



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**MANUELA CASSIANO DE MACEDO**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE  
MISTURAS DE SOLO COM RESÍDUOS DE PNEUS E RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Recife, PE

2016



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**MANUELA CASSIANO DE MACEDO**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE  
MISTURAS DE SOLO COM RESÍDUOS DE PNEUS E RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar

Co-orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Recife, PE

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Universidade de Pernambuco – Recife

M141i Macedo, Manuela Cassiano de  
Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição / Manuela Cassiano de Macedo. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2016.  
122 f.: il

Orientadora: Dra. Stela Fucale Sukar  
Co- orientador: Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.  
Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

1. Resíduo de pneus 2. RCD 3. Melhoramento de solo  
4. Comportamento geomecânico - Dissertação I. Sukar, Stela Fucale (orient.) II. Ferreira, Silvio Romero de Melo (co-orient.) III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

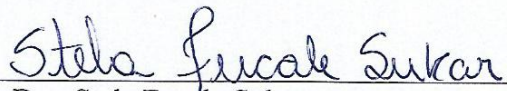
CDD: 624.15136

**MANUELA CASSIANO DE MACEDO**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO  
DE MISTURAS DE SOLO COM RESÍDUOS DE PNEUS E  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

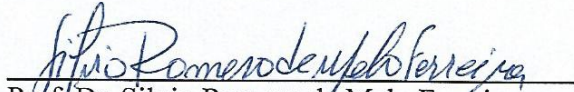
BANCA EXAMINADORA:

**Orientadora:**



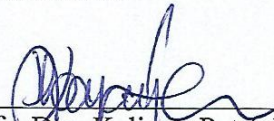
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Stela Fucile Sukar  
Universidade de Pernambuco

**Co-orientador:**

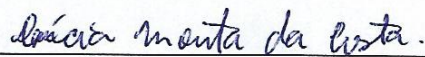


\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira  
Universidade Federal de Pernambuco

**Examinadores:**



\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Kaliny Patricia Vaz Lafayette  
Universidade de Pernambuco



\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Lícia Mouta da Costa  
Universidade Federal de Pernambuco

Recife, PE  
2016

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por toda a paciência, amor e  
apoio ao longo da minha caminhada

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Inácio e Neide, por sempre acreditarem que seria capaz. Em especial minha mãe que esteve sempre presente ao meu lado nesta jornada.

Ao meu irmão, pela descontração e por me auxiliar em certos momentos quando precisei de uma força “braçal”.

Aos meus orientadores, Stela Fucale e Silvio Romero, por todo conhecimento transmitido e pelas orientações fundamentais para estruturação deste trabalho.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CNPq, pela bolsa de estudos e CAPES pelo financiamento, a qual possibilitou a realização desse trabalho.

Aos alunos Amanda, Juan e Diogo pela contribuição na realização de alguns ensaios de laboratório. Em especial a Aline pelo comprometimento na execução destes ensaios.

Ao laboratorista Fábio por todo o auxílio, dicas e por tornar a vida dentro do laboratório menos pesada. Agradeço também a Francisco pela ajuda e direcionamento na execução de diversos ensaios.

Ao laboratorista da UFPE, Gutemberg, por ajudar na realização de alguns ensaios.

A todos os professores e funcionários do PEC que de forma direta ou indireta contribuíram para realização desta pesquisa.

MACEDO, Manuela Cassiano de. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2016. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2016.

## RESUMO

Grande é o volume de material gerado pela construção civil e pelo reaproveitamento de pneus causando impactos ambientais quando descartados de forma inadequada. É importante encontrar soluções a estas questões, dentre as possibilidades de utilização destes resíduos está o aproveitamento em obras geotécnicas como material alternativo para melhoramento do solo. Esse trabalho tem por objetivo analisar o comportamento geomecânico do solo, localizado na encosta do Alto Reservatório em Nova Descoberta, Recife – PE, a partir da inserção de resíduos de pneus provenientes da indústria de recapagem com misturas de 10, 20, 30, 40 e 50% em relação ao peso do solo seco, traçando um comparativo com a inclusão nas mesmas proporções de resíduos da construção e demolição (RCD). O programa de investigação constou da coleta e preparação das amostras, caracterização física e mecânica das amostras individualmente e misturas predeterminadas, a fim de se conhecer as características individuais destes materiais e avaliar possíveis alterações destes nas propriedades do solo. Nos ensaios de compactação constatou-se que o aumento do teor de resíduos de pneus ao solo provocou uma gradativa diminuição da densidade seca máxima, diferentemente das misturas de solo-RCD, que não proporcionaram alterações significativas quando comparadas aos resultados para o solo. As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a mistura de solo-pneus são típicas de material elastoplástico com endurecimento e a mistura solo-RCD são de material friável ou plástico, dependendo da tensão de consolidação. A mistura de solo-pneus apresentou os melhores parâmetros de resistência quando misturado 80% do solo com 20% de fibras de pneus e a mistura de solo-RCD apresentou os melhores parâmetros quando misturado 70% do solo com 30% de RCD. Desta forma, conclui-se que tanto os resíduos de pneus quanto os resíduos de construção e demolição podem ser utilizados como alternativa ao melhoramento do solo, sendo o primeiro mais adequado para estruturas que suportem maiores deslocamentos e o segundo para estruturas com deslocamentos menores.

**Palavras-chave:** Resíduo de pneus, RCD, Melhoramento de solo, Comportamento Geomecânico.

MACEDO, Manuela Cassiano de. **Research on the geomechanical behavior of soil mixtures with waste tires and construction and demolition wastes.** 2016. 117p. Master in Civil Engineering – Polytechnic School of Pernambuco, Pernambuco University. Recife, 2016.

## ABSTRACT

Great is the volume of material generated by the construction and the tire reuse causing environmental impacts when discarded improperly. It is important to find solutions to these issues, among the possibilities of using these wastes is the use in geotechnical works as an alternative material for soil improvement. This work aims to analyze the geomechanical behavior of the soil, located on the hillside of the Upper Reservoir in New Discovery, Recife - PE, from the waste tire insert from the retreading industry with mixtures of 10, 20, 30, 40 and 50% relative to the weight of the dry soil, drawing a comparison with the inclusion in the same proportions construction and demolition waste (CDW). The research program included the collection and preparation of samples, physical and mechanical characterization of the samples individually and predetermined mixtures, in order to meet the individual characteristics of these materials and evaluate these possible changes in soil properties. In compression tests it was found that increasing the level of waste tires to the ground caused a gradual decrease of the maximum dry density, unlike land-CDW mixtures, they did not provide significant change when compared to results for the soil. The shear stress versus horizontal displacement curves for the soil-tire mixture are typical of elastoplastic material with hardening and soil-RCD mixture are friable or plastic, depending on the consolidation of tension. The tire-soil mixture showed the best resistance parameters when mixed 80% soil of 20% of tire fibers and soil-RCD mixture showed the best parameters when mixed with soil 70% and 30% CDW. In this way, it can be concluded that both waste tires and construction and demolition waste can be used as an alternative to soil improvement, the former being more suitable for structures that support greater displacements and the latter for structures with smaller displacements.

**Keywords:** Waste tires, CDW, Soil improvement, Geomechanical Behavior.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhamento da Estrutura de um pneu (MICHELIN, 2014).....	21
Figura 2 - Processo de vulcanização (MARK <i>et al.</i> , 2013).....	23
Figura 3 - Ciclo de Vida do Pneu (RAMOS FILHO, 2005). ....	24
Figura 4 - Evolução do gerenciamento de pneus inservíveis na Europa (GOMES, 2013).....	27
Figura 5 - Visualização dos produtos obtidos a partir dos resíduos de pneus (EDINCLILER <i>et al.</i> , 2010).....	28
Figura 6 - Imagens eletrônicas de varredura (x 5000 ampliação): partículas de argila de tijolo (JIA <i>et al.</i> 2015).....	35
Figura 7 - Imagens eletrônicas de varredura do agregado natural 600x (a); agregado reciclado 600x (b); agregado reciclado 500x (c) - ARAÚJO, 2014. ....	35
Figura 8 - Comportamento do solo a) elemento do solo sem reforço; b) elemento do solo com reforço (SAYÃO <i>et al.</i> , 2009) .....	37
Figura 9 - Apresentação das amostras de pneus utilizadas na pesquisa (ZORNBERG <i>et al.</i> , 2004). ....	38
Figura 10 - Tensão cisalhante mobilizada para 5% de deformação axial (ZORNBERG <i>et al.</i> , 2004). ....	39
Figura 11 - Envoltórias de resistência mostrando a influência da razão comprimento/largura dos resíduos sobre a tensão de cisalhamento (Densidade relativa = 55%, x= 30%) - Zornberg <i>et al.</i> (2004). ....	39
Figura 12 - Curvas tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e deformação vertical para (a) solo argiloso e (b-f) misturas com resíduos finos (CETIN <i>et al.</i> , 2006). ....	42
Figura 13 - Curvas tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e deformação vertical para (a) solo argiloso e (b-f) misturas com resíduos grossos (CETIN <i>et al.</i> , 2006). ....	43

Figura 14 - Comportamento da coesão (a) e do ângulo de atrito (b) a partir da inserção de resíduos (CETIN <i>et al.</i> , 2006). .....	44
Figura 15 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal sob tensões normais; 100, 200, e 400 kPa (a,b,c) ; 0, 5, 10, 20, 30, e 100% (1-6) de resíduos de pneus, respectivamente (SOGANCI, 2015).....	45
Figura 16 - Envoltórias de resistência nas amostras de solo com diferentes teores de resíduos de pneus: 0, 5, 10, 20, 30 e 100% (SOGANCI, 2015).....	45
Figura 17 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a) TB1 - 10; b) TB1 - 20 (EDINÇLILER & AYHAN, 2010).....	47
Figura 18 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a) TB2 - 10; b) TB2 - 20 e c) TB2- 30 (EDINÇLILER & AYHAN, 2010). .....	47
Figura 19 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal com variação de teores de resíduos (FRANCO, 2012). .....	50
Figura 20 - Envoltória de resistência (FRANCO, 2012). .....	51
Figura 21 - Tensão x Deslocamento amostra RCD-R 05 (SANTOS, 2007). .....	53
Figura 22 - Envoltória de resistência amostra RCD-R 05 (SANTOS,2007). .....	54
Figura 23 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal do solo (a); do RCD (b) e do solo-RCD (c).....	55
Figura 24 - Envoltórias de resistência das misturas ensaiadas (DE SOUZA E REIS, 2015).....	57
Figura 25 - Programa experimental da pesquisa. ....	59
Figura 26 - Vista do bairro de Nova Descoberta.....	61
Figura 27 – Vista da encosta com os respectivos locais de pesquisas já realizadas (LIMA, 2002). .....	61
Figura 28 - Local de coleta da amostra de solo (A) – Processo de coleta (B). .....	62
Figura 29 - Processo de raspagem do pneu (ROCHA,2013). .....	63

Figura 30 - Amostra de resíduos de pneus coletada .....	64
Figura 31 - Usina de beneficiamento em Camaragibe-PE. ....	64
Figura 32 - Processo de coleta do material.....	65
Figura 33 - Amostra de RCD.....	65
Figura 34 - Misturas solo-resíduos a) amostra de solo-pneu com 40% de resíduos; b) solo com 50% de RCD.....	66
Figura 35 - Ensaio de Peneiramento (a); Ensaio de Sedimentação (b). ....	69
Figura 36 - Detalhe dos picnômetros: (a) após a retirada do ar; (b) totalmente preenchido. ....	70
Figura 37 - Corpo de Prova de uma mistura de solo com 30% de resíduos de pneus (S70P30). ....	71
Figura 38 - Corte esquemático do molde (a); Vista tridimensional do molde (b). ....	73
Figura 39 - Procedimento de moldagem dos corpos de prova. ....	75
Figura 40 - Curvas granulométricas do solo, resíduo de pneus e o RCD (a); das misturas solo-pneu (b); e das misturas solo-RCD (c). ....	77
Figura 41 - Curvas de compactação do solo e do RCD.....	83
Figura 42 - Curvas de compactação das misturas solo-pneu. ....	84
Figura 43 - Curvas de compactação das misturas Solo-RCD.....	84
Figura 44 - Gráfico de variação dos parâmetros de compactação das misturas de Solo-Pneu. ....	86
Figura 45 - Gráfico de variação dos parâmetros de compactação das misturas de Solo-RCD. ....	86
Figura 46 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) – Solo.....	88

Figura 47 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 10% de resíduos de pneus. ....	89
Figura 48 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 20% de resíduos de pneus. ....	90
Figura 49 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 30% de resíduos de pneus. ....	91
Figura 50 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 40% de resíduos de pneus. ....	92
Figura 51 - Definição da tensão de cisalhamento de ruptura (DE CAMPOS & CARRILHO, 1995). ....	95
Figura 52 - Envoltórias de resistência Mohr-Coulomb: a) para tensões cisalhantes máximas/ critério de CAMPOS & CARRILHO; deslocamento horizontal de 5 mm (b); e deslocamento horizontal de 10 mm (c). ....	95
Figura 53 - Síntese dos valores de coesão (a) e ângulo de atrito (b) para o diferentes teores e níveis de deslocamento de 5 mm e 10 mm, e resistência máxima / critério de ruptura De Campos e Carrilho (1995) das misturas de solo-pneus. ....	97
Figura 54 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 10% de RCD.....	98
Figura 55 -Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 30% de RCD.....	99
Figura 56 - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 50% de RCD.....	100
Figura 57 - Envoltórias de resistência Mohr-Coulomb: a) para tensões cisalhantes máximas/ critério de CAMPOS & CARRILHO, b) para tensões cisalhantes	

correspondentes a 5 mm de deslocamento horizontal e c) para tensões cisalhantes correspondentes a 10 mm de deslocamento ..... 102

Figura 58 - Síntese dos valores de coesão (a) e ângulo de atrito (b) para o diferentes teores e níveis de deslocamento de 5 mm e 10 mm, e resistência máxima das misturas de solo-RCD..... 104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação do ângulo de atrito com o teor de pedaços de pneus (ATTOM, 2006).....	40
Tabela 2 - Indicadores de resistência das amostras avaliadas (SOGANCI, 2015).46	
Tabela 3 – Dados dos ensaios de cisalhamento direto.....	48
Tabela 4 – Relação da coesão (c) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ) interno com o teor de resíduos (x) – (FRANCO, 2012).....	51
Tabela 5 – Parâmetros de resistência do solo, RCD e mistura (DIAS, 2014). .....	56
Tabela 6 – Parâmetros de resistência das misturas solo-RCD.....	57
Tabela 7 – Misturas preparadas de solo-pneus. ....	67
Tabela 8 – Misturas preparadas de solo-RCD. ....	67
Tabela 9 – Teor de umidade das misturas solo-pneus no período de 24h, 30h e 48h. ....	68
Tabela 10 - Percentual de argila, silte, areia e pedregulho nas amostras de solo, resíduo de pneus, RCD, e das misturas.....	78
Tabela 11 – Classificação SUCS e TRB para as amostras estudadas.....	79
Tabela 12 – Resultados dos Limites de Consistência para o solo e o RCD. ....	80
Tabela 13 – Resultados dos Limites de Consistência das amostras de solo-RCD. 81	
Tabela 14 – Densidade real das amostras individualmentee e das misturas solo-pneus e solo-RCD. ....	81
Tabela 15 – Comparação da densidade real dos grãos com outras pesquisas. ...	82
Tabela 16 - Umidade ótima e peso específico aparente seco do solo e RCD.....	83
Tabela 17 - Umidades ótimas e pesos específicos seco máximo das misturas solo-Pneu. ....	85
Tabela 18 - Umidades ótimas e pesos específicos seco máximo das misturas solo-RCD. ....	85
Tabela 19 - Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência máxima e os diferentes níveis de deslocamento do solo e das misturas. ....	96
Tabela 20 – Parâmetros de resistência para o solo e misturas de solo-RCD.....	103

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais alternativas para o tratamento dos pneus inservíveis (Autor, 2016).....	26
Quadro 2 – Causas para a geração de resíduos. ....	30
Quadro 3 – Composição dos RCD (SILVA, 2011).....	31
Quadro 4 – Quadro resumo das principais pesquisas apresentadas. ....	52
Quadro 5 – Quadro resumo das principais pesquisas apresentadas. ....	58
Quadro 6 – Quadro quantitativo de ensaios .....	60
Quadro 7 – Resumo das principais características físicas e mecânicas dos materiais .....	105

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Considerações Iniciais.....	12
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Estrutura da dissertação.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Introdução.....	18
2.2 Pneumáticos.....	20
2.2.1 Caracterização do pneu.....	20
2.2.2 O pneu como resíduo.....	23
2.3 Resíduos de Construção e Demolição.....	29
2.3.1 Características dos agregados reciclados.....	34
2.4 Solos reforçados.....	36
2.4.1 Solos Reforçados com Pneumáticos.....	37
2.4.1.1 Estudos realizados com chips de pneus.....	37
2.4.1.2 Estudos realizados com migalhas de pneus.....	41
2.4.1.3 Estudos realizados com desbastes de pneus.....	46
2.4.2 Solos Reforçados com RCD.....	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1 Coleta de Amostras.....	60
3.1.1 Solo.....	60
3.1.2 Resíduos de Pneus.....	62
3.1.3 Resíduos de Construção e Demolição.....	64
3.2 Preparação dos Materiais.....	66
3.3 Ensaio de Caracterização Física dos Materiais.....	67
3.3.1 Análise Granulométrica.....	68



3.3.2 Limites de Consistência .....	69
3.3.3 Densidade Real dos Grãos .....	70
3.3.4 Compactação Proctor Normal .....	70
3.4 Caracterização Mecânica .....	72
3.4.1 Ensaio de Cisalhamento Direto .....	72
3.4.2 Confeccção do molde .....	73
3.4.3 Moldagem dos Corpos de Prova.....	74
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	76
4.1 Caracterização dos Materiais .....	76
4.1.1 Análise Granulométrica.....	76
4.1.2 Limites de Consistência .....	80
4.1.3 Densidade Real dos grãos.....	81
4.1.5 Compactação Proctor Normal .....	82
4.2 Ensaio de Cisalhamento Direto .....	87
4.3 Análise da Influência da adição dos resíduos de pneu e RCD nas características física e mecânica das misturas .....	105
5 CONCLUSÕES .....	106
REFERÊNCIAS .....	108
APÊNDICE – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.....	115

## **1 INTRODUÇÃO**

É apresentado de forma abrangente a problemática relacionada a gestão dos resíduos sólidos enfocando as questões relacionadas aos pneus inservíveis e resíduos de construção e demolição (RCD), abordando as características inerentes a estes materiais, consequências do descarte inadequado, legislação e alternativas para uma correta destinação desses resíduos, assim como a possibilidade da utilização destes no melhoramento de solos. São pontuados também os objetivos e a estrutura desta dissertação.

### **1.1 Considerações Iniciais**

Nos últimos anos, as questões relacionadas ao meio ambiente ganharam um especial destaque, fruto da percepção do limite de capacidade do planeta em suportar o atual estilo de vida adotado pela sociedade, o qual está pautado na premissa extrair-produzir-descartar sem qualquer preocupação com consequências futuras. Desse modo, tem-se uma crise ambiental instalada apresentando índices cada vez mais alarmantes, exigindo mudanças urgentes.

Um dos pontos preocupantes neste contexto é, sem dúvida, a gestão adequada dos resíduos sólidos. Por muitos anos, os resíduos provenientes das atividades humanas foram bastante negligenciados, gerando um acúmulo quase que descontrolado. Com isso, alcançou-se um resultado de saturação ambiental em que não se comporta mais o volume produzido.

O descarte de resíduos é um problema que apresenta impactos diretos significativos à sociedade. Segundo Burker & Keller (2010), a quantidade de solo exigida para se manter e decompor estes materiais é um dos principais problemas, uma vez que estes espaços, de certa forma, podem ser vistos como recursos naturais desperdiçados, já que poderiam se configurar como áreas produtivas.

Frente a isso, está a questão relacionada aos pneus inservíveis que apresentam uma configuração complexa devido às suas características físicas e químicas. O pneu é um elemento que acompanha a sociedade desde o início da era automotiva. Contudo, apenas recentemente entrou na pauta de discussões devido aos efeitos nocivos provenientes de seu descarte inadequado. De forma geral, estes são projetados e construídos para possuírem uma alta durabilidade e, como tal, caracterizam-se por serem naturalmente não degradáveis.

A geração mundial de pneus inservíveis vem aumentando em ritmo acelerado, de modo geral, fruto da expansão da indústria automobilística. Dessa forma, a disposição destes resíduos vem tornando-se um enorme problema nos centros urbanos. É estimado que 13,5 milhões de toneladas de pneus são descartados todo ano. Em 2009 constatou-se que, em média, no mundo, um total de 3 bilhões de pneus inservíveis foram depositados de forma ilegal no meio ambiente (WANG et al., 2009). Com isso, percebe-se a imensa necessidade de se destinar e transformar esses resíduos em possíveis fontes de matéria-prima.

