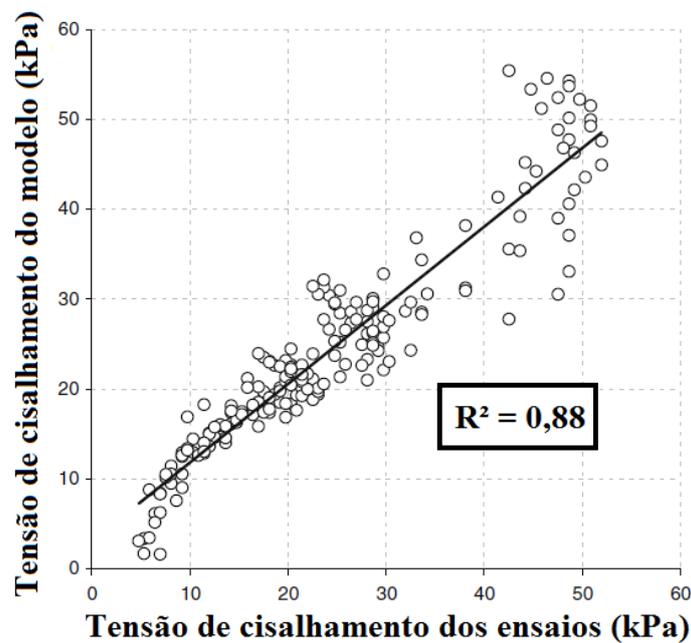


Figura 2.22 – Resultados de Laboratório versus resultados do Modelo para a areia grossa e arredondada (CABALAR, 2011).

Cabalar (2011) conclui então que, para teores inferiores a 10% a resistência cai significativamente, porém, para teores maiores que 10%, essa queda diminui e assim

apresenta tensões de cisalhamento máximas quase constantes. No entanto, o ângulo de atrito interno para a areia fina e angular não mudou significativamente.

Outra conclusão foi que a precisão do modelo proposto foi razoável e calculou-se a resistência ao cisalhamento com um valor de correlação de  $R^2 = 0,90$  e  $R^2 = 0,88$  para as misturas com borracha e a areia fina e angular e a areia grossa e arredondada, respectivamente.

#### **2.4.2. PESQUISAS UTILIZANDO PEDAÇOS DE PNEUS**

Na pesquisa de Atton (2006) foram estudados os efeitos nas propriedades de solos arenosos quando estes são misturados a pedaços de pneus. Os pedaços de pneus utilizados foram os passados na peneira N° 4. As misturas foram feitas com três tipos de solos arenosos, que se diferenciavam pela variação do teor de argila presente, as misturas foram feitas com variação nas proporções de lascas de pneu de: 10%, 20%, 30% e 40% do peso.

Nesta pesquisa Atton (2006) utilizou três tipos de solo que se diferenciavam em relação ao teor de finos. A areia A apresenta 92% de areia pura e 8% de finos, a areia B apresenta 95% de areia e 5% de finos e a areia C contém 90% de areia e 10% de finos. Estes autores concluíram que o aumento na porcentagem de pedaços de pneus aumentou o ângulo de atrito interno.

Zornberg *et al.* (2004) realizaram ensaios triaxiais de grandes dimensões para estudar diferentes tamanhos de pedaços de pneus que variavam de formato e tamanho, ambos misturados a uma areia seca No. 30 (0,4 mm), classificada como SP pelo SUCS. Para definir a melhor dosagem foram realizadas misturas com 0%, 5%, 10%, 15%, 30%, 38%, 60% e 100% de pedaços de pneus.

Estes pedaços de pneus variavam em relação à forma (razão entre largura e comprimento) com variações de 1, 2, 4 e 8, eles são apresentados na Figura 2.23. Os resultados dos ensaios triaxiais são apresentados na Tabela 2.4. Neste estudo é apresentado o  $\phi_{eq}$  que corresponde ao ângulo de atrito estimado quando a coesão é nula.

Os ensaios triaxiais mostraram que para as amostras com pedaços de pneus puras o comportamento tensão desviadora-deformação era aproximadamente linear e o comportamento de deformação totalmente em contração volumétrica.

Esta resposta é significativamente diferente das amostras da areia pura estudada, as quais mostraram uma estrutura bem definida de resistência ao cisalhamento com pico e

comportamento dilatante para as densidades relativas utilizadas neste estudo.

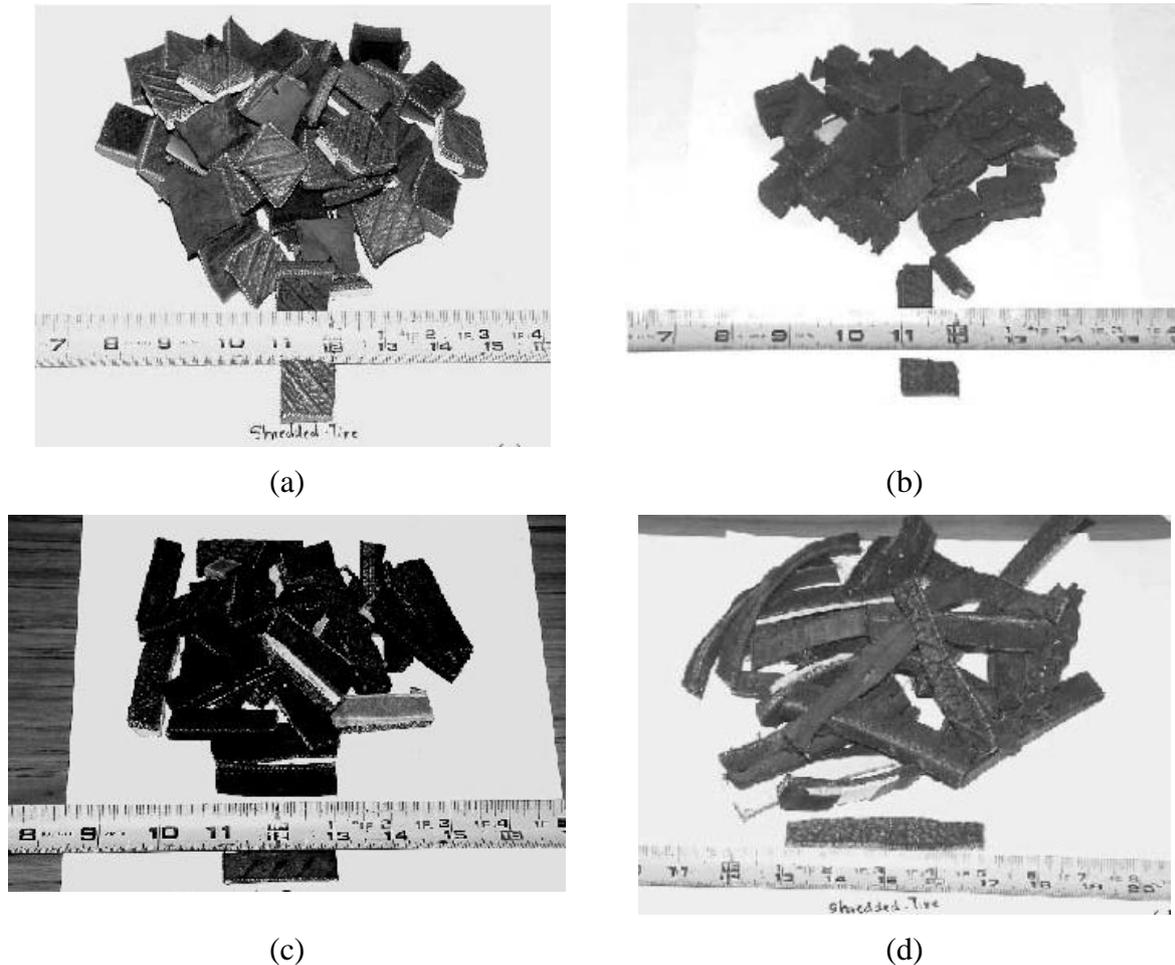


Figura 2.23 – Pedacos de pneus com as diferentes relações: (a)  $n=1$ , (b)  $n=2$ , (c)  $n=4$  e (d)  $n=8$  (ZORNBERG *et al.*, 2004).

Tabela 2.4 – Parâmetros de resistência das misturas de areia e pedaços de pneus (ZORNBERG *et al.*, 2004).

Densidade relativa da areia (%)	Teor de pedaços de pneu (%)	Relação da largura e comprimento dos pedaço de pneu	Parametros de Resistência ao cisalhamento		
			$\phi$ (graus)	c (kPa)	$\phi_{eq}$ (graus)
55	0	na	36,8	7,8	37,9
75	0	na	41,0	3,8	41,4
55	10	4	35,7	21,7	38,9
55	30	4	35,7	30,4	40,2
55	60	4	34,4	18,2	37,3
na	100	4	21,4	22,8	26,5

75	30	4	36,4	30,7	40,8
55	30	2	35,6	22,3	38,9
55	30	1	35,1	23,7	38,7
75	20	4	37,2	22	40,3
55	30	8	36,1	60	44,5
55	38,3	4	36,1	41,2	42
55	10	1	36,5	19,8	39,4
55	5	4	36,1	7	37,1
65	15	4	34,8	21,7	38,2

Concluiu-se que a influência do teor de pedaços de pneu sobre o comportamento da tensão-deformação volumétrica das amostras de areia era significativo. Existe uma mudança no comportamento de misturas de pedaços de pneu e areia com teores de aproximadamente 35%.

A influência da razão do comprimento e da largura dos pedaços de pneus sobre o comportamento da tensão-deformação volumétrica é insignificante para as deformações axiais inferiores a cerca de 5%. No entanto, a relação do comprimento pela largura dos pedaços de pneus afeta a resposta da tensão-deformação quando comparadas a altas tensões axiais.

Por fim, a principal conclusão que Zornberg *et al.* (2004) chegaram foi que a contribuição nos mecanismos de reforço para a tensão de cisalhamento das misturas é mais significativa a baixas pressões confinantes.

Embora a contribuição de mecanismos de reforço é também observada em altas pressões confinantes, a resistência ao cisalhamento é frequentemente inferior ao obtido para areia pura. Consequentemente, estruturas sob baixas pressões confinantes podem ser beneficiadas com a adição de pedaços de pneus.

### **2.4.3. PESQUISAS UTILIZANDO MIGALHAS DE PNEUS**

Ghazavi (2004) estudou as misturas de migalhas de pneu a uma areia em duas condições, fofa e ligeiramente densa, com ensaios de cisalhamento direto nas porções de 0%, 10%, 15%, 20%, 50%, 70% e 100% de migalhas de pneu em relação ao peso. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com amostras pequenas de 63 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

A partir dos resultados dos ensaios Ghazavi (2004) concluiu que a resistência ao

cisalhamento não se altera de forma significativa. No entanto, as misturas de areia e migalhas de pneus são leves, o que impõe pressões mais baixas em estruturas de contenção. Características de dilatação foram observadas especialmente em amostras com maior teor de borracha e maior compactação.

Edinçliçler *et al.* (2010) avaliaram diferentes técnicas de processamento e suas propriedades mecânicas em misturas com areia para melhorar as propriedades de engenharia. O estudo consistiu em uma sequência de ensaios de cisalhamento direto em grandes dimensões com tensões normais de 20, 40 e 80 kPa utilizando misturas de migalhas de pneu, com dimensões de 1 a 3 mm, e uma areia bem graduada, de densidade média, com peso específico seco de 13,8kN/m<sup>3</sup>.

Eles observaram que, em tensão baixa (20 kPa), a adição de migalha de pneu a areia em várias proporções aumentou a tensão de cisalhamento. Mesmo em pequenas percentagens de adição, os parâmetros são melhorados.

Os autores constataram que em todos os níveis de tensão vertical as adições de migalhas de pneu na areia em todos os teores aumentaram a resistência ao cisalhamento da mistura em relação a areia sozinha até mesmo nas pequenas percentagens. Outra observação interessante é que para as tensões mais baixas de 20 e 40 kPa a adição de migalha de borracha tem um aumento na resistência ao cisalhamento mais evidente que em relação a altas tensões.

Quanto aos parâmetros de resistência, a Tabela 2.5 a seguir mostra os valores de coesão e ângulo de atrito. Observa-se que foram obtidos valores de ângulo de atrito de até 42,6°.

Tabela 2.5 – Parâmetros de resistência das misturas de areia e migalhas de pneus (EDINÇLILER *et al.*, 2010).

Material	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Parâmetros de resistência	
		Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
100% de migalhas de pneu	5,4	4,6	31,0
100% de areia	13,78	0	38,7
95% areia + 5% migalha de pneu	13,38	1,3	41,2
90% areia + 10% migalha de pneu	13,02	0,2	41,4
80% areia + 20% migalha de pneu	12,38	1,1	42,6
70% areia + 30% migalha de pneu	11,85	1,2	40

Edinclieler *et al.* (2010) concluíram que, com o aumento da resistência ao cisalhamento da mistura migalha de pneu e areia, estes podem ser usados como elementos de fibra de reforço. Para as condições do ensaio, mesmo em baixas inclusões de migalhas de pneus, tais como 10% em peso, já foi possível observar que o comportamento das deformações melhora significativamente.

Eles constataram que o tipo de processamento, o teor de pneus usados e processados e a tensão normal são as características mais importantes das misturas que influenciam a resistência ao cisalhamento.

Szeliga *et al.* (2012) estudaram as misturas de um solo argilo-arenoso e pó de pneu (migalhas de pneus). Foram realizados ensaios com teores de 0%, 20%, 30% e 40%. O solo foi classificado como uma argila arenosa de média plasticidade (CH), já o pó de pneu utilizado apresentava diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 1,0 mm.

Os ensaios de compactação realizados foram do tipo Proctor Normal, segundo NBR 7182 (ABNT, 1986a), para os teores de migalhas de pneus estudados e as curvas são apresentadas na Figura 2.24.

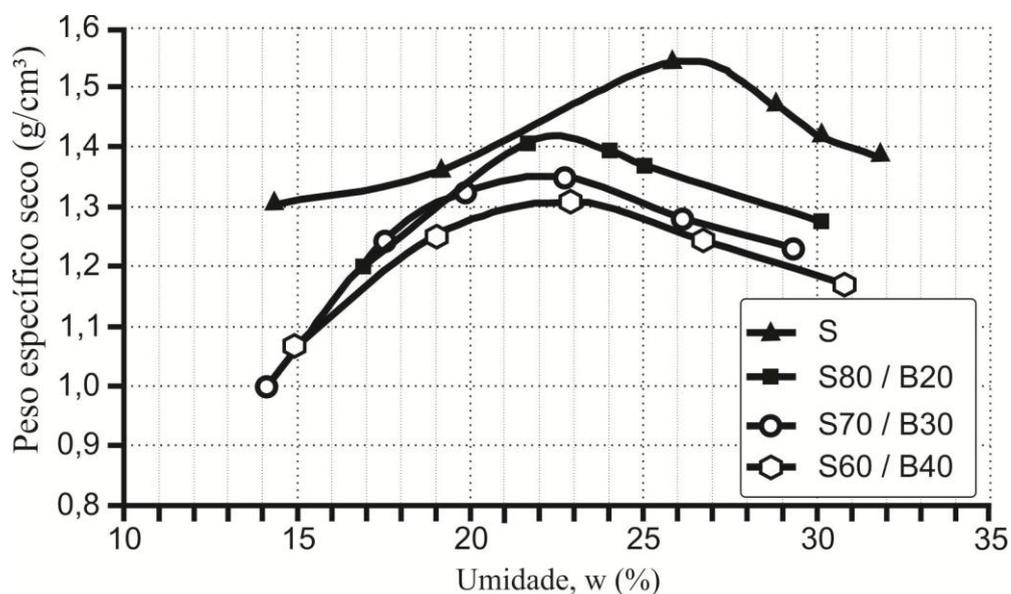


Figura 2.24 – Curvas de compactação do solo puro e misturas solo-borracha (SZELIGA *et al.*, 2012).

Quanto ao ensaio de cisalhamento direto, Szeliga *et al.* (2012) realizaram ensaios com tensões normais de 50, 160, 200 e 300 kPa.

Eles concluíram então que o ângulo de atrito foi o parâmetro que apresentou maior melhoria. Embora a coesão tenha sido elevada, mostrou uma melhoria menor. Segundo os

autores, esse comportamento pode ser justificado pelo fato de as partículas de borracha não terem propriedades de atração elétrica, as quais possuem as partículas de argila.

De todos os teores de borracha estudados como reforço do solo nesta pesquisa, pode-se considerar o teor de 40% como um “teor ótimo”, uma vez que aumentou em cerca de 20% os valores dos parâmetros de resistência do solo argiloso puro, contribuindo também para a destinação de um volume maior deste resíduo.

#### **2.4.4. PESQUISAS UTILIZANDO DESBASTES DE PNEUS**

Edinçliler (2007) estudou as misturas de areia e desbastes de pneu realizando ensaios de cisalhamento de grandes dimensões (300 x 300 x 300 mm) em amostras com teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 100% de desbastes em peso, no estado seco. A areia utilizada na pesquisa era tipo uniformemente graduada, densidade média, com um peso específico seco de 15,3 kN/m<sup>3</sup>. Os desbastes tinham comprimentos máximos de 4 cm, com peso específico de 5,1 kN/m<sup>3</sup>. Foram realizados os ensaios de cisalhamento direto nas tensões de 20, 40 e 80 kPa.

A partir dos ensaios em grande escala de cisalhamento direto, Edinçliler (2007) concluiu que com o aumento observado da resistência ao cisalhamento das misturas de desbastes de pneus e areia é possível sua utilização como elementos de reforço tipo fibra. Para os desbastes de pneus e condições de ensaio adotados, mesmo em baixas inclusões de desbastes de pneus, tais como 10 por cento em peso, a deformação da mistura é consideravelmente alterada.

Franco (2012) avaliou o comportamento mecânico e hidráulico de misturas de um solo tropical e desbastes de pneus para a construção de aterros com foco na dosagem ideal de resíduo de borracha. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, como limites de Atterberg, massa específica dos grãos (solo e lasca), além de ensaios de compactação.

O solo foi classificado como SC, areia argilosa, de acordo com o SUCS. Foram realizados ensaios de compactação, cisalhamento direto, compressão unidimensional e permeabilidade, todos em tamanho convencional, com o intuito de investigar diversos aspectos de seu comportamento mecânico e hidráulico.

Foram estudados os teores de 0%, 10%, 20%, 40%, 50% e 100% de resíduo de pneu e a Figura 2.25 apresenta as curvas. Quanto ao ensaio de cisalhamento, este foi realizado em uma caixa circular de dimensões 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Foram aplicadas tensões de 50, 100 e 200 kPa, e a velocidade foi de 0,05 mm/min. A sequência entre a Figura

2.26 e a Figura 2.28, apresentam os resultados dos ensaios.

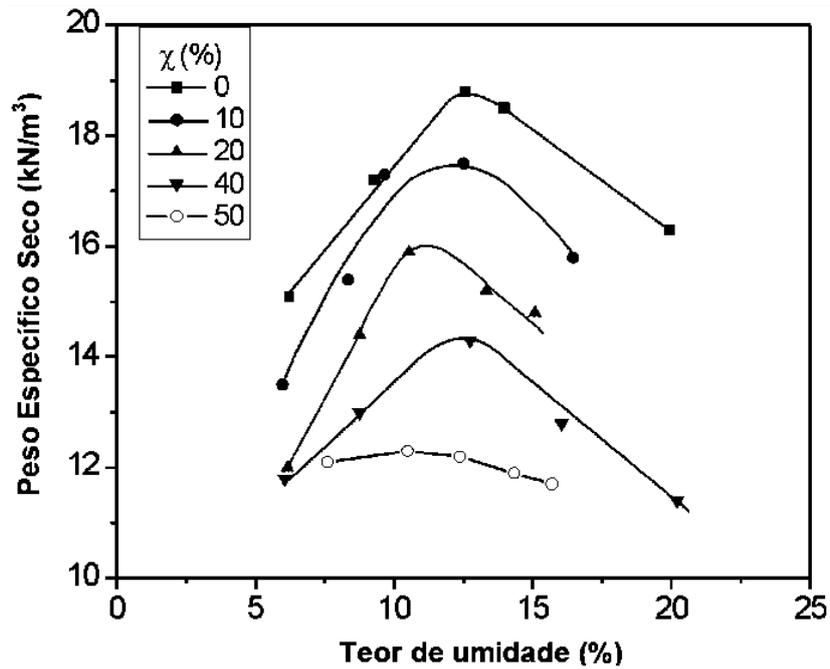


Figura 2.25 – Curvas de compactação do solo puro e das misturas solo – resíduo de pneus (FRANCO, 2012)

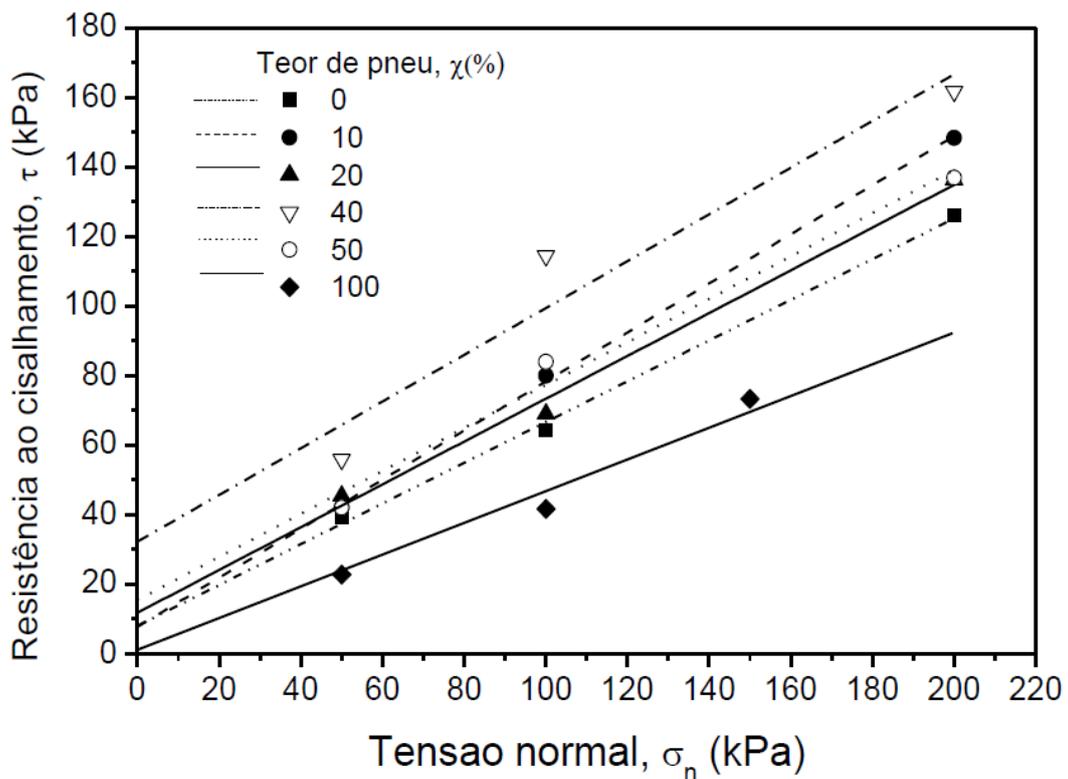


Figura 2.26 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento para diferentes porcentagens de resíduo de pneu (FRANCO, 2012).

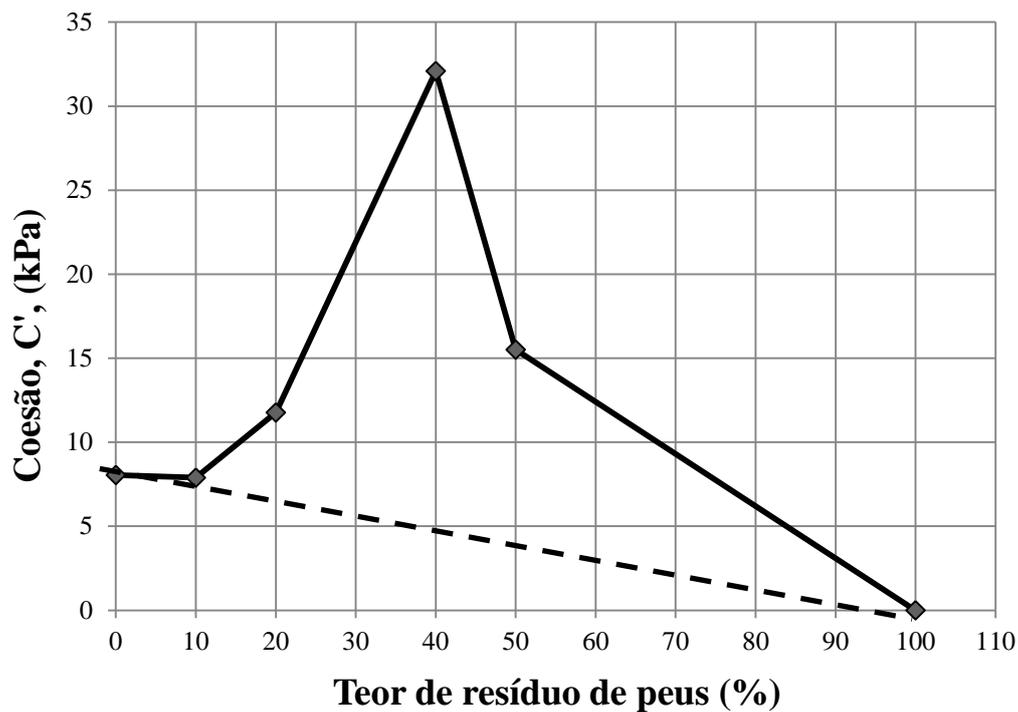


Figura 2.27 – Relação teor resíduo de pneu versus coesão (FRANCO, 2012).

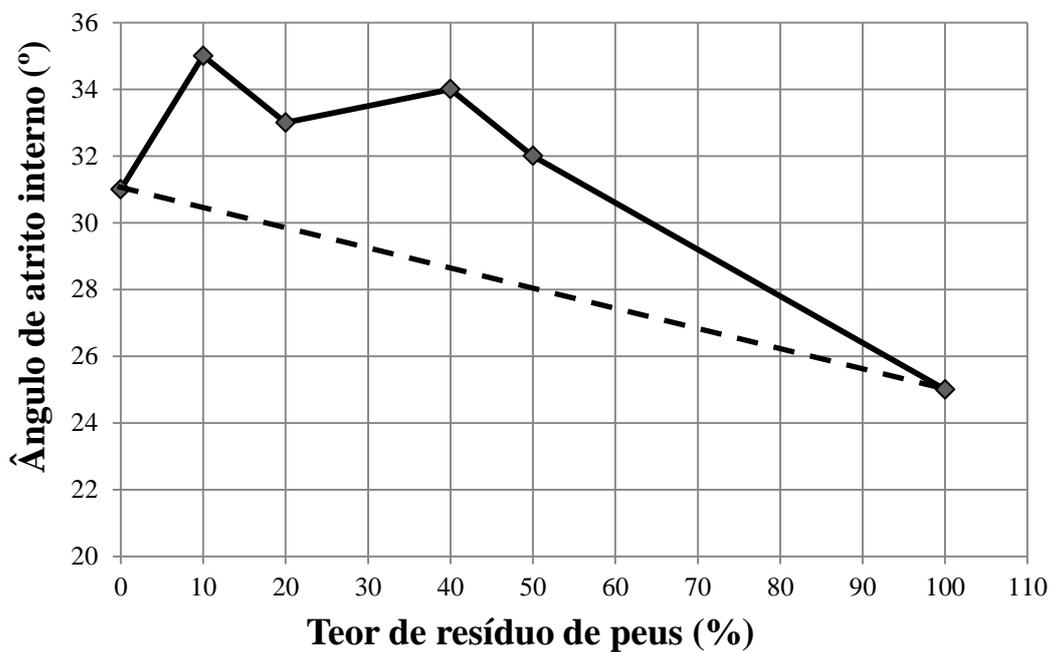


Figura 2.28 – Relação teor resíduo de pneu versus ângulo de atrito interno (FRANCO, 2012).

Baseando-se nos resultados, Franco (2012) concluiu que o teor de pneus exerce uma influência significativa na curva de compactação do material. Quanto maior o teor, menor é o peso específico seco máximo atingido.

Quanto aos ensaios de cisalhamento direto, obteve-se uma máxima resistência ao cisalhamento em um teor de resíduo de pneus de 40% em peso. Nos ensaios realizados, não existiu uma tendência clara para a variação do ângulo de atrito interno com o teor de resíduo.

O ângulo de atrito das misturas 10%, 20%, 40% e 50% de resíduo de pneu foi maior do que o do solo puro (0% de resíduo de pneu), e do desbaste puro (100% de resíduo de pneu). O ângulo de atrito do desbaste puro foi significativamente inferior aos valores obtidos com os demais teores. Quanto à coesão, houve um aumento com o incremento dos teores de desbastes utilizados, atingindo um pico para o teor ótimo de 40% com posterior redução para teores além deste valor.

## 3 - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

---

Este capítulo objetiva tratar dos equipamentos utilizados nesta pesquisa, descrevendo os componentes bem como seu princípio de funcionamento. Serão também descritas a caracterização e algumas propriedades dos materiais utilizados na pesquisa.

### 3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

#### 3.1.1. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO EM MÉDIAS DIMENSÕES

Souza (2011) adaptou o equipamento projetado por Palmeira (1998) para realização de ensaios de cisalhamento direto em maior escala. Inicialmente, o equipamento executava ensaios de tração confinada em geotêxteis, e era constituído basicamente de duas garras laterais e um sistema de reação e para aplicação do carregamento normal ao geotêxtil. Maiores detalhes de tal versão podem ser encontrados em Mendes (2006). A Figura 3.1 ilustra o equipamento quando era utilizado para os ensaios de tração confinada. Por sua vez, a Figura 3.2 e Figura 3.3 ilustram as novas características relativas ao projeto de modificação do equipamento original com dimensões de projeto. Por fim, a caixa de cisalhamento apresentou as seguintes dimensões 300 x 300 x 175 mm<sup>3</sup>.



Figura 3.1 – Equipamento de arrancamento de geotêxteis.

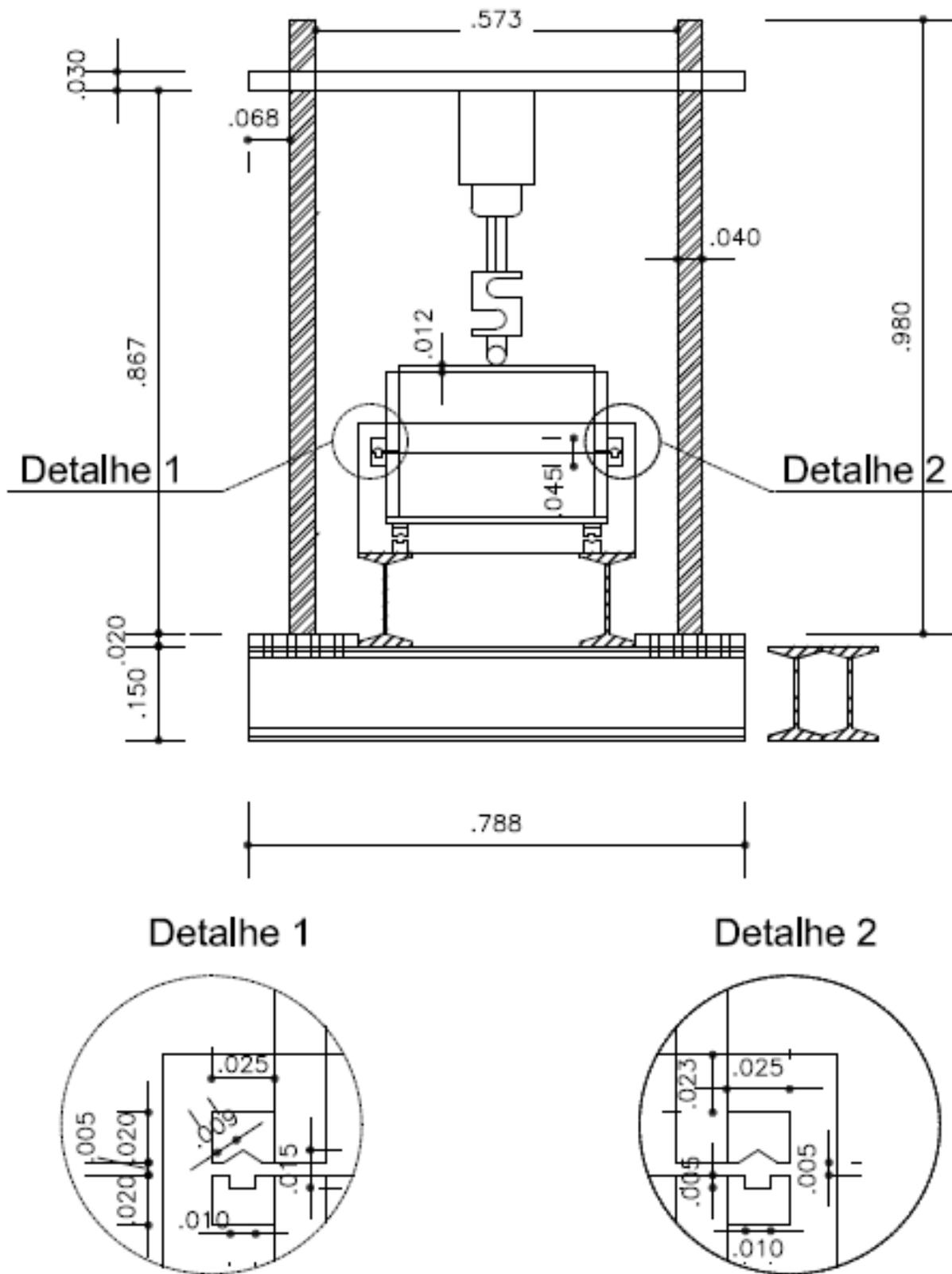


Figura 3.2 – Esquema das componentes da prensa de cisalhamento no corte frontal, medidas em metro (SOUZA, 2011).

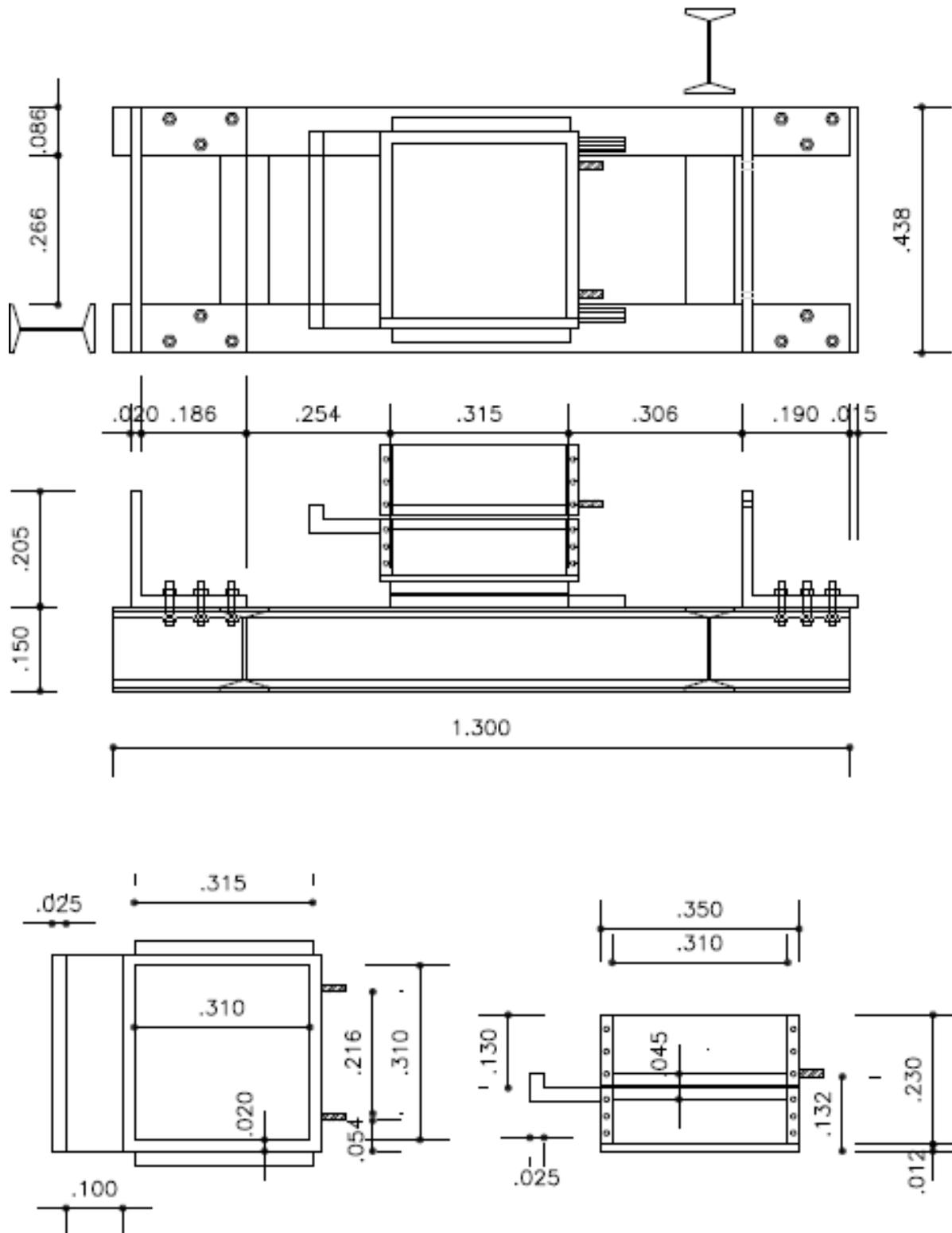


Figura 3.3 – Esquema das componentes da prensa de cisalhamento no corte superior, medidas em metro (SOUZA, 2011).

Para medição da força cisalhante, o equipamento apresenta uma célula de carga que mede o carregamento horizontal durante a sua aplicação. Uma visão geral do equipamento é

apresentada na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Visão geral do equipamento de cisalhamento direto montado.

O sistema de cisalhamento é composto por um circuito hidráulico com dois cilindros hidráulicos, com capacidade de carga de 100 kN cada, que podem aplicar esforços de tração e compressão em um curso de 50 mm. O funcionamento ocorre quando um dos cilindros hidráulicos é posicionado em uma prensa convencional de ensaios triaxiais com o curso aberto, que ao ser ligada, faz com que esse curso seja fechado e, à medida que é comprimido, injeta óleo para o outro cilindro hidráulico por meio de ligação de mangueiras hidráulicas, permitindo que esta transferência de carga se dê em velocidades constantes e preestabelecidas. A Figura 3.5 (a) e (b) mostram detalhadamente o sistema.

A tensão normal é aplicada por um sistema constituído de uma bomba e cilindro hidráulico, com curso de 100 mm, ambos com capacidade de carga de 100 kN como mostra a Figura 3.5 (c).

O sistema de instrumentação deste equipamento consiste em: (i) duas células de carga, sendo uma para medir a força de reação de cisalhamento e a outra para medir a força normal,

(ii) três transdutores de deslocamento, sendo um para medir o deslocamento da caixa (horizontal) e outros dois para verificar o deslocamento na fase de adensamento e a rotação do topo da caixa na aplicação da força normal (vertical). Todos estes sensores estão ligados a um sistema de aquisição de dados (SPIDER 8) para a obtenção dos valores a cada 1 segundo. Os detalhes da instrumentação utilizada para medir os deslocamentos da amostra e as cargas aplicadas podem ser vistos na Figura 3.5(a), (b) e (c).

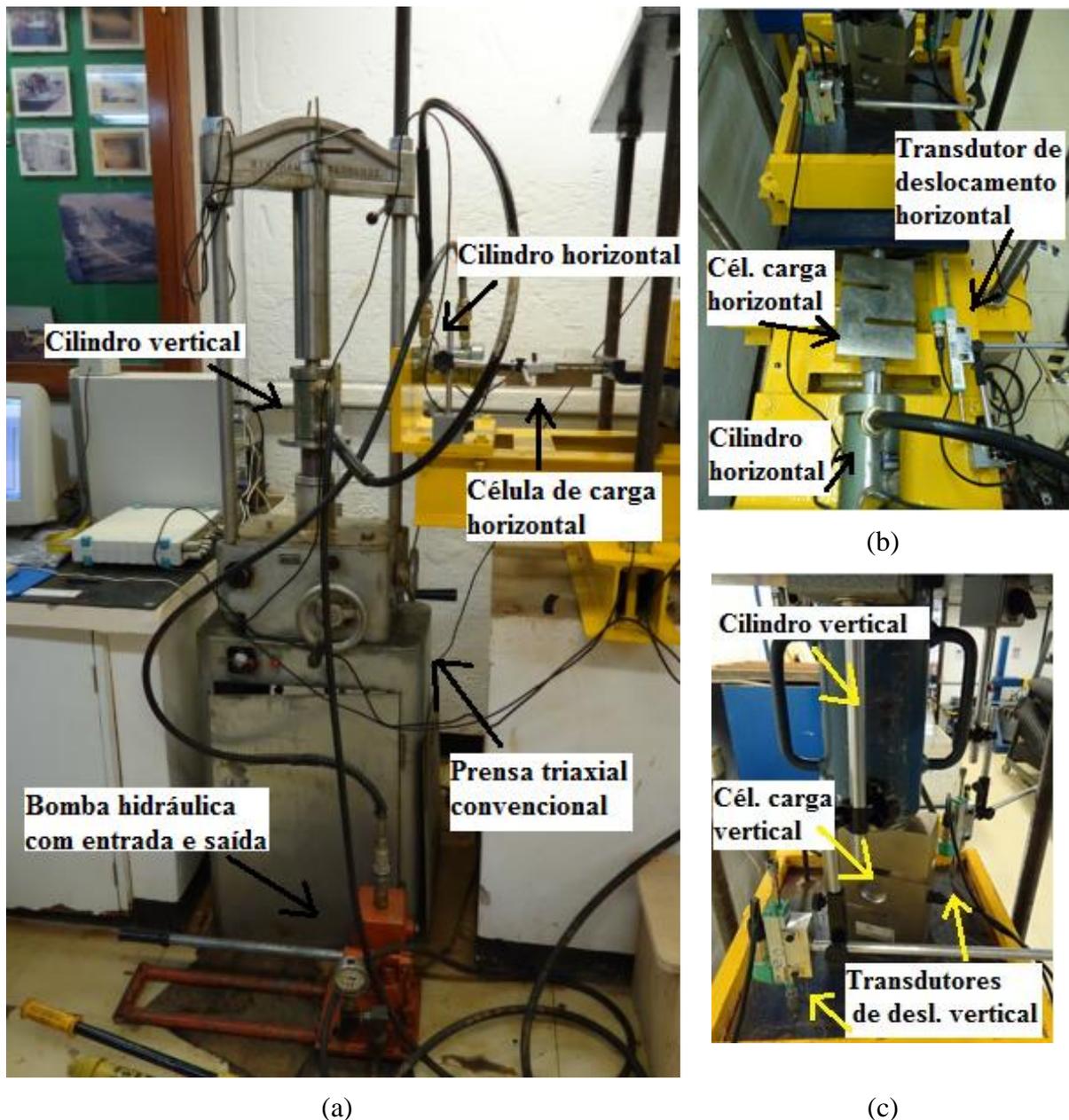


Figura 3.5 – Visão geral dos sistemas mecânicos e de instrumentação: (a) e (b) horizontal e (c) vertical.

### 3.1.2. PENTAPICNOMETRO

O pentapicnometro é um equipamento de última geração que utiliza gás para medir a densidade verdadeira e volume de vários materiais como: pó, catalisadores, cerâmica, carvão, materiais de construção, etc. Existem vários modelos e o utilizado nesta pesquisa foi o Pentapyc 5200E (Figura 3.6).

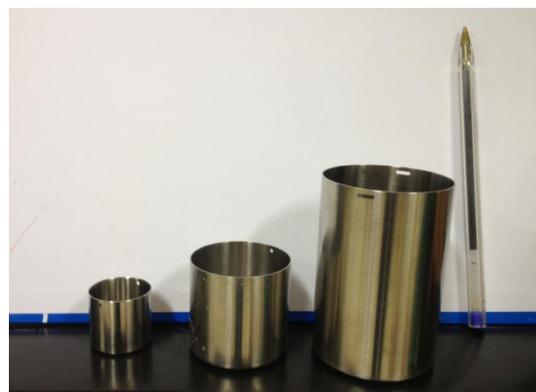


Figura 3.6 – Pentapicnometro modelo pentapyc 5200E.

O pentapyc 5200E funciona da seguinte forma: pode ser carregado por até cinco amostras (Figura 3.7(a)) e, em seguida, as capsulas internas são preenchidas em todo o seu volume por gás Hélio simultaneamente. Cada uma das cinco amostras é então analisada e automaticamente são geradas leituras para cada célula e cada processo de preenchimento de gás, sem o envolvimento do operador.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Dimensões e disposição das capsulas do Pentapicnometro.

Para realização do ensaio, para cada amostra, é possível a utilização de três tipos diferentes de cápsulas internas como mostra a Figura 3.7 (b). O tamanho é escolhido de acordo com o tamanho do material (pequeno, médio e grande). As dimensões das cápsulas internas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dimensões das cápsulas internas do Pentapicnometro.

<b>Tipos das cápsulas</b>	<b>Volume Nominal</b>	<b>Diâmetro Interno</b>	<b>Altura Interna</b>
<b>Grande</b>	135 cm <sup>3</sup>	49 mm	75 mm
<b>Média</b>	50 cm <sup>3</sup>	40 mm	39 mm
<b>Pequena</b>	10 cm <sup>3</sup>	24 mm	23 mm

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1. SOLO DO CAMPUS EXPERIMENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

A amostra de solo aqui denominada por solo de Brasília, que é predominantemente argiloso e colapsível, foi coletada em poços com variação de profundidade de 1,00 – 1,50 m no campus experimental da Pós-Graduação em Geotecnia, situado no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Essa área fica localizada no bairro Asa Norte, na cidade de Brasília, Distrito Federal, cujos dados georreferenciados apresentaram os seguintes valores: 15°45'30''S 47°52'22''O.

A Figura 3.8 (a) mostra a fase inicial da abertura do poço e a Figura 3.8 (b) exibe a profundidade do poço, bem como o perfil do solo, que se apresentava mais seco, devido ao clima da época, e com forte presença de raízes na superfície, de 0 a 1 m de profundidade. A Figura 3.9 apresenta a localização dos poços de coleta.

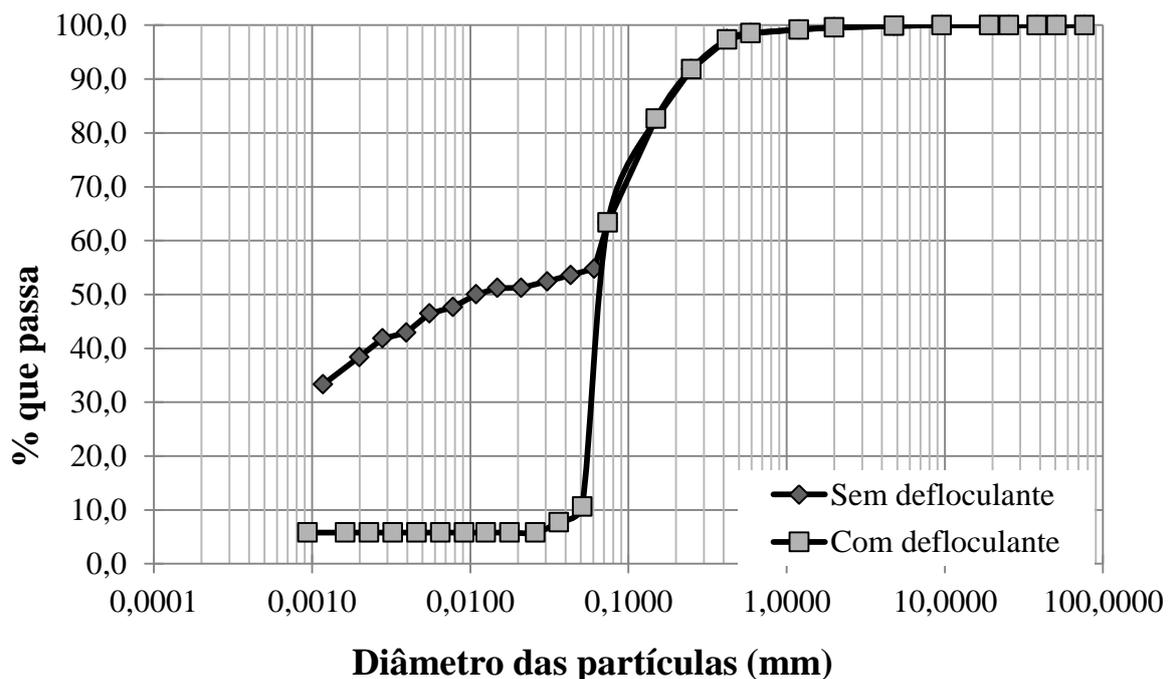


(a) (b)  
Figura 3.8 – (a) Escavação manual e (b) Poço para coleta.



Figura 3.9 - Localização da coleta da amostra no Campus Experimental do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. (GOOGLE EARTH, 2012).

Foram realizados ensaios de caracterização e, em seguida, o solo foi classificado. Para isto, foram realizados os seguintes ensaios: Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, Massa Específica dos Grãos, Curva Granulométrica (com e sem defloculante), conforme as normas brasileiras NBR 6459 (ABNT, 1984a), NBR 7180 (ABNT, 1984b), NBR 6508 (ABNT, 1984c) e NBR 7181 (ABNT, 1984d) respectivamente. A curva granulométrica (com e sem defloculante) é apresentada na Figura 3.10.



Os limites obtidos foram: limite de liquidez igual a 40%, limite de plasticidade de 25%, obtendo um índice de plasticidade de 15%. Baseando-se nesses resultados, o solo foi classificado como CL, ou seja, uma argila de baixa plasticidade.

Foram também realizados ensaios de compactação e cisalhamento direto convencional. O ensaio de compactação seguiu os procedimentos da norma NBR 7182 (ABNT, 1986a), sem reuso de material, sobre amostras de solo preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica. A Figura 3.11 apresenta a curva de compactação para o solo. Com esse resultado, foi obtido um  $\gamma_d$  de 15,02 kN/m<sup>3</sup> para uma umidade ótima de 24,1% e a massa específica dos grãos foi de 2,68.

Conhecido o teor de umidade ótimo e o peso específico seco máximo, as amostras foram preparadas para o ensaio de cisalhamento direto. Segundo a ASTM D 3080 (ASTM, 1998) este ensaio consiste na aplicação de uma força normal de confinamento em três estágios, cisalhando a amostra em um plano de ruptura pré-determinado com velocidade constante, neste caso 0,05 mm/min, para a obtenção da tensão de cisalhamento máxima do solo. Esta velocidade foi determinada relacionando a velocidade dos ensaios de cisalhamento direto de médias dimensões para que ambos tivessem a mesma condição.

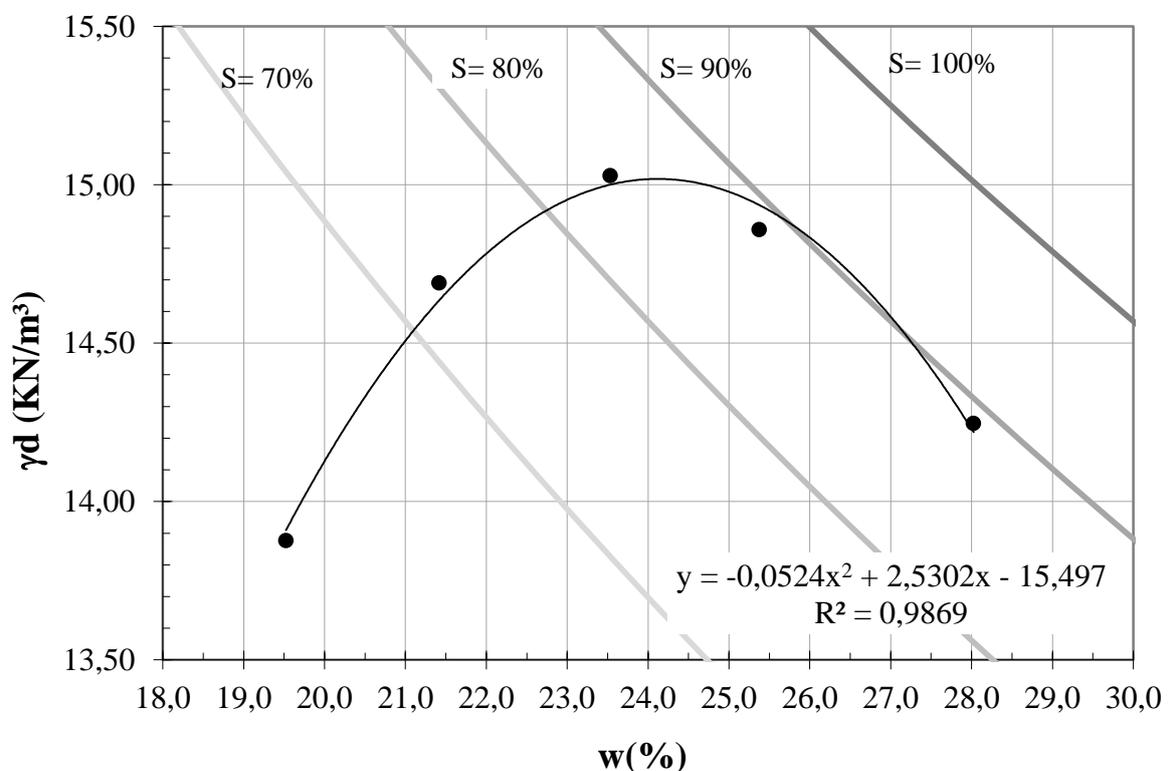


Figura 3.11- Curva de compactação do solo de Brasília.

A Figura 3.12 apresenta as curvas de tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal para as três tensões de confinamento aplicadas ao solo utilizado. As tensões confinantes de 25 kPa, 50 kPa e 80 kPa foram escolhidas em função das tensões confinantes do ensaio de cisalhamento direto de médias dimensões.