A fim de regulamentar o descarte deste tipo de resíduo, foi aprovada no Brasil a Resolução nº 416/09 do CONAMA (BRASIL, 2009), que tem por objetivo dispor sobre a destinação final de forma ambientalmente adequada e segura dos pneumáticos. Vale ressaltar, também, que esta mesma legislação determina aos fabricantes e importadores que sejam promovidos estudos e pesquisas a fim de desenvolver técnicas para uma melhor reutilização, reciclagem, como também da coleta e destinação destes resíduos.

No Brasil, de acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos no ano de 2014 cerca de 445 mil toneladas de pneus inservíveis, o equivalente a 89 milhões de pneus de passeio, foram coletados e receberam um correta destinação. Segundo a Reciclanip (2014), os pneus inservíveis recolhidos, atualmente, têm três destinações principais: i) a queima em fornos de cimento, ii) a utilização direta nas indústrias de artefatos de borracha e iii) a trituração em que ocorre a

separação da borracha do aço e dos produtos têxteis, resultando numa produto com uma variedade de granulometrias que pode ser utilizada de diversas formas, a exemplo do asfalto-borracha.

Dentre as alternativas de utilização destes resíduos, surge a possibilidade de aplicação em obras geotécnicas como material alternativo para melhoramento do solo (ATTOM, 2006; CETIN *et al.*, 2006; OIKONOMOU & MAVRIDOU, 2009; HAZARIKA *et al.*, 2010; TAPAS & BALESHWAR, 2013). De acordo com Tapas & Baleshwar (2013), os pneus possuem propriedades que tornam seu uso viável, pois têm alta resistência, elevada durabilidade, baixo custo e uma menor densidade relativa a outros materiais. Podendo ser utilizado tanto inteiro, aos pedaços ou triturados, sozinhos ou misturados ao solo.

Outro material também proveniente dos pneumáticos que merece destaque são os desbastes, subprodutos resultantes do processo de recuperação de pneus usados que consiste na remoção da superfície de contato antiga e fabricação de uma nova. Nesse processo de retirada e colocação deste novo recobrimento é gerado, então, resíduos de borracha de forma alongada que se assemelham a fibras, criando elementos com potencial de uso para melhoramento de solos.

Inserido também nesta problemática ambiental estão os resíduos de construção e demolição (RCD). Sabe-se que a Indústria da Construção Civil, é sem dúvida um dos grandes responsáveis pelo desenvolvimento social e econômico de um país, todavia é também uma das atividades que mais causam impacto ao ambiente seja pelo consumo excessivo de recursos naturais e energia, seja pela geração de resíduos.

De acordo com Silva (2011), o setor da construção civil gera em média, só na União Europeia, 100 milhões de toneladas de resíduos por ano, tornando-se uma das atividades que mais impactam diretamente o meio ambiente. Sendo essa expressiva geração de resíduos constatada quando analisada a parcela constituinte de RCD na totalidade dos Resíduos

Sólidos Urbanos (RSU) dos grandes centros urbanos brasileiros em que se observa uma taxa de 50% a 71% (SILVA *et al.* 2015).

Estes materiais residuais caracterizam-se por apresentar um grande volume associado a uma alta taxa de geração, causando ao espaço urbano diversos prejuízos quando do seu mau gerenciamento. Um aspecto válido de citação é, segundo Gusmão (2008), o grande potencial de reciclagem destes resíduos alcançado a taxa de cerca de 91% do total.

Dessa forma, a fim de minimizar os problemas associados aos resíduos de construção e demolição foi publicada a Resolução nº 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão adequada do RCD, propondo ações de forma a diminuir os impactos ambientais. Com isso é proposto aos geradores a não geração de resíduos, assim como a redução, reutilização e reciclagem, do mesmo modo que a disposição ambientalmente adequada dos mesmos.

Uma alternativa viável para estes materiais residuais é a utilização em obras geotécnicas tal como solo reforçado, ou pavimentação visto que estes tipos de obras requerem um grande volume de materiais permitindo o direcionamento adequado de uma expressiva quantidade destes resíduos, ao passo que estes apresentam, de modo geral, propriedades que justificam seu uso (SANTOS, 2007)

O emprego de um material alternativo associado ao solo surge como uma solução interessante sob o aspecto técnico, buscando-se o melhoramento das características e propriedades do solo. A exemplo do solo, objeto de estudo desta e de outras pesquisas anteriores (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002; SÁ, 2006 e MOURA, 2009), que está localizado em um encosta no município de Recife-PE, no bairro de Nova Descoberta, que possui dentre vários aspectos, o histórico de diversos deslizamentos.

De acordo com Lima (2002), a referida encosta apresenta características de risco, principalmente pela ocupação antrópica desordenada:

construção de casa com a retirada da cobertura vegetal primitiva e taludes quase verticais.

Diante disso busca-se não só estimular uma consciência ambiental adequada em relação a estes tipos de resíduos, mas também fortalecer a utilização destes como uma alternativa em materiais geotécnicos.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

A pesquisa tem como objetivo geral analisar o comportamento físico e mecânico de misturas de solo e resíduos de pneus, provenientes de recuperação de pneus usados, assim como misturas de solo e resíduos de construção e demolição (RCD), para obras geotécnicas.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

A fim de se alcançar o objetivo geral desta pesquisa foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- analisar as propriedades físicas e mecânicas do solo, do resíduo de pneus e dos RCD;
- avaliar o comportamento físico e mecânico de misturas solo-resíduo, em diferentes percentuais de substituição do resíduo em peso;
- verificar a influência da adição dos diferentes teores de resíduos de pneus no comportamento das misturas solo-resíduo, em comparação com a mesma proporção de RCD.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 aborda de forma breve a problemática dos resíduos, seus impactos ambientais e prejuízos ao homem, assim como, possíveis alternativas para um descarte adequado. Apresenta também os objetivos, a metodologia e a organização do texto.

O Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, abrangendo a questão da sustentabilidade em relação à gestão de resíduos, problemática do descarte de pneus e tecnologias de tratamento para estes elementos, assim como apresenta um panorama sobre os resíduos de construção e demolição (RCD), além de abordar a utilização destes materiais e de resíduo de pneus e RCD, em obras geotécnicas.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para a realização da pesquisa, descrevendo o processo de coleta e preparação dos materiais, a metodologia dos ensaios e as normas seguidas.

O Capítulo 4 exhibe os resultados e as correspondentes análises obtidas a partir da realização dos ensaios, apresentando os dados e as avaliações da inserção de resíduos ao solo.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões acerca da pesquisa, assim como sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aborda-se neste capítulo a problemática relacionada ao descarte de pneus inservíveis, suas características, principais destinações e tipos de resíduos. Assim como o RCD, pontuando, de modo geral, as formas de geração, a composição, os prejuízos causados ao ambiente e as propriedades deste material. Enfocando também a utilização destes materiais como reforço ao solo.

### 2.1 Introdução

A geração de resíduos é algo inevitável; por mais que se procure a adoção da ideologia “lixo zero”, elementos residuais são sempre produzidos. Segundo Eigenheer (2009), mesmo nas mais simples atividades humanas ocorrem a produção de resíduos. Isto se dá tanto na preparação como ao fim da vida útil daquilo que é processado. Assim sendo, cabe à sociedade saber como se relacionar com estes materiais, utilizando as potencialidades dos mesmos a seu favor, reduzindo seus prejuízos ao ambiente.

Dentre a variabilidade de resíduos gerados no espaço urbano, há aqueles que merecem especial destaque; a exemplo dos resíduos de construção e demolição (RCD) e os pneus, devido ao grande volume de produção e as características peculiares que possuem. Sabe-se que, diferentemente dos resíduos orgânicos, estes, em sua maioria, não se deterioram, não apresentam odor, assim sendo, quando dispostos em locais inadequados, em geral, permanecem por longos períodos até a retirada.

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), que abrange os resíduos sólidos e suas classificações, o RCD e os pneus se enquadram na classe II como resíduos não perigosos, materiais que não possuem características de inflamabilidade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Esta classe se subdivide em II A, não inertes, que são os resíduos que podem possuir algumas propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, exigindo um gerenciamento específico, assim como



os pneus. E Classe II B, os inertes, resíduos sem periculosidade, que não apresentam nenhuma das propriedades citadas na classe II A, que submetidos ao contato direto com água destilada ou deionizada, não apresentam, na maior parte de seus constituintes, índices de solubilização acima dos padrões de potabilidade da água, da mesma forma que o RCD.

No entanto, apesar da classificação da supracitada norma, inserir estes materiais fora da zona de periculosidade, não os torna inofensivos. Sabe-se que o descarte inadequado destes resíduos em locais públicos transformam estes elementos em pólos geradores de diversos problemas, atraindo o descarte de novos materiais, gerando mais acúmulos e proliferação de vetores patogênicos.

Assim sendo, a problemática em relação aos resíduos assume, na atualidade, um papel de extrema relevância posicionando-se nos centros das discussões ambientais devido, em parte, aos altos custos operacionais ligados ao seu gerenciamento, e a crescente necessidade de controlar a sua geração a fim de se alcançar um ambiente mais sustentável.

Segundo a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED, 1987), o desenvolvimento sustentável, nada mais é que:

"Um processo de mudança no qual a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estão todos em harmonia reforçando o potencial para atender às necessidades e aspirações humanas tanto atuais quanto futuras".

Diante disso, percebe-se que, para se alcançar a sustentabilidade, é preciso empenho de todos. Assim sendo, a busca por tecnologias e alternativas favoráveis ao meio ambiente é um processo contínuo. Dessa forma, a adoção de práticas à redução, reutilização e reciclagem destes materiais criam novas possibilidades a estes resíduos, a exemplo da inserção destes na cadeia produtiva industrial, dentre elas a da Construção Civil.

É sabido que a Indústria da Construção Civil é um dos ramos que mais consomem recursos naturais do planeta, estando extremamente dependente do ambiente para produção de suas atividades. Nesse contexto, diante das atuais dificuldades, é estimulada a se adaptar, cabendo à Engenharia Civil encontrar novos caminhos a fim de propor práticas mais sustentáveis, tal que atendam concomitantemente as necessidades da sociedade e a preservação do meio ambiente.

Como opção, surge a utilização dos resíduos para a substituição dos agregados naturais, parcial ou totalmente, seja no concreto não estrutural, na produção de blocos, na construção de rodovias ou mesmo inseridos ao solo em obras geotécnicas (FUJII, 2012; FARIAS, 2013; LUNDGREN, 2014; SANTOS NETO, 2015; RODRIGUES, 2015)

Contudo, de acordo com Edinçliler *et al.* (2010), o aumento do uso de elementos residuais em aplicações de engenharia implica na necessidade de uma maior compreensão de suas propriedades. Devido à diferença de tamanhos, formas e texturas dos materiais usados, bem como da utilização de equipamento de ensaios convencionais desenvolvidos, especificamente para os solos, limitando, por vezes, a previsão do comportamento mecânico dos materiais reciclados e dos resíduos.

## **2.2 Pneumáticos**

### ***2.2.1 Caracterização do pneu***

Para fins de conceituação considera-se, segundo a Resolução do CONAMA nº 416 (BRASIL, 2009), o pneu ou pneumático um elemento integrante de um sistema de rodagem composto por um conjunto de componentes que tem por objetivo transmitir a tração gerada por meio da aderência ao solo, bem como, sustentar elasticamente o peso do veículo e a resistência à pressão provocada pelo contato com o solo.

A referida resolução também define pneu novo como sendo aquele que não apresenta sinais de uso ou reforma como também características de envelhecimento ou deterioração. Já os pneus inservíveis se caracterizam

pela impossibilidade de reparação por conta de danos que comprometem a estrutura.

Por vezes, pensa-se no pneu como um mero complemento na estrutura de um automóvel, não percebendo seu grau de importância como único ponto de contato entre o automóvel e a via, sendo um meio condutor, guiando com precisão o veículo. Para tanto, possui uma conformação muito bem estruturada, como pode ser vista na Figura 1.

**Figura 1** - Detalhamento da Estrutura de um pneu (MICHELIN, 2014).



As partes principais que compõe o pneu são os talões, a carcaça e a banda de rodagem. Uma descrição sobre cada componente é apresentada a seguir (MICHELIN, 2014):

- os talões se constituem de fios metálicos revestidos de borracha permitindo manter o pneu fixado ao aro;
- a carcaça é uma superfície de grande resistência composta por um conjunto de camadas com fibras naturais, sintéticas ou metálicas, sendo, atualmente, constituída principalmente por um trançado de cordas de rayon;
- a banda de rodagem e as paredes laterais, ponto de contato direto com o solo, possuem uma composição com misturas de borracha no qual é adicionado o negro-de-fumo.

Para se alcançar um desempenho satisfatório dos pneus nos mais variados ambientes, como relata a ANIP (2014), é necessária uma combinação integrada entre processos e matérias-primas, em que se encontram os seguintes componentes: i) borracha natural, ii) borracha sintética, iii) derivados do petróleo, como o negro de fumo, iv) cabos de aço, cintas de aço ou náilon e v) diversos produtos químicos como o enxofre.

É válido ressaltar que a adição de derivados do petróleo (negro-de-fumo) aumenta consideravelmente a resistência à abrasão, bem como a durabilidade do pneu. Com um aumento de vida útil de 8000 km para até 129.000 km em alguns pneus, atinge-se uma taxa de elevação de até 16 vezes (BNDES,1998). Antes disso, os pneus possuíam a cor original da borracha natural, próxima do branco e não tinha tanta durabilidade.

Observa-se, contudo, que o negro de fumo, componente que tem como finalidade aumentar a resistência mecânica dos pneus é, também, responsável por dificultar a sua reciclagem, gerando grandes problemas ambientais (BNDES,1998).

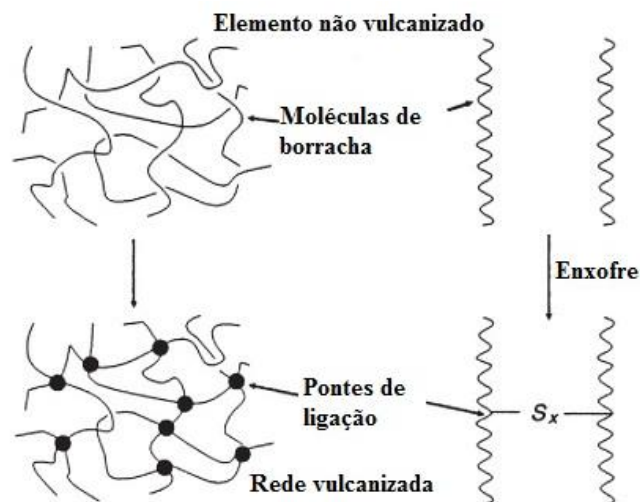
Analisando-se as matérias-primas que compõe o pneu, observa-se que cerca de 40% de sua composição é borracha, 25% de fuligem (derivados do petróleo), 15% de composto de aço, 5% de tecidos e os 15 % restantes de outros compostos químicos (TAPAS & BALESHWAR, 2013).

Vale destacar que a fabricação do pneu envolve um processo conhecido como vulcanização, que consiste numa reação entre o elastômero, produto presente na borracha, o enxofre, bem como outros produtos químicos que gera a formação de uma rede tridimensional química. Outro ponto característico nessa composição são os elastômeros reticulados que se constituem de materiais termofixos sólidos, insolúveis e infusíveis, o que torna o reprocessamento direto e a reciclagem dos pneus dificultosa (MARK *et al.*, 2013).

De acordo com Mark *et al.* (2013), a vulcanização consiste, portanto, de um processo que envolve a produção de junções químicas pela inserção

de componentes, tal qual o enxofre presente nos pneus, que permitem as ligações cruzadas entre as cadeias de polímeros (Figura 2), aumentando dessa forma a elasticidade do material, ao mesmo tempo em que diminui a plasticidade. Sendo assim, proporciona uma maior resistência e durabilidade ao pneu, ao passo que traz dificuldades quanto a uma possível reciclagem do material.

**Figura 2** - Processo de vulcanização (MARK *et al.*, 2013).



Os pneus, portanto, possuem uma composição complexa, caracterizando-se como um produto durável, mas que possui uma característica agregada de ser naturalmente não biodegradável, o que se torna um problema no momento em que estes passam a condição de inservível.

### **2.2.2 O pneu como resíduo**

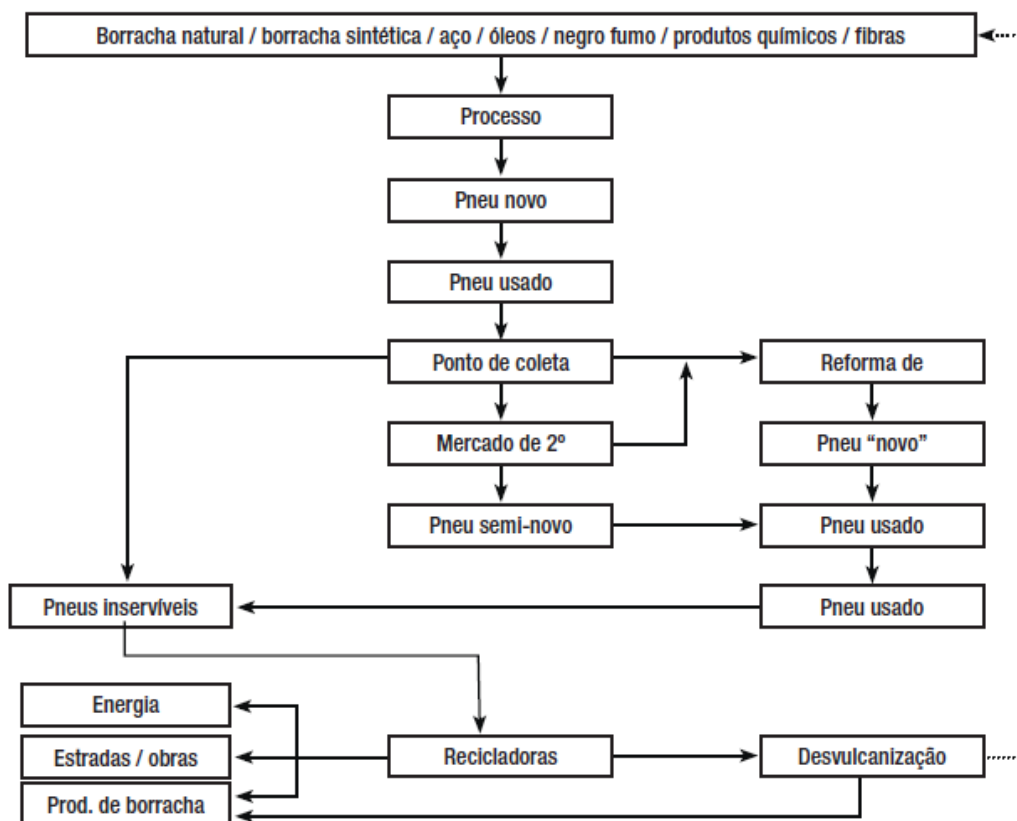
De acordo com os dados levantados pela WBSCD (2010), avalia-se que a cada ano são gerados, em média, 1 bilhão de unidades de pneus inservíveis em todo mundo. Segundo ETRA (2014), só na União Europeia, cerca de 3,5 milhões de toneladas de pneus se transformam em resíduos a cada ano.

A ausência de dados sobre o destino de pneus inservíveis no Brasil não permite determinar com certeza o passivo ambiental. No ano de 2002, baseado na frota de veículos do país, foi estimada uma geração anual de aproximadamente 44 milhões de carcaças de pneus, com um total, até

aquele momento, de 100 milhões de pneus abandonados irregularmente em todo território nacional (BERTOLLO, 2002). Em 2013, no Brasil, o volume de vendas (produção + importação) foi de 72,6 milhões de unidades (ANIP, 2014), que correspondeu a um aumento de 6,9% em relação ao ano anterior, demonstrando desta forma um maior consumo e conseqüentemente uma tendência no aumento na geração destes resíduos.

Assim sendo, como todo material, o pneu possui um ciclo de vida útil, possuindo ainda alternativas para o prolongamento do seu uso e retardamento do seu descarte como é o caso da recapagem, reforma e remoldagem. A Figura 3 apresenta o ciclo de vida de um pneu, desde a sua fabricação ao seu descarte.

**Figura 3 - Ciclo de Vida do Pneu (RAMOS FILHO, 2005).**



O ponto-chave deste esquema é a etapa em que o pneu já usado pode ser diretamente descartado se sua estrutura estiver comprometida ou ser reformado, voltar ao mercado e dessa forma postergar o descarte deste material diminuindo o volume de resíduos gerados.

O descarte de pneus que não possuem mais utilidade não é tarefa fácil, pois se configura como um produto de difícil degradação. Sua forma bem como resistência à compactação dificulta o armazenamento, demandando uma grande quantidade de espaço (BNDES, 2007; TAPAS & BALESHWAR, 2013). Considerando-se que um pneu pesa em média entre 10 kg e 50 kg, e que cerca de 75% do seu volume é formado por um espaço vazio, constitui-se de um elemento extremamente volumoso, de modo que ocupa grandes áreas nos aterros sanitários (CETIN *et al.*, 2006; MARTÍNEZ, 2013).

Apesar dos pneus possuírem características que não os enquadram como perigosos, conforme classificação pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), os mesmos proporcionam impactos diretos ao ambiente, tornando-se meio para possíveis incêndios ou abrigos para vetores patogênicos. Vale destacar que o pneu, devido a sua forma, possui uma capacidade física de acumular água e absorver luz, tornando-se um habitat ideal para a proliferação de diversos agentes causadores de doenças.

Outro aspecto a ser considerado é a disposição de oxigênio que se estoca no interior das pilhas de pneus, sendo condição suficiente para proporcionar um incêndio devido aos seus componentes inflamáveis (OIKONOMOU & MAVRIDOU, 2009), a exemplo do que ocorreu no maior lixão ilegal da Espanha onde houve em maio de 2016 um incêndio de grandes proporções gerando uma nuvem tóxica afetando diretamente cerca de 20.000 habitantes (BBC, 2016) . Destaca-se como produto desta queima, a liberação de substâncias tóxicas e cancerígenas, como dioxinas e furanos (BNDES, 2007).

Assim sendo, foi criada uma ação em conjunto entre os fabricantes e importadores juntamente com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), implantando-se o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis. Foram criados diversos pontos de coleta a fim de se evitar os danos causados pelo descarte inadequado destes resíduos em todo o Brasil, contando, em 2014, com um total de 819 pontos. Este programa é administrado pela Reciclanip, entidade ligada a

ANIP, voltada, exclusivamente, para a coleta e destinação de pneus inservíveis.

Diante disso, percebe-se que a destinação correta e ambientalmente adequada para os pneus inservíveis possui certa complexidade, exigindo um gerenciamento cauteloso. No entanto, já existem, hoje, diversas alternativas para o reuso ou recuperação destes materiais. Seguindo a hierarquia de princípios que compõe o gerenciamento destes resíduos, procura-se, em primeiro lugar, o reuso, seguido pela reciclagem e a recuperação energética. Assim sendo, as tecnologias voltadas para o tratamento destes resíduos se estruturam da seguinte maneira (Quadro 1).

**Quadro 1** – Principais alternativas para o tratamento dos pneus inservíveis (Autor, 2016).

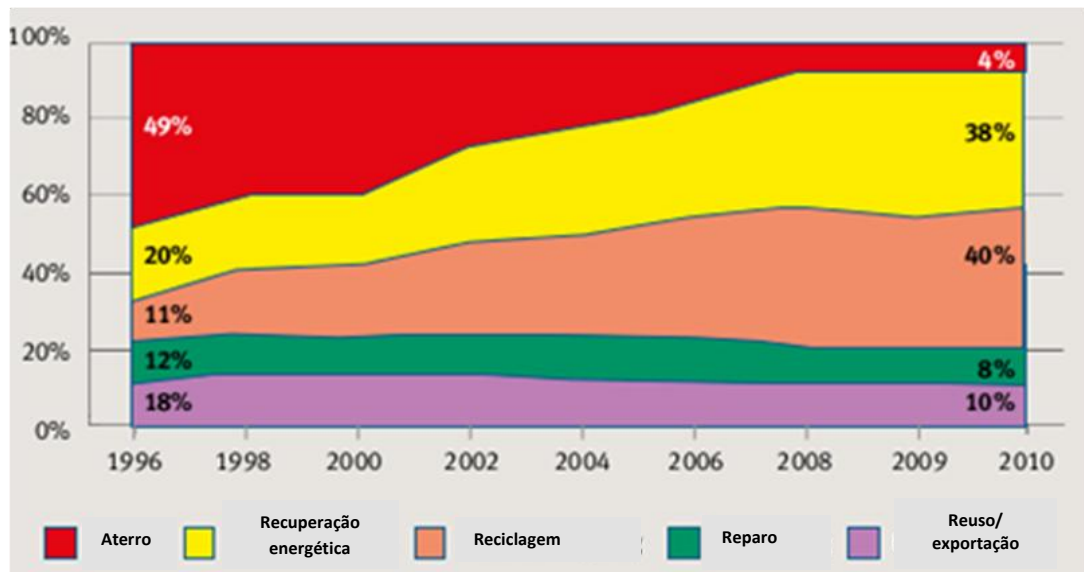
TIPOS	MODO	PROCESSOS
Reuso sem descaracterização da forma	Reparação	Recauchutagem
		Remoldagem
	Reutilização física	Utilização do pneu na sua forma original
Reaproveitamento do material	Física	Trituração
	Química	Regeneração
	Térmica	Pirólise
		Combustão
Recuperação energética	-	Co-incineração

De acordo com ETRMA (2012), desde 1996, mais de 24 milhões de toneladas de pneus em fim de vida foram recuperadas por meio de energia ou de recuperação de material, e em 2010, apenas 4% dos pneus em fim de vida produzidos foram depositados em aterro, contra 96 % de



outros destinos (38% de recuperação de energia, 40% de reciclagem de material, de 8% de recauchutagem, e 10% de reutilização / exportação), Figura 4.

**Figura 4** - Evolução do gerenciamento de pneus inservíveis na Europa (GOMES, 2013).

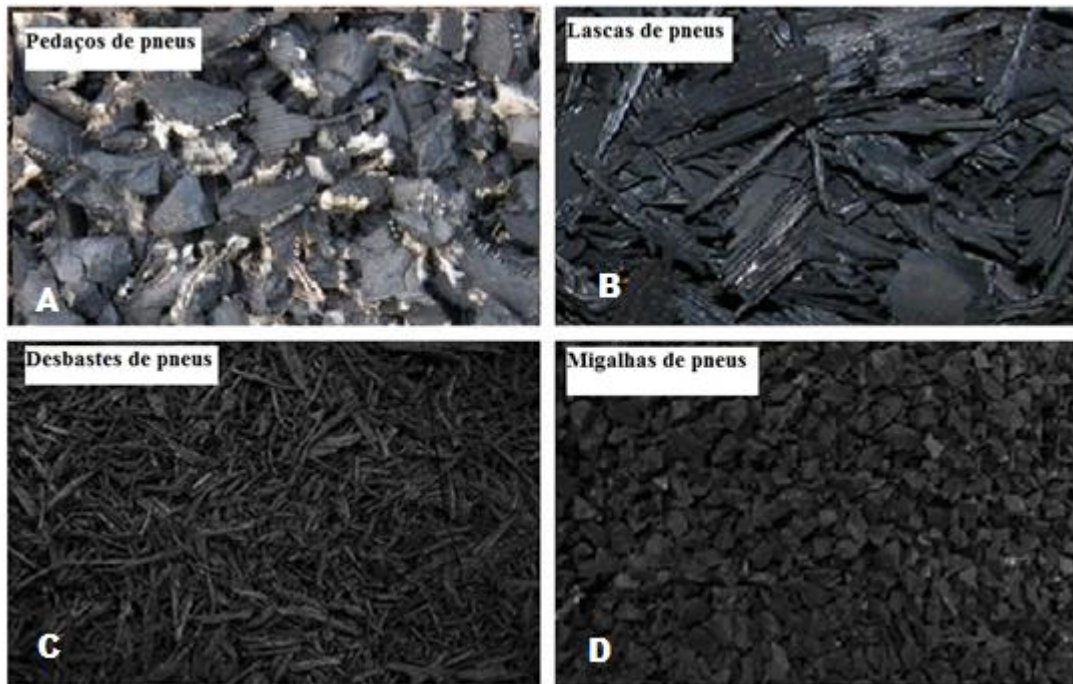


No Brasil, as tecnologias de destinação ambientalmente adequadas para pneus inservíveis, comumente praticadas pelas empresas, segundo o Relatório de Pneumáticos de 2013 (IBAMA,2013) são:

- **Co-incineração:** trata-se da utilização de pneus inservíveis em fornos de clínquer como substituto parcial de combustíveis e como fonte de elementos metálicos devido ao seu alto poder calorífico;
- **Desvulcanização:** atividade pelo qual passa o pneu inservível a fim de se produzir a borracha desvulcanizada a partir da quebra das ligações químicas de sua composição.
- **Pirólise:** processo de decomposição térmica da borracha conduzido na ausência de oxigênio ou em condições em que a concentração de oxigênio é suficientemente baixa para não causar combustão, com geração de óleos, aço e negro de fumo.

- **Trituração:** consiste na trituração e refinamento da borracha por meio de um processo industrial que resulta na borracha moída, em diferentes granulometrias, com separação e aproveitamento do aço, como pode ser observado na Figura 5.

**Figura 5** - Visualização dos produtos obtidos a partir dos resíduos de pneus (EDINCLILER *et al.*, 2010).



Segundo a ASTM D 6270 (1998), os resíduos de pneumáticos podem ser classificados em:

- **pedaços de pneus:** são pedaços de pneus com dimensões compreendidas entre 50 mm e 305 mm (Figura 5a);
- **chips de pneus:** pedaços de pneus que possuem uma forma geométrica básica, medindo entre 12 mm e 50 mm;
- **lascas de pneus:** são fragmentos de pneus que possuem tamanho entre 2mm e 12 mm (Figura 5b);
- **migalha de pneus:** são partículas de borracha com dimensões entre 0,6mm e 2mm (Figura 5d);
- **pó de borracha ou borracha moída:** abrange as partículas de borracha menores que 0,6mm.

Um outro elemento residual proveniente de pneus são os desbastes (Figura 5c), produto derivado do processo da recuperação de pneus usados que ainda não se enquadram na categoria de inservíveis.

Vale salientar que esses processos não se configuram como um método de descaracterização da estrutura do pneu mas uma opção para aumentar a vida útil deste, prolongando seu uso e, conseqüentemente, adiando seu descarte, diminuindo o volume de resíduos gerado. São três os tipos de reformas de pneus: a recapagem, a recauchutagem e a remoldagem.

A recapagem consiste na aplicação de uma nova camada de borracha apenas na banda de rodagem, sendo mais utilizada em pneus de carga. Já a recauchutagem realiza a substituição da banda de rodagem até os ombros<sup>1</sup> do pneu. E na remoldagem, ocorre o recobrimento com uma nova camada de borracha em toda a estrutura entre os talões.

### **2.3 Resíduos de Construção e Demolição**

De modo geral, é sabido que a Indústria da Construção Civil é um dos maiores e mais ativos setores dentro da economia de um país, consumindo mais matéria-prima e energia que qualquer outra atividade econômica. E se por um lado impulsiona o desenvolvimento da economia, na contramão é um dos principais responsáveis pela degradação ambiental, assim como da grande parcela de resíduos gerados no espaço urbano.

Sabe-se que a ação de construir é uma atividade secular, e como tal apresenta diversas mudanças e desenvolvimentos técnicos ao longo dos anos. No entanto, uma característica peculiar ainda muito presente no setor é o forte traço artesanal na execução das atividades, ocasionando desperdícios, e, conseqüentemente, contribuindo para a alta taxa de geração de resíduos (SANTOS, 2007; SILVA, 2011).

---

<sup>1</sup> Parte externa entre a banda de rodagem, parte do pneu que entra em contato com o solo, e seu flanco, parte lateral do pneu (INMETRO, 2016).

Para fins de conceituação, consideram-se, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), resíduos de construção e demolição (RCD) os materiais residuais provenientes de atividades de construções, reformas, reparos e demolições, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis. As causas para a geração de resíduos são diversas, como podem ser resumidas no Quadro 2.

**Quadro 2** – Causas para a geração de resíduos.

<b>Atividade</b>	<b>Causa da produção de resíduos</b>
Reformas	A ausência de incentivo no aproveitamento e na reciclagem dos materiais, assim como a falta de planejamento por vezes neste tipo de obra ocasionando a geração de resíduos.
Demolição	Causada pela própria atividade, entretanto a escolha da forma de execução poderá permitir a reutilização de elementos residuais e a inserção destes em outras obras.
Construção Nova	Falta de compatibilização de projetos, racionalização e planejamento do uso de materiais.

É estimado que, anualmente, apenas na União Europeia, sejam geradas em média 100 milhões de toneladas de RCD (APA,2016). No Brasil este volume chega a ser de 45 milhões de toneladas (ABRELPE, 2015), contudo esta estimativa de cálculo por vezes é prejudicada devido a grande parcela do total destes resíduos serem descartados de forma irregular no ambiente, não sendo contabilizado. Como consequência, acarreta em diversos problemas no espaço urbano como poluição visual, degradação do ambiente ou mesmo a possibilidade de abrigo a diversos vetores de doenças.

Outro problema é o surgimento da necessidade do retrabalho por parte das empresas de coleta urbana que são obrigadas a recolher a custos maiores estes resíduos no espaço urbano; a Companhia de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro estimou em 2012 que o valor de coleta destes resíduos era em média 70 R\$/t. (LIMA, 2013)

Segundo Angulo *et al.* (2011), os RCD representam, em média, 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tanto no Brasil como em outros países. Segundo dados da Associação Brasileira de Limpeza Urbana e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2015), houve um aumento de 4,1% na quantidade de RCD coletado no país entre os anos de 2013 e 2014.

Vale salientar que este tipo de resíduo tem origens diversas em toda cadeia produtiva da construção civil, estendendo-se desde a prospecção de matéria-prima natural até o fim da vida útil das construções. Apresenta em sua composição diversos materiais de acordo com as características de cada edifício e os diferentes métodos construtivos utilizados, fornecendo a estes resíduos uma heterogeneidade (SILVA, 2011). No Quadro 3 pode-se identificar os materiais comumente encontrados nos RCD.

**Quadro 3 – Composição dos RCD (SILVA, 2011).**

<b>Composição dos RCD</b>			
<b>Recicláveis</b>	<b>Inertes</b>	<b>Perigosos</b>	<b>Não-perigosos</b>
Papelão	Concreto	Amianto	Misturas de concreto
Plástico	Cerâmica	Asfalto	Gesso
Madeira	Argamassa	Tinta	Fibrocimento
Metais	Alvenaria	Verniz	Fibra de vidro
Vidro	-	-	Lã de rocha

De modo geral, os RCD quando mal gerenciados causam impactos ambientais, tais como assoreamento de corpos hídricos, poluição visual, atração de resíduos não inertes que levam à atração de animais vetores

de doenças, dentre outros. Além disso, por serem resíduos volumosos, contribuem para a aceleração da vida útil de aterros sanitários.

No Brasil, existem leis que disciplinam o gerenciamento desses materiais, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei 12.305 (BRASIL, 2010), as Políticas Estaduais de Resíduos Sólidos, que no Estado de Pernambuco é a Lei 14.236 (PERNAMBUCO, 2010), a Lei municipal de Recife 17.072 (RECIFE, 2005), além da Resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002) que é específica para o gerenciamento de RCD.

Uma forma de destinação adequada destes resíduos é a reciclagem, uma prática antiga adotada pela sociedade, apresentando progressivo crescimento desde o início do século XX, como pode ser observado em relato de 1936 (Wells, 1936 apud Eigenheer, 2009):

“A indústria da reciclagem pode ser uma aliada da limpeza urbana, mas na verdade tem vida própria. A destinação de materiais para a reciclagem desvia, certamente, materiais da rota da coleta e dos aterros.[...] Fui informado por um consultor competente, que o negócio de reciclagem, quando avaliada como um todo, é a quinta maior indústria na Inglaterra. Esta indústria recicla tudo; de ferro velho a vigas de aço, maquinaria descartada, entulho de obra, garrafas, tecidos e pneus velhos.”

Ganhando maior incentivo na atualidade devido aos problemas ambientais decorrentes do alto volume de resíduos sólidos urbanos gerados, dentre eles o RCD que como tal possui um alto potencial de recuperação, podendo 80% destes serem reciclados (ORTIZ *et al.*, 2010).

Sem dúvida, a reciclagem é uma alternativa benéfica tanto pelo fato da redução na geração de resíduos quanto na diminuição da extração de matérias-primas naturais. Apenas no ano de 2007, foi estimado um consumo mundial de agregados naturais de 20.000 milhões de toneladas e esperado uma taxa de crescimento anual de 4,7%, demonstrando a intensa exploração dos recursos naturais que como tal são finitos e não são renováveis (BLEISCHWITZ & BAHN-WALKOWIAK, 2007).

O impacto ambiental da exploração destes agregados não se restringe apenas ao consumo de matérias-primas não renováveis, mas também ao

alto consumo de energia e o mais importante, a redução da biodiversidade em locais de extração. Fortalecendo, assim, a necessidade por mudanças que tornem a indústria da construção mais sustentável (PACHECO-TORGAL,2013).

No Brasil, de acordo com Ulsen (2011), de modo geral, o processo de reciclagem do RCD ocorre basicamente em duas etapas: a britagem que pode ser efetuada por um britador de mandíbulas ou impacto, e o peneiramento que é realizado a seco por um conjunto de peneiras. Em relação aos elementos de aço presentes, estes são retirados por um extrator de metais ou manualmente, assim como materiais indesejáveis.

É válido ressaltar que por vezes estes materiais provenientes da reciclagem são vistos como de segunda classe, e taxados como sem qualidade, conceitos impostos pelo coletivo popular e reforçados pela falta de conhecimento. Assim sendo, é necessário observar os RCDs como um recurso ou subproduto que por meio da reutilização e reciclagem pode ser convertido em novos produtos, podendo ser utilizados para diversos fins com características e potencialidades tanto quanto a de recursos naturais.

Para atingir esse objetivo, em escala mundial, pesquisadores têm realizado estudos que aprovam a reinserção do RCD na cadeia da construção civil com diversas finalidades. Por exemplo, Souza *et al.* (2008) avaliaram o aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de tijolos prensados de solo-cimento, resultando na obtenção de tijolos de melhor qualidade. Para fins não estruturais, Martínez *et al.* (2010) indicam a utilização de agregados reciclados para jardinagem e aterros de valas de mineração. Já Ferreira & Thomé (2011) testaram a utilização de RCD como alternativa para melhoramento de um solo de basalto, servindo como base de fundações superficiais, e os resultados se mostraram viáveis. Assim como para a pavimentação (PROENÇA, 2012 e FARIAS, 2013), para produção de concreto e blocos de concreto (RODRIGUES, 2011; LUNDGREN, 2014; RODRIGUES, 2015), para estabilização de solo colapsíveis (SANTOS NETO, 2015).

Com isso, vai permitir não só a minimização da produção de resíduos mas, também, a redução do consumo de recursos naturais, prolongando assim a vida útil das jazidas. Reinserindo também estes materiais recuperados dentro do próprio ambiente construído.

### ***2.3.1 Características dos agregados reciclados***

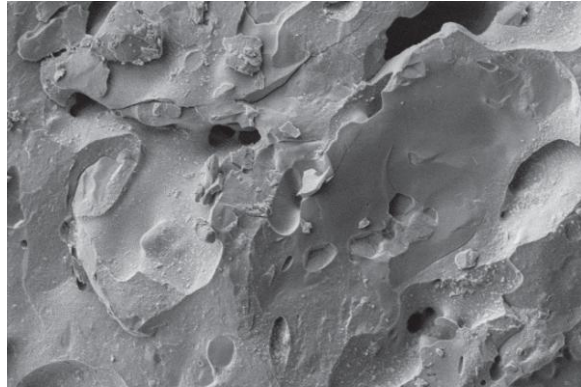
Analisando-se os resíduos de construção e demolição, percebe-se que, de modo geral, estes são compostos por elementos cerâmicos, blocos de concreto, argamassa, cimento, entre outros materiais, apresentando variações a depender do tipo de construção que procederam e o processamento a que foram submetidos (ANGULO *et al.* 2002; ULSEN *et al.* 2013). Esta heterogeneidade de elementos na composição é o que diretamente influencia as propriedades dos agregados reciclados (AR) em comparação aos agregados naturais (AN).

Para fins de conceituação, segundo a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado natural é o material pétreo granular com dimensões e propriedades adequadas para utilização na preparação de argamassas e concretos podendo ser empregado da forma que se apresenta na natureza ou submetido a um processo de lavagem, classificação ou britagem. Defini-se como agregado reciclado de RCD, o material também granular proveniente do beneficiamento do Resíduo de Construção e Demolição podendo ser classificado como agregado reciclado de concreto (ARC) em que sua fração graúda (>4,75mm) é composta de no mínimo 90% de fragmentos de concreto; ou agregado reciclado misto (ARM) no qual esta fração se apresenta inferior a 90% (ABNT, 2011).

Caracteristicamente, os agregados reciclados possuem uma superfície com maior porosidade em relação aos agregados naturais, consequência da presença da pasta de cimento por vezes aderida aos agregados assim como de materiais cerâmicos constituintes, proporcionando desta forma uma maior absorção de água (LIMA E LEITE, 2012). Em estudo realizado por Jia *et al.* (2015), é possível observar a estrutura destes resíduos cerâmicos e observar os vazios presentes (Figura 6).