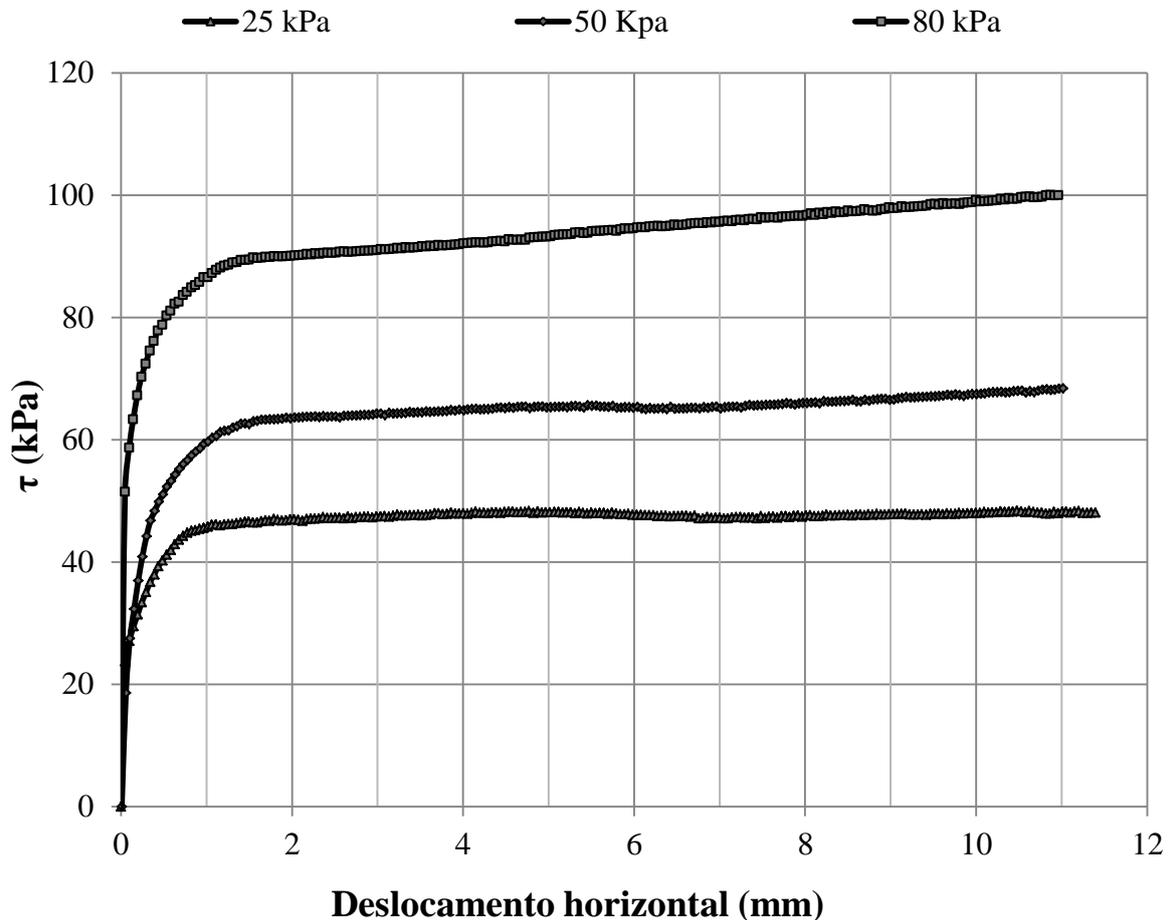


Figura 3.12- Curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal para o solo de Brasília.

Para a realização desses ensaios, os corpos de prova foram compactados na umidade ótima a partir do volume da caixa de cisalhamento. Com o conhecimento da altura da caixa de cisalhamento obteve-se o volume de solo na caixa (cujas dimensões eram 60 mm x 60 mm X 20 mm) e em função do peso específico obtido, calculou-se a massa de solo a ser inserida na caixa de cisalhamento. A compactação foi realizada por carregamento estático.

Baseando-se nos resultados obtidos, obteve-se para o solo estudado uma coesão de 23,4 kPa e um ângulo de atrito de 43°, conforme mostra a Figura 3.13 que apresenta a envoltória de ruptura do solo.

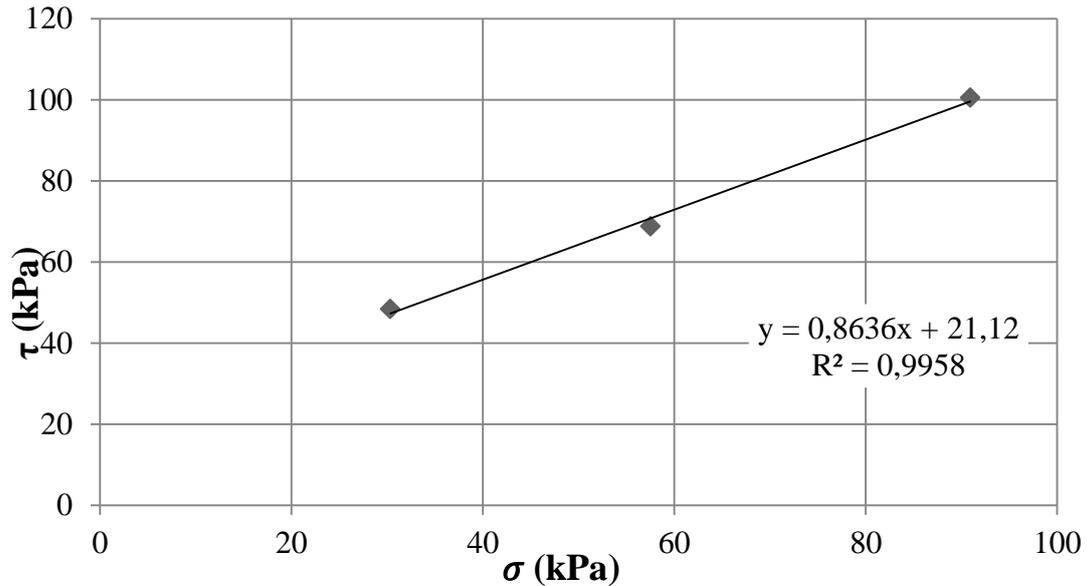


Figura 3.13- Envoltória de Mohr-Coulomb no ensaio de cisalhamento direto (com dimensões 60 X 60 x 20 mm<sup>3</sup>) para o solo de Brasília.

### 3.2.2. RESÍDUOS DE PNEU

Os resíduos de pneu utilizados foram obtidos por meio de doação do setor de destinação de pneus da empresa JLS transportes, com sede em Abadia de Goiás/GO, que os tritura mecanicamente. A Figura 3.14 mostra os fragmentos de borracha enviados ao Laboratório de Geotecnia da UnB. Segundo a proposta de Edinçliler *et al.* (2010) os fragmentos utilizados foram classificados como pedaço de pneu (*tire shred*) por ainda apresentar fios de aço, barbantes e seus demais componentes.



Figura 3.14- Resíduos de pneus triturados utilizados nesta pesquisa.

Os pedaços de borracha foram caracterizados, sendo realizados os seguintes ensaios: análise granulométrica e massa específica dos grãos. O ensaio de análise granulométrica foi realizado conforme a norma brasileira NBR 7181 (ABNT, 1984b), fazendo assim uma analogia ao comportamento da borracha como um agregado graúdo.

Como os fragmentos de borracha foram cedidos em duas etapas, uma primeira por volta de 20 quilos, uma segunda por volta de 130 quilos para cada uma das etapas foi realizado uma curva de granulometria.

Para a quantidade de borracha da 1ª etapa entregue, foi realizada a curva granulométrica com uso de todo o material. Já para a segunda etapa, devido a sua alta quantidade foi realizado um quarteamento (Figura 3.15 (a)), obtendo-se três amostras para melhor representá-la.



(a)



(b)

Figura 3.15- (a) Quarteamento dos resíduos de borracha da segunda etapa e (b) Visualização dos resíduos de pneu triturado que ficam retidos nas peneiras # 10, #16 e #30.

As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 3.16. Observa-se que em todas as análises realizadas nas curvas granulométricas observou-se um predomínio de partículas com tamanho nominal entre 4 e 25,4 mm. Outro ponto de interesse é que nas peneiras inferiores a 4 mm existe um predomínio maior de barbantes e pedaços de metal que a própria borracha (Figura 3.15 (b)). Devido a isto, as partículas adotadas nos ensaios foram as do intervalo de 4 a 25,4 mm. Observa-se ainda que as curvas granulométricas da 2ª etapa apresentaram características muito similares comprovando a qualidade do quarteamento e a pouca variação as duas remessas fornecidas.

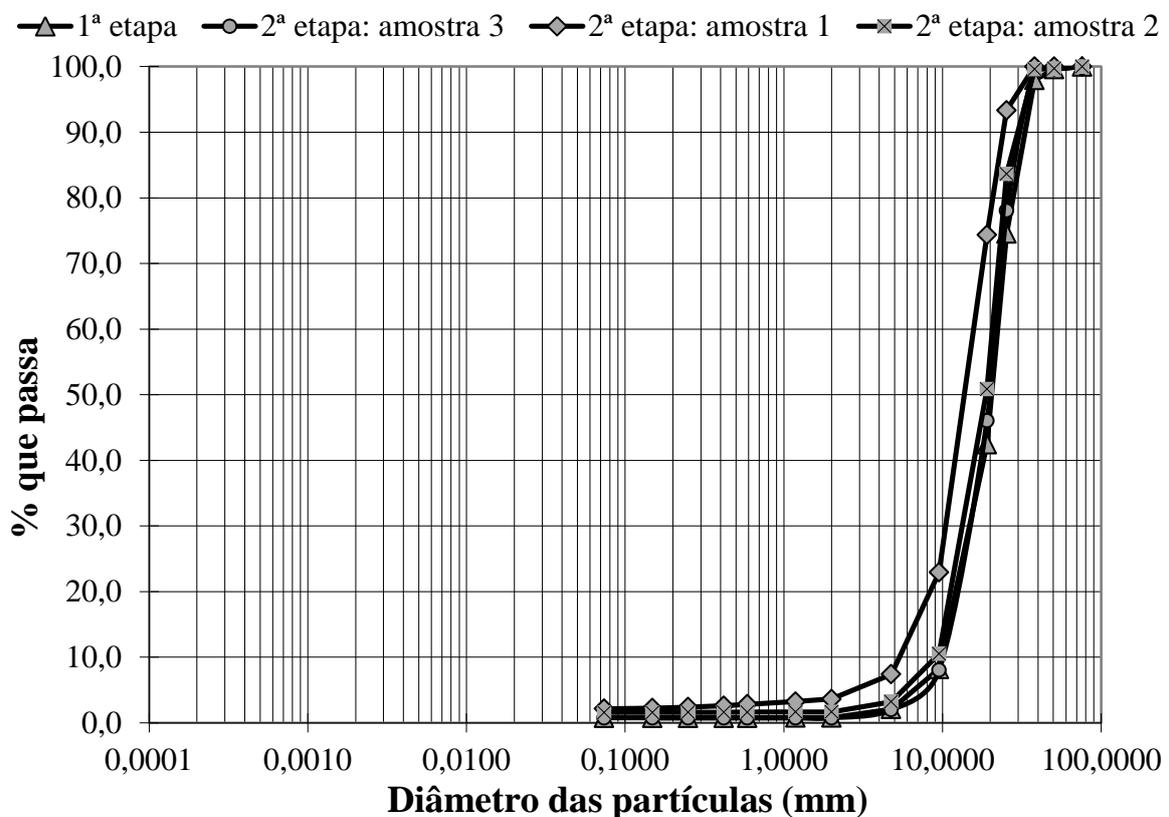


Figura 3.16- Curva Granulométrica dos pedaços de pneu utilizados.

Para o ensaio de massa específica dos grãos foi utilizado o pentapícnometro, apresentado na Figura 3.17 (a) e descrito no item 3.1.2. Este equipamento foi utilizado tendo em vista a necessidade de determinação dessa massa específica e da impossibilidade de sua determinação pelos métodos tradicionais. Na Figura 3.17 (b) é apresentado o material utilizado neste ensaio.

A partir da amostra total de pedaço de pneu foram selecionadas aleatoriamente amostras para a realização deste ensaio. Em seguida, as amostras foram colocadas em cada

uma das cinco cápsulas grandes. Na Tabela 3.2 são apresentados os resultados do ensaio, onde observa-se uma variação nos valores encontrados devido a heterogeneidade do material, assim para o cálculo do  $G_s$  foi adotado a média destas leituras que foi de 1,18656.



(a)



(b)

Figura 3.17- Ensaio de massa específica dos grãos: (a) equipamento e (b) a borracha utilizado.

Tabela 3.2 – Determinação do  $G_s$  por média das leituras do Pentapicnometro.

<b>Fase</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>MÉDIA</b>
<b>Célula 1</b>	1,2056	1,2071	1,2095	1,2051	1,2058	1,20662
<b>Célula 2</b>	1,1917	1,1909	1,19	1,1895	1,1874	1,1899
<b>Célula 3</b>	1,1797	1,18	1,1806	1,1796	1,1802	1,18002
<b>Célula 4</b>	1,2128	1,2124	1,2132	1,212	1,2116	1,2124
<b>Célula 5</b>	1,1523	1,1426	1,142	1,1413	1,141	1,14384
<b>Final</b>						1,18656

## 4 - METODOLOGIA DA PESQUISA

---

Neste capítulo está apresentada a metodologia deste projeto para obtenção dos objetivos traçados. São mostrados os teores de borracha propostos e os ensaios realizados com as misturas, bem como o procedimento de determinação das curvas relevantes.

### 4.1 ESTUDO DOS TEORES DE BORRACHA

Após o término das atividades de caracterização dos materiais utilizados separadamente, foi pesquisado, em estudos anteriores, as porcentagens de borracha utilizadas objetivando obter uma base na definição das porcentagens de pedaço de borracha que seriam estudadas nesta pesquisa.

Assim, foram definidos inicialmente os teores iniciais de 5, 10 e 15% com relação ao peso, porém, durante a execução da compactação, observou-se que com 5% de borracha existia uma grande dificuldade no processo de compactação e quando desconfinadas as amostras apresentavam grandes fissuras (Figura 4.1). Analisando os resultados deste ensaio, foi decidido o estudo dos seguintes teores: 2,5%, 3,75% e 7,5%.



Figura 4.1- Amostra com 5% de compactação, apresentação de fissuras.

O peso de borracha misturado para cada ensaio foi definido segundo a metodologia de Zornberg *et al* (2004), com mesma terminologia, como:

$$W_{ts} = W_s \left( \frac{X_{bor}}{100 - X_{bor}} \right) \quad (4.1)$$

Onde:  $W_{ts}$  o peso das tiras de borracha,  $W_s$  o peso do solo seco e  $X_{bor}$  a porcentagem de borracha.

Para cada ensaio, foi determinada a quantidade de solo e borracha necessários, e foram preparados de acordo com as normas pertinentes. Os procedimentos de cada ensaio, tanto quanto a preparação da amostra como a metodologia do ensaio propriamente dito seguem nos itens abaixo.

## 4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação seguiu os procedimentos da NBR 7182 (ABNT, 1986a), sem reuso de material, sobre amostras de solo preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica.

A partir destas amostras de solo secas, foram separados 4,5 kg de solo para cada ponto da curva e adicionado à água até a umidade desejada, sendo esta mistura deixada em câmara úmida por vinte e quatro horas ou mais para a completa homogeneização. Passado este tempo, foi verificada a umidade com a utilização da estufa segundo o anexo da NBR 6457 (ABNT, 1986b), e misturado ao solo às quantidades de borracha pertinentes.

O cálculo do peso de borracha a acrescentar está apresentado na Tabela 4.1. Esta tabela foi determinada a partir da metodologia de Zornberg *et al* (2004) citada anteriormente. O 1º teor não está presente, pois refere-se ao teor de 0% de borracha. Após a mistura do solo com a borracha, a mesma permaneceu na câmara úmida por mais vinte e quatro horas para uma homogeneização da umidade.

Após a preparação das amostras, as mesmas foram compactadas com o uso do cilindro e do soquete grande (Figura 4.2 (a)). A Figura 4.2 (b) mostra uma camada em processo de compactação, onde se pode observar a presença de pedaços de borracha. No caso da última camada, a borracha que ultrapassava a altura do cilindro era retirada com auxílio de tesoura (Figura 4.2 (c)).

Tabela 4.1- Cálculo das quantidades de pedaços de pneus a serem acrescentadas ao solo.

Ensaio	Umidade	Teor de Borracha	Peso do saco úmido (kg)	Peso da borracha seca (kg)
T02	20,93	2,50%	4,95	0,105
T02	22,15	2,50%	4,90	0,103
T02	24,26	2,50%	5,06	0,104
T02	25,98	2,50%	4,87	0,099
T02	27,92	2,50%	5,24	0,105
T03	18,82	3,75%	5,16	0,169
T03	20,91	3,75%	5,25	0,169
T03	23,66	3,75%	5,06	0,159
T03	25,06	3,75%	5,35	0,166
T03	27,18	3,75%	5,40	0,165
T04	21,90	5,00%	4,78	0,206
T04	20,90	5,00%	4,76	0,202
T04	23,65	5,00%	4,85	0,204
T04	25,05	5,00%	4,99	0,208
T04	27,17	5,00%	5,00	0,204
T05	20,24	7,50%	4,69	0,316
T05	22,26	7,50%	4,72	0,313
T05	24,65	7,50%	4,91	0,319
T05	26,05	7,50%	4,76	0,306
T05	27,91	7,50%	4,79	0,303

Nota: T02: teor utilizado no 2º ensaio com 2,5% de borracha

T03: teor utilizado no 3º ensaio com 3,75% de borracha

T04: teor utilizado no 4º ensaio com 5% de borracha

T05: teor utilizado no 5º ensaio com 7,5% de borracha

Com o ensaio, foram obtidos os valores de peso específico seco máximo de cada cilindro com a variação da umidade para cada um dos teores de borracha utilizados. Para o traçado das curvas de saturação foi utilizado uma média ponderada entre os teores e o valor de  $G_s$  para a borracha e para o solo, a equação a seguir apresenta esta média.

$$G_{seq} = \frac{G_{sbor} \times X_{bor} + G_{solo} \times X_{solo}}{100\%} \quad (4.2)$$

Sendo,  $G_{seq}$  a massa específica dos sólidos da mistura, o  $G_{sbor}$  a massa específica dos

sólidos de borracha,  $X_{bor}$  o teor de borracha da mistura,  $G_{s_{solo}}$  a massa específica dos sólidos do solo e  $X_{solo}$  o teor de solo da mistura.

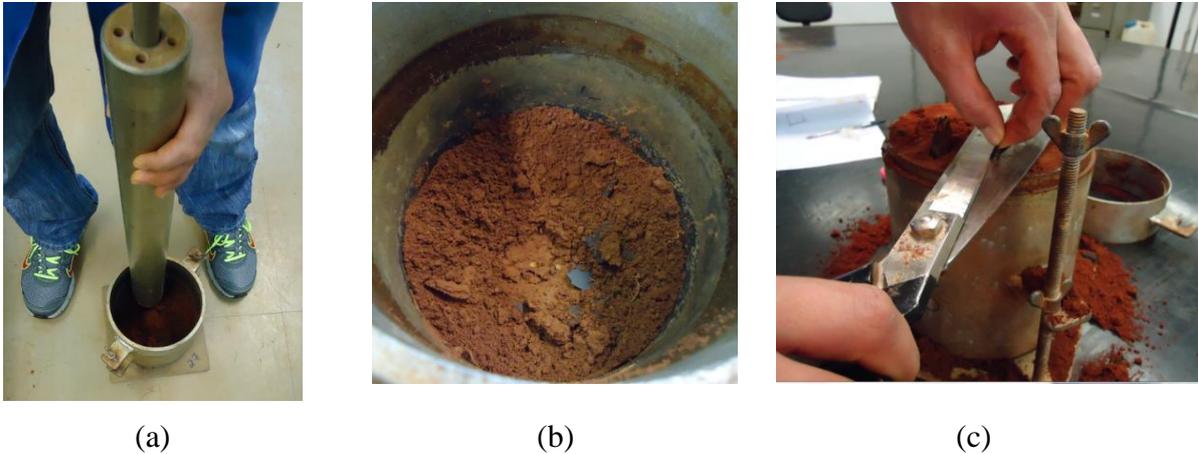


Figura 4.2- Ensaio de compactação, execução: (a) cilindro e soquete, (b) 1ª camada e (c) corte com tesoura das pontas de pedaços de pneu possíveis.

### 4.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DE MÉDIAS DIMENSÕES

Para os ensaios de cisalhamento direto em maior escala, após a determinação dos pesos específicos máximos para cada teor de borracha, foram preparadas amostras com sequência similar às preparadas para o ensaio de compactação. A partir das amostras de solo secas, foram preparados cerca de 100 quilos de solo adicionando à água até a umidade desejada, neste caso, a umidade ótima para cada teor de borracha.

Após o tempo de homogeneização, foi conferido o teor de umidade, conforme o anexo da NBR 6457 (ABNT, 1986b). Por fim, foram adicionados os pedaços de borracha e esta mistura guardada na câmara úmida por 24 horas para sua homogeneização.

Devido ao tamanho das amostras para o ensaio, foi necessário que a compactação das amostras na caixa de cisalhamento fosse realizada através de compactação estática. Para uma melhor homogeneização da amostra, sua altura foi dividida em três camadas, duas de 58,3 mm e a última de 58,4 mm totalizando uma altura de 175 mm.

Assim, foram então separados da amostra total três sacos, sendo o conteúdo de cada um o peso necessário para execução de cada camada. Apresenta-se na Figura 4.3 a sequência de compactação estática mostrando a divisão das três camadas, seguida da colocação do solo e do processo de prensagem e por fim a escarificação entre as camadas.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3- Sequência de preparação das amostras para o ensaio de cisalhamento direto em médias dimensões: (a) detalhamento das alturas de cada camada na caixa. (b) deposição do material, (c) compactação estática, (d) camada compactada e (e) escarificação entre camadas.

Os valores para realização do processo de compactação estática, conforme apresentados na Figura 4.3 estão descritos na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**

Tabela 4.2 - Cálculo dos pesos da mistura para cada teor de borracha.

<b>Teor de borracha:</b>	<b>Densidade:</b>	1,89	g/cm <sup>3</sup>		
2,5%	<b>camada</b>	<b>1<sup>a</sup></b>	<b>2<sup>a</sup></b>	<b>3<sup>a</sup></b>	<b>Total</b>
<b>Umidade Ótima:</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	6073,364	5566,484	5576,032	17215,88
24,40%	<b>Peso (kg)</b>	11,48	10,52	10,54	32,54
<b>Teor de borracha:</b>	<b>Densidade:</b>	1,85	g/cm <sup>3</sup>		
3,75%	<b>Camada</b>	<b>1<sup>a</sup></b>	<b>2<sup>a</sup></b>	<b>3<sup>a</sup></b>	<b>Total</b>
<b>Umidade Ótima:</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	6073,364	5566,484	5576,032	17215,88
w <sub>ot</sub> =24,5%	<b>Peso (kg)</b>	11,24	10,30	10,32	31,85
<b>Teor de borracha:</b>	<b>Densidade:</b>	1,83	g/cm <sup>3</sup>		
5%	<b>Camada</b>	<b>1<sup>a</sup></b>	<b>2<sup>a</sup></b>	<b>3<sup>a</sup></b>	<b>Total</b>
<b>Umidade Ótima:</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	6073,364	5566,484	5576,032	17215,88
w <sub>ot</sub> = 24,53%	<b>Peso (kg)</b>	11,11	10,19	10,20	31,51
<b>Teor de borracha:</b>	<b>Densidade:</b>	1,82	g/cm <sup>3</sup>		
7,50%	<b>Camada</b>	<b>1<sup>a</sup></b>	<b>2<sup>a</sup></b>	<b>3<sup>a</sup></b>	<b>Total</b>
<b>Umidade Ótima:</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	6073,364	5566,484	5576,032	17215,88
w <sub>ot</sub> = 24,9%	<b>Peso (kg)</b>	11,05	10,13	10,15	31,33

Com a realização da compactação da amostra, foram então aplicadas as pressões normais nos valores de 25, 50 e 80 kPa, como procedimento, foi aguardado o tempo de adensamento da amostra, em média 14 horas, e assim dado início ao processo de cisalhamento.

Para que o ensaio ocorresse em conformidade com a Norma ASTM D 3080/98, condições drenadas e adensadas, foi calculada a velocidade de ensaio a partir do parâmetro  $t_{90}$  obtido pelas curvas de adensamento. Foi estimada pela prática com o solo usado na pesquisa uma velocidade mínima de 0,01016 mm/mim. Como as curvas apresentaram velocidades superiores à mínima, esta foi a adotada em todos os ensaios, totalizando a duração de cada ensaio em média de sete horas.

Alguns estudos apresentaram grande influência da rugosidade da face da lateral da caixa de cisalhamento na tensão normal no plano de ruptura, esta foi corrigida pela proposta de Palmeira (2009) que pode ser observada na Figura 4.4 e a nova tensão normal é dada pela equação a seguir,

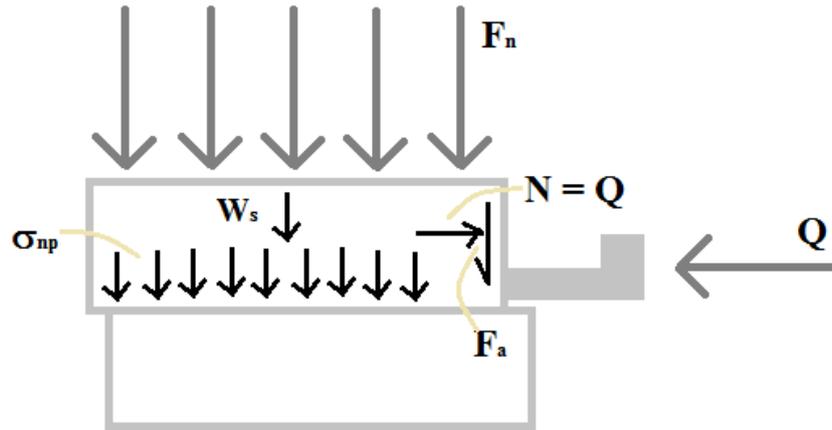


Figura 4.4- Analogia utilizada por Palmeira (2009).

$$\sigma_{np} = \sigma_n + \frac{w_s + (Q + \sigma_n A_L k_0) \times \tan \varphi_{sw}}{A} \quad (4.3)$$

Sendo,  $\sigma_{np}$  a tensão normal no plano de ruptura,  $\sigma_n$  a tensão normal aplicada pela bomba hidráulica,  $w_s$  a força peso da parte superior ao plano de ruptura,  $Q$  a máxima força de cisalhamento,  $A_L$  é a área lateral de atuação da carga,  $k_0$  é coeficiente de empuxo no repouso,  $\varphi_{sw}$  o ângulo de atrito entre o solo e a parede da caixa e  $A$  a área de atuação da força normal.

Como o ensaio durou em média 24 horas, foram verificadas as umidades iniciais e finais de todos os ensaios, sendo a umidade final verificada no topo no meio e na base da amostra.

## 5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compactação e cisalhamento direto em médias dimensões. Foram realizados ensaios de compactação para determinação dos teores de umidade ótimos e, após isso, os resultados foram então utilizados para determinação da quantidade de solo e borracha a utilizar nos ensaios de cisalhamento. Por fim, os ensaios de cisalhamento foram executados para verificação da influência do teor de resíduos de borracha na resistência ao cisalhamento do solo estudado.

### 5.1 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados para a análise da influência do teor de borracha nas propriedades das misturas. Da Figura 5.1 à Figura 5.4 são apresentados os resultados de compactação para os teores de borracha, em peso, de 2,5%, 3,75%, 5% e 7,5%, respectivamente. Pelos resultados obtidos, verifica-se que o ramo úmido da curva está entre as curvas de 80% a 100% de saturação. Cabe salientar que, para o cálculo dessas curvas, utilizou-se um  $G_s$  médio, baseado nos valores de massa específica dos grãos do solo e da borracha e de teores em porcentagem utilizados.