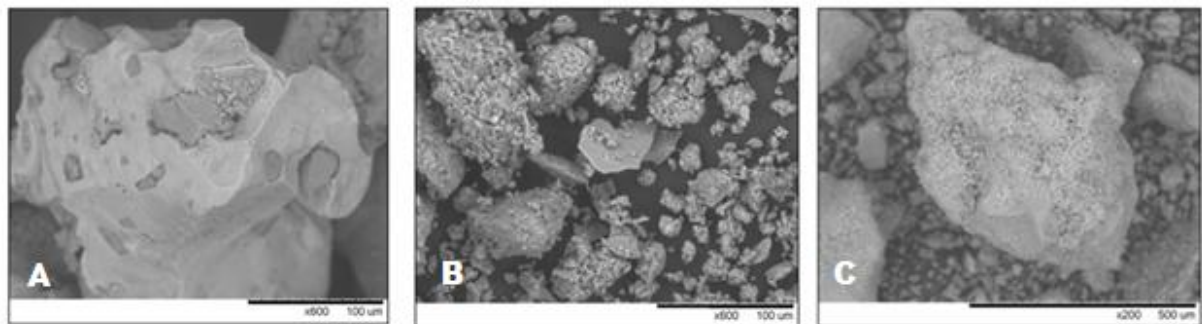


**Figura 6** - Imagens eletrônicas de varredura (x 5000 ampliação): partículas de argila de tijolo (JIA *et al.* 2015).



Em estudo comparativo realizado por Araujo (2014), foi observado que os agregados naturais possuem uma superfície mais lisa e uniforme quando comparado ao agregado reciclado que apresenta uma textura superficial bastante rugosa e porosa. Na Figura 7, pode-se observar imagens resultantes de análise de microscopia eletrônica de varredura realizada em AN e AR.

**Figura 7** - Imagens eletrônicas de varredura do agregado natural 600x (a); agregado reciclado 600x (b); agregado reciclado 500x (c) - ARAÚJO, 2014.



Em relação à forma, o AR possui uma maior cubicidade quando comparado ao AN. Tal forma é resultante dos materiais cimentícios e das rochas britadas presentes no RCD. De certa forma, a predominância de partículas cúbicas contribui, segundo Lima e Leite (2012), para uma melhor densificação e melhoria da resistência ao cisalhamento. Por outro lado, a presença de partículas alongadas planas em sua maioria dos materiais cerâmicos contribui à quebra durante a compactação.

## 2.4 Solos reforçados

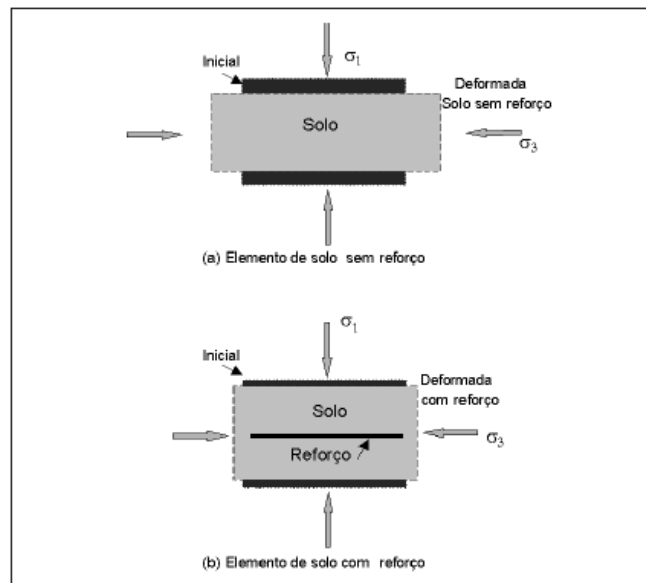
Realizando uma análise superficial dos solos, percebe-se que estes, de modo geral, são compostos por um sistema multifásico de partículas sólidas e de vazios que podem estar preenchidos por água ou ar, formando uma interação entre esses elementos. Dessa forma, as forças que são aplicadas ao solo são suportadas pelas partículas e a água presentes em sua composição. Vale salientar que o solo de forma abrangente possui elevada resistência a esforços de compressão, todavia baixa resistência à tração.

Assim sendo, em um projeto geotécnico, por vezes, o solo a ser trabalhado não atende todas as exigências ideais para a sua utilização, sendo necessários ajustes e modificações que proporcionem a adequação às características de resistência e deformabilidade exigidas. Surge como alternativa para melhoramento do solo, a inserção de elementos resistentes a fim de desenvolver os parâmetros desejados, tais como a resistência ao cisalhamento, resistência à compressão, densidade; e condutividade hidráulica (CASAGRANDE, 2013).

De modo geral, a técnica de reforço do solo consiste na inserção de elementos resistentes à tração, podendo ser orientado em uma direção estabelecida em forma de barras, grelhas, mantas entre outros; ou por meio de uma disposição aleatória com fibras naturais ou sintéticas. Dessa forma, o comportamento geotécnico do solo é melhorado, por meio da transferência de esforços para os elementos resistentes.

Quando uma massa de solo sofre um carregamento vertical conseqüentemente ocorre um processo de deformações verticais de compressão e deformações laterais de extensão na forma de tração. Contudo, se o solo possui um reforço, ocorre uma limitação da movimentação lateral, logo a deformabilidade é reduzida devido ao comportamento de tração gerado pelos elementos de reforço, como ilustrado na Figura 8 (SAYÃO *et al.*, 2009).

**Figura 8** - Comportamento do solo a) elemento do solo sem reforço; b) elemento do solo com reforço (SAYÃO *et al.*, 2009)



#### 2.4.1 Solos Reforçados com Pneumáticos

Algumas aplicações de resíduos de pneus relacionadas à geotecnia são apresentadas por Hazarika *et al.* (2010). São três as alternativas citadas para utilização do resíduo, ou seja, a aplicação de pneus triturados para o melhoramento de drenagem; mistura de areia e chips de pneus para a diminuição de danos causados por terremotos; e mistura com argila tratada com cimento para melhorar a tenacidade e ductilidade do solo.

Muitas são as vantagens da utilização da borracha de pneu em obras geotécnicas, devido ao fato desta possuir um baixo peso unitário, alta durabilidade, possuir a capacidade de absorver vibrações, uma elevada compressibilidade elástica, bem como, uma alta condutividade hidráulica, além de não causar efeito negativo ao solo ou às águas subterrâneas. Verifica-se que o uso da borracha de pneu tem-se tornado uma opção cada vez mais viável (HAZARIKA *et al.* 2010 ; CASAGRANDE, 2013).

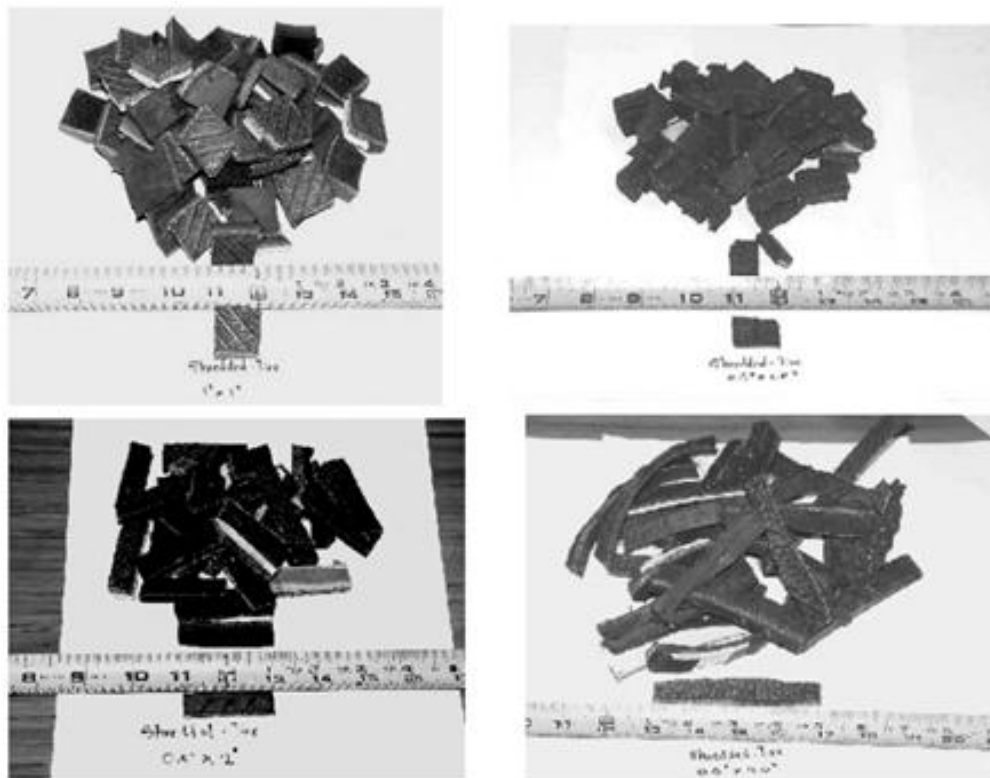
##### 2.4.1.1 Estudos realizados com chips de pneus

Zornberg *et al.* (2004), a fim de avaliar a relação de teor de resíduos e a razão (comprimento e largura) de pedaços de pneus, bem como os efeitos da inserção destes sobre a resistência ao cisalhamento de uma areia,

realizou um programa de investigação em uma célula triaxial de grande escala - para corpos de prova com pedaços de pneus - de até 102 mm, com diâmetro de 153mm e altura de 305mm.

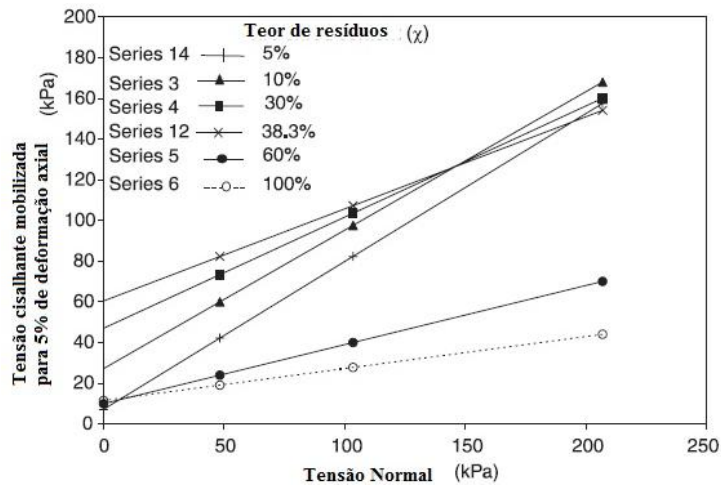
As amostras para os ensaios triaxiais foram preparadas com areia seca Monterey nº 30 e pedaços de pneus sem os elementos de aço, cortados em tamanhos retangulares com larguras variando entre 12,7 e 25,4 mm, seguindo as proporções de largura e comprimento indicadas: 1:1, 1:2, 1:4 e 1:8 (Figura 9).

**Figura 9** - Apresentação das amostras de pneus utilizadas na pesquisa (ZORNBERG *et al.*, 2004).



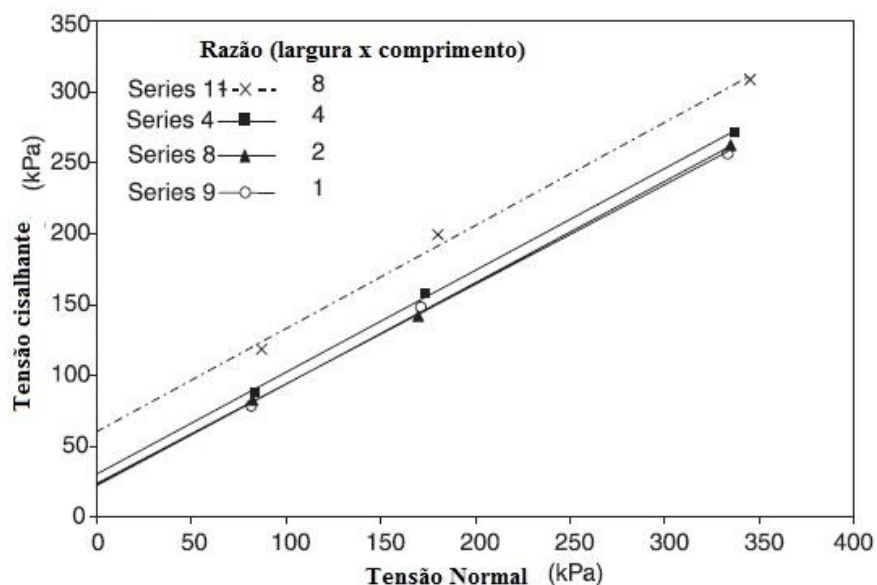
Dessa forma, as amostras de areia pura ( $\chi = 0\%$ ), pedaços puros de pneus ( $\chi = 100\%$ ) e misturas destes dois materiais ( $\chi = 5, 10, 15, 30, 38,$  e  $60\%$ ) foram ensaiados como parte desta investigação. As envoltórias de resistência para 5% de deformação axial nos diferentes teores são apresentadas na Figura 10.

**Figura 10** - Tensão cisalhante mobilizada para 5% de deformação axial (ZORNBERG *et al.*, 2004).



Analisando-se os resultados, percebe-se que o teor ótimo de resíduos se encontra na faixa de 30 e 38,3% aumentando a resistência ao cisalhamento à medida que o teor de resíduos era aumentado até este patamar, decrescendo além desses valores. Outro aspecto de influência é a relação da razão entre as dimensões (largura x comprimento) dos pedaços de pneus que apresentou aumento significativo a partir da razão de 4 e 8, observado na Figura 11.

**Figura 11** - Envoltórias de resistência mostrando a influência da razão comprimento/largura dos resíduos sobre a tensão de cisalhamento (Densidade relativa = 55%,  $\chi = 30\%$ ) - Zornberg *et al.* (2004).



Attom (2006) realizou um estudo laboratorial com o objetivo de analisar o efeito de pedaços de pneus nas propriedades físicas de algumas areias. O programa experimental utilizou 03 (três) diferentes gradações de areias que foram misturadas, individualmente, com 04 (quatro) porcentagens de pedaços de pneus, ou seja, 10, 20, 30 e 40%. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto convencional em uma caixa com dimensões de 10,5cm x 10,5cm x 3,0cm que foi aplicada tensões de 50, 100, 150 kPa.

Os resultados demonstraram que, primeiramente, houve um aumento do ângulo de atrito interno proporcional ao teor de pedaços de pneus (Tabela 1). Esse aumento ocorre, devido à resistência gerada pelos resíduos, como cita Gray & al-Refeal (1986 *apud* Attom, 2006), complementando o mecanismo de resistência natural das partículas do solo.

**Tabela 1** – Variação do ângulo de atrito com o teor de pedaços de pneus (ATTOM, 2006).

Areia	Pedaços de Pneus (%)	Ângulo de Atrito
Solo com 92% de areia	0	25
	10	30
	20	37
	30	41
	40	45
Solo com 95% de areia	0	28
	10	35
	20	42
	30	47
	40	49
Solo com 90% de areia	0	36
	10	42
	20	45
	30	48
	40	50

#### *2.4.1.2 Estudos realizados com migalhas de pneus*

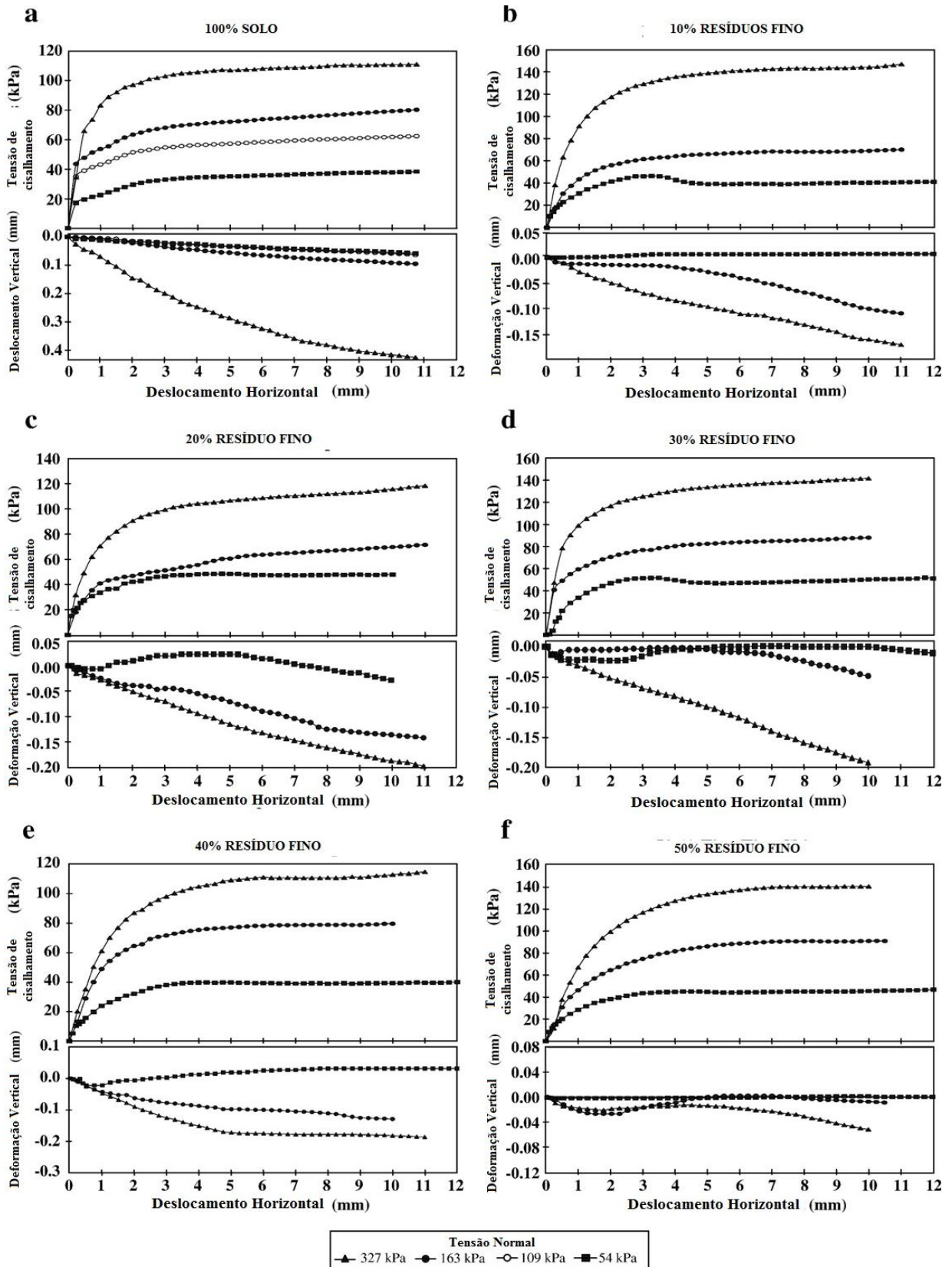
Cetin *et al.* (2006) realizou um estudo com migalhas de pneus buscando analisar as propriedades geotécnicas dos grânulos de borracha separados em uma granulometria fina e outra grossa, em diferentes teores (10, 20, 30, 40 e 50%), misturados a um solo argiloso.

O tamanho das partículas de pneus foi delimitado em fino, sendo o material passante na peneira nº40 (0,42mm), e grosso representando a parte retida entre as peneiras nº10 (2mm) e nº 40 (0,42mm). Dessa forma, os ensaios foram realizados nos 03 (três) materiais puros (solo, resíduos finos e grossos), assim como, nas misturas de solo com os 02 (dois) tipos de resíduos nos teores mencionados.

Com a finalidade de se determinar as tensões cisalhantes e as características de deformação volumétrica do solo argiloso, dos resíduos e das misturas, ensaios de cisalhamento direto não drenado foram realizados em uma caixa de 60mm x 60mm de área e 35mm de altura. O dispositivo foi preenchido com água e permaneceu submerso durante todo o ensaio, com aplicação de tensões de 54, 109, 163 e 327 kPa. As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal assim como as curvas deformação vertical versus deslocamento horizontal são mostradas nas Figuras 12 e 13, respectivamente, para os resíduos fino e grosso.