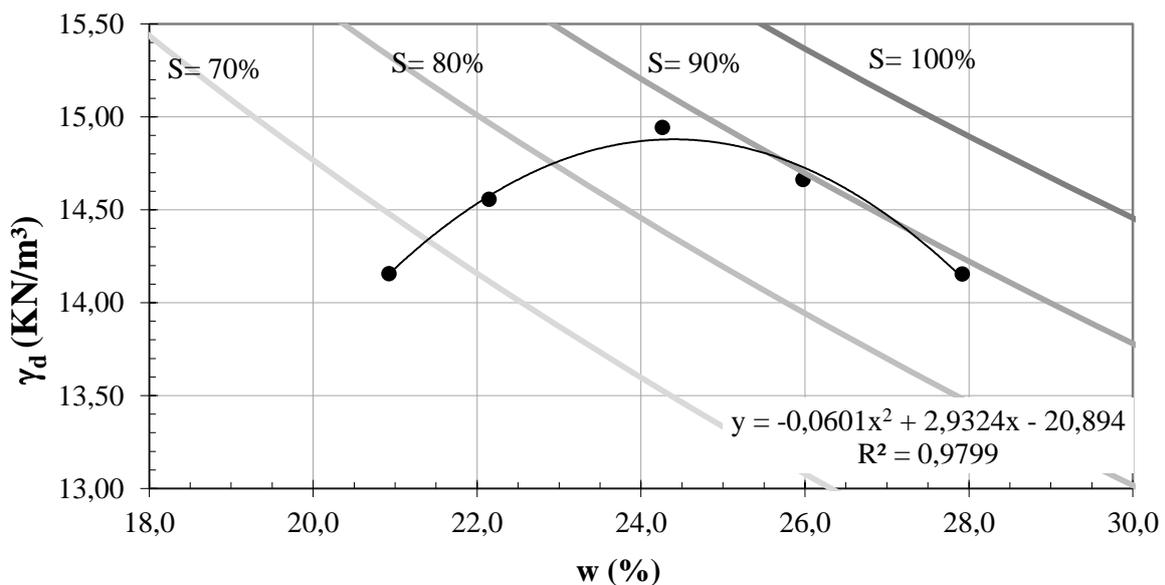


Figura 5.1- Curva de compactação para mistura com 2,5% de resíduos de pneu (T02).

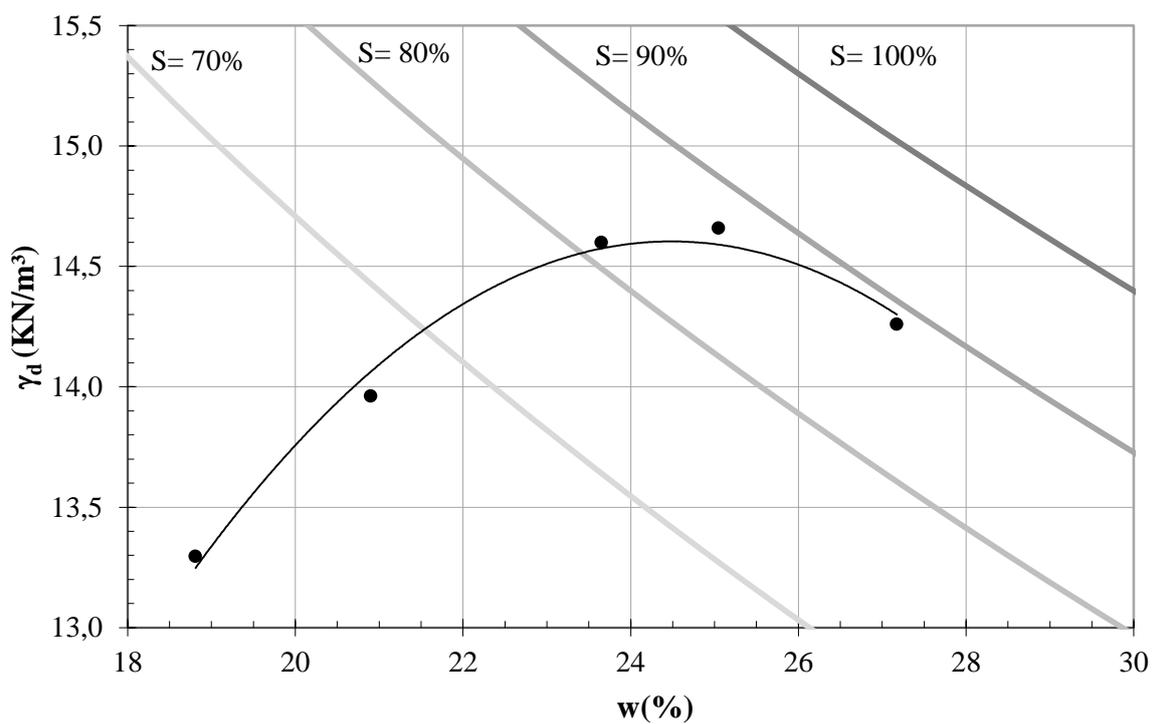


Figura 5.2- Curva de compactação para mistura com 3,75% de resíduos de pneu (T03).

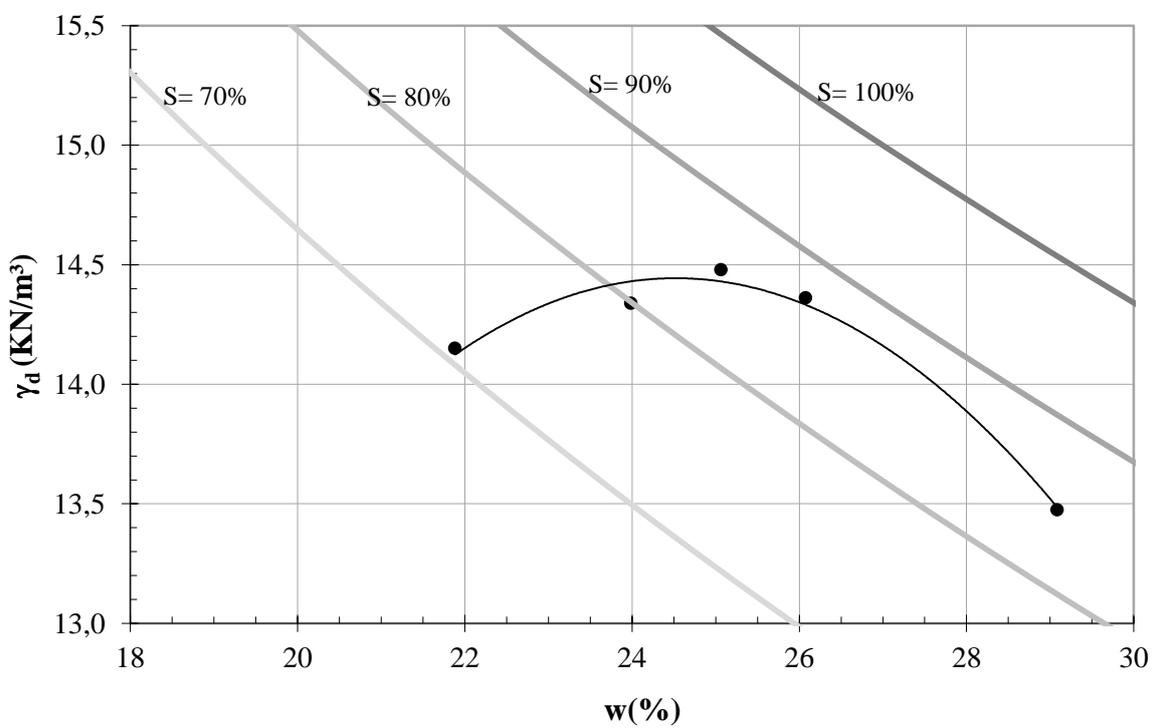


Figura 5.3- Curva de compactação para mistura com 5% de resíduos de pneu (T04).

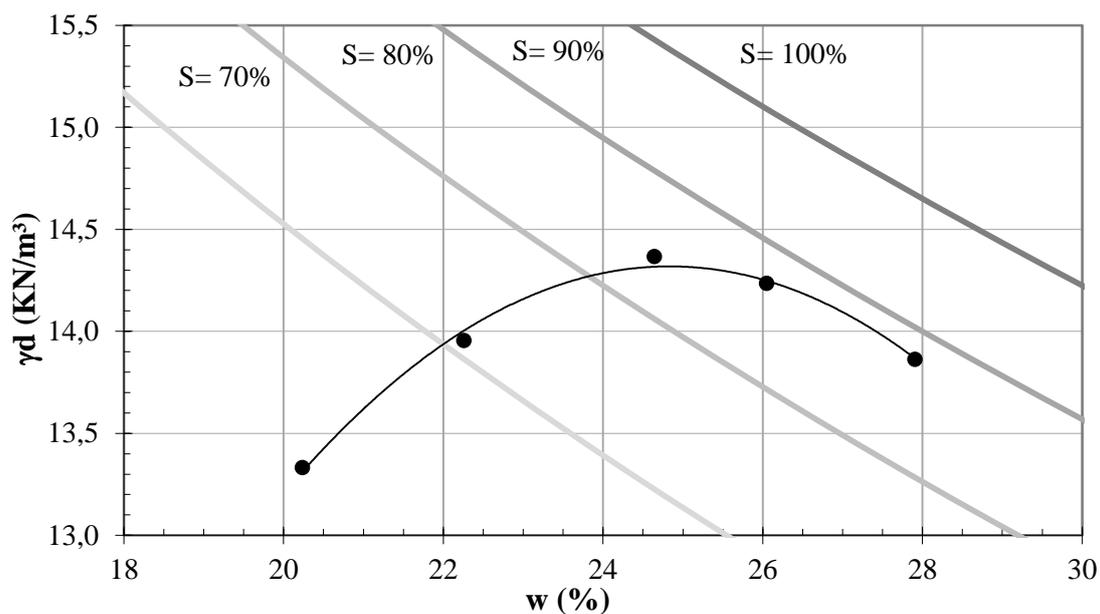


Figura 5.4- Curva de compactação para mistura com 7,5% de resíduos de pneu (T05).

Na Tabela 5.1 apresenta-se o resumo das curvas apresentadas anteriormente. Observa-se que todas as curvas obtiveram bons resultados de  $R^2$  (valores maiores que 0,98) mostrando uma boa relação entre as compactações e as variações de umidade, é apresentado também  $\rho$  que foi utilizado para determinação dos pesos das amostras. Já a Figura 5.5 apresenta todas as curvas de compactação em um só gráfico para uma comparação entre os comportamentos apresentados.

Tabela 5.1 - Valores dos pesos específicos secos máximos e umidades ótimas para os ensaios realizados.

Ensaio	Teor de borracha	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{ot}$ (%)	$R^2$
<b>T01</b>	0%	15,02	24,12	0,987
<b>T02</b>	2,50%	14,88	24,40	0,980
<b>T03</b>	3,75%	14,60	24,50	0,984
<b>T04</b>	5,00%	14,44	24,53	0,981
<b>T05</b>	7,50%	14,32	24,83	0,992

Observa-se que, à medida que o teor de resíduo de borracha é acrescentado este exerce certa influência sobre o peso específico seco máximo das misturas, diminuindo em até 4,66% para misturas com 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 variação de

umidade de 2% para mais ou menos, esta umidade permaneceu a mesma.

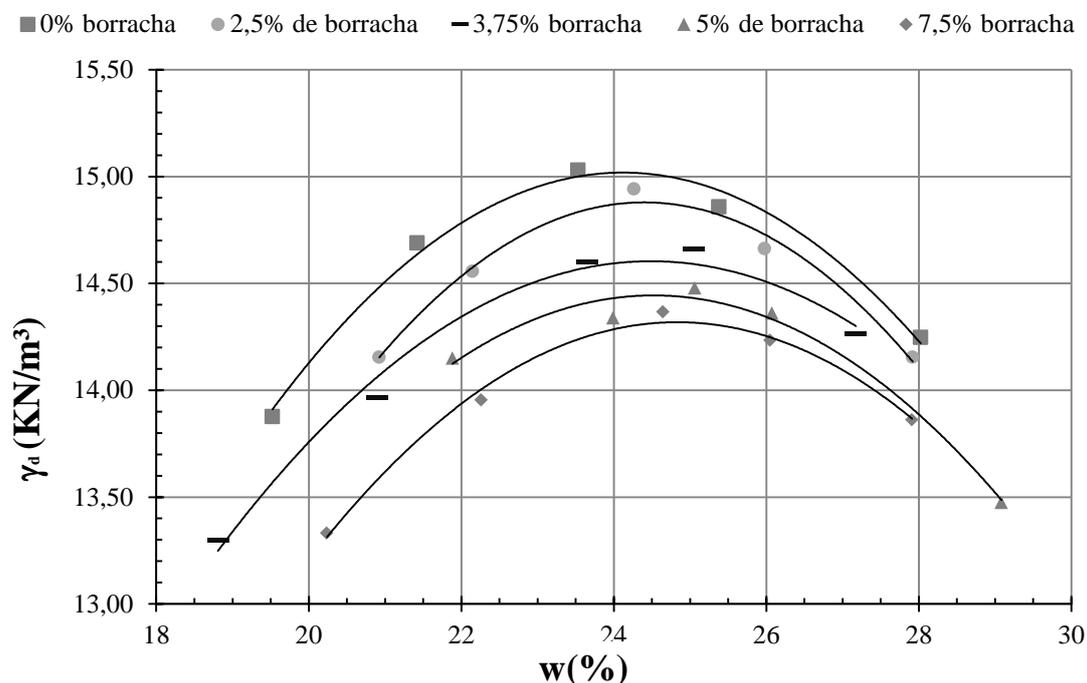


Figura 5.5- Curvas de compactação para todos os teores.

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados das correlações do índice de vazios e a umidade, e na Figura 5.6 são apresentadas estas relações. Observa-se o índice de vazios não apresentou grandes variações, logo, não existiu diferença do teor de borracha na compactação final, ou seja, teoricamente não houve mudança no comportamento do solo. Assim pode-se concluir que o teor de pedaços de borracha não alterou a eficiência do processo de compactação.

Tabela 5.2 - Valores dos índices de vazios para os ensaios de compactação.

Ensaio	Teor de borracha	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	Gs	$\gamma_w$ (kN/m <sup>2</sup> )	e
T01	0%	13,8765	19,52356	2,68	10	0,9313231
	0%	14,68991	21,419953			0,8243810
	0%	15,02933	23,533004			0,7831802
	0%	14,85805	25,37718			0,8037360
	0%	14,24653	28,02534			0,8811599
T02	2,5%	14,15483	20,925245	2,64	10	0,8669696
	2,5%	14,55602	22,148639			0,8155127
	2,5%	14,94227	24,264841			0,7685825

	2,5%	14,66307	25,976524			0,8022588
	2,5%	14,15427	27,919539			0,8670437
T03	3,75%	13,29627	18,815516	2,62	10	0,9734833
	3,75%	13,96152	20,90768			0,8794492
	3,75%	14,59905	23,659706			0,7973744
	3,75%	14,65883	25,057731			0,7900441
	3,75%	14,26008	27,183663			0,8400997
T04	5%	14,1501	21,895661	2,61	10	0,8412088
	5%	14,33894	24,001003			0,8169604
	5%	14,4788	25,076095			0,7994088
	5%	14,36135	26,075			0,8141243
	5%	13,47429	29,098998			0,9335556
T05	7,5%	13,33135	20,237147	2,57	10	0,9262805
	7,5%	13,95425	22,260811			0,8402936
	7,5%	14,36584	24,64671			0,7875679
	7,5%	14,23436	26,051653			0,8040800
	7,5%	13,86164	27,910469			0,8525886

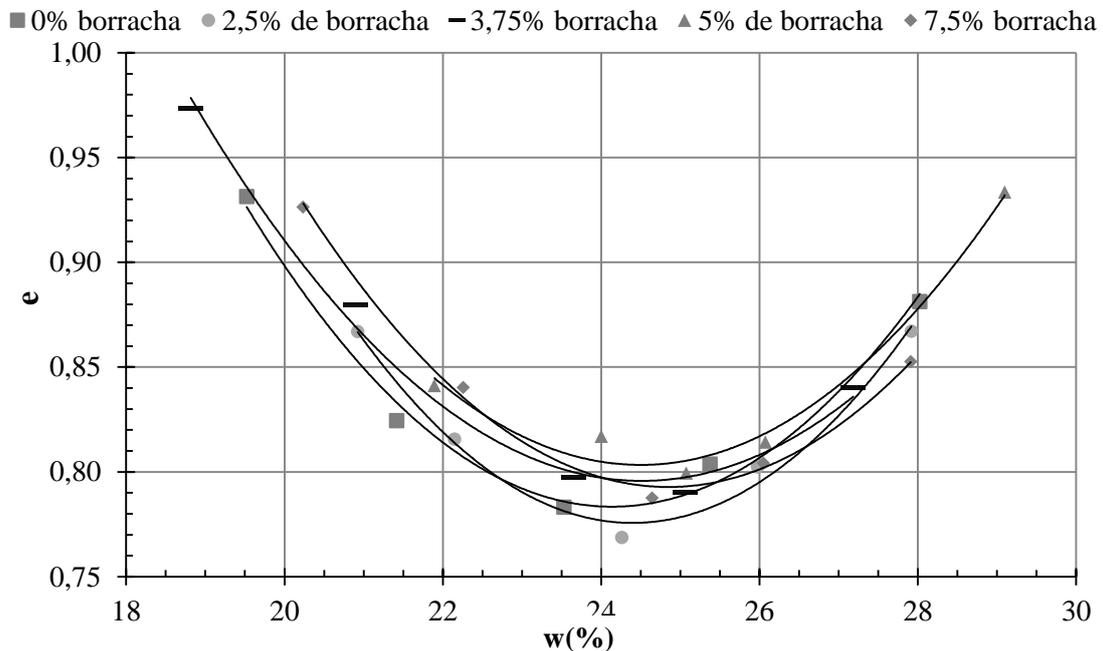


Figura 5.6- Curvas de índice de vazios para todos os teores.

A Figura 5.7 apresenta os corpos-de-prova dos ensaios de compactação para todos os teores com acréscimo de pedaços de borracha de pneu. Observa-se que em todas as porcentagens os corpos de prova quando desconfinados apresentaram trincas entre o solo e os pedaços de borracha de pneu e a Figura 5.8 mostra claramente onde a mistura apresenta a

maior fraqueza que é neste contato.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.7- Corpos de prova dos ensaios de compactação, variando a umidade, para os teores: (a) T02 (teor de 2,5% de borracha), (b) T03 (teor de 3,75% de borracha), (c) T04 (teor de 5% de borracha) e (d) T05 (teor de 7,5% de borracha).

Outra observação é que quanto menor a umidade maior a quantidade de trincas, isto pode ocorrer, pois o solo mais úmido impregna nos pedaços de borracha e o oposto acontece

quando ele está seco. Quanto às trincas em geral, este fenômeno ocorre, pois a borracha quando desconfinada libera a energia que recebeu quando foi compactada. Para a mistura T04 (5%) a amostra mais seca foi totalmente perdida no processo de retirada da amostra do cilindro.



Figura 5.8- Plano de fraqueza da mistura: entre o solo e os pedaços de borracha.

Na Figura 5.9 e na Figura 5.10 apresentam-se as relações entre os teores de resíduo e as umidades e os teores de resíduo e os pesos específicos secos máximos obtidos. Observa-se uma linearidade em ambas as relações. Para o caso da relação entre o teor de resíduo de borracha utilizado, nota-se uma relação crescente com o teor de umidade ótima ( $w_{ot}$ ). Já para a relação com o peso específico aparente seco máximo, essa relação é decrescente.

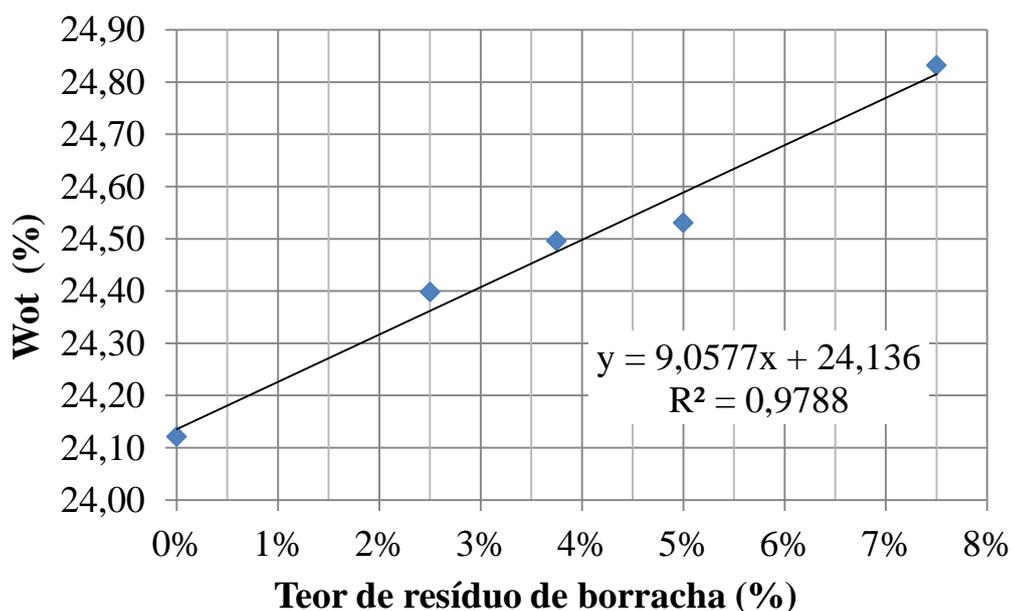


Figura 5.9- Relação entre o teor de borracha e a umidade.

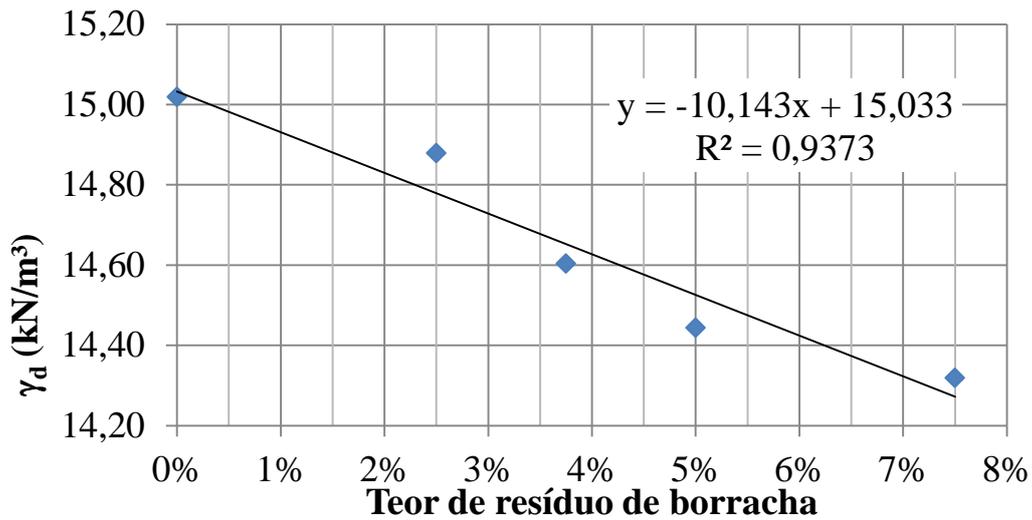


Figura 5.10- Relação entre o teor de borracha e o peso específico aparente máximo.

## 5.2 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO EM MÉDIAS DIMENSÕES

Com o intuito de avaliar os comportamentos tanto da tensão cisalhante como da variação do volume, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto em médias dimensões, devido ao tamanho das partículas que compunham as misturas estudadas. Os resultados deste ensaio são expostos da Figura 5.11 a Figura 5.30.

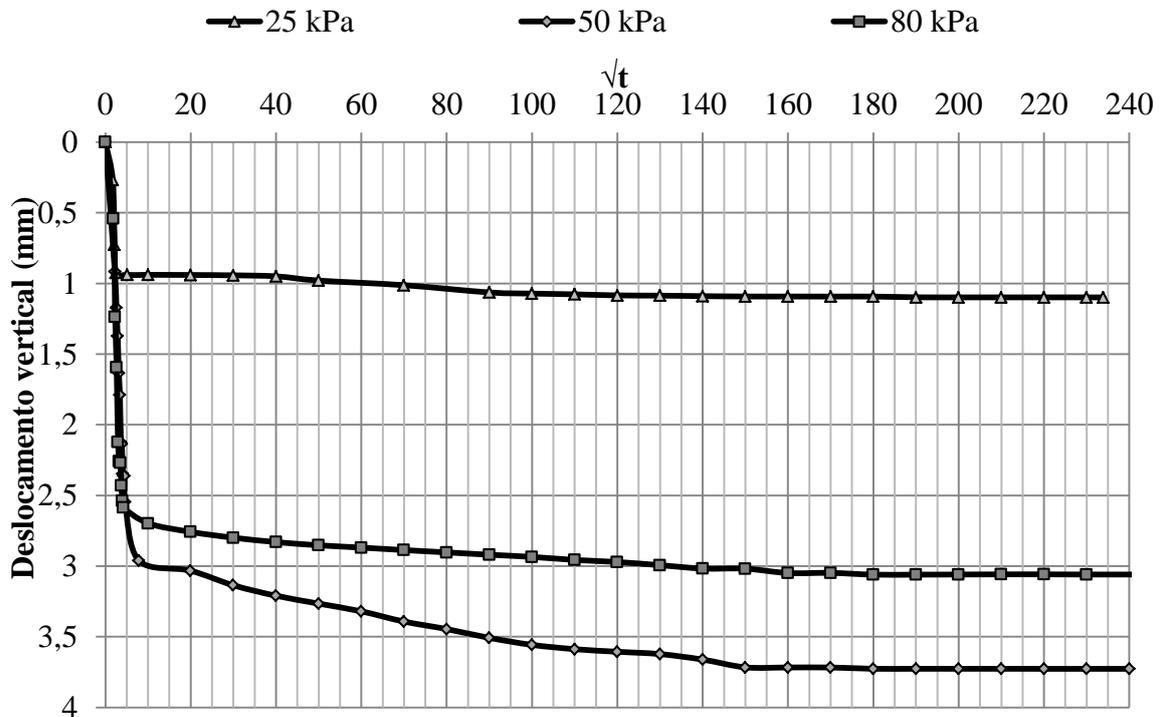


Figura 5.11- Curvas de adensamento para T01.