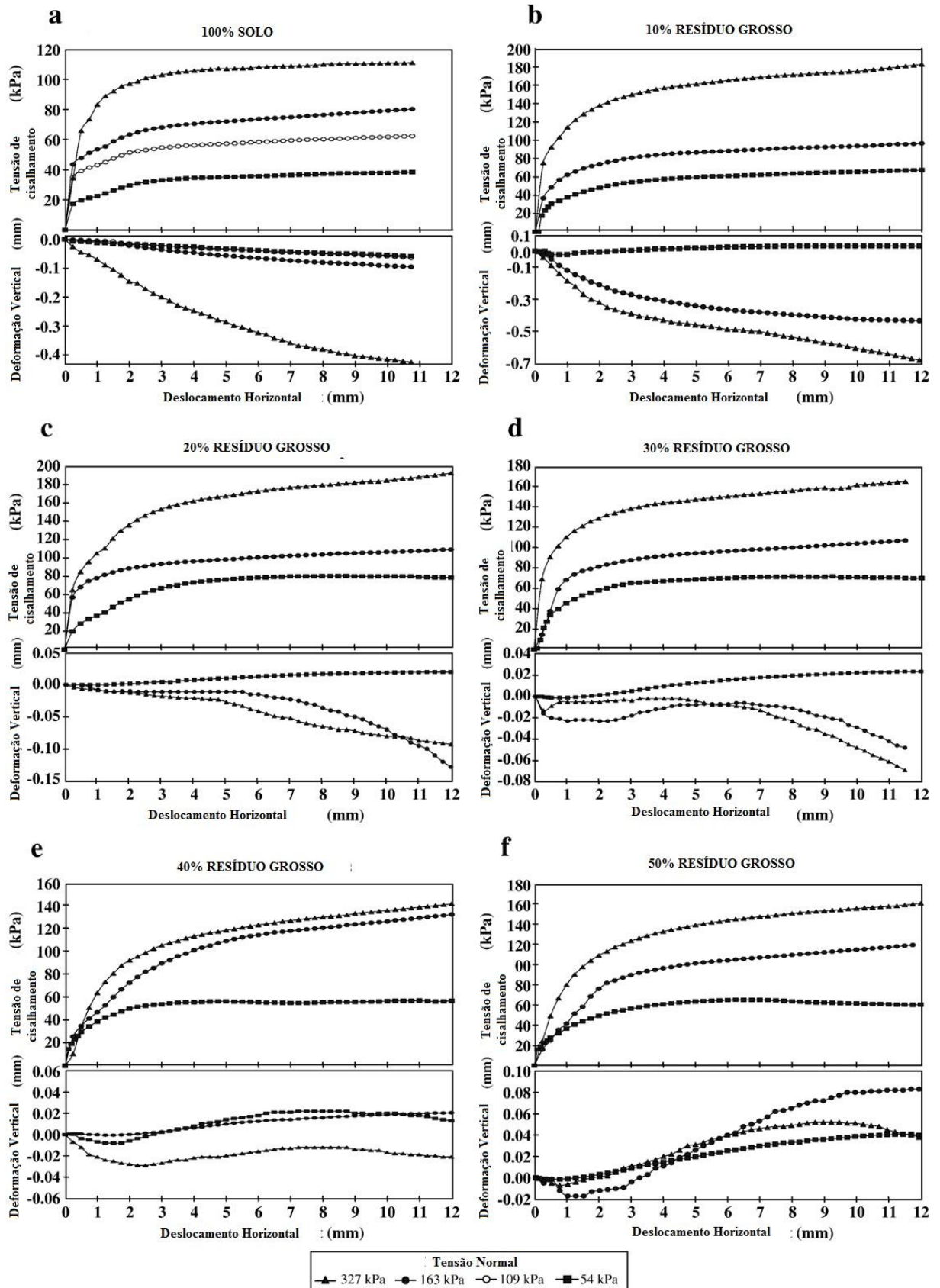
Os resultados apresentados por Cetin *et al.* (2006) mostram que as tensões de cisalhamento aumentam até 30% para resíduos com a granulometria mais fina (Figura 12) e 20% para as misturas de pneus mais grossos (Figura 13). Observou-se, também, que quanto maior a tensão normal maior a resistência ao cisalhamento.

**Figura 12** - Curvas tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e deformação vertical para (a) solo argiloso e (b-f) misturas com resíduos finos (CETIN *et al.*, 2006).



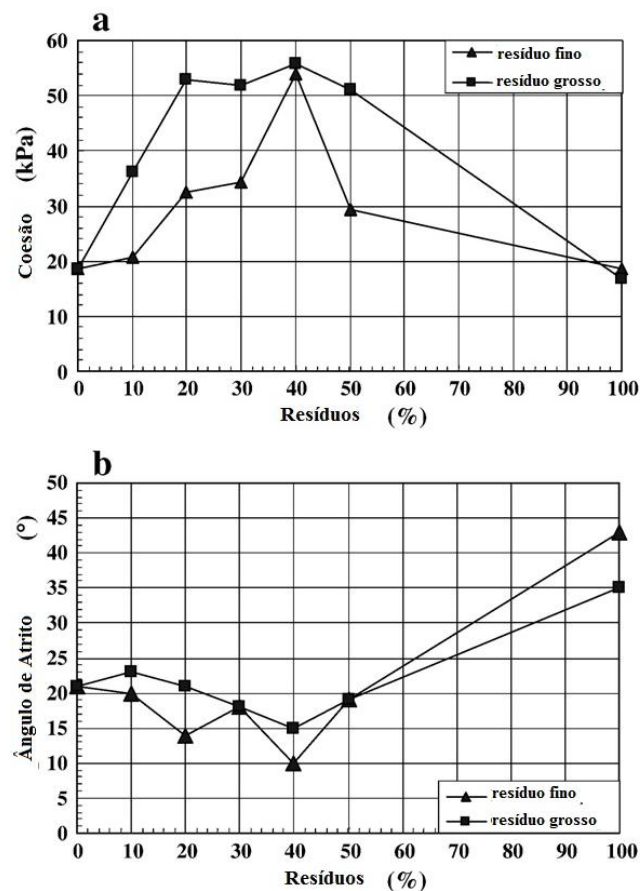


**Figura 13** - Curvas tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e deformação vertical para (a) solo argiloso e (b-f) misturas com resíduos grossos (CETIN *et al.*, 2006).



Em relação a coesão e o ângulo de atrito, percebe-se um aumento na coesão das misturas com a inserção de resíduos até 40% em ambas as misturas, a medida que o ângulo de atrito diminui (Figura 14). Acima dessa porcentagem, o comportamento se altera diminuindo a coesão e aumentando o ângulo de atrito.

**Figura 14** - Comportamento da coesão (a) e do ângulo de atrito (b) a partir da inserção de resíduos (CETIN *et al.*, 2006).

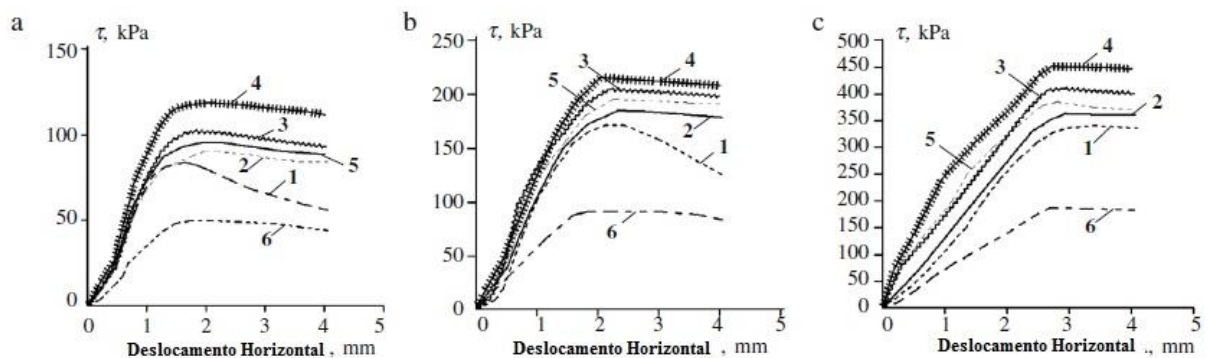


Soganci (2015), a fim de avaliar o efeito da inserção de migalha de pneus em um solo arenoso e as condições sob as quais suas propriedades mecânicas são modificadas, realizou ensaios de cisalhamento direto convencionais, sob tensões normais de 100, 200 e 400 kPa, em areia pura, borracha e misturas de solo-pneu com teores de 5, 10, 20 e 30% de proporção de resíduos em relação ao peso do solo seco.

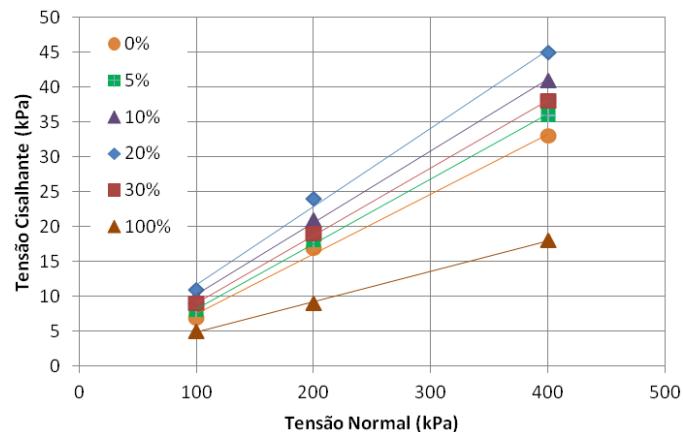
A areia escolhida para o estudo apresentou uma porcentagem de 96,6% de suas partículas na fração arenosa e 3,4% de silte e argila, com peso específico dos grãos de 2,66 e peso específico seco máximo de

15,79kN/m<sup>3</sup>. As amostras de borracha mostraram um dimensionamento entre 1,0 e 3,0 mm e a ausência de qualquer elemento metálico em sua composição. As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos materiais ensaiados são apresentadas na Figura 15, enquanto que as envoltórias de resistência são mostradas na Figura 16.

**Figura 15** - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal sob tensões normais; 100, 200, e 400 kPa (a,b,c) ; 0, 5, 10, 20, 30, e 100% (1-6) de resíduos de pneus, respectivamente (SOGANCI, 2015).



**Figura 16** - Envoltórias de resistência nas amostras de solo com diferentes teores de resíduos de pneus: 0, 5, 10, 20, 30 e 100% (SOGANCI, 2015).



Analisando-se as Figuras 15 e 16, percebe-se que a tensão cisalhante máxima foi encontrada na mistura com 20% de borracha. Observou-se, também que a resistência ao cisalhamento para todas as misturas é maior que a da areia pura, demonstrando aumento já com a adição de 5%. A Tabela 2 mostra os valores relacionados ao ângulo de atrito e a coesão a partir da inserção de borracha ao solo.

**Tabela 2** - Indicadores de resistência das amostras avaliadas (SOGANCI, 2015).

Material	Indicadores de Resistência
100% borracha granular	$c = 3.5 \text{ kPa}; \varphi = 24.3^\circ$
100% areia	$c = 0 \text{ kPa}; \varphi = 40.4^\circ$
95% areia + 5% de borracha	$c = 1.5 \text{ kPa}; \varphi = 42.1^\circ$
90% areia + 10% de borracha	$c = 4.5 \text{ kPa}; \varphi = 45.6^\circ$
80% areia + 20% de borracha	$c = 7 \text{ kPa}; \varphi = 47.1^\circ$
70% areia + 30% de borracha	$c = 3 \text{ kPa}; \varphi = 42.8^\circ$

#### 2.4.1.3 Estudos realizados com desbastes de pneus

Outro elemento que também tem potencial de utilização como reforço de solos são os desbastes de borracha provenientes do processo de recuperação de pneus usados, apresentando a possibilidade de inserção tanto em solos arenosos quanto argilosos de maneira aleatória, assumindo o papel das fibras já utilizadas em projetos geotécnicos.

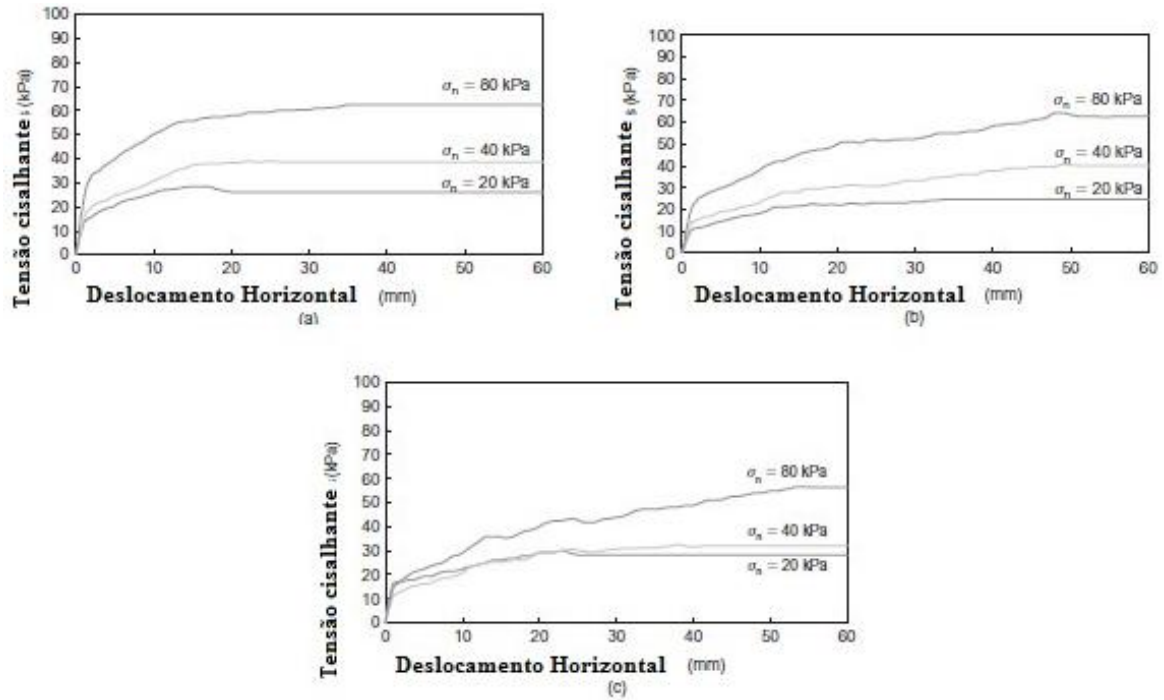
Edinçliler & Ayhan (2010) elaboraram um estudo sobre a inserção de resíduos de pneus no reforço de areias. O programa experimental focou na realização de ensaios de cisalhamento em grande escala e na investigação do processo de melhoramento da resistência da areia.

Para a pesquisa foram utilizados desbastes de pneus que foram divididos em dois grupos: TB1, com espessura entre 2,0 mm e 4,0 mm e comprimento de 8,0 mm a 10 mm; e TB2 com espessura entre 4,0 mm e 5,0 mm e comprimento variando de 10 mm a 50 mm.

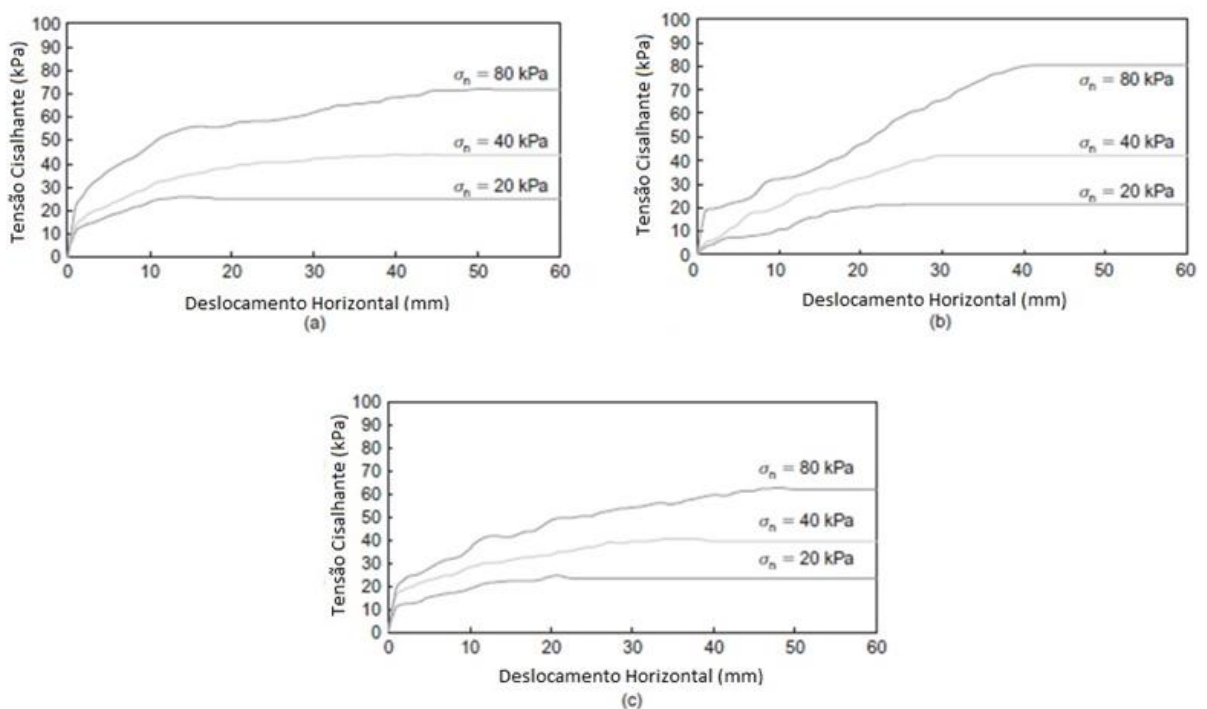
Os ensaios foram executados em um equipamento de cisalhamento em grande escala (300 mm x 300 mm), onde foram analisadas a areia pura, os resíduos puros (desbastes de pneus – TB1 e TB2), e dois grupos de misturas de areia com cada tipo de resíduo nos teores de 10, 20 e 30%. Durante os ensaios, foram aplicadas tensões normais de 20, 40 e 80 kPa. As curvas da tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as

misturas com desbastes de pneus (TB1 – TB2) são apresentadas nas Figuras 17 e 18.

**Figura 17** - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a) TB1 - 10; b) TB1 – 20 (EDINÇLILER & AYHAN, 2010).



**Figura 18** - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a) TB2 - 10; b) TB2 - 20 e c) TB2- 30 (EDINÇLILER & AYHAN, 2010).



Observando-se os gráficos das Figuras 17 e 18, percebe-se que para TB1, os valores da tensão cisalhante apresentam aumento com o deslocamento horizontal semelhante sob as diferentes tensões normais, algo também observado em TB2.

Os autores verificaram que há um aumento da resistência ao cisalhamento das amostras com o aumento da razão entre espessura e comprimento dessas fibras, concluindo que quanto mais alongada a fibra maior a superfície de contato com o solo e, conseqüentemente, maior a força de resistência gerada. Os desbastes de pneus TB2 com teor de 20% alcançou o valor máximo de resistência das misturas, para a tensão normal a 80 kPa. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios.

**Tabela 3** – Dados dos ensaios de cisalhamento direto.

Parâmetros	Amostras						
	Areia	TB1-10	TB1-20	TB1-30	TB2-10	TB2-20	TB2-30
$\tau$ para $\sigma = 20$ kPa	22.9	28.4	25.9	29.9	25.5	21.5	24.7
$\tau$ para $\sigma = 40$ kPa	27.9	38.8	40.4	32.4	43.9	42	41
$\tau$ para $\sigma = 80$ kPa	53.1	62.5	64.4	56.7	72	80.6	62
Ângulo de atrito	34.2	29.8	32.4	25.2	37.4	45.4	32
Coesão	0	16.5	13.9	17.8	11.5	2.2	13.4
$\gamma_s$ máx (KN/m <sup>3</sup> )	14	13.5	12	10	13.5	12	10

Os dados dos ensaios mostram que as misturas de solo-TB2 possuem ângulos de atrito superiores às misturas de solo-TB1, e em relação a areia pura com teores de 10 e 20%. Para a coesão, observa-se que para todas as misturas ocorrem um acréscimo nos valores.

Ainda com base na Tabela 3, os autores observaram que quanto maior a tensão normal aplicada maior o efeito das fibras na resistência das misturas comparadas ao solo, assim como, a relação comprimento/largura das fibras.

De acordo com Edinçliler & Ayhan (2010), na zona de cisalhamento das amostras, as fibras funcionam como âncoras, resistindo às forças cisalhantes. Assim sendo, quanto maior o teor de fibras e o comprimento, maior a área de contato com as partículas do solo, proporcionando um aumento na resistência de cisalhamento das misturas.

Franco (2012) em sua pesquisa, a fim de analisar o comportamento de resistência ao cisalhamento de misturas de solo laterítico e desbastes de pneus, realizou um programa experimental para avaliar as propriedades do solo a partir da inserção destes resíduos. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto (50mm de diâmetro e 20mm de altura) para tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, em amostras com teores de desbastes de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 100%. Devido ao tamanho reduzido da caixa de cisalhamento foram utilizados desbastes com no máximo de 10mm. A Figura 19 apresenta as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as amostras ensaiadas, enquanto que a Figura 20 ilustra as envoltórias de resistência.

Os resultados apresentados demonstram que as amostras de solo-resíduos não possuem um pico de resistência definido, assim como o solo e o resíduo puro, dessa forma o deslocamento horizontal e a tensão cisalhante possuem uma tendência de crescimento até atingir um grau de estabilização.

**Figura 19** - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal com variação de teores de resíduos (FRANCO, 2012).

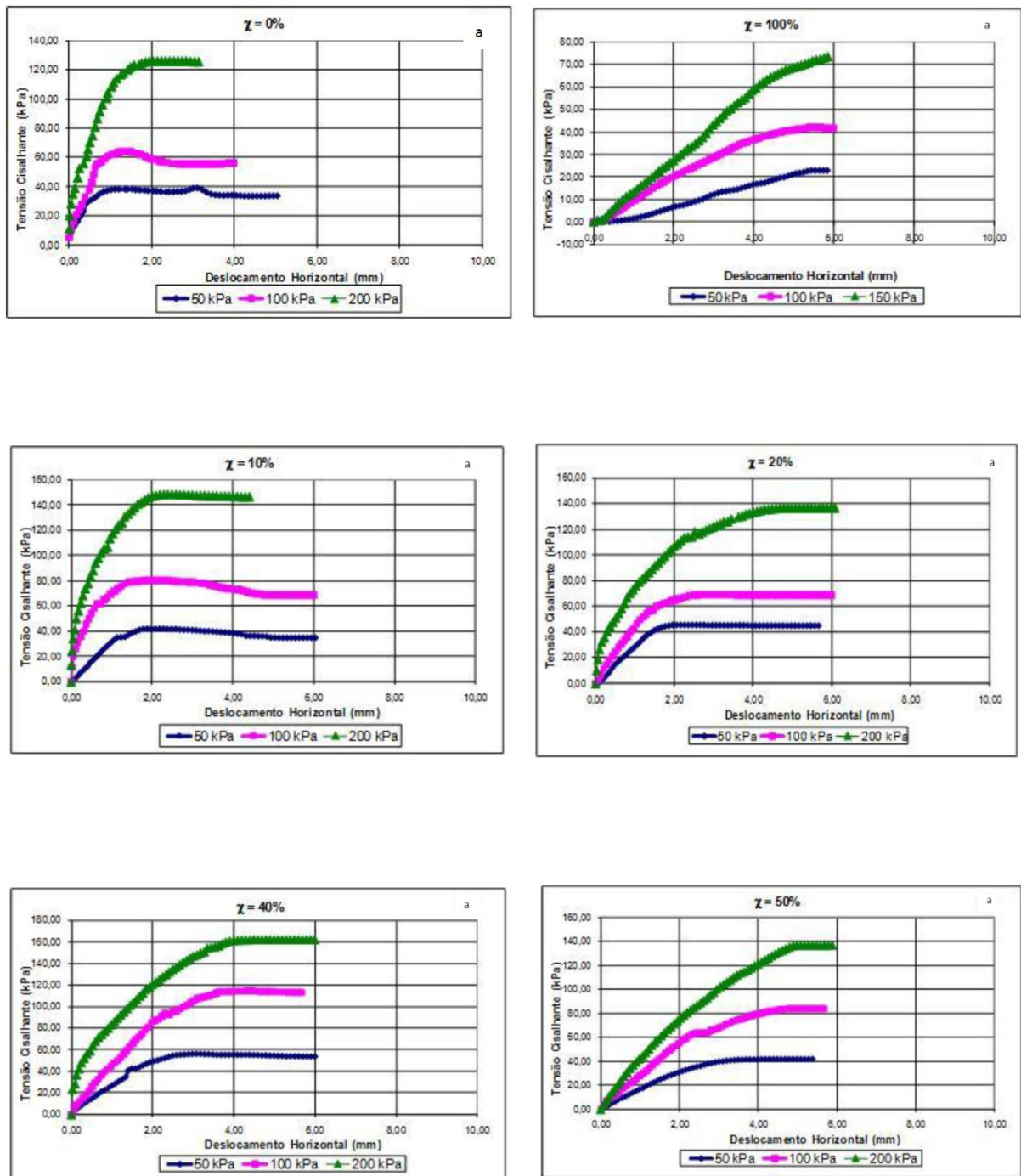
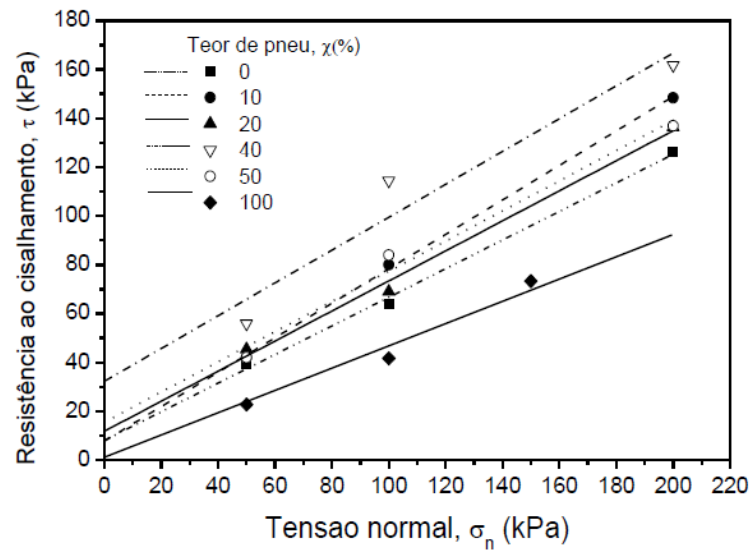




Figura 20 - Envoltória de resistência (FRANCO, 2012).



A partir das envoltórias de resistência, observa-se que houve um aumento da resistência ao cisalhamento proporcional ao teor de desbastes de pneus até o valor de 40%, sugerindo um teor ótimo para misturas com o solo (Figura 20). A Tabela 4 mostra um resumo dos parâmetros de resistência das amostras obtidos nos ensaios.

**Tabela 4** – Relação da coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ) interno com o teor de resíduos ( $\chi$ ) – (FRANCO, 2012).

Teor do resíduo ( $\chi\%$ )	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Coesão ( $c$ )
0	31°	8,05
10	35°	7,89
20	33°	11,77
40	34°	32,09
50	32°	15,51
100	25°	0

De acordo com a Tabela 4 foram obtidos ângulos de atrito variando entre 31° e 34°, apresentando índices não tão expressivos quando comparados a coesão que variou entre 8 e 32 kPa.

Em síntese, é apresentado no Quadro 4 o resultado das principais pesquisas abordadas, em que se pode constatar o teor de resíduos ideal encontrado por cada autor. Percebe-se que, de modo geral, esta porcentagem varia entre 20% e 40%.

**Quadro 4** – Quadro resumo das principais pesquisas apresentadas (Autor, 2016).

TIPOS	ENSAIOS	TEOR	PARÂMETROS	REFERÊNCIA
Chips de Pneus	Cisalhamento Direto Convencional (105 mm x 105 mm) Solo A – c = 0 kPa; $\phi$ = 25° Solo B – c = 0 kPa; $\phi$ = 28° Solo C – c = 0 kPa; $\phi$ = 36°	Solo A + 10%	c = 0 kPa; $\phi$ = 30°	Attom (2006)
		Solo A + 20%	c = 0 kPa; $\phi$ = 37°	
		<b>Solo A + 30%</b>	<b>c = 0 kPa; <math>\phi</math> = 41°</b>	
		Solo B + 10%	c = 0 kPa; $\phi$ = 28°	
		Solo B + 20%	c = 0 kPa; $\phi$ = 35°	
		<b>Solo B + 30%</b>	<b>c = 0 kPa; <math>\phi</math> = 42°</b>	
		Solo C + 10%	c = 0 kPa; $\phi$ = 42°	
		Solo C + 20%	c = 0 kPa; $\phi$ = 45°	
		<b>Solo C + 30%</b>	<b>c = 0 kPa; <math>\phi</math> = 48°</b>	
Desbastes de pneus (8mm < TB1 < 10mm/40mm < TB2 < 50mm)	Cisalhamento Direto (300 mm x 300 mm x 300 mm) Solo – c = 0 kPa; $\phi$ = 34,2°	Solo + 10% TB1	c = 16,5 kPa; $\phi$ = 29,8°	Edinçliler; Ayhan (2010)
		Solo + 20% TB1	c = 13,9 kPa; $\phi$ = 32,4°	
		Solo + 30% TB1	c = 17,7 kPa; $\phi$ = 25,2°	
		Solo + 10% TB2	c = 11,5 kPa; $\phi$ = 37,4°	
		<b>Solo + 20% TB2</b>	<b>c = 2,2 kPa; <math>\phi</math> = 45,4°</b>	
		Solo + 30% TB2	c = 13,4 kPa; $\phi$ = 32,0°	
Desbastes de Pneus	Cisalhamento Direto Convencional (50mm de diâmetro e 20mm de altura) Solo – c = 8,05 kPa; $\phi$ = 31°	Solo + 10%	c = 7,89 kPa; $\phi$ = 35°	Franco (2012)
		Solo + 20%	c = 11,77 kPa; $\phi$ = 33°	
		<b>Solo + 40%</b>	<b>c = 32,09 kPa; <math>\phi</math> = 34°</b>	
		Solo + 50%	c = 15,51 kPa; $\phi$ = 32°	
Migalhas de Pneus (1,0 mm – 3,0 mm)	Cisalhamento Direto Convencional (60 mm x 60 mm) Solo – c = 0 kPa; $\phi$ = 40,4°	Solo + 5%	c = 1,5 kPa; $\phi$ = 32,1°	Soganci (2015)
		Solo + 10%	c = 4,5 kPa; $\phi$ = 45,6°	
		<b>Solo + 20%</b>	<b>c = 7 kPa; <math>\phi</math> = 47,1°</b>	
		Solo + 30%	c = 3 kPa; $\phi$ = 42,8°	

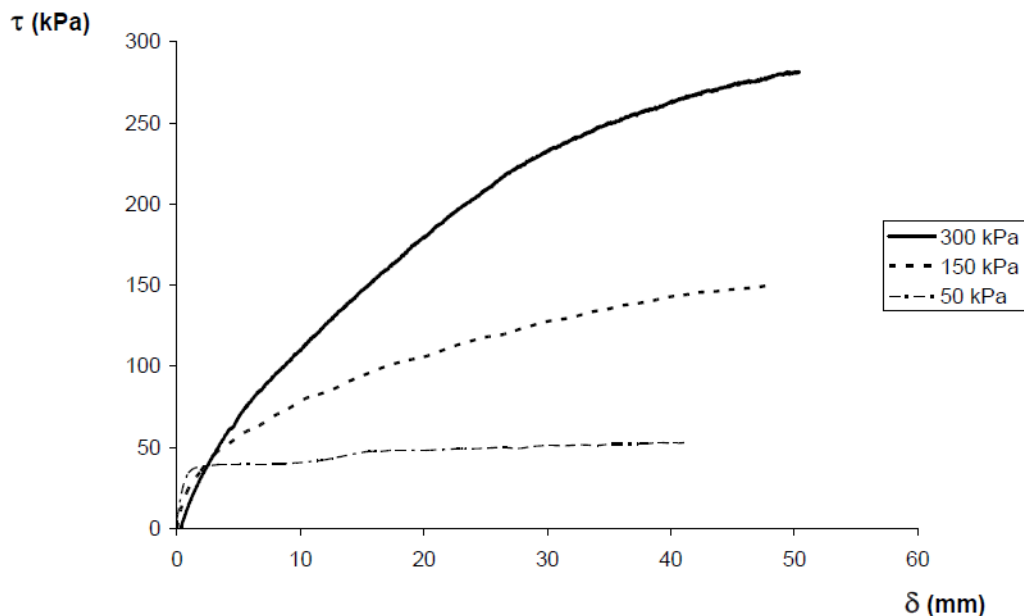
#### 2.4.2 Solos Reforçados com RCD

Santos (2007) em sua pesquisa buscou analisar as propriedades geotécnicas de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) a fim de avaliar seu desempenho como material de preenchimento de estruturas de solo reforçado. Para sua pesquisa foram coletadas 05(cinco) amostras de RCD-R em dias diferentes de uma Usina de Reciclagem de

Entulhos da Prefeitura de São Carlos- SP, onde foram conduzidos ensaios de caracterização física e mecânica.

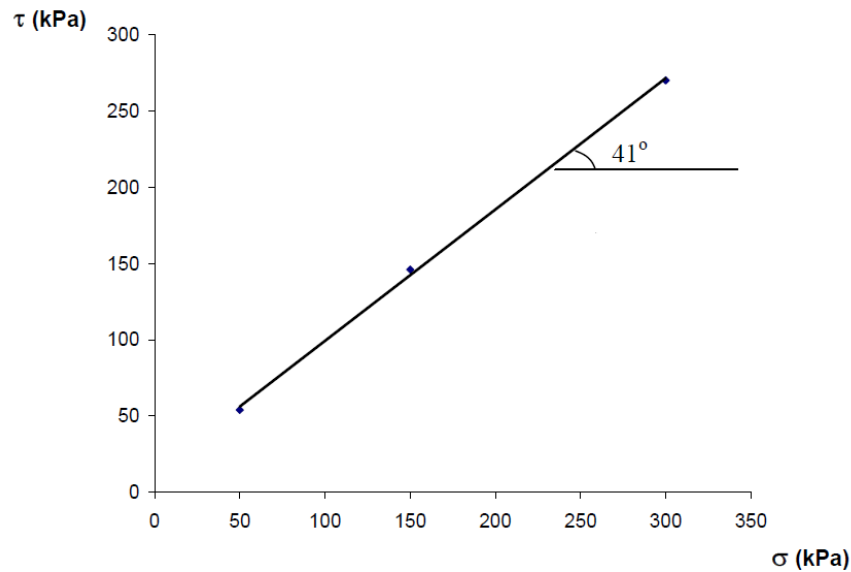
Para estudo do comportamento mecânico do RCD-R, foi realizado o ensaio de cisalhamento direto em grandes dimensões, devido ao tamanho das partículas da amostra apresentar um tamanho de até 60 mm. O equipamento utilizado possuía dimensões de 500mm x 500mm e 500mm de altura. Na Figura 21 é apresentada a curva tensão cisalhante versus deslocamento para a amostra denominada RCD-R 05 (Resíduo de Construção e Demolição Reciclado, coleta n° 5).

**Figura 21** - Tensão x Deslocamento amostra RCD-R 05 (SANTOS, 2007).



Analisando-se o gráfico, percebe-se que a amostra apresentou uma tendência de crescimento até alcançar um comportamento de estabilização, a partir daí houve o aumento da deformação sem variação das tensões de cisalhamento, demonstrando um comportamento plástico. A envoltória de resistência é apresentada na Figura 22.

**Figura 22** - Envoltória de resistência amostra RCD-R 05 (SANTOS,2007).

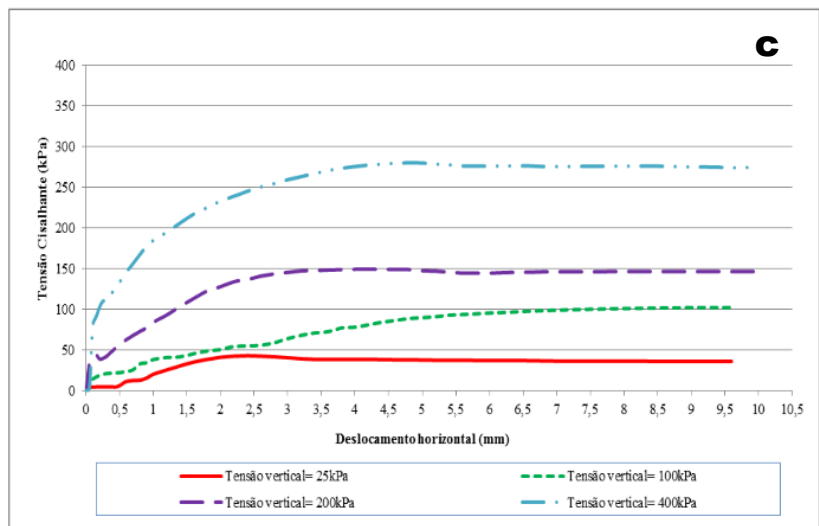
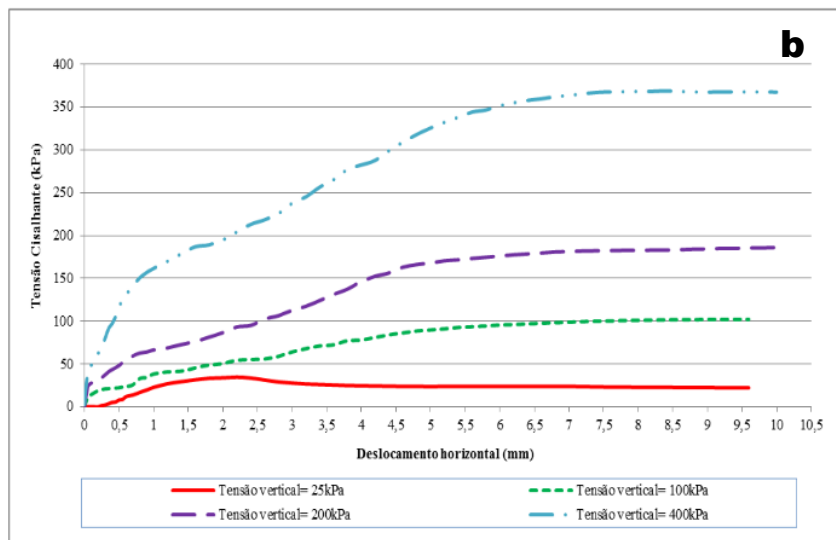
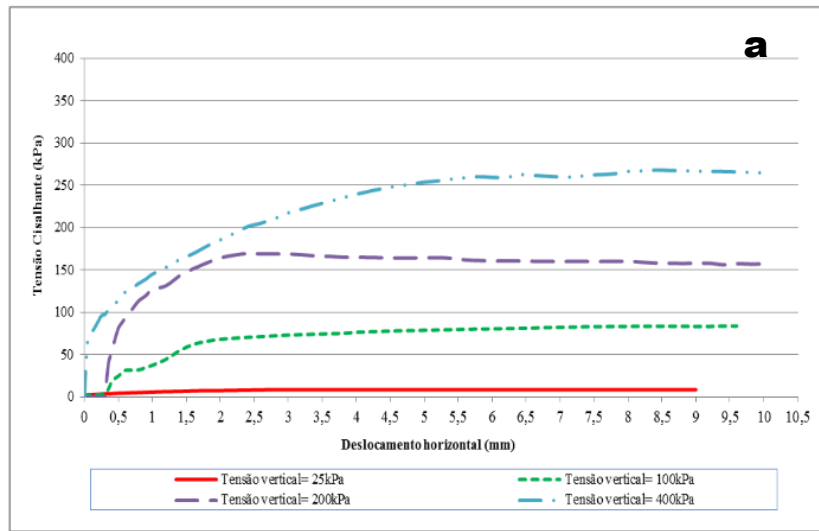


A partir do gráfico da Figura 22, observa-se que o valor do ângulo de atrito da amostra é de  $41^\circ$ . Comparando com dados obtidos para o solo e para areia adotados também no estudo, que são respectivamente  $33^\circ$  e  $32^\circ$ , percebe-se que o RCD-R individualmente apresenta valores superiores as amostras de solo demonstrando sua potencialidade na utilização como material geotécnico.

Ensaio de cisalhamento direto foram conduzidos também por Dias (2014), em solo e RCD individualmente e em mistura de solo-RCD nas proporções de 50%. O solo em estudo foi coletado na cidade de Aparecida de Goiânia – GO, assim como o RCD que foi obtido em uma Usina de Reciclagem da mesma região. A caixa de cisalhamento utilizada apresenta dimensões de 100mm x 100mm x 40mm sendo aplicada tensões de confinamento de 25, 100, 200 e 400 kPa na condição saturada e velocidade de 0,042 mm/min.

Nas figuras 23 são apresentadas as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o solo, RCD e mistura solo-RCD.

**Figura 23** - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal do solo (a); do RCD (b) e do solo-RCD (c).



Observando-se a Figura 23 nota-se que de modo geral as amostras não apresentam comportamento de pico definido. Comparativamente o RCD (23b) em relação ao solo (23a) possui tensões cisalhantes maiores para todas as tensões normais aplicadas. Com relação à mistura de solo-RCD (23c) visualiza-se o aumento gradual da tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal até a estabilização, apresentando, assim como o RCD, valores maiores para tensões cisalhantes que as apresentadas para o solo.

A Tabela 5 mostra um resumo dos parâmetros de resistência das amostras obtidos nos ensaios.

**Tabela 5** – Parâmetros de resistência do solo, RCD e mistura (DIAS, 2014).

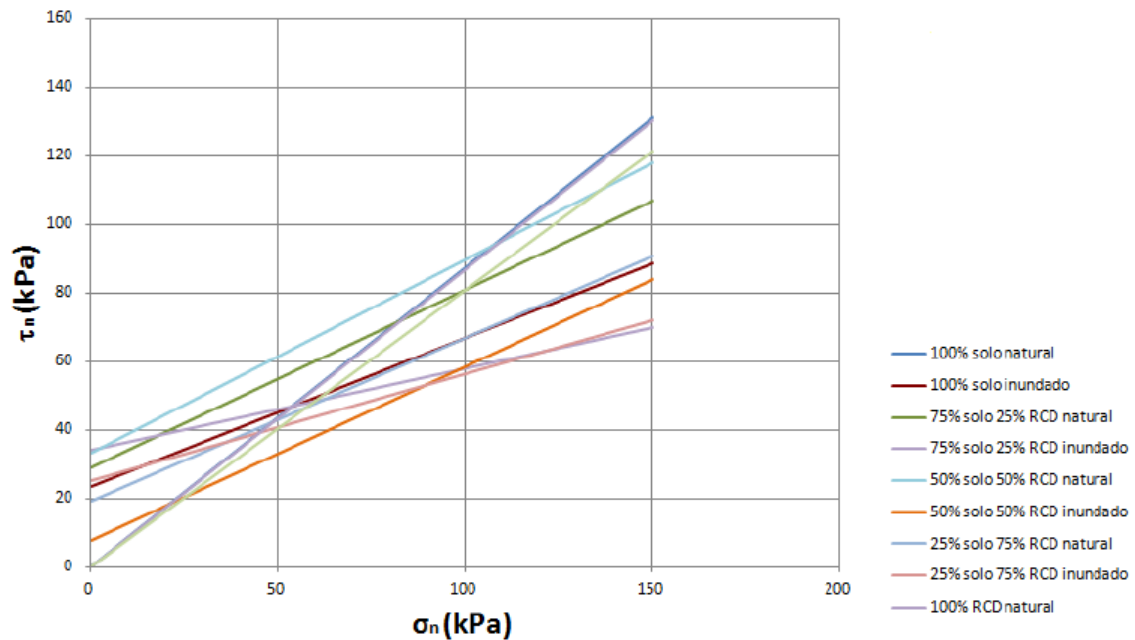
Material	$\phi$ (°)		c (kPa)	
	Máxima	Residual	Máxima	Residual
Solo	32	32	24,49	18,18
RCD	41	43	14,03	1,20
Mistura	32	32	29,42	24,58

Analisando-se a Tabela 5 percebe-se que em relação ao ângulo de atrito tanto o solo quanto a mistura os resultados permaneceram os mesmos enquanto o RCD apresentou índices mais altos, provavelmente devido a estrutura física do material de ser mais granular. Para a coesão a variação da mistura com o RCD apresentou valores maiores que o solo demonstrando um aspecto positivo no melhoramento do solo.