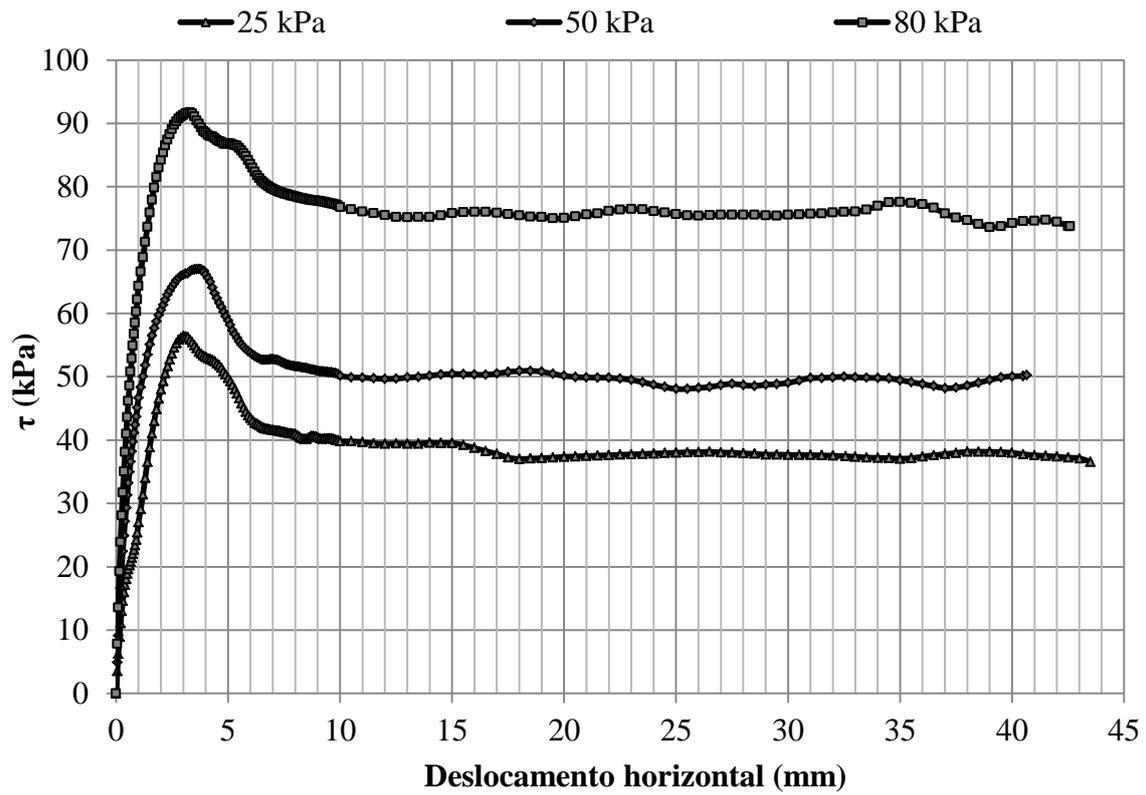


Figura 5.12- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para T01.

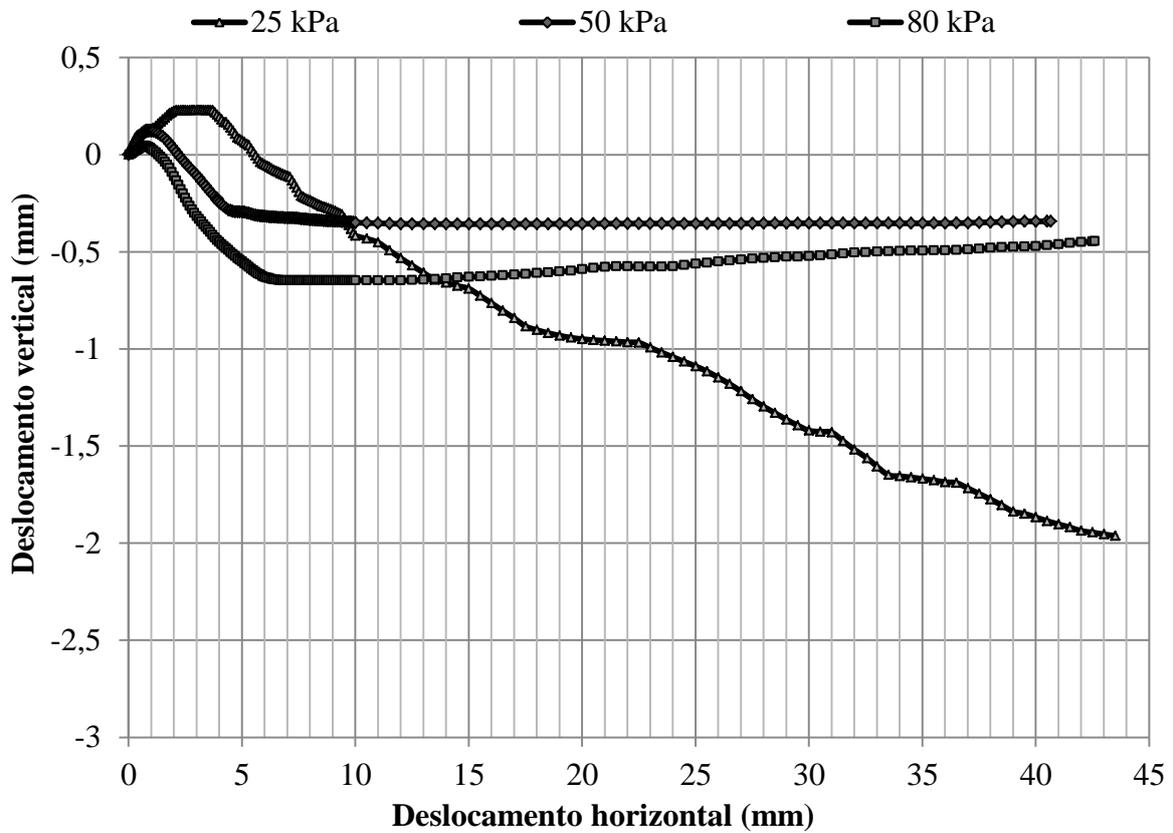


Figura 5.13- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para T01.

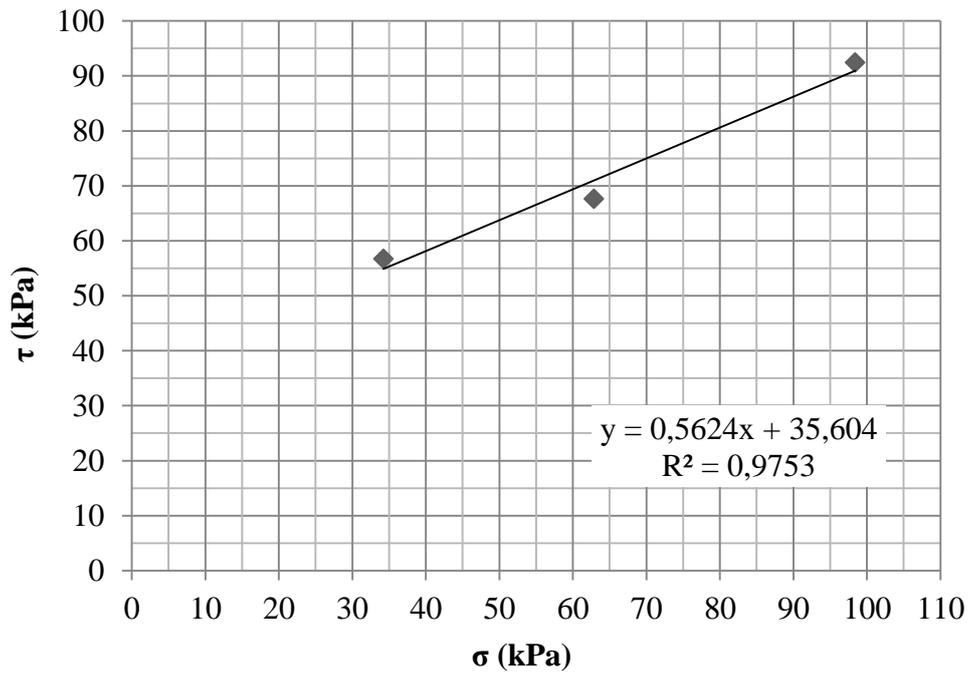


Figura 5.14- Envoltória de Mohr-Coulomb para T01.

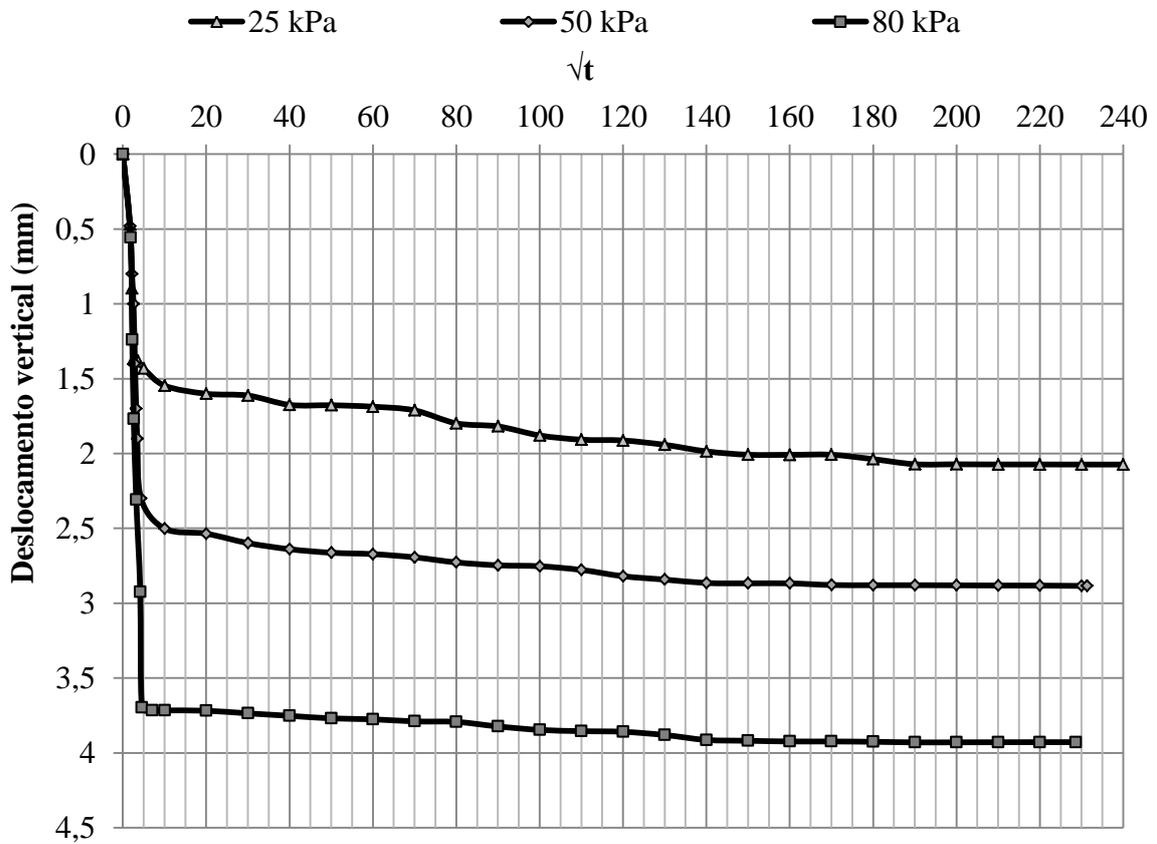


Figura 5.15- Curvas de adensamento para T02.

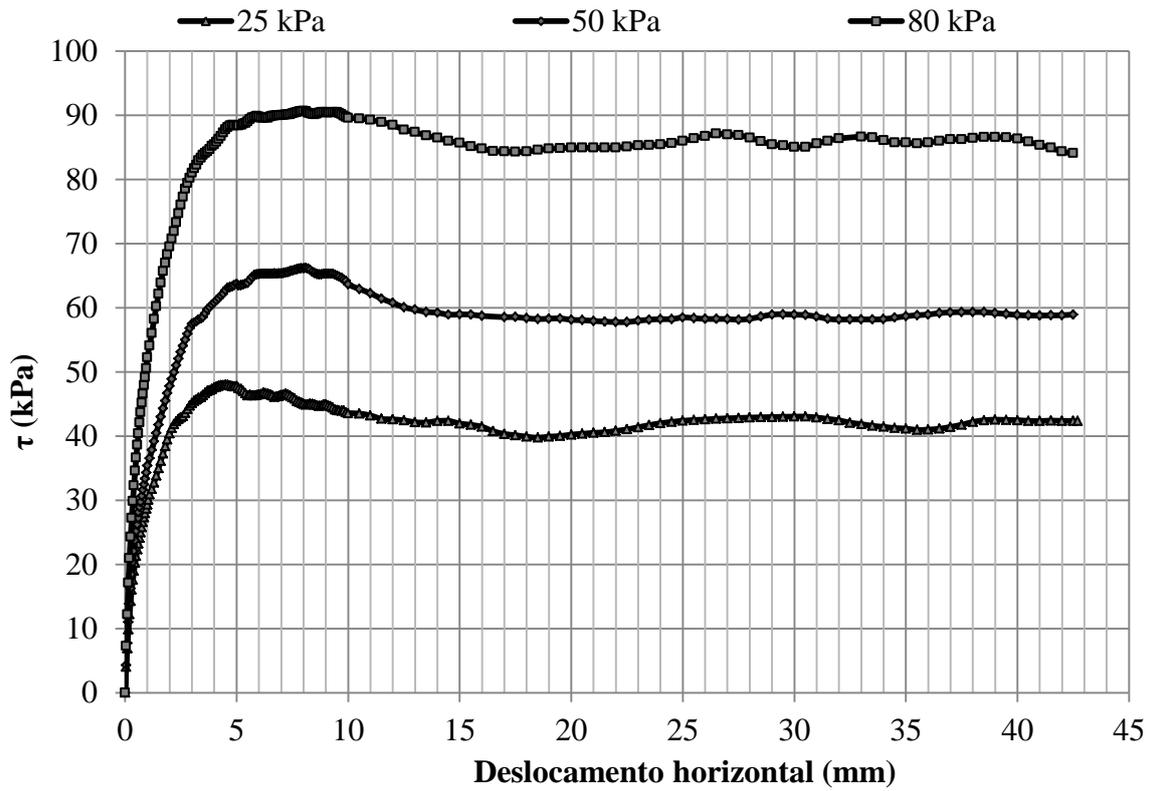


Figura 5.16- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para T02.

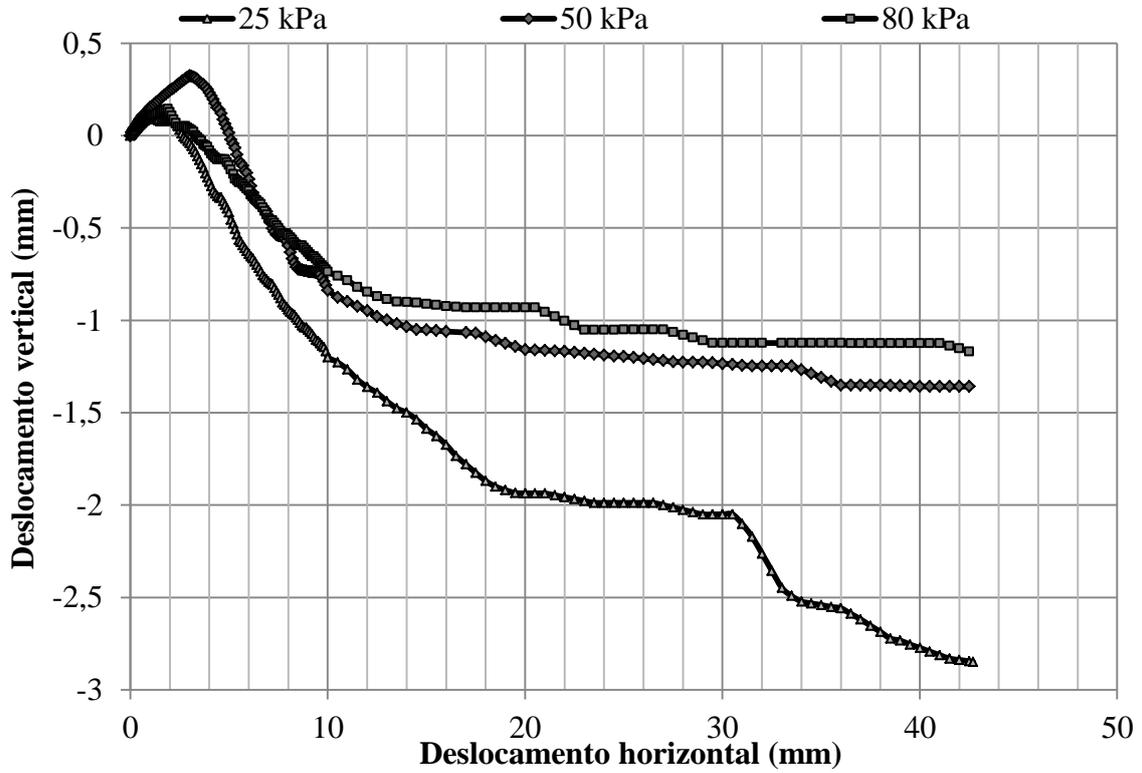


Figura 5.17- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para T02.

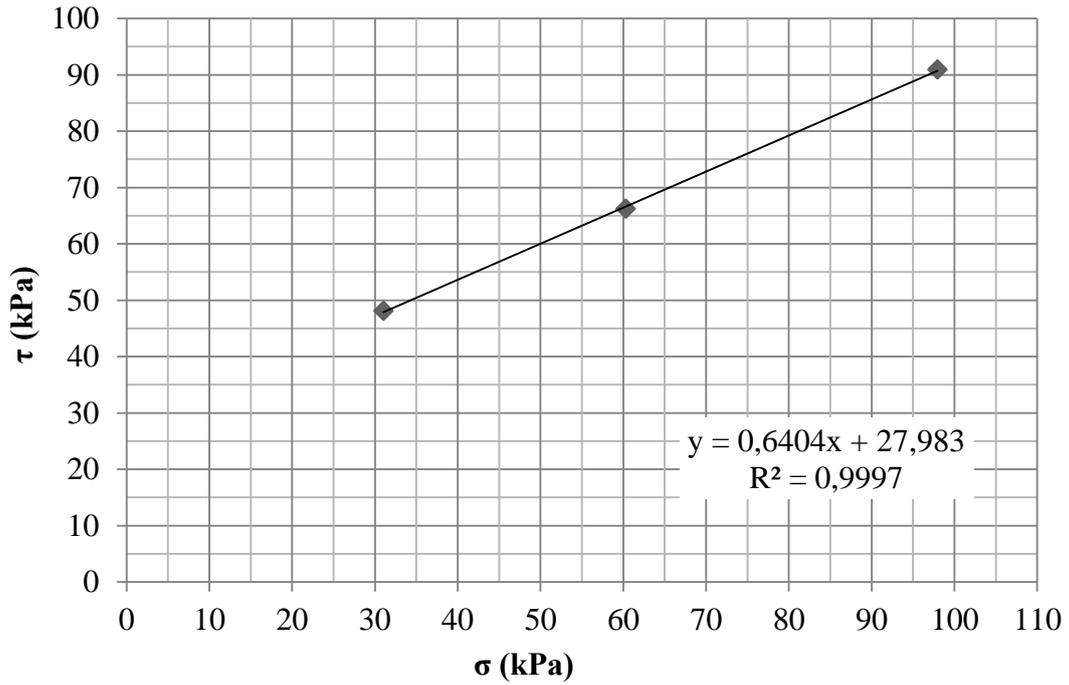


Figura 5.18- Envoltória de Mohr-Coulomb para T02.

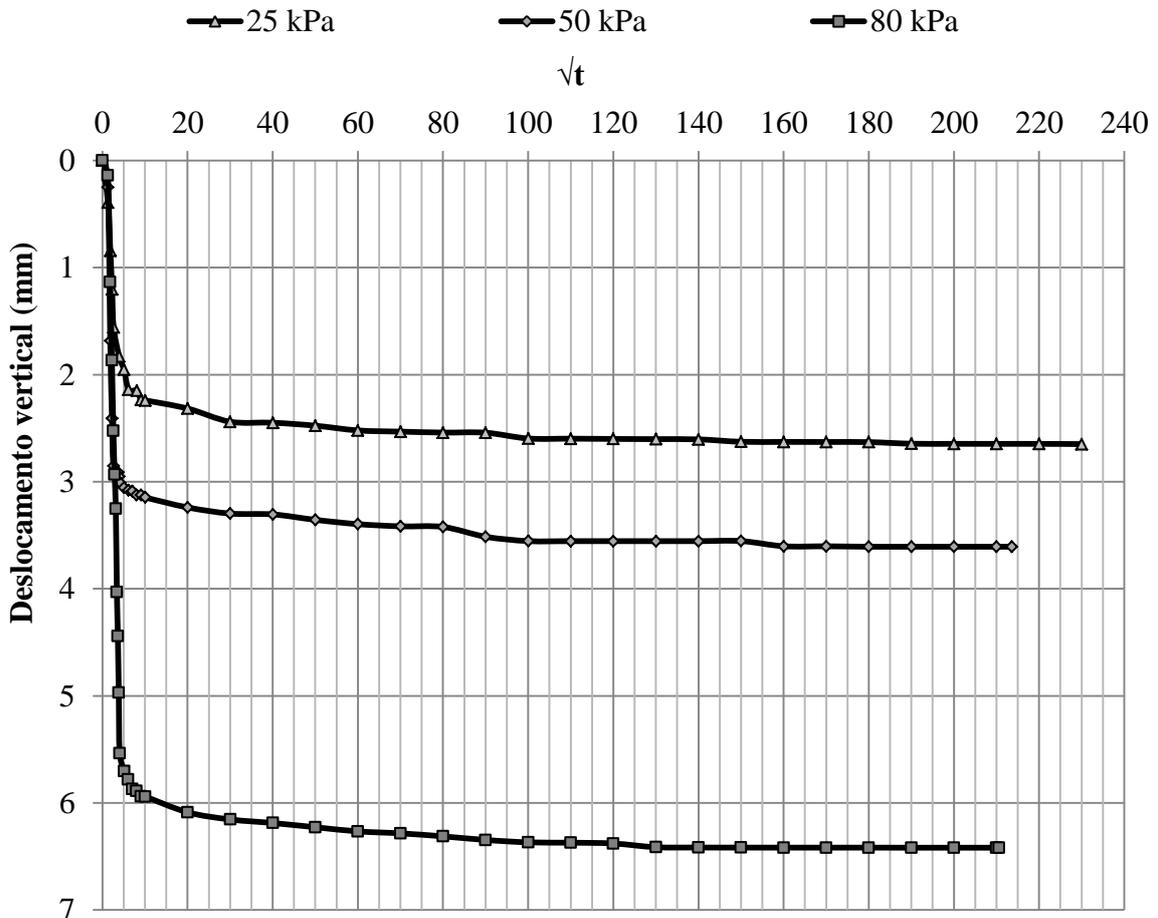


Figura 5.19- Curvas de adensamento para T03.

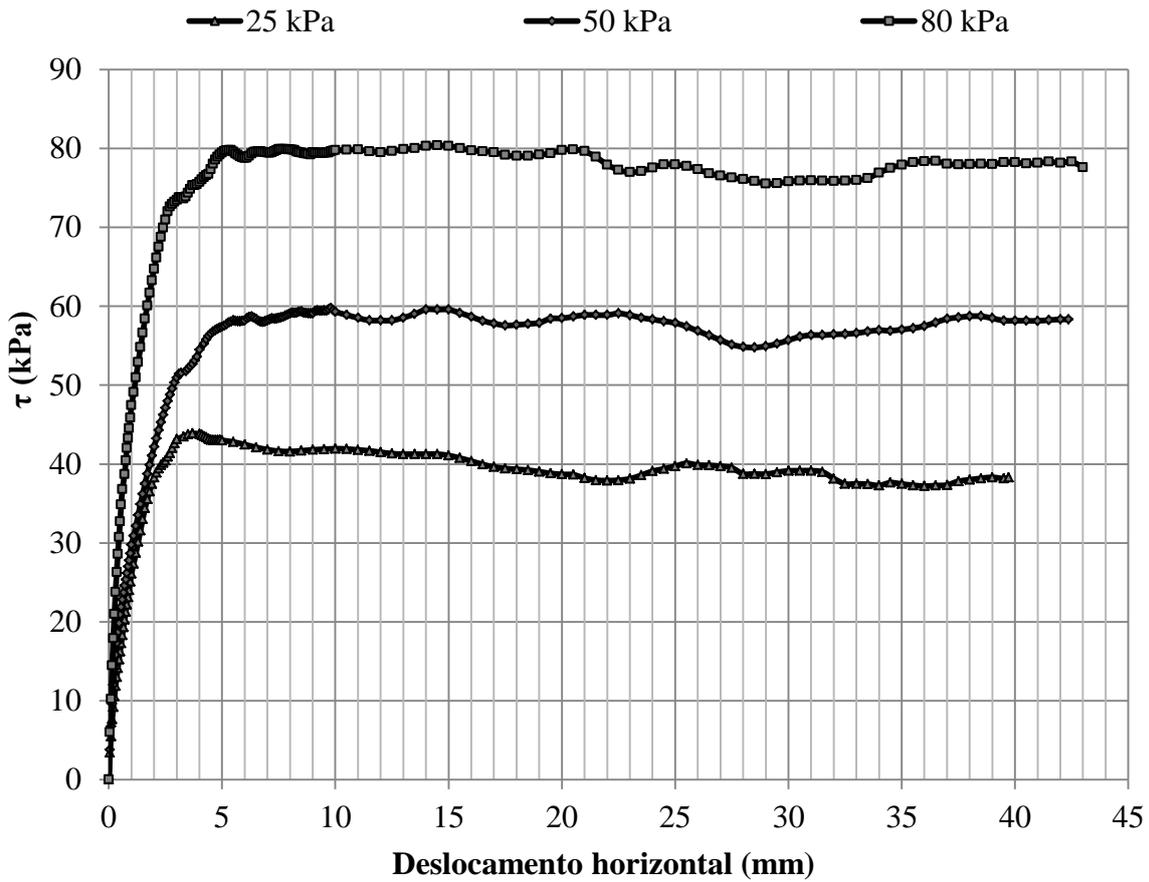


Figura 5.20- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para T03.

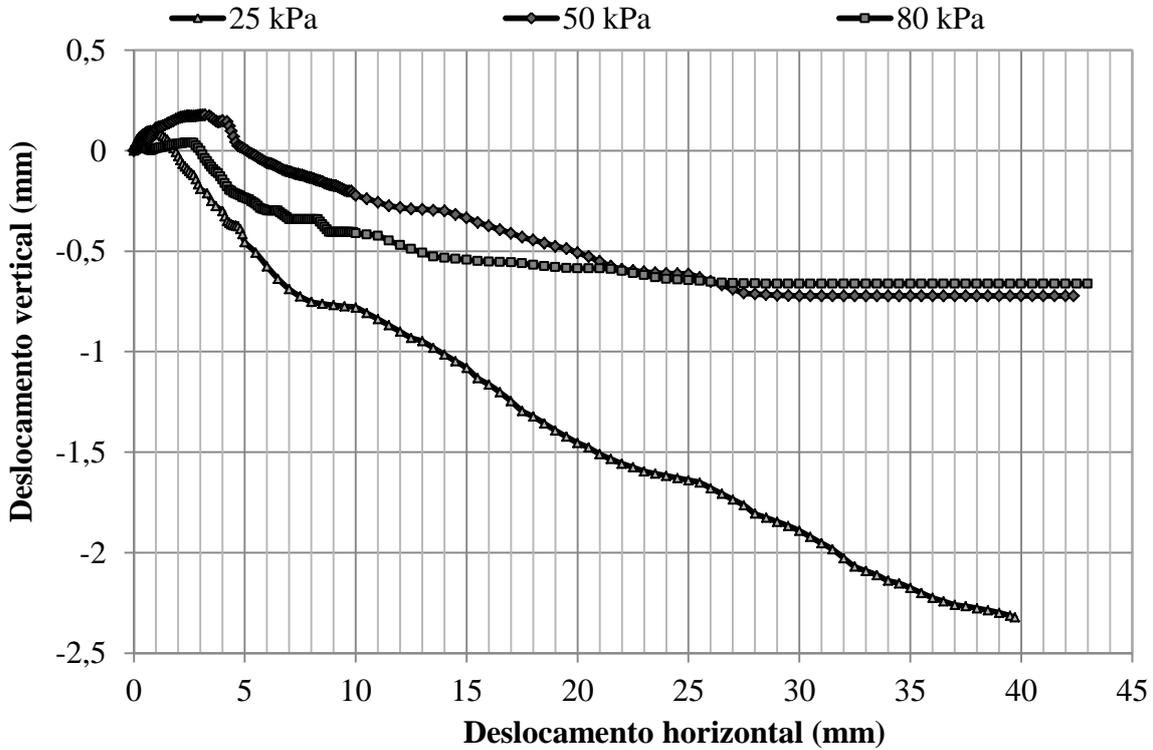


Figura 5.21- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para T03.

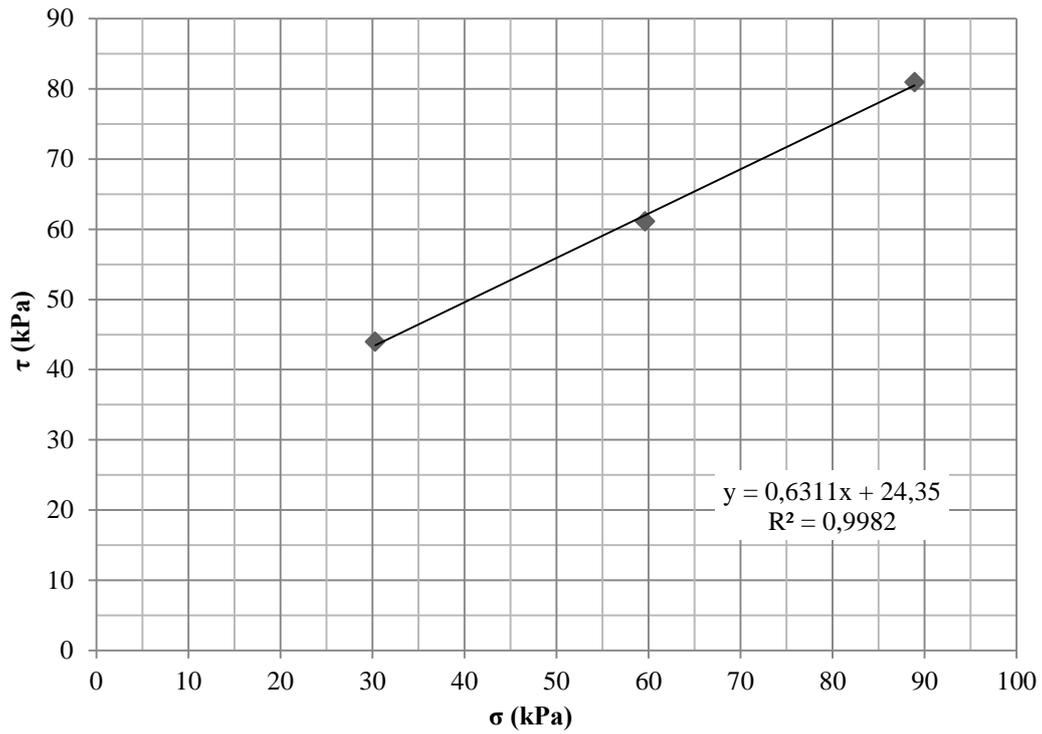


Figura 5.22- Envoltória de Mohr-Coulomb para T03.

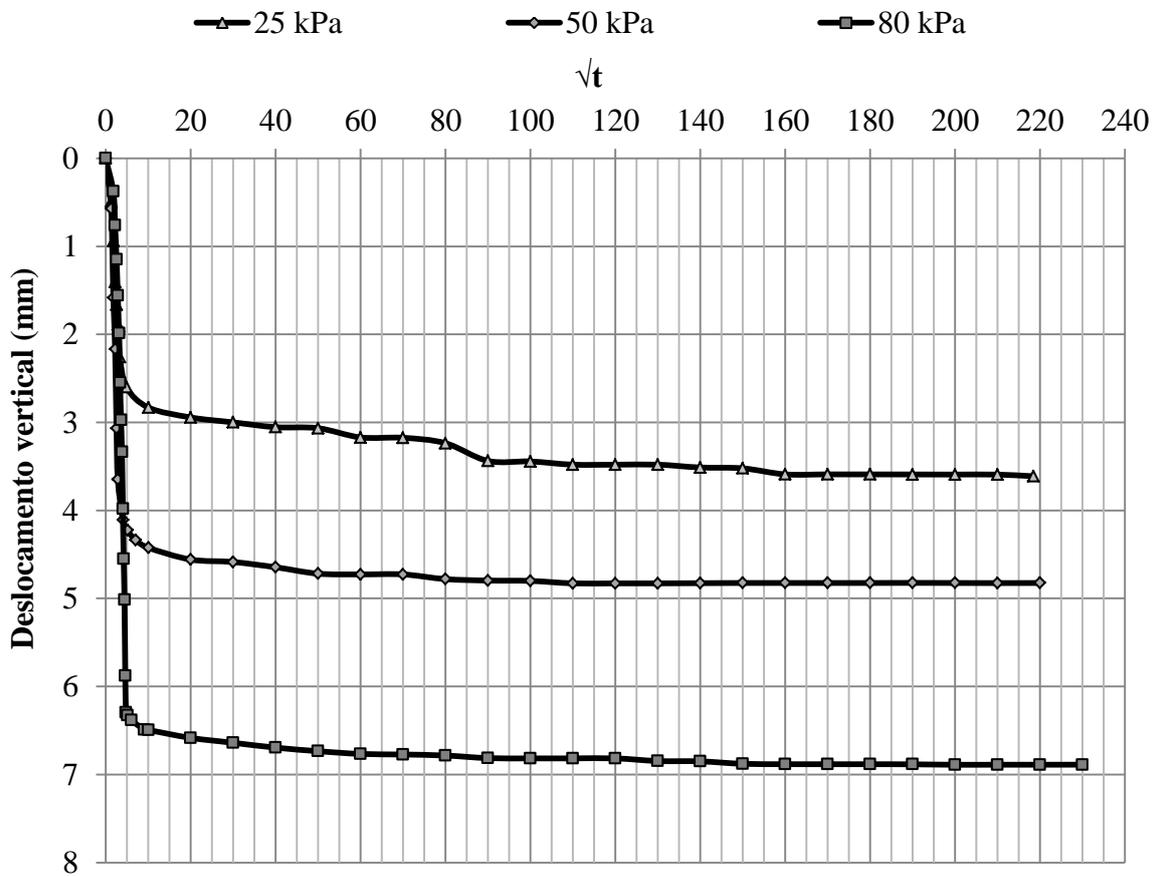


Figura 5.23- Curvas de adensamento para T04.

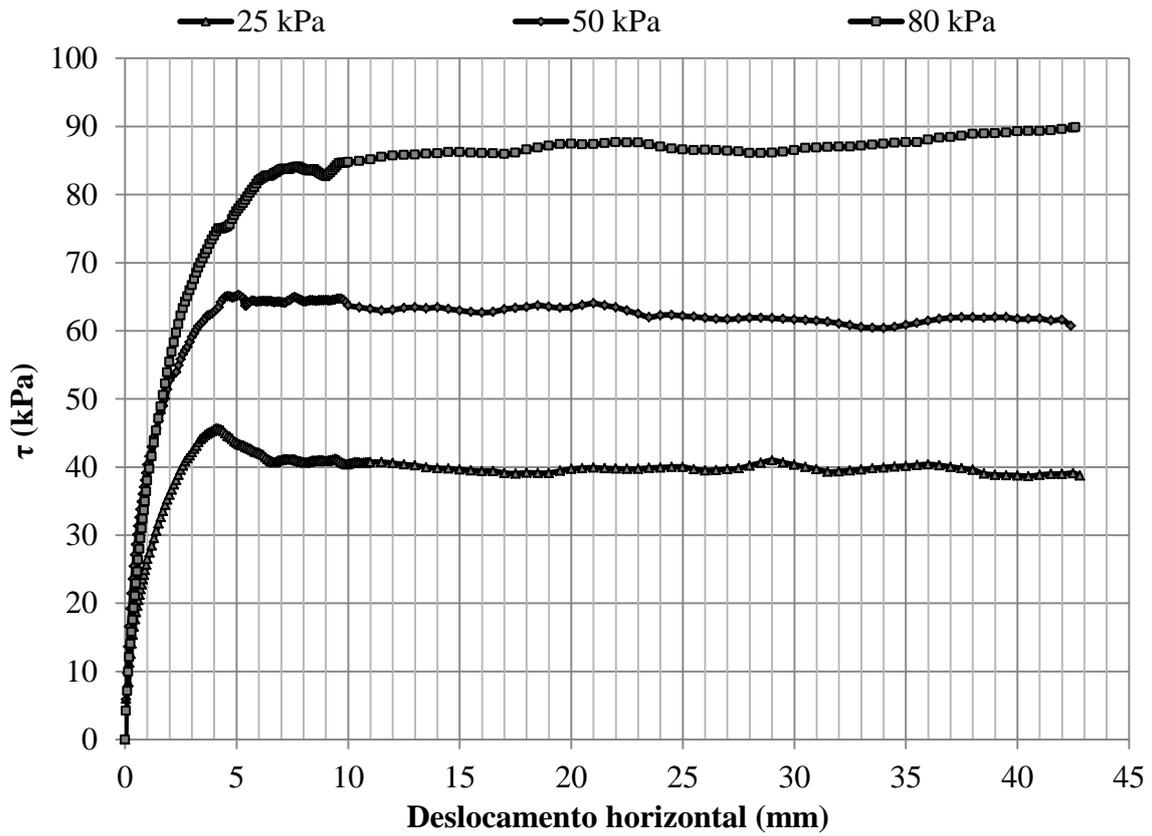


Figura 5.24- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para T04.

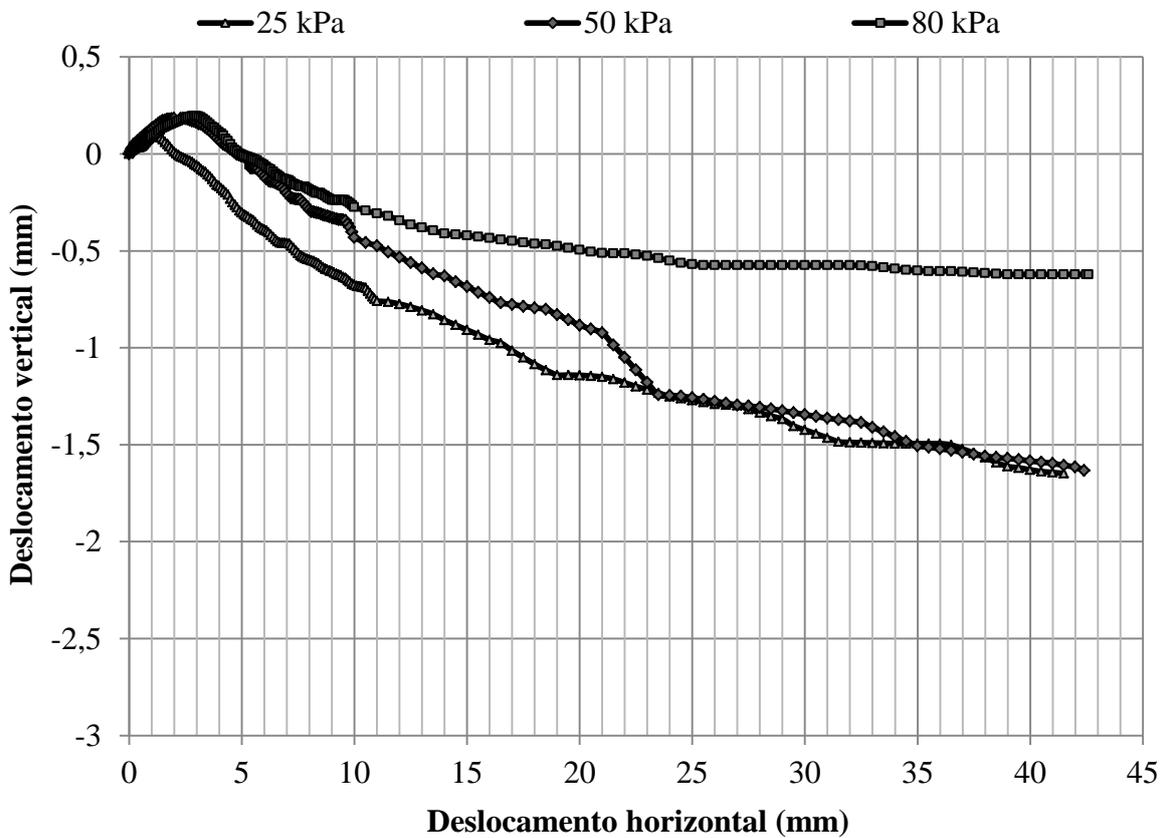


Figura 5.25- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para T04.

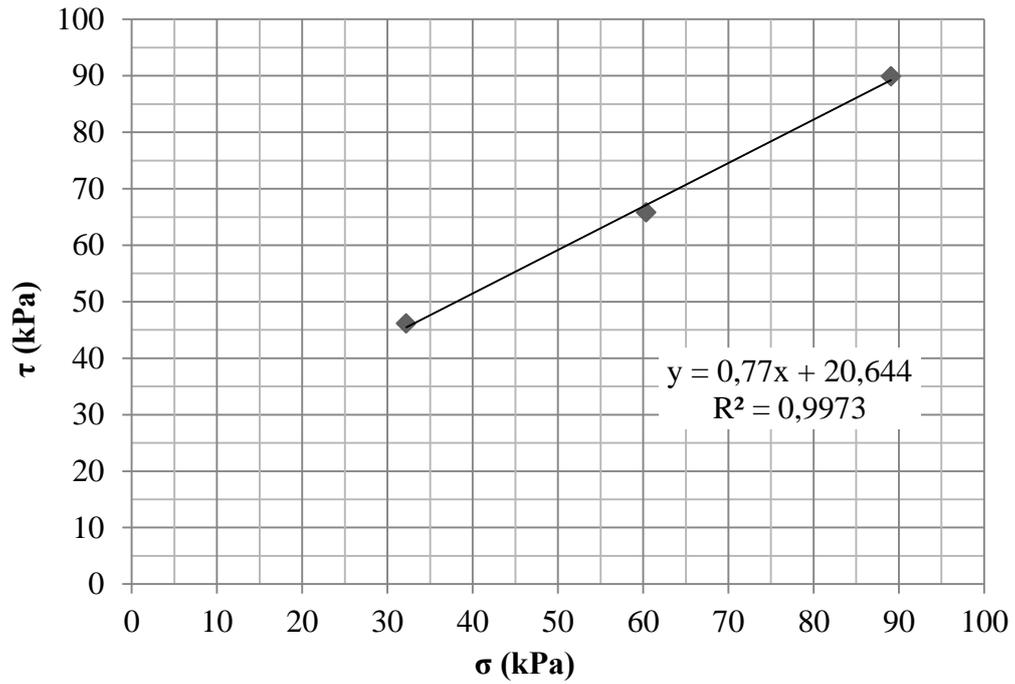


Figura 5.26- Envoltória de Mohr-Coulomb para T04.

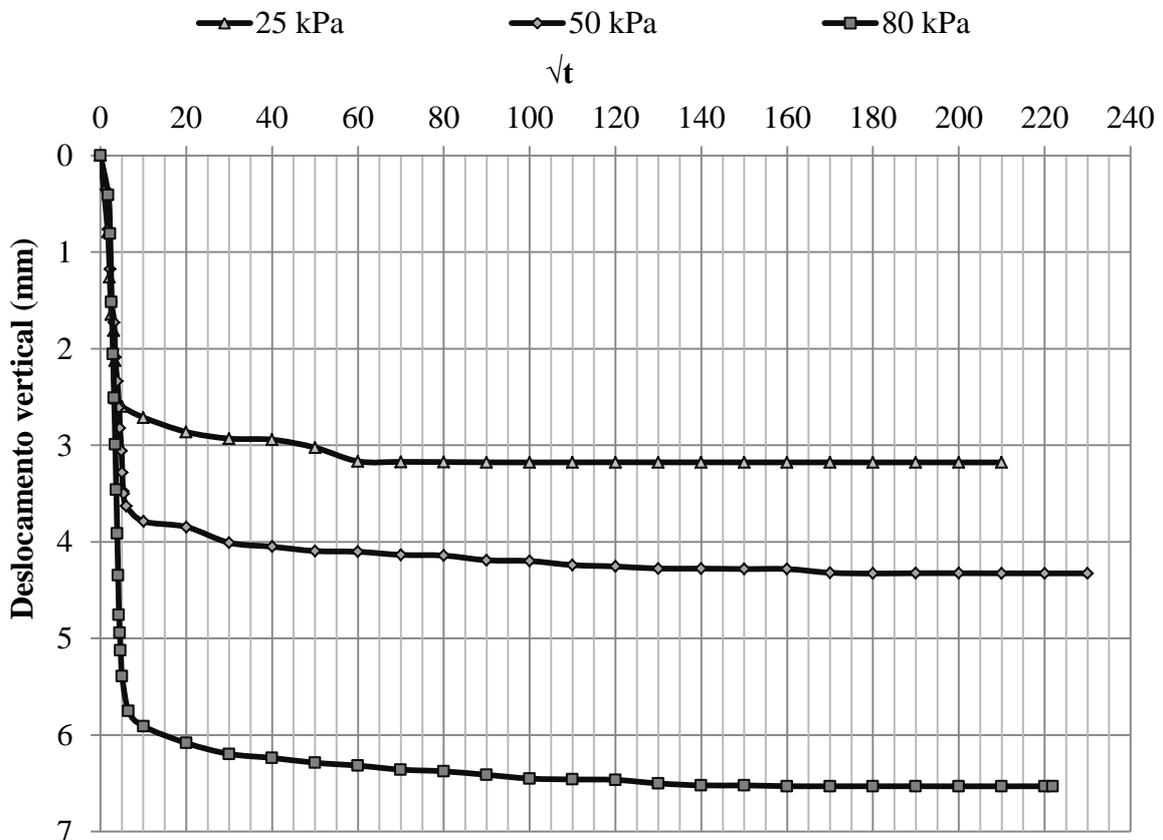


Figura 5.27- Curvas de adensamento para T05.

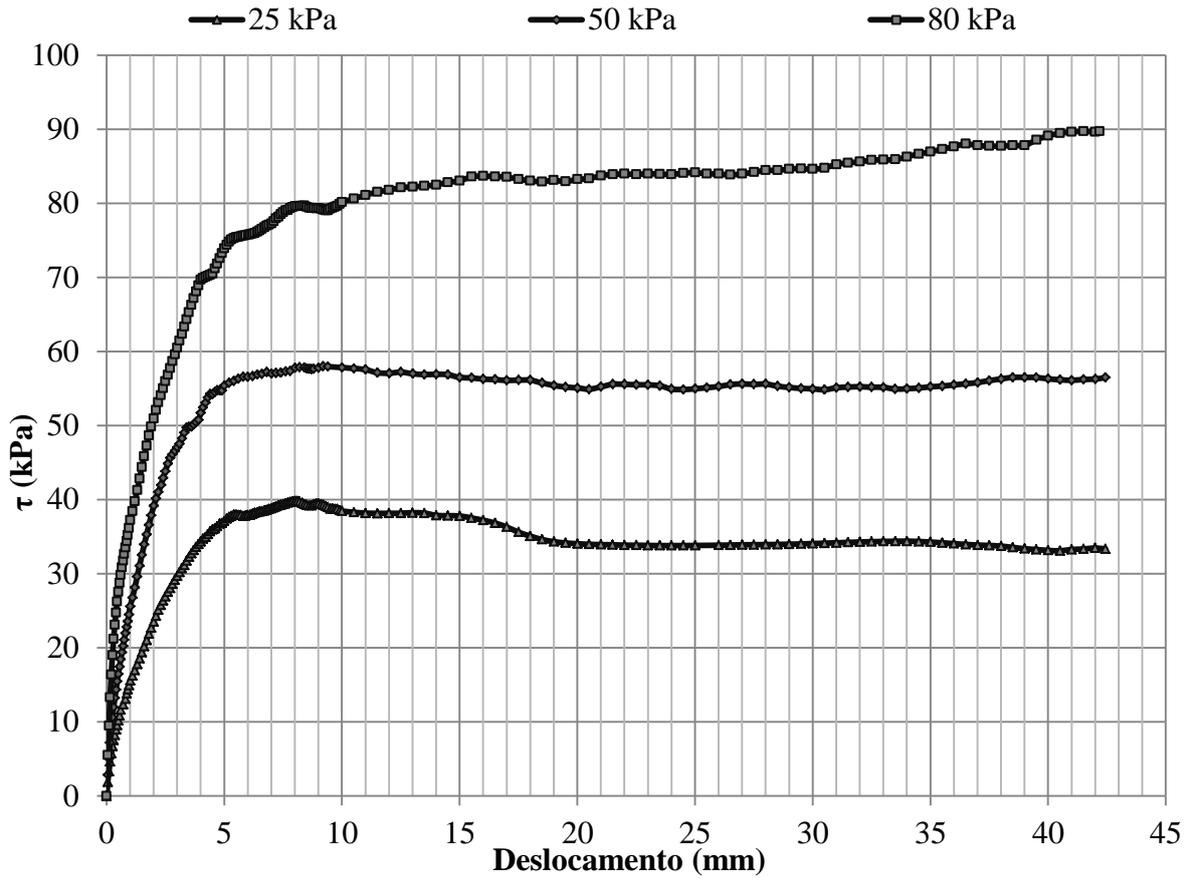


Figura 5.28- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para T05.

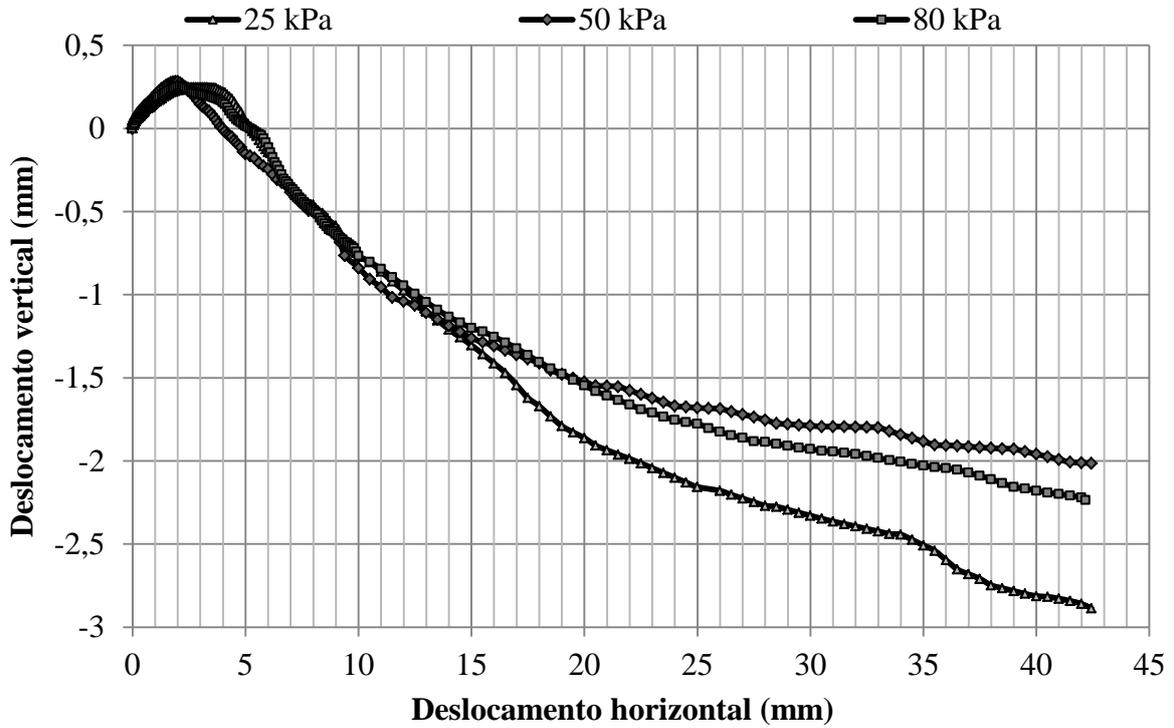


Figura 5.29- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para T05.

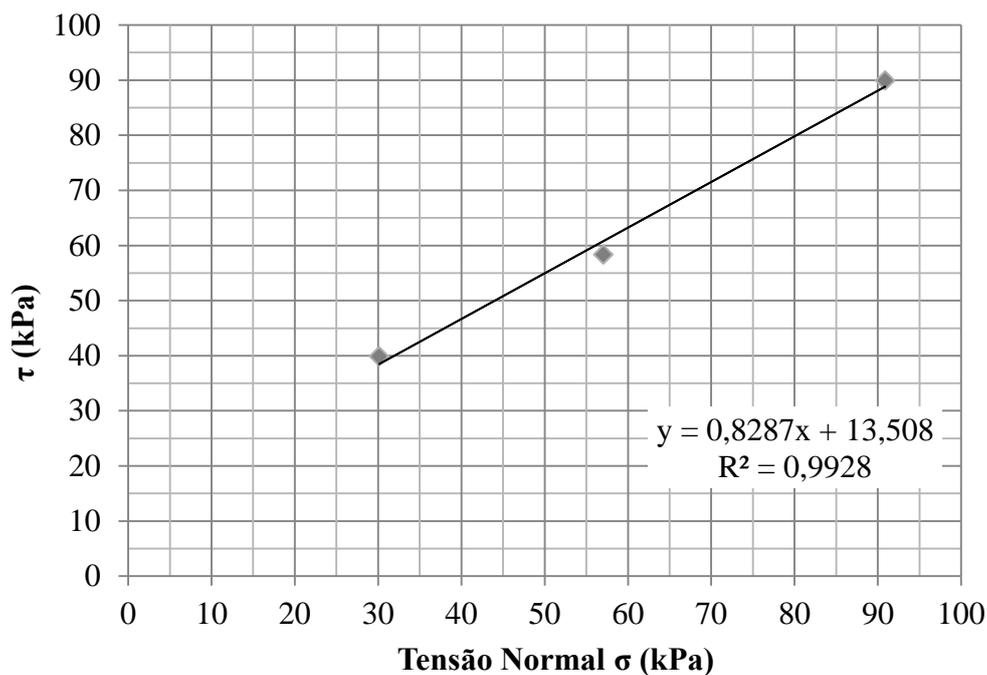


Figura 5.30- Envoltória de Mohr-Coulomb para T05.

Inicialmente apresentaram-se as curvas de adensamento das quais foram calculadas as velocidades de ensaio, em seguida as curvas de tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal, deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal e por fim a envoltória de Mohr-Coulomb para todos os teores estudados.

Nos gráficos foi tomado como positivo o adensamento e como negativo a dilatância. Seguindo as prescrições da norma, as velocidades de ensaios seriam rápidas, o que motivou o uso de, no mínimo, quatro horas de cisalhamento com base em estudos anteriores do solo utilizado.

Devido à necessidade de comparação dos ensaios de maior e menor escala, foi realizado o ensaio também para amostras com solo puro. Na Tabela 5.3 é apresentado o resumo dos resultados dos ensaios de média escala, por meio das tensões normais corrigidas, as tensões de cisalhamento, coesão e ângulo de atrito.

Tabela 5.3 - Valores de tensão máxima de cisalhamento, coesão e ângulo de atrito para os ensaios realizados na caixa de médias dimensões.