Em estudo realizado por De Souza e Reis (2015), foram conduzidos ensaios de cisalhamento direto em misturas de solo-RCD com diferentes teores nas proporções de 100% solo, 75% solo 25% RCD, 50% solo 50% RCD, 25% solo 75% RCD e 100% RCD para corpos de prova com 50mm x 50mm x 20mm e velocidade de 0,025mm/s. As amostras foram compactadas nas condições ótimas de compactação e ensaiadas com tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa, nas condições de umidade natural e inundada. As envoltórias de resistência são apresentadas na

Figura 24, assim como o resumo dos parâmetros de resistência na Tabela 6.

**Figura 24** - Envoltórias de resistência das misturas ensaiadas (DE SOUZA E REIS, 2015).



**Tabela 6** – Parâmetros de resistência das misturas solo-RCD.

	100% Solo		75% Solo 25% RCD		50% Solo 50% RCD		25% Solo 75% RCD		100% RCD	
	c	Ø	c	Ø	c	Ø	c	Ø	c	Ø
Natural	0	41,2	28,8	27,5	33,4	29,5	19,4	25,4	0	41
Inundado	23,5	23,2	33,9	13,5	7,6	27	25	17,4	0	39

Observando-se os resultados, percebe-se que tanto o solo quanto o RCD apresentam para a coesão o valor de 0 (zero), característica peculiar de materiais granulares. Para as misturas, visualiza-se um acréscimo nestes valores, provavelmente ocasionada pela interação das partículas que geram uma coesão aparente. No que se refere ao ângulo de atrito, é observado que comparado ao solo natural ocorre uma diminuição dos valores, principalmente quando inundado, pois a saturação das misturas proporciona a diminuição das superfícies de contato das partículas influenciando com isso os resultados. Verifica-se com isso, diante dos

dados obtidos neste ensaio, que o RCD associado a este solo não proporcionou melhorias significativas. Entretanto para uma constatação definitiva destes resultados são necessários ensaios complementares.

No Quadro 5 é apresentado de forma resumida os resultados encontrados para as pesquisas com RCD expostas na pesquisa, em que se é possível perceber as propriedades do mesmo, seja individualmente ou misturado ao solo.

**Quadro 5** – Quadro resumo das principais pesquisas apresentadas (Autor, 2016).

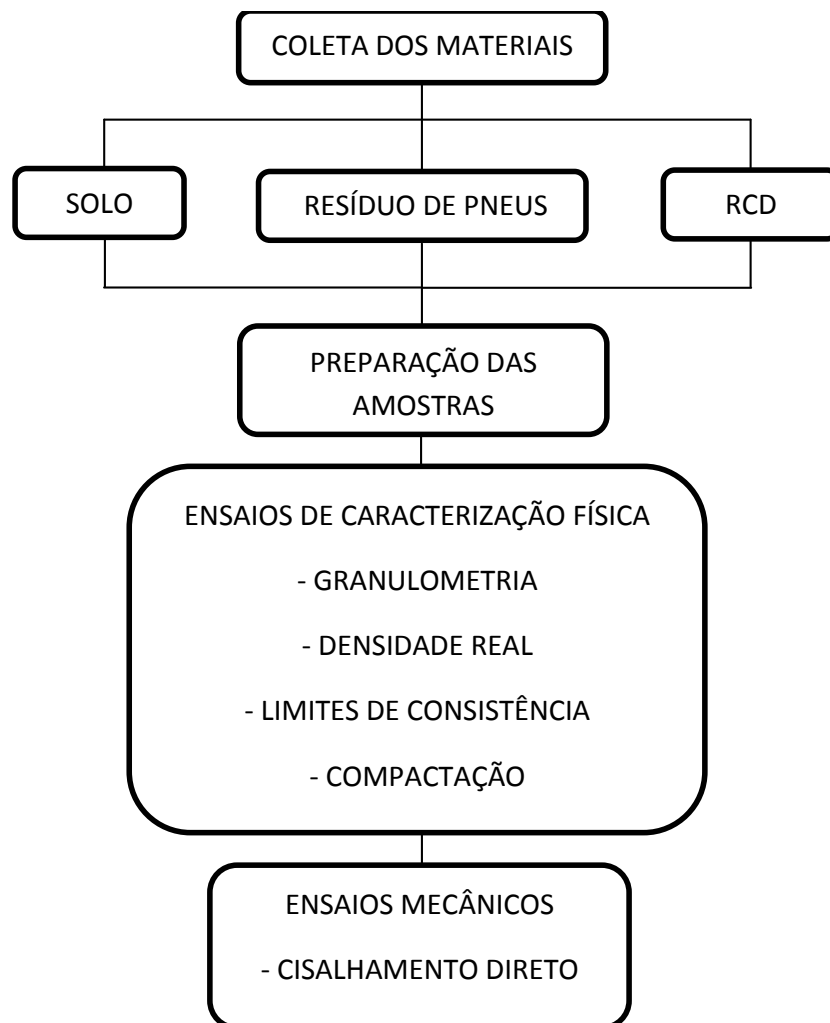
RESÍDUO	ENSAIO	MATERIAL	PARÂMETROS	REFERÊNCIA
RCD	Cisalhamento Direto Convencional (500mm x 500mm x 500mm)	Solo A	$\phi = 33^\circ$	Santos (2007)
		Solo B	$\phi = 32^\circ$	
		RCD	$\phi = 44^\circ$	
	Cisalhamento Direto Convencional (100mm x 100mm x 40mm)	Solo	$c = 24,5 \text{ kPa}; \phi = 32^\circ$	Dias (2014)
		RCD	$c = 14 \text{ kPa}; \phi = 41^\circ$	
		Solo + 50% RCD	$c = 29,4 \text{ kPa}; \phi = 32^\circ$	
	Cisalhamento Direto Convencional (50mm x 50mm x 20mm)	Solo	$c = 0 \text{ kPa}; \phi = 41,2^\circ$	De Souza e Reis (2015)
		Solo + 25% RCD	$c = 28,8 \text{ kPa}; \phi = 27,5^\circ$	
		Solo + 50% RCD	$c = 33,4 \text{ kPa}; \phi = 29,5^\circ$	
		Solo + 75% RCD	$c = 19,4 \text{ kPa}; \phi = 25,4^\circ$	
RCD		$c = 0 \text{ kPa}; \phi = 41^\circ$		



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa está dividido em três etapas e pode ser visualizado na Figura 25. A primeira etapa consiste na coleta e preparação dos materiais a serem estudados (solo, resíduo de pneus e RCD). A segunda corresponde à caracterização física, abrangendo tanto as amostras individualmente quanto as misturas solo-resíduos. Por fim, para avaliação do comportamento mecânico, a terceira etapa compreende a execução de ensaios de cisalhamento direto no solo e nas misturas solo-resíduos. Em síntese pode se visualizar no Quadro 6 os ensaios realizados na pesquisa juntamente com as quantidades.

**Figura 25** - Programa experimental da pesquisa.



**Quadro 6** – Quadro quantitativo de ensaios

<b>Ensaio</b>	<b>Quantidades</b>
Granulometria	12
Densidade Real	32
Limites de Consistência	12
Compactação	11
Cisalhamento Direto	54
Total	121

Desta forma, os ensaios estabelecidos para a pesquisa permitiram o conhecimento das propriedades individuais de cada material assim como das misturas solo-resíduos, avaliando com isso as possíveis alterações físicas e mecânicas a partir da inserção destes resíduos ao solo. É válido salientar que para a execução dos ensaios foi utilizado como diretriz as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo necessário por vezes ajuste para o tipo de material ensaiado visto que tais normas estabelecem procedimentos para o solo e não especificamente para o pneu ou mesmo o RCD.

### **3.1 Coleta de Amostras**

#### ***3.1.1 Solo***

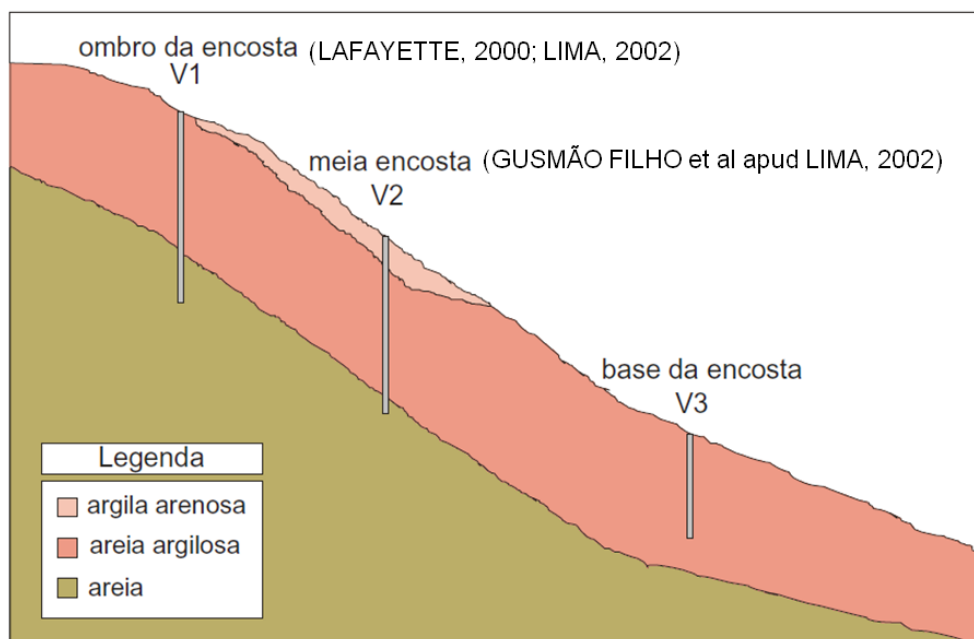
O solo utilizado foi obtido no bairro de Nova Descoberta em Recife-PE, mais precisamente na encosta do Alto Reservatório, uma área constituída de solos da Formação Barreiras, composto de sedimentos não consolidados, apresentando um alto potencial de risco de instabilidade de taludes. Esta área possui um histórico significativo de deslizamentos e se configura por apresentar uma ocupação desordenada, sem qualquer planejamento urbano, provocando alterações tais como cortes e aterros, com ausência de critérios técnicos, promovendo e fortalecendo com isso os problemas de erosão e deslizamentos já existentes (Figura 26).

**Figura 26 - Vista do bairro de Nova Descoberta**



É válido ressaltar que este solo foi objeto de pesquisas anteriores (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002; SÁ, 2006; MOURA, 2011), Figura 27. Para amostras indeformadas deste solo, segundo Lafayette (2000), os parâmetros de resistência encontrados foram coesão de 13 kPa e ângulo de atrito de 24°. Já Lima (2002) encontrou os valores de coesão de 28 kPa e ângulo de atrito de 31°.

**Figura 27 – Vista da encosta com os respectivos locais de pesquisas já realizadas (LIMA, 2002).**



Foram coletados aproximadamente 200 kg de solo, localizados próximos à superfície do terreno, sendo, então, acondicionados em sacos plásticos

para evitar a perda do material mais fino e alocados, posteriormente, para sacos de r fia que foram transportados para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE). A Figura 28 apresenta o local e processo de retirada das amostras.

**Figura 28** - Local de coleta da amostra de solo (A) – Processo de coleta (B).



### ***3.1.2 Resíduos de Pneus***

O resíduo de pneus utilizado consiste em um subproduto resultante do processo de recapagem de pneus, mais conhecido como desbastes, ou seja, fibras de borracha de pneus que normalmente são descartadas. Este material foi adquirido de uma empresa renovadora de pneus, localizada no município de Jaboatão dos Guararapes – PE que possui gera o média mensal de 7 toneladas.

Vale salientar que o processo de reforma de pneus realizado pela empresa segue algumas etapas. Primeiramente, todo pneu usado recolhido nas filiais de venda de pneus novos, são limpos, secos e passam por um processo de inspe o da estrutura, a fim de se avaliar a possibilidade ou não da reforma. Passada esta etapa, os pneus aprovados são destinados ao setor de raspagem (Figura 29). O pneu   raspado e toda a cobertura

antiga da banda de rodagem é removida, sendo esta a etapa que ocorre a geração dos resíduos. Em seguida, o pneu recebe uma cola especial e a nova camada de borracha é aplicada, sendo finalizado este processo em um forno com temperatura a 110°C para completa aderência da nova superfície no pneu.

**Figura 29** - Processo de raspagem do pneu (ROCHA,2013).



Em relação aos resíduos produzidos, a empresa adota alguns procedimentos. Todo o material residual gerado é armazenado diariamente em um reservatório que é desabastecido a cada 15 (quinze) dias. Assim sendo, desse volume acumulado foram retirados aproximadamente 80 kg de resíduos que foram acondicionados em sacos plásticos e levados para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS), da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE).

A amostra de resíduos de pneus caracteriza-se por apresentar uma estrutura isenta de materiais têxteis e tiras de aço, sendo constituída apenas pela borracha, possuindo um formato alongado que se assemelha às fibras comumente utilizadas em projetos geotécnicos com comprimento variando de 20mm até mesmo dimensões muito pequenas, assemelhando-se a um pó, como pode ser observado na Figura 30.

**Figura 30** - Amostra de resíduos de pneus coletada



### ***3.1.3 Resíduos de Construção e Demolição***

O resíduo de construção e demolição (RCD) foi obtido em uma Usina de Beneficiamento, localizada no município de Camaragibe-PE, na Região Metropolitana do Recife (RMR). A usina tem como finalidade o recebimento, britagem, estocagem e venda de resíduos provenientes de diversas obras no Recife e RMR, com capacidade de processamento de até 900 toneladas por dia.

Na usina de beneficiamento, os resíduos são, inicialmente, pesados e possíveis contaminantes são retirados para posterior processamento, onde os mesmos são britados para ter reduzida sua dimensão, peneirados num sistema mecânico de peneiras e separados por tamanhos de brita e areia. A Figura 31 apresenta alguns destes equipamentos utilizados para processamento destes resíduos na usina.

**Figura 31** - Usina de beneficiamento em Camaragibe-PE.



Dessa forma, a coleta do resíduo foi feita, primeiramente, observando-se as características do material, que deveria ser um agregado miúdo com dimensões inferiores a 4,8 mm. Determinada a amostra, a coleta de 200kg foi realizada em uma pilha beneficiada, atentando-se para o recolhimento do material do topo, meio e base. A Figura 32 registra o processo de coleta do material.

**Figura 32** - Processo de coleta do material.



Os resíduos foram acondicionados em sacos plásticos reforçados e destinados ao Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC), da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. A Figura 33 mostra uma visão da amostra de RCD estudada na pesquisa.

**Figura 33** - Amostra de RCD.



### 3.2 Preparação dos Materiais

Para realização dos ensaios predeterminados nesta pesquisa, os materiais passaram por uma preparação prévia. Dessa forma, as amostras foram secas ao ar e posteriormente foram passadas na peneira nº 4 (4,8 mm) para retirada de possíveis grãos com tamanhos maiores. Em seguida, dois tipos de misturas foram preparadas, uma com solo e resíduos de pneus (solo-pneu) nas proporções de 10, 20, 30, 40 e 50% em relação ao peso do solo seco; e outra com o solo e RCD com os mesmos teores da mistura anterior. A Figura 34 apresenta uma amostra de solo com 40% de fibras de pneus e o solo com 50% de RCD.

É válido salientar que para a preparação dessas misturas foram seguidas algumas etapas a fim de se facilitar o trabalho com o material e produzir amostras com um certo padrão. Em primeiro lugar após o peneiramento os resíduos eram misturados ao solo seco uniformemente de acordo com o teor estabelecido, sendo acrescentado aos poucos e envolvido no solo, atentando-se em especial para o resíduo de pneus devido ao tamanho e a forma das partículas. Só então era acrescentada a água gradualmente, quando necessária, a partir da umidade determinada e novamente misturado tomando-se o cuidado para que esses resíduos não se acumulassem em certas regiões.

**Figura 34** - Misturas solo-resíduos a) amostra de solo-pneu com 40% de resíduos; b) solo com 50% de RCD.



Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas as siglas utilizadas para identificar as amostras e as proporções das misturas.



**Tabela 7 – Misturas preparadas de solo-pneus.**

Mistura	Solo (%)	Resíduo de Pneus (%)
S90P10	90	10
S80P20	80	20
S70P30	70	30
S60P40	60	40
S50P50	50	50

S- solo; P- resíduo de pneus.

**Tabela 8 – Misturas preparadas de solo-RCD.**

Mistura	Solo (%)	RCD (%)
S90R10	90	10
S80R20	80	20
S70R30	70	30
S60R40	60	40
S50R50	50	50

S- solo; R- Resíduo de Construção e Demolição.

A determinação destes teores foi feita a fim de se analisar o comportamento do solo a partir da inserção gradual destes dois tipos de resíduos, verificando a influência destes nos parâmetros de resistência do solo, traçando um comparativo entres estes dois compósitos e assim buscando-se estabelecer um teor ótimo máximo de melhoramento do solo.

### 3.3 Ensaios de Caracterização Física dos Materiais

Para conhecimento das características físicas do solo, do resíduo de pneus e RCD, foram realizados diversos ensaios de acordo com as propriedades de cada material e das misturas solo-resíduos, dentre eles:

- Análise Granulométrica – NBR 7181 (ABNT, 1984a);
- Limite de Liquidez – NBR 6459 (ABNT, 1984b);
- Limite de Plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 1984c);
- Massa Específica dos grãos – NBR 6508 (ABNT, 1984d); e
- Compactação NBR 7182 (ABNT, 1986).

Ensaio de verificação do teor de umidade pelo tempo de 24h, 30h e 48h foram também conduzidos nas misturas solo-pneu a fim de se avaliar o ponto de estabilização da umidade (Tabela 9). Para este caso, diferentemente das demais amostras, foi adotada a temperatura de 50°C devido às restrições da borracha de pneu em suportar temperaturas mais altas.

**Tabela 9** – Teor de umidade das misturas solo-pneus no período de 24h, 30h e 48h.

Misturas	24h (%)	30h (%)	48h (%)
S90P10	17,5	17,6	17,7
S80P20	16,5	16,6	16,7
S70P30	18,5	18,6	18,6
S60P40	17,4	17,5	17,5

Constatou-se que para as amostras com menores teores de resíduos é necessário, no mínimo, 48h para se atingir a umidade real do material, diferentemente das amostras com 30% e 40% de pneus que apresentou estabilização a 30h.

### ***3.3.1 Análise Granulométrica***

A análise granulométrica das amostras foi conduzida seguindo os procedimentos indicados na NBR 7181 (ABNT, 1984a), sendo cada material preparado conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986) que normaliza o método de preparação de amostras para ensaios de caracterização e compactação.

Para o ensaio tanto com o solo, quanto para os desbastes de pneus, RCD e as misturas solo-resíduos foram utilizados 1,5 kg de amostra, combinando duas etapas, peneiramento e sedimentação, devido à constatação visual da presença de uma parcela significativa de materiais finos (Figura 35).

**Figura 35** - Ensaio de Peneiramento (a); Ensaio de Sedimentação (b).



É válido ressaltar que a secagem dos resíduos de pneus e das misturas solo-pneu para a realização do peneiramento, exigiu um controle de temperatura da estufa não ultrapassando os 50°C, devido à possibilidade de ocasionar danos à estrutura da borracha, sendo retiradas as amostras após a constância de peso.

### ***3.3.2 Limites de Consistência***

A fim de se identificar a influência ou não dos finos de argila presente nos materiais, foram realizados os ensaios de Limites de Consistência (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade) nas amostras de solo, solo-pneu e solo-RCD.