Teor de Resíduo de Borracha	$\sigma_N$ (kPa)	$\sigma_N$ corrigida (kPa)	$\tau_{max}$ (kPa)	Coesão $c'$ (kPa)	Ângulo de atrito ( $\phi'$ )
0%	25,90	34,23	56,69	35,60	29,35
	52,60	62,85	67,63		
	84,61	98,39	92,42		

2,50%	25,90	31,03	48,08	27,98	32,64
	53,39	60,32	66,21		
	88,49	97,95	90,88		
3,75%	25,60	30,32	43,94	24,35	32,26
	53,39	59,66	61,09		
	80,50	88,94	80,93		
5%	27,28	32,22	46,11	20,64	37,60
	53,39	60,37	65,82		
	80,22	89,08	89,88		
7,50%	25,90	30,14	39,86	13,51	39,65
	50,99	57,08	58,34		
	82,29	90,89	89,93		

Pelos resultados obtidos, nota-se uma redução nos valores de intercepto de coesão e um acréscimo nos valores de ângulo de atrito com o aumento do teor de borracha incorporado ao solo. Isso provavelmente ocorre pois o resíduo de borracha tende a comportar-se como um material granular dentro da amostra de solo.

Apesar das amostras apresentarem esse comportamento de forma geral, é necessário observar o comportamento da amostra durante a execução da compactação. Conforme comentado anteriormente, as amostras utilizando os teores T05 apresentaram trincas excessivas devido a presença de borracha e isso deve ser levado em consideração durante a execução de uma obra real.

Quanto ao ensaio de cisalhamento direto nas diferentes escalas, observa-se uma variação entre os valores dos ensaios convencionais e os de médias dimensões. A coesão apresenta, para o ensaio convencional, um valor de 23,44 kPa, enquanto que, para o ensaio em maior escala, apresenta um valor de 35,60 kPa. Por sua vez, o ângulo de atrito cai de 43,02<sup>0</sup> (ensaio convencional) para 23,44<sup>0</sup> (ensaio de médias dimensões).

Como justificativa para estas variações têm-se que, durante o processo de compactação da amostra de médias dimensões, pode ter ocorrido alguma região menos compactada do que quando se comparando ao ensaio em menor escala. E ainda que por se tratar de uma amostra de média dimensão podem existir zonas de variação da uniformidade da umidade da amostra.

Nas Figura 5.31 a Figura 5.36 são apresentadas as curvas de tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal dos diferentes teores de borracha para uma mesma tensão normal.

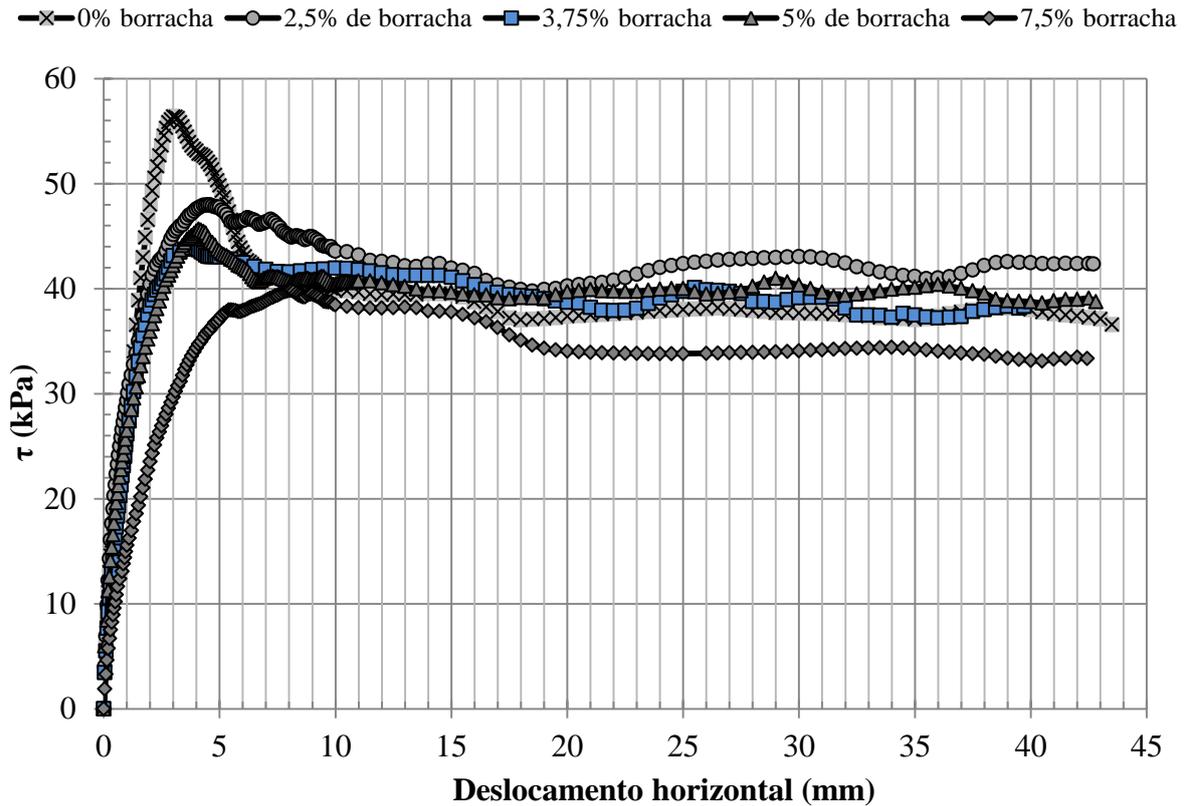


Figura 5.31- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para tensão confinante de 25 kPa para todos os teores.

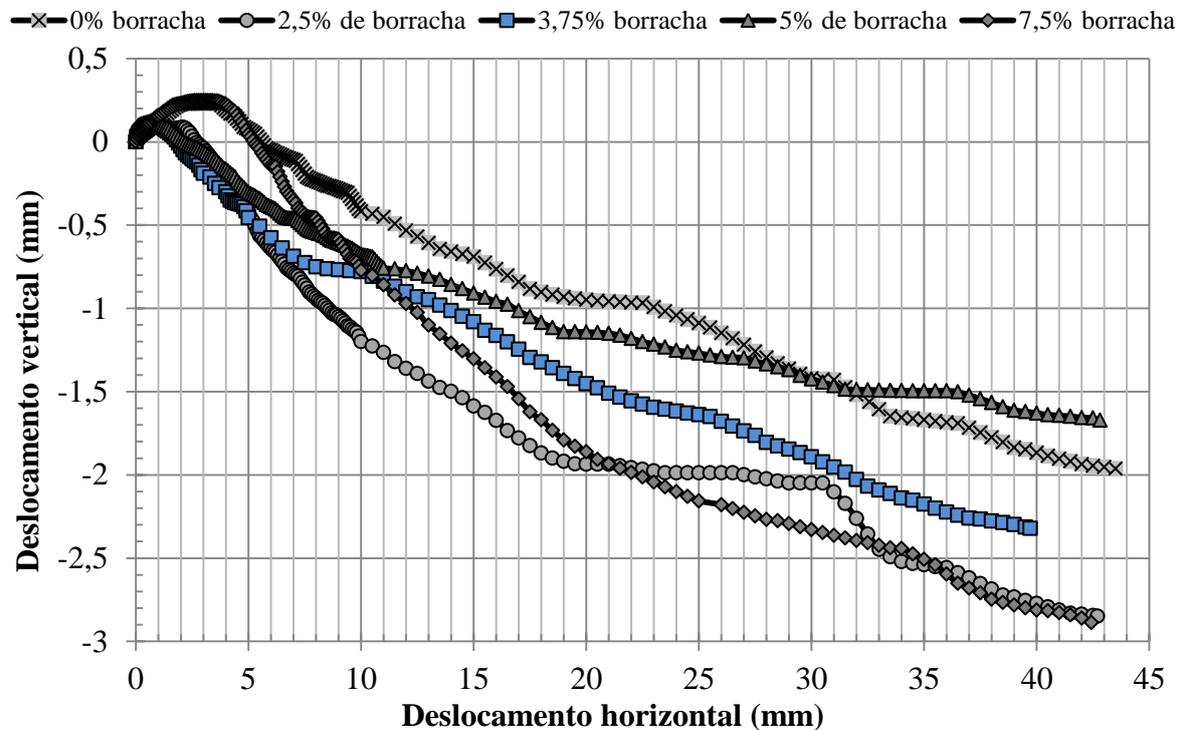


Figura 5.32- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para tensão confinante de 25 kPa para todos os teores.

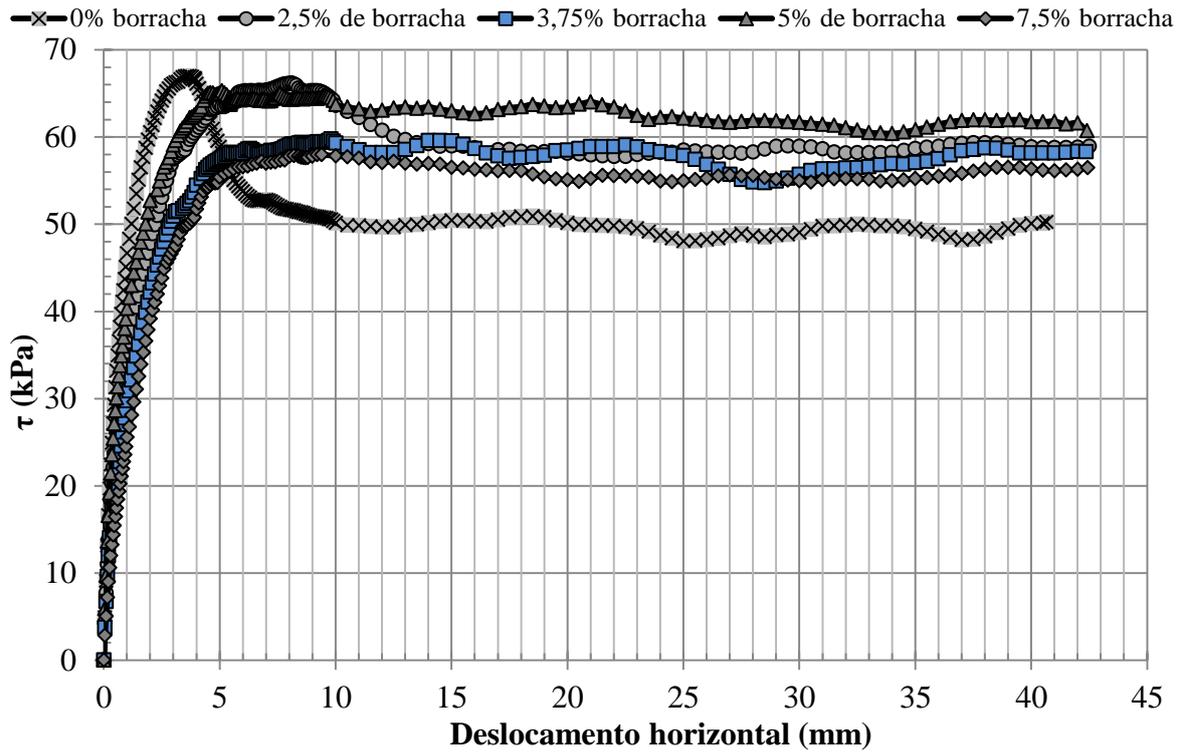


Figura 5.33- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para tensão confinante de 50 kPa para todos os teores.

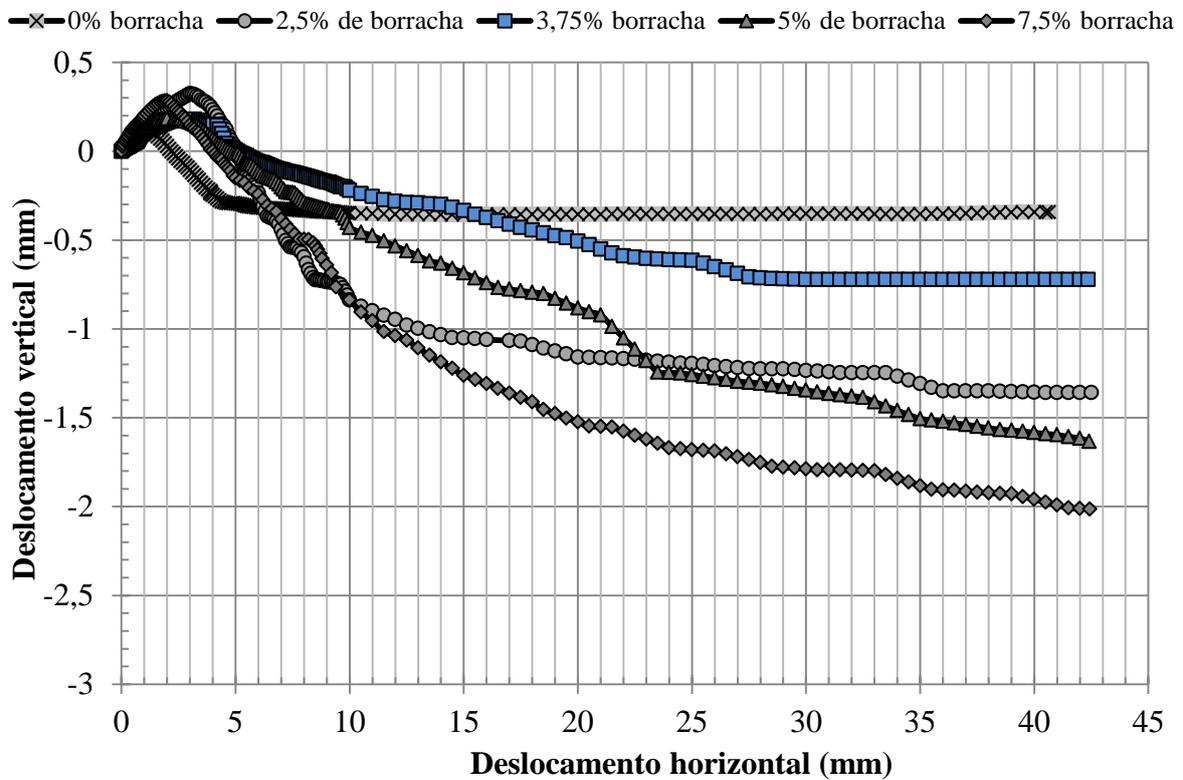


Figura 5.34- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para tensão confinante de 50 kPa para todos os teores.

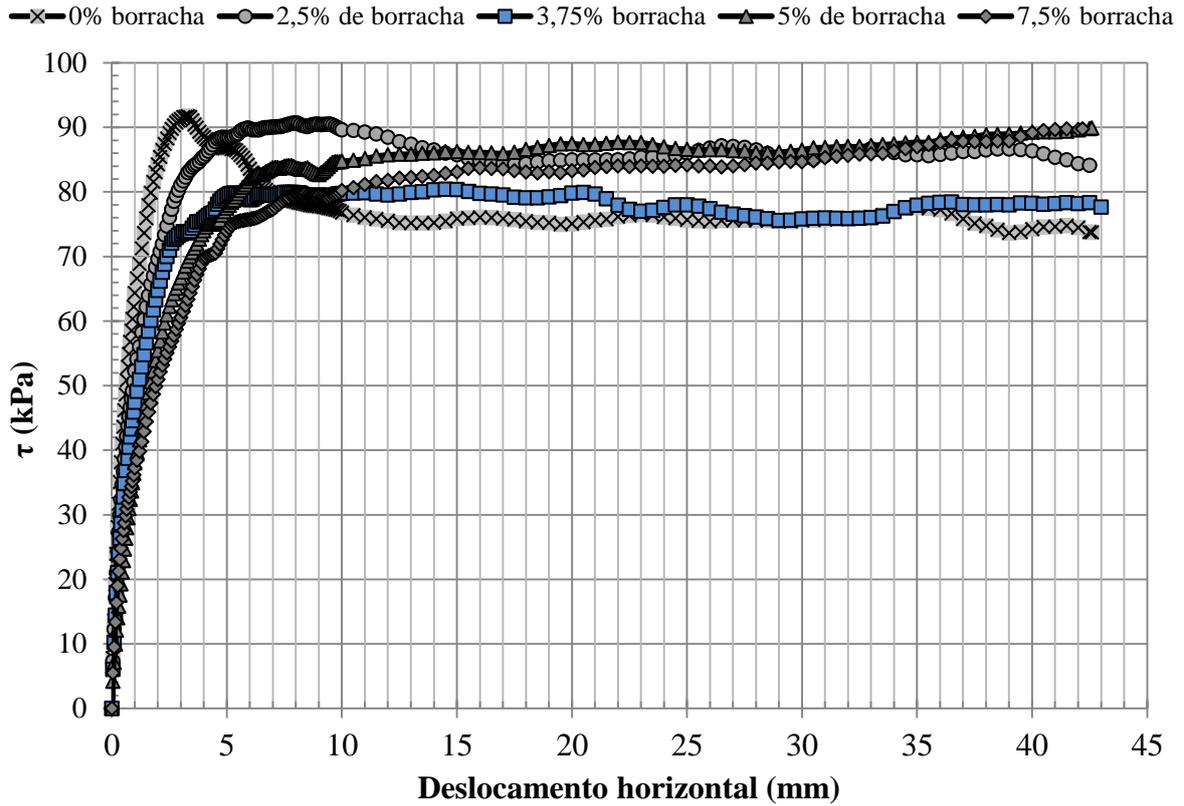


Figura 5.35- Tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para tensão confinante de 80 kPa para todos os teores.

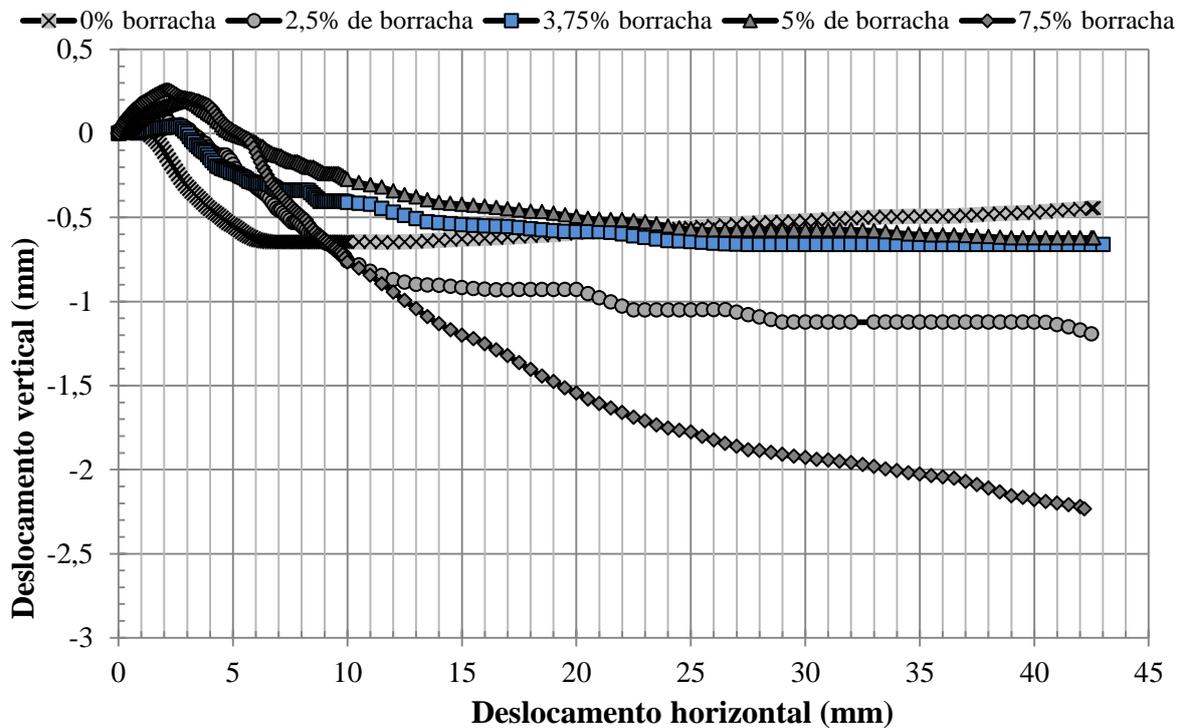


Figura 5.36- Deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para tensão confinante de 80 kPa para todos os teores.

Observa-se que, à medida que é acrescentado o resíduo de borracha a mistura, esta passa a apresentar menor pico de resistência para todas as tensões estudadas. Isto também foi observado nos estudos de Franco (2012), pois embora o solo puro utilizado em sua pesquisa apresentou baixo pico na resistência, com a adição de borracha este não apresentava nenhum. Esta queda no pico de resistência pode ser explicada pelo fato dos fragmentos de borracha absorvem certa energia aplicada ao solo, tendo em vista que são mais deformáveis, essa absorção acaba reduzindo a dilatância do solo.

Quanto aos efeitos da variação de altura, todas as misturas estudadas apresentaram uma pequena contração inicial, variando de acordo com os teores entre os deslocamentos horizontais de 2 a 5 mm, e em seguida uma constante dilatância para as tensões de 25 kPa e 50 kPa e um trecho constante para 80 kPa. Estes resultados podem ser justificados por uma possível movimentação vertical da caixa durante o ensaio devido aos carregamentos aplicados. Sugere-se enrijecer as laterais da caixa.

Na Figura 5.37, na Figura 5.38 e na Figura 5.39 são expostas as relações das tensões de cisalhamento máximas e os teores de resíduo de pneu para cada tensão confinante.

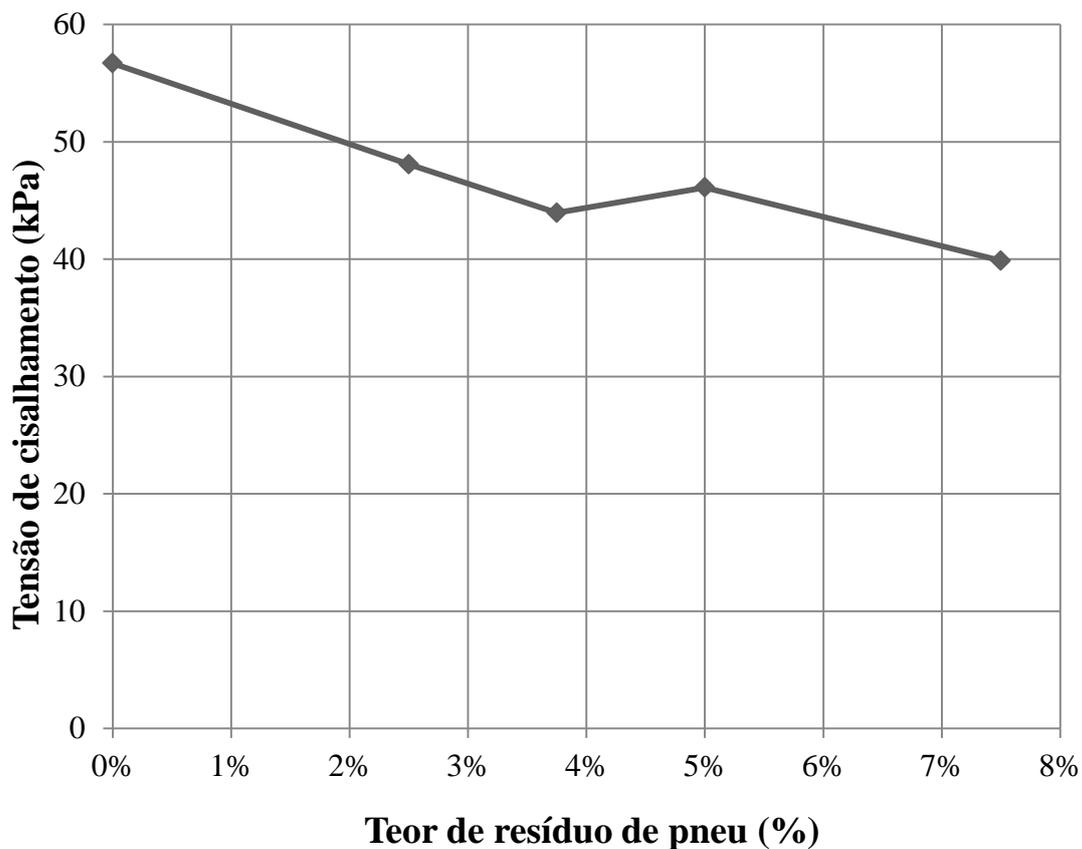


Figura 5.37- Relação entre a tensão de cisalhamento máxima e o teor de borracha para 25 kPa.

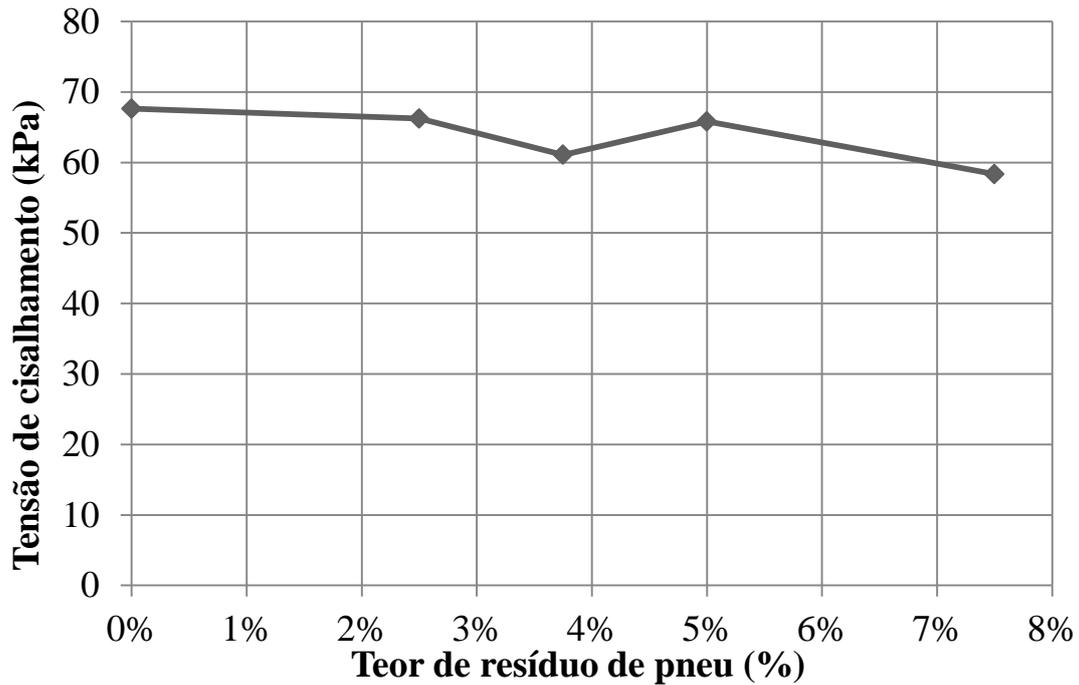


Figura 5.38- Relação entre a tensão de cisalhamento máxima e o teor de borracha para 50 kPa.

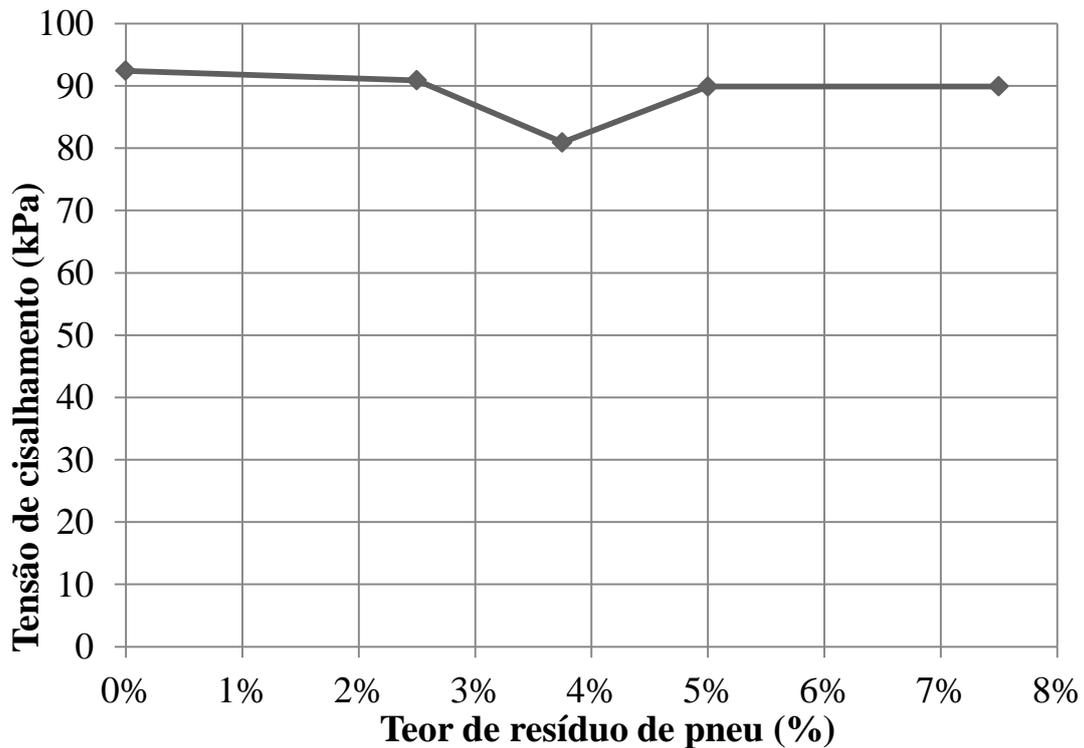


Figura 5.39- Relação entre a tensão de cisalhamento máxima e o teor de borracha para 80 kPa.

Observa-se que para as tensões de 25 kPa e 50 kPa o comportamento da tensão de ruptura é parecido, existe uma queda evidente nas tensões de cisalhamento para as misturas que contem resíduos de borracha. Comparando a tensão normal de 80 kPa, a queda do valor

da tensão máxima de cisalhamento devido a variação dos teores de borracha diminui, o que torna as resistências ao cisalhamento praticamente iguais, exceto para a amostra T03. Esta amostra sofreu comportamento diferenciado em relação aos demais, gerando picos de queda nos traçados em relação aos demais teores com presença de resíduo de borracha.

Já na Figura 5.40 e na Figura 5.41 são apresentadas as relações entre a coesão e ângulo de atrito com os teores de resíduo de borracha. Nota-se que a relação entre a coesão e o teor de borracha é linear, porém, para o ângulo de atrito, não há esse comportamento de forma tão evidente.

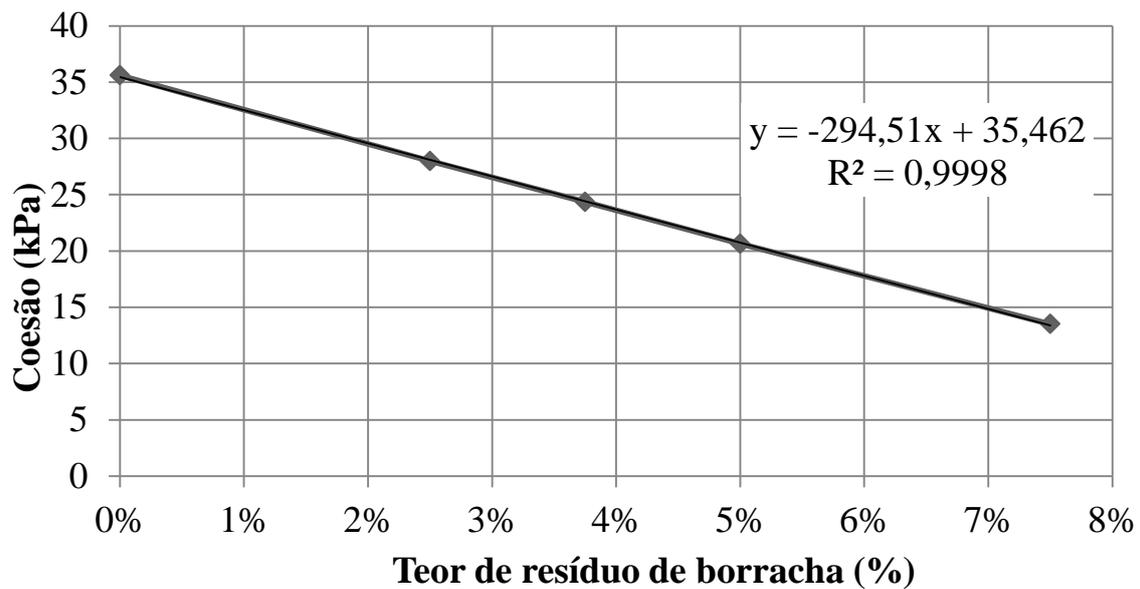


Figura 5.40- Relação entre a coesão e o teor de resíduo de pneu.

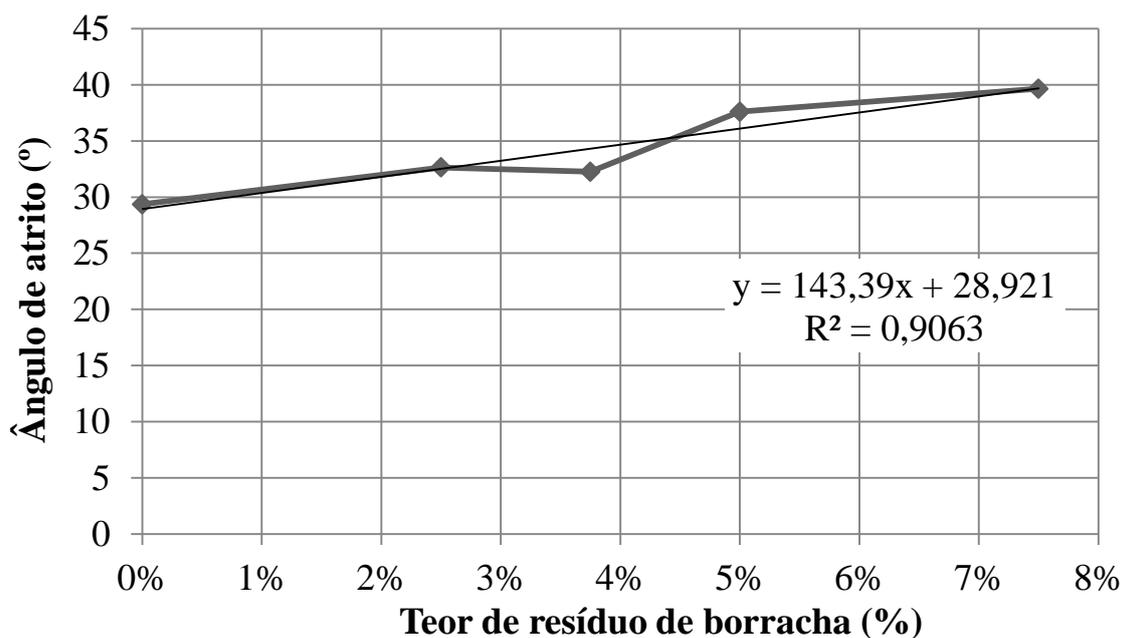


Figura 5.41- Relação entre o ângulo de atrito e o teor de resíduo de pneu.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de umidade da amostra no início e no final do ensaio. Não se observam perdas significativas de umidade tendo em vista que o ensaio durou, em média, vinte e quatro horas. Nota-se que a base da amostra apresentou os menores teores de umidade apresentados. Isso ocorre devido à proximidade do contorno da caixa. Porém, em média, a variação de umidade foi pequena. Esse dado é importante, uma vez que a variação da umidade do solo pode acarretar em variações na sua resistência.

Tabela 5.4 - Variação da umidade para cada ensaio.

<b>Amostras</b>	<b>Especificação</b>	<b>T01 (0%)</b>	<b>T02 (2,5%)</b>	<b>T03 (3,75%)</b>	<b>T04 (5%)</b>	<b>T05 (7,5%)</b>	
<b>Umidade para ensaio com 25 kPa</b>	<b>Inicial</b>	24,15	24,30	24,67	24,43	24,59	
	<b>Final</b>	<b>topo</b>	24,36	23,87	22,57	24,09	24,12
		<b>meio</b>	23,34	24,06	23,07	23,18	24,36
		<b>base</b>	22,85	23,19	22,90	23,37	23,67
<b>Umidade para ensaio com 50 kPa</b>	<b>Inicial</b>	24,13	24,30	24,68	24,59	24,57	
	<b>Final</b>	<b>topo</b>	22,72	24,50	23,78	24,55	24,11
		<b>meio</b>	23,01	25,04	23,90	23,24	24,26
		<b>base</b>	22,79	23,61	23,08	23,53	23,91
<b>Umidade para ensaio com 80 kPa</b>	<b>Inicial</b>	24,13	24,31	24,68	24,52	24,60	
	<b>Final</b>	<b>topo</b>	23,12	23,72	24,24	24,09	24,11
		<b>meio</b>	23,30	24,15	24,30	24,32	24,50
		<b>base</b>	23,07	23,47	23,68	23,30	23,48

### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos ensaios de compactação foi possível observar que o ramo úmido da curva está entre as curvas de 80% a 100% de saturação. Observou-se também que, à medida que o teor de resíduo de borracha é acrescentado ocorre uma alteração no peso específico seco máximo das misturas, diminuindo em até 4,66% para misturas com teor de 7,5% com relação à mistura de solo puro, sendo esta queda não é linear. Quanto à variação da umidade ótima, esta diminui linearmente com o aumento do teor de borracha adicionado, porém esta queda sofre pouca alteração o que leva, em termos práticos, a ser desconsiderada.

Pelos resultados apresentados, notou-se que o índice de vazios não apresentou grandes variações, o que significa que teoricamente não houve mudança no comportamento do solo. Por isto, pode-se concluir que o teor de pedaços de borracha não alterou a eficiência do processo de compactação.

Além disso, para todas as porcentagens de pedaços de pneu, os corpos de prova

quando desconfinados apresentaram trincas entre as partículas de solo e os pedaços de borracha de pneu, o que pode não acontecer em estruturas de contenção em escala real.

Outra ressalva é que quanto menor a umidade da mistura, maior a quantidade de trincas e isto pode ter ocorrido pois o solo mais úmido impregna nos pedaços de borracha e o oposto acontece quando ele está seco. Quanto às trincas em geral, este fenômeno ocorre pois a borracha quando desconfinada libera a energia que recebeu quando foi compactada. Para a mistura T04 (5%) a amostra mais seca foi totalmente perdida no processo de retirada da amostra do cilindro.

Quanto à relação entre os teores de resíduo de borracha utilizados, nota-se uma relação crescente com o teor de umidade ótima ( $w_{ot}$ ), já para a relação com o peso específico aparente seco máximo, essa relação é decrescente.

Assim, quanto à compactação pode-se concluir que os teores de borracha aplicados apresentaram trincas excessivas e apenas analisando este fator, para o uso destas misturas seria necessário que as amostras não fossem desconfinadas.

Para os ensaios de cisalhamento direto em média escala, constatou-se que existiu uma redução nos valores de intercepto da coesão com o aumento do teor de borracha incorporado ao solo, pois a presença de borracha desestruturou o solo, o que fez a coesão mudar, pois, teoricamente se mudou a continuidade do solo.

Quanto ao ângulo de atrito, este apresentou um acréscimo com o aumento do teor de borracha incorporado ao solo. Isso provavelmente ocorreu pois o resíduo de borracha tende a comportar-se como um material granular dentro da amostra de solo.

Constatou-se que, à medida que é acrescentado o resíduo de borracha a mistura, esta passa a apresentar menor pico de resistência para todas as tensões estudadas. Esta queda pode ser explicada pelo fato de os fragmentos de borracha estarem absorvendo certa energia aplicada ao solo, tendo em vista que são mais deformáveis, essa absorção acaba reduzindo a dilatância do solo.

Quanto aos efeitos da variação de altura, todas as misturas estudadas apresentaram uma pequena contração inicial, variando de acordo com os teores entre os deslocamentos horizontais de 2 a 5 mm, e em seguida uma constante dilatância para as tensões de 25 kPa e 50 kPa e um trecho constante para 80 kPa. Estes resultados podem ser justificados por uma possível movimentação vertical da caixa durante o ensaio devido aos carregamentos aplicados. Sugere-se enrijecer as laterais da caixa

Nota-se que a relação entre a coesão e o teor de borracha é linear, porém, para o ângulo de atrito, não há esse comportamento de forma tão evidente.

Quanto ao ensaio de cisalhamento direto nas diferentes escalas, observa-se uma variação entre os valores dos ensaios convencionais e os de médias dimensões. Como justificativa para estas variações têm-se que, durante o processo de compactação da amostra de médias dimensões, pode ter ocorrido alguma região menos compactada do que quando se comparando ao ensaio em menor escala. E ainda que por se tratar de uma amostra de média dimensão podem existir zonas de variação da uniformidade da umidade da amostra.

Visando relacionar todos os aspectos estudados, a resistência ao cisalhamento, máximo de pedaços de pneu utilizados e aspectos da compactação, verificou-se que o melhor teor estudado foi o de 5% de pedaços de pneu, pois, apesar de apresentar fissuras, este teor apresentou para tensão de confinamento de 25 kPa uma queda na resistência ao cisalhamento porém para as demais tensões de confinamento sua resistência permaneceu similar.

Ressalta-se que o uso destes resíduos em misturas com solo são interessantes pois destinam estes resíduos mantendo, para maiores tensões normais, a resistência ao cisalhamento. Porém, seu uso é limitado, pois seria necessário um controle eficaz da umidade ótima para que sejam minimizadas as fissuras, e ainda seria necessário o estudo dos aspectos ambientais relacionados a este uso.

## 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

Este trabalho apresentou uma investigação laboratorial do potencial de uso de um subproduto de pneu inservíveis na mistura com solo laterítico argiloso. Apesar de alguns estudos quanto ao comportamento de misturas de resíduo e solo puramente granular, poucas são as pesquisas utilizando solos tropicais. Com o fim desta pesquisa foi possível concluir que:

- a) De forma geral, as amostras com umidades diferentes das da umidade ótima apresentaram muitas fissuras, e observou-se que quanto mais seco, 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.
- b) O teor de resíduo de pneu provoca certa influência no peso específico aparente seco da mistura, com queda de até 4,66% para os maiores teores estudados, enquanto a umidade não sofre grande alteração;
- c) Com o aumento do teor de resíduo de borracha, existe uma queda nos picos de resistência das curvas deslocamento horizontal *versus* tensão de cisalhamento das misturas.
- d) Com o aumento do teor de resíduo de pneu, o ângulo de atrito tende a aumentar e a coesão tende a diminuir, sendo a relação da coesão com uma queda consideravelmente linear, diferentemente da relação do ângulo de atrito.
- e) Não foi observada uma tendência clara com relação ao teor de borracha e tensão cisalhante máxima para qualquer das tensões estudadas.

Por fim, conclui-se que, apesar de certa queda na resistência ao cisalhamento das misturas, o uso dos resíduos de pneus pode ser realizado, devendo levar em consideração aspectos financeiros. Assim, esta solução pode ser utilizada para a minimização do descarte de pneus inservíveis como uma destinação técnica no campo da engenharia civil.

Observou-se ainda que o melhor teor para as características estudadas foi o T04 que corresponde a 5% de resíduo de borracha e 95% de solo, pois apesar da queda de resistência a baixas tensões, nas tensões normais maiores ele apresentou uma boa estabilização. Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se a utilização de partículas mais regulares com tamanhos mais homogêneos, bem como outros tipos de subprodutos de pneus inservíveis.

Para a utilização na prática, recomenda-se o estudo dos impactos ambientais que estas misturas possam causar ao meio, como ensaios de solubilidade, lixiviação, avaliação do potencial de contaminação da borracha quando incorporada ao solo em obras reais, bem como

estudos de viabilidade financeira. Sugere-se ainda o estudo da degradação da borracha nestas misturas, bem como o efeito da temperatura, reações com a água e etc.

Para o campo da Geotecnia sugere-se a realização de uma proposta similar a do ensaio CBR – Índice de Suporte Califórnia, para a utilização destas misturas como aterro em pavimentação. Sugere-se também um estudo da interação destas misturas com geogrelhas utilizando o mesmo tipo de solo desta pesquisa.

Sugere-se o estudo destes resíduos com outro tipo de solo como uma areia limpa e ainda uma trituração dos fragmentos obtidos em menores dimensões. Para a melhoria do equipamento de cisalhamento direto do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília indica-se o enrijecimento das laterais da caixa de cisalhamento, bem como acoplar uma caixa para possibilitar ensaios submersos.

E por fim, para evolução deste estudo para uma escala real, sugere-se a construção de aterros compactados com as misturas utilizadas nesta pesquisa.

## REFERENCIAS

---

- ABNT (1984a). NBR 6459/1984: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 6 p.
- ABNT (1984b). NBR 7180/1984: Determinação do Limite de Plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 3 p.
- ABNT (1984c). NBR 6508/1984: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 8p.
- ABNT (1984d). NBR 7181/1984: Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 13 p.
- ABNT (1986a). NBR 7182/1986: Solo – Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 10 p.
- ABNT (1986b). NBR 6457/1986: Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 9 p.
- ABNT (2004). NBR 10004/2004: Resíduos Sólidos – Classificação. Associação de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 77 p.
- ABRAPNEUS, (2012). Associação Brasileira dos revendedores de pneus, Produção anual. Disponível em: < [http://www.abrapneus.com.br/arearestrita/ap\\_estatistica1.php](http://www.abrapneus.com.br/arearestrita/ap_estatistica1.php)>. Acessado em: 16/03/2012.
- AHMED, I., LOVELL, C. W. (1993). Rubber Soils as Lightweight Geomaterials. Transportation Research Record, 1422: 61-70.
- AKBULUT, S., ARASAN, S., KALKAN, E. (2007). Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. Applied Clay Science, 38: 23-32.
- AN, D., e YANG, X. (2008). Shear behavior of sand-expanded polystyrene beads lightweight fills. J. Cent. South Univ. Technol, 15: 174-179.
- ANDRADE, H. S. (2007). Pneus Inservíveis: Alternativas Possíveis de Reutilização. Monografia, Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 101 p.
- ASTM (1998). ASTM D3080/98 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Underconsolidated Drained. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos, 6 p.
- ASTM (2008). ASTM D6270/08 - Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos, 20

p.

- ATTON, M. F. (2006). The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sands. *Environ Geol* 49: 497-503.
- BENSON, C. H. (1995). Using shredded scrap tires in civil and environmental construction. *Resource Recycling*, 95 (2): 1-4.
- BNDES (1997). Pneus: áreas de operações industriais 2; Setorial 2. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Brasília, DF, 35 p.
- BRAND, E.W., PHILLIPSON, H.B. (1985). Review of International practice for the sampling and testing of residual soil. *Samplers and Testing for Residual Soil: A review for International Practice*. Scorpion Press, Hong Kong, 7-21.
- CABALAR, A. F. (2011). Direct Shear Tests on Waste Tires-Sand Mixtures. *GeotechGeol Eng.*, 29: 411-418.
- CARDIM, R. D. (2008). Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107 p.
- CARGA PESADA (2013). Disponível em: <http://www.cargapesada.com.br/edicoesanteriores/edicao105/recau105.html>. Acessado em 14/01/2013.
- CAPPI, D. M. (2004). Recuperação Ambiental de Áreas Erodidas como Alternativa de Destino Final de Pneus Inservíveis. Dissertação (Mestrado), Escola de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 74p.
- CETIN, H., FENER, M. GUNAYDIN, O. (2006). Geotechnical Properties of Tire-cohesive Clayey Soil Mixtures as a Fill Material. *Engineering Geology*, 88:110-120.
- CEMPRE (2013). Disponível em: < [http://www.cempre.org.br/ft\\_pneus.php](http://www.cempre.org.br/ft_pneus.php) >. Acessado em 08/04/2013.
- CONAMA (2012). Resolução nº 258/1999. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html> >. Acessado em 15/05/2012.
- DAS, B. M. (2007). Fundamentos de engenharia geotécnica. Thomson, São Paulo, SP, vol 6, 559 p.
- DENATRAN (2013). Disponível em: < <http://www.denatran.gov.br/frota.htm> >. Acessado em 30/01/2013.
- EDIL, T., BOSSCHER, P., (1994). Engineering properties of tire chips and soil mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 14 (4): 453-464.
- EDINÇLILER, A., (2007). Using waste tire-soil mixtures for embankment construction. In: *International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials “Opportunities and*

- Challenges” . Kanto Branch of Japanese Geotechnical Society, Japan, 1: 319-328.
- EDINÇLILER, A., BAYKAL, G., SAYGILI, A. (2010). Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction. *Waste Management*, 30: 1073-1080.
- EHRlich, M., BEKCHER, L. (2009). Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução. *Oficina de Textos*, São Paulo, SP, 126 p.
- FEUERHAMEL, M. R. (2000). Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. *Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS*, 152 p.
- FIJII, L. M. T. (2012). Estudo de Misturas de Solo, RCD e Cal Virgem e Hidratada Para Uso em Obras Rodoviárias. *Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília, DF*, 156 p.
- FRANCO, K. L. B. (2012). Caracterização d Comportamento Geotécnico de Misturas de Resíduo de Pneus e Solo Laterítico. *Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN*, 139 p.
- FOOSE, G.J., BENSON, C.H., BOSSCHER, P.J. (1996). Sand reinforced with shredded waste tires. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (9): 760-767.
- GHAZAVI M. (2004). Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22: 401-406.
- GHAZAVI M.GHAFFARI, J., FARSHADFAR, A. (2011). Experimental Determination of Waste Tire chip-Sand-Geogrid Interface Parameters Using Large Direct Shear Tests.5<sup>th</sup> Symposium on Advances in Science & Technology Khavaran Higher-education Institute, Mashhad, Iran 1- 9.
- GOMES FILHO, C. V. (2007). Levantamento do Potencial de Resíduos de Borracha no Brasil e Avaliação de sua utilização na indústria da Construção Civil. *Dissertação (Mestrado Profissionalizante), Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR*, 138 p.
- GOOGLE EARTH (2012), Disponível em: <<https://maps.google.com.br/>>. Acessado em 28/02/2012.
- GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise Das Propriedades E Comportamento De Um Perfil De Solo Laterítico Aplicada Ao Estudo Do Desempenho De Estacas Escavadas. *Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF*, 207 p.
- HUMPHREY, D., SANDFORD, T. C. (1993). Lightweight Subgrade Fill and Retaining Wall Backfill. *Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-products for Construction of Highway Facilities Denver, Denver, Colorado*, 19-22.

- JIMÉNEZ (2011), A. M. G. (2011). Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para Utilização em Pavimentação. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148 p.
- LEE, H. J., e ROH, H. S. (2006). The use of recycled tire chips otimize dynamic earth pressure during compaction of backfill. *Construction and Building Materials*, 21: 1016-1026.
- LUND, H. F. (1993). *The McGraw Hill Recycling Handbook*. McGraw Hill, Michigan, Estados Unidos, 2 ed., 976 p.
- KAMIMURA, E. (2002). Potencial de Utilização dos Resíduos de Borracha de Pneus pela Indústria da Construção Civil. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 143 p.
- KLICK, E. (2003). *Grandes conquistas da humanidade*. Editora Klick, São Paulo-SP, 271 p.
- MARTINS, H. L. (2006). Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 116 p.
- MENDES, M. J. A. (2006). Comportamento Carga-Alongamento De Geotêxteis Não Tecidos Submetidos À Tração Confinada. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152 p.
- MENDES, C. B. A. M., NUNES, F. R. (2009). *Asfalto Borracha – Minimizando os Impactos Ambientais no Meio Ambiente gerados pelo descarte de pneus inservíveis*. Monografia, Curso de Engenharia de Produção-Civil da Faculdade Brasileira – UNIVIX, Vitória-ES, 60 p.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E AMBIENTE (2012). Art.º 13.º do Decreto de Lei n.º 78/2004. Disponível em: < <http://dre.pt/pdf1s/2004/04/080A00/21362149.pdf>>. Acessado em 15/05/2012.
- MOSELEY, M. P., KIRSCH, K. (2004) *Ground Improvement*. Taylor & Francis Group, New York, NY, 2ª edição, 431p.
- MOTTA, E. Q. (2011). Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Codisposição de Lodo de Tratamento de Esgoto através de Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 211p.
- MUÑETON, C. M. G. (2009). Uso de Biotecnologia na Melhoria de Solos para Fins de Pavimentação Rodoviária. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148 p.
- ODA, S. (2000). Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos

- EES/USP, São Carlos-SP, 300 p.
- PALMEIRA, E.M. (1998). Equipamento Para Ensaio de Tração Confinada de Geotêxteis em Solos – Versão 2. Relatório de Pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília.
- PALMEIRA, E. M. (2009). Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 27:368-390.
- PINTO, C. S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. Oficina de textos, São Paulo, SP, 367 p.
- PIRELLI (2012). Tudo sobre pneus. Disponível em: <[http:// www.pirelli.com/mediaObject/pirellityre/br/pt/extra-catalogue/car/all\\_about\\_tyres/about\\_tyres/original/about\\_tyres.pdf](http://www.pirelli.com/mediaObject/pirellityre/br/pt/extra-catalogue/car/all_about_tyres/about_tyres/original/about_tyres.pdf)>. Acessado em 11/03/2012.
- RAO, G. V., DUTTA, R. K. (2006). Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 711-724.
- REZENDE, L. R. (1999). Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.
- ROSA, A. C. (1998). Apostila de Curso Interno na Fundação GeoRio da Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro. Apostila, Rio de Janeiro, 39 p.
- SALES, K. C. S. (2012). Melhoria de Solos por Inclusão de Fibras Naturais. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148 p.
- SANTOS, E. C. (2007). Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 126p.
- SHAHIN, M. A., MARDESIC, T., NIKRAZ, H. R. (2011). Geotechnical Characteristics of Bauxite Residue sand mixed with crumbed Rubber from Recycled Car Tires. *Journal of GeoEngineering*, 6 (1): 63-72.
- SHALABY, A., KHAN, R. A. (2005). Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study. *Resources Conservation & Recycling*, 22: 318-332.
- SIDDIQUE, R. (2009). Utilization of waste materials and by products in producing controlled low-strength materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 54: 1-8.
- SILVA, Metodologia Para Determinação De Parâmetros Para Solos Não Saturados Utilizando Ensaio Com Umidade Conhecida. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113 p.
- SOUZA, M. V. R. (2011). Relatório cisalhamento Direto, concepção e dimensionamento da prensa de cisalhamento de grande escala do PPG-UNB. Relatório, Programa de Pós-

graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 29 p.

- SZELIGA, L., RAMIREZ, G. D., CASAGRANDE, M. D. T. (2012). Estudo experimental de soloreforçado com borracha moída de pneus inservíveis para aplicação em obras geotécnicas. XVI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – COBRAMSEG, Associação brasileira de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – ABMS, Porto de Galinhas, PE, ref. 231, 8p.
- TATLISOZ, N., EDIL, T. B., BENSON, C. H. (1998). Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124 (11): 1109-1119.
- VARGAS, M. (1977). Introdução à mecânica dos solos. MCgraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 509p.
- YOUWAI, S., BERGADO, D. T. (2004). Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material. *Computer and Geotechnics*, 31: 103-114.
- ZORNBERG, J. G., CABRAL, A. R., VIRATJANDR, C. (2004). Behaviour of tire shred – sand mixtures. *Can. Geotech. J.*, 41: 227-241.