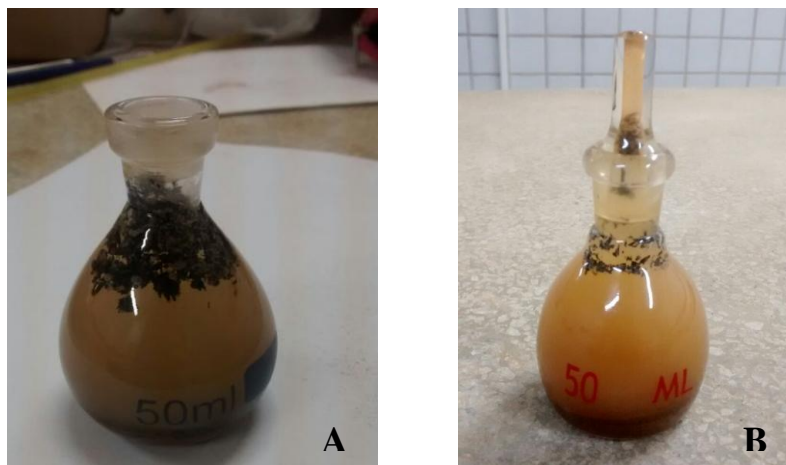
Os ensaios para determinação dos Limites de Consistência foram realizados seguindo as normas NBR 6459 (ABNT, 1984b) e NBR 7180 (ABNT, 1984c) tanto para o solo quanto para as misturas.

### 3.3.3 Densidade Real dos Grãos

Para realização do ensaio de densidade real, a norma NBR 6508 (ABNT, 1984c) foi seguida, utilizando-se o método do picnômetro e da bomba de vácuo para retirada do ar das amostras. Para os resíduos de pneus e as mistura solo-pneu o processo de realização do ensaio teve que ser adaptado.

Na execução dos ensaios de densidade real nas amostras com resíduos de pneus, observou-se que após o período de retirada do ar pela bomba de vácuo, parte das partículas de borracha dos resíduos de pneus ficava em suspensão, acompanhado a linha d'água. Dessa forma, para evitar a perda de material após a colocação da tampa, foi limitada a altura da água até metade do gargalo. Sendo a água, posteriormente, adicionada por meio da abertura superior da tampa até o preenchimento total do picnômetro. A Figura 36 mostra o picnômetro após a retirada do ar e totalmente preenchido de água em duas misturas.

**Figura 36** - Detalhe dos picnômetros: (a) após a retirada do ar; (b) totalmente preenchido.



### 3.3.4 Compactação Proctor Normal

Com a finalidade de se determinar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo das amostras, foram realizados ensaios de

compactação com energia de Proctor Normal, segundo a NBR 7182 (ABNT, 1986).

Dessa forma, aproximadamente 3 kg de cada amostra foram preparadas e compactadas em um cilindro, em três camadas, recebendo cada camada 26 golpes, utilizando-se o reuso do material para confecção dos corpos de prova.

É válido salientar que a preparação das misturas de solo-pneu para a execução dos ensaios demandou uma maior atenção quanto à homogeneização, devido a forma fibrilar característica dos resíduos de pneus, para obtenção de uma amostra uniforme.

Dessa forma, a confecção dos corpos de prova seguiram algumas etapas: primeiramente se pesou as amostras de acordo com a porcentagem a ser utilizada; depois o solo e o resíduo secos ao ar foram misturados, a fim de se evitar um acúmulo maior das fibras ou RCD em alguns locais mais que outros. Por fim a água era acrescentada e incorporada cuidadosamente para assim poder moldar os corpos de prova. A Figura 37 mostra um corpo de prova moldado com 30% de resíduo de pneus.

**Figura 37** - Corpo de Prova de uma mistura de solo com 30% de resíduos de pneus (S70P30).



### 3.4 Caracterização Mecânica

Para conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais e das misturas solo-resíduos foi determinada a realização do ensaio de cisalhamento direto a fim de se obter os parâmetros geotécnicos, ângulo de atrito, coesão e resistência ao cisalhamento, destes materiais.

#### *3.4.1 Ensaio de Cisalhamento Direto*

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados tanto na matriz do solo natural quanto nas misturas de solo-resíduos, para a mistura solo-pneus os teores adotados foram de 10% a 40%, para o solo-RCD adotaram-se as porcentagens de 10%, 30% e 50% devido os ensaios físicos apresentarem resultados muito aproximados.

É válido salientar que as amostras de solo-pneu possuem um grande volume devido às características físicas da fibra de pneu. Assim sendo, foram encontradas dificuldades na moldagem dos corpos de prova diretamente na caixa de cisalhamento, desta forma houve a necessidade de se projetar um molde com tamanho compatível com as dimensões internas da caixa, permitindo a transferência deste material para a mesma e a produção de forma padronizada desses corpos de prova.

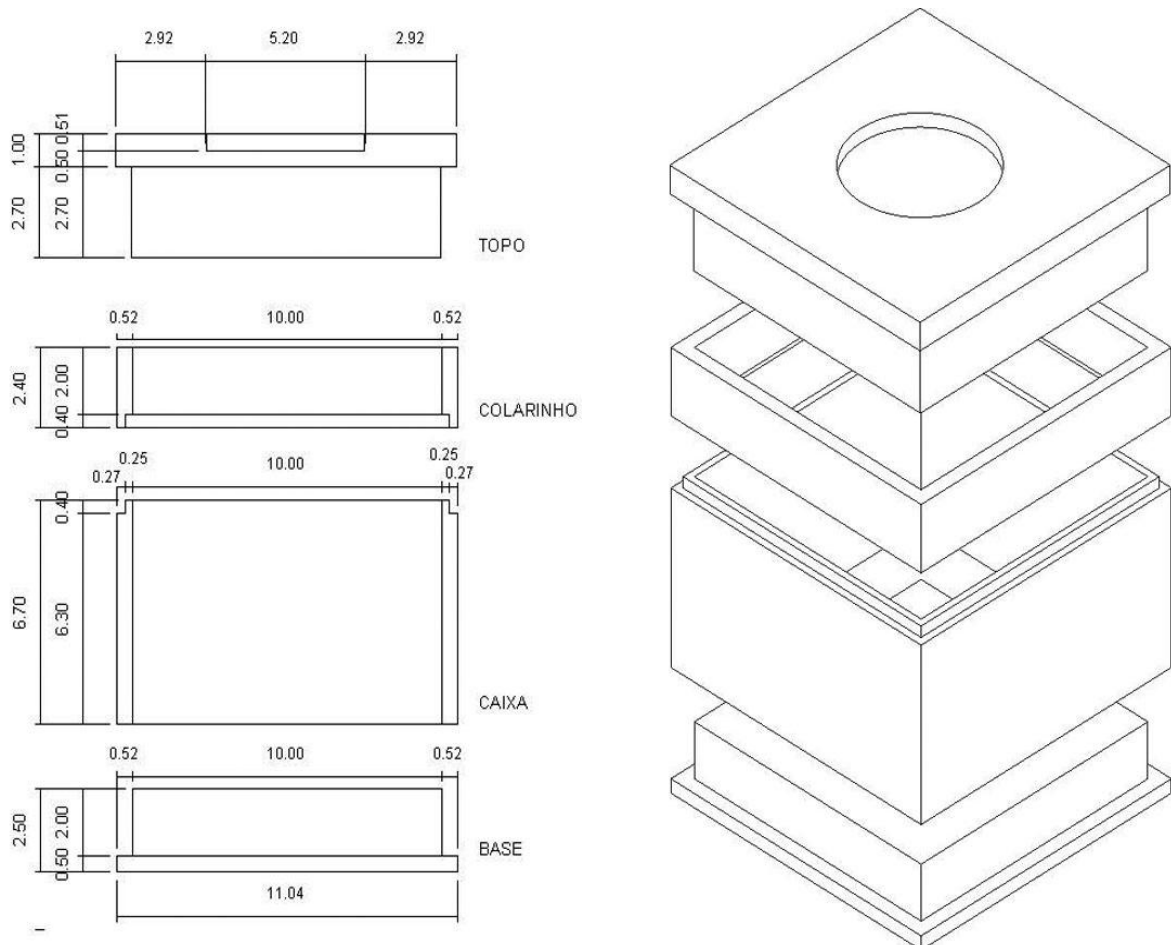
A velocidade foi calculada de modo que em 3h de ensaio fosse alcançado 15 mm de deslocamento horizontal, assim sendo a velocidade média padrão determinada para o ensaio foi de 0,083 mm/min.

Adotou-se o ensaio adensado rápido, tomando-se como parâmetro de compactação das amostras a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo, com a aplicação das tensões de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa.

### 3.4.2 Confeção do molde

Para a moldagem dos corpos de prova foi então confeccionado um molde em aço que foi fabricado no Laboratório de Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco. No programa Autocad, este foi projetado em quatro partes: base, caixa, colarinho e topo (Figura 38).

**Figura 38** - Corte esquemático do molde (a); Vista tridimensional do molde (b).



A base é constituída de um placa de 5 mm de espessura e aproximadamente 110 mm de lado, com um bloco superior em aço que possui dimensões de 100 mm x 100 mm com 20 mm de altura que adentra a outra parte subsequente, a caixa. Esta possui dimensões internas de 100 mm x 100 mm e 67 mm de altura, encaixando-se perfeitamente à base, o que permite um espaço livre de 47 mm em que se coloca a amostra a ser compactada.

Devido ao volume do material, foi produzido também um colarinho medindo as mesmas dimensões da caixa e 24 mm de altura, que permite a moldagem do corpo de prova em duas camadas. Por fim tem-se o topo, com 100 mm x 100 mm de lado e 37 mm de altura, sendo 10 mm da placa de fechamento que recebe o esforço da prensa de moldagem e 27 mm do volume que penetra a caixa. Este volume ao ser encaixado ao corpo do molde sem o colarinho resulta em um espaço livre de 20 mm que corresponde a primeira camada, ao se colocar o colarinho e realizar novamente o encaixe é criado acima um espaço de 20mm que se refere a segunda camada.

### ***3.4.3 Moldagem dos Corpos de Prova***

O procedimento geral para a confecção destes corpos de prova se deu da seguinte forma: primeiramente as amostras foram preparadas de acordo a porcentagem de fibras, homogeneizadas e adicionadas água até alcançar a umidade ótima. Posteriormente, foi calculada a quantidade em peso de amostra necessária de acordo com o volume do molde, o peso específico aparente seco máximo do material e a umidade ótima. De posse deste valor, este foi dividido em duas camadas como procedimento para facilitar a moldagem, resultando em corpos de prova de 100 mm x 100 mm e 40 mm de altura.

Esquemáticamente, a moldagem dos corpos de prova seguiu as etapas apresentadas na Figura 39: inicialmente, após o cálculo da quantidade de amostra a ser utilizada, a primeira camada era colocada uniformemente no molde e a parte superior encaixada (1); o conjunto era então levado a uma prensa hidráulica manual sendo a amostra compactada estaticamente até o limite de encontro da placa superior do molde e a caixa, sendo o bloco em aço do topo encaixado totalmente (2); Em seguida o colarinho era posicionado no molde e a segunda camada de amostra colocada, lembrando-se de se realizar a escarificação da primeira camada a fim de se proporcionar a união das mesmas (3);



O molde era novamente levado a prensa e o mesmo procedimento realizado na primeira camada repetia-se (4), lembrando de se deixar o molde preenchido com a amostra na prensa por 15 minutos antes de se colocar na caixa para melhor estabilização do corpo de prova; Após a moldagem da amostra, a base, o topo e o colarinho eram retirados, o molde era então posicionado sobre a caixa de cisalhamento e um tarugo de madeira colocado acima do corpo de prova (5); Com isso o conjunto era outra vez levado a prensa para que se houvesse a transferência do corpo de prova do molde para a caixa de cisalhamento (6); Por fim realizava-se uma conferência visual do corpo de prova na caixa pois para algumas amostras, principalmente com teores maiores de resíduos de pneus, o material extrapolava o limite de altura da caixa exigindo a retirada deste excedente.

**Figura 39** - Procedimento de moldagem dos corpos de prov



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados os resultados e as análises obtidos na execução dos ensaios tanto nas amostras de solo, RCD e resíduo de pneus quanto nas misturas predeterminadas.

### 4.1 Caracterização dos Materiais

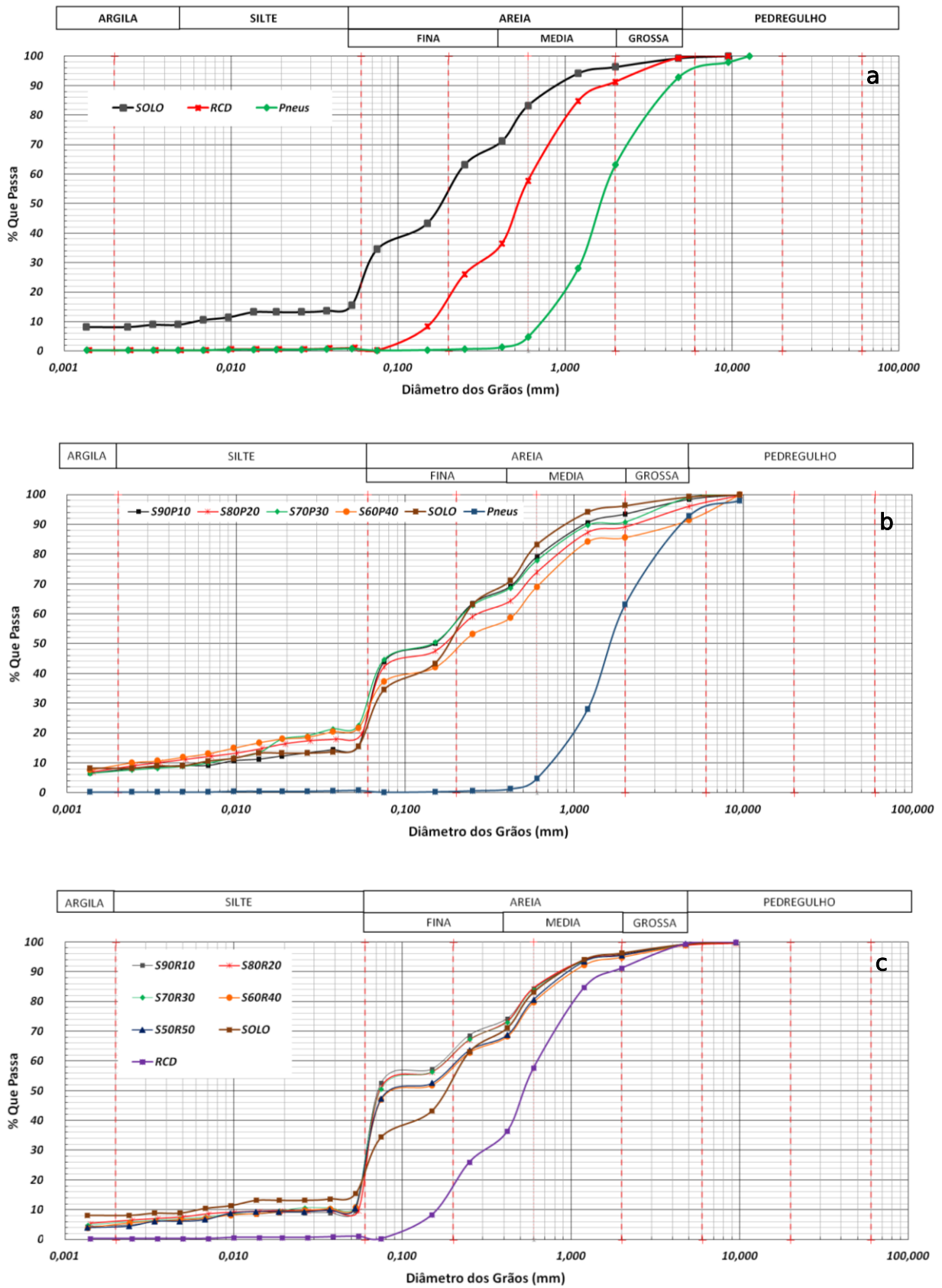
#### 4.1.1 *Análise Granulométrica*

As curvas granulométricas obtidas nos ensaios para o solo, o resíduo de pneus e o RCD assim como para as misturas solo-pneu e solo-RCD são apresentadas na Figura 40. Percebe-se que, de modo geral, as amostras individuais possuem uma distribuição de suas partículas predominantemente compreendidas entre as frações de 4,8mm e 0,05mm, o que correspondente a areia. O solo apresenta 80% de seus grãos na fração de areia, enquanto que os resíduos de pneus 99,23% e o RCD 98,3%.

Analisando-se a Figura 40b, verifica-se, na porção que abrange a areia grossa e média, certa distinção entre as misturas solo-pneu posicionando-se entre a faixa do solo e do pneu. Observa-se também uma maior presença de grãos na areia fina quando comparados ao solo. Com relação à parcela de silte e argila, nota-se para as misturas um aproximação de resultados junto ao solo, estando um pouco acima influenciado também pela presença de partículas de pequenas dimensões de pneus.

Para as misturas solo-RCD (Figura 40c), constata-se que a variação de teores de RCD adicionados ao solo não alterou significativamente a distribuição granulométrica entre as misturas, permanecendo as curvas numa faixa entre o solo puro e o RCD puro, excetuando-se a porção que vai do silte a argila na qual as misturas estão situadas acima do solo.

**Figura 40** - Curvas granulométricas do solo, resíduo de pneus e o RCD (a); das msituras solo-pneu (b); e das misturas solo-RCD (c).



A Tabela 10 apresenta os percentuais das frações das amostras de solo, resíduo de pneus e RCD, bem como das misturas solo-pneu e solo-RCD, obtidos no presente estudo.

**Tabela 10** - Percentual de argila, silte, areia e pedregulho nas amostras de solo, resíduo de pneus, RCD, e das misturas.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)
			Fina	Média	Grossa	
<b>Solo</b>	8,33	5,70	57,17	25,10	2,96	0,75
<b>RCD</b>	0,31	0,69	35,46	54,76	8,08	0,68
<b>Pneus</b>	0,30	0,47	0,55	61,84	29,57	7,27
<b>S90P10</b>	6,90	4,61	63,8	18,14	4,90	1,65
<b>S80P20</b>	8,43	5,99	56,17	18,60	6,89	3,92
<b>S70P30</b>	6,55	10,00	57,61	16,60	8,20	1,04
<b>S60P40</b>	8,45	7,12	49,82	20,21	5,80	8,60
<b>S90R10</b>	14,05	6,44	41,14	34,19	3,22	0,96
<b>S80R20</b>	16,63	4,20	40,47	34,21	3,23	1,26
<b>S70R30</b>	15,38	8,79	37,03	34,43	3,55	0,82
<b>S60R40</b>	14,32	8,84	36,09	35,59	4,16	1,00
<b>S50R50</b>	13,39	8,99	38,30	34,91	3,83	0,58

Por meio das curvas granulométricas foi possível obter das amostras os coeficientes de não uniformidade (Cu) e curvatura (Cc), assim como a correspondente classificação para o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, e TRB (antigo HRB) em que os solos são reunidos em grupos e subgrupos a partir de sua granulometria, limites de consistência e do índice do grupo (Tabela 11).

**Tabela 11** – Classificação SUCS e TRB para as amostras estudadas.

<b>Amostra</b>	<b>Cu</b>	<b>Cc</b>	<b>Distribuição</b>	<b>SUCS</b>	<b>TRB</b>
<b>Solo</b>	38,3	3,55	Mal graduado	SC	A-2-4
<b>Resíduo de Pneus</b>	3,64	0,85	Bem graduado	SP	A-1-b
<b>RCD</b>	3,82	0,81	Bem graduado	SP	A-1-a
<b>S90P10</b>	27,5	2,05	Bem graduado	SM	A-4
<b>S80P20</b>	80	3,88	Mal graduado	SM	A-4
<b>S70P30</b>	31,42	2,34	Bem graduado	SM	A-4
<b>S60P40</b>	180	3,41	Mal graduado	SM	A-4
<b>S90R10</b>	3,40	0,39	Bem graduado	SM-SC	A-4
<b>S80R20</b>	4	0,31	Bem graduado	SM-SC	A-4
<b>S70R30</b>	3,65	0,37	Bem graduado	SM-SC	A-4
<b>S60R40</b>	4,15	0,32	Bem graduado	SM-SC	A-4
<b>S50R50</b>	4,23	0,32	Bem graduado	SM-SC	A-4

A partir da classificação SUCS, o solo se apresenta como SC, o que corresponde a uma areia argilosa com distribuição dos grãos mal graduada ( $Cc > 3$ ). Comparativamente, apresenta resultados próximos aos encontrados por Lafayette (2000) e Moura (2011), em que se encontraram as mesmas denominações tanto para a classificação SUCS e TRB.

Considerando a classificação unificada usada para os solos, o resíduo de Pneus e RCD podem ser classificados como SP, caracterizando-se por serem areias mal graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino, com uma distribuição dos grãos muito uniformes ( $Cu < 5$ ). Com relação às amostras de solo-pneus, estas são classificadas segundo a SUCS como SM, areias siltosas, por apresentar mais de 12% de seus grãos menores que 0,075 e Índice de Plasticidade (IP) menor que 4. Para as amostras de solo-RCD, há um enquadramento na classificação de SM-SP, areias silto-argilosas devido, também a porcentagem de grãos menores que 0,075 ultrapassar 12% e o IP localizar-se entre 4 e 7.

A seguir são listadas, de acordo com o DNIT (2006), as características dos solos de cada grupo e subgrupo a partir dos índices de classificação TRB para cada amostra estudada:

**Índice A-1-a:** enquadra os resíduos de pneus, caracterizando materiais que possuem uma fração mais grossa, contendo, principalmente, nos solos, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino.

**Índice A-1-b:** classifica o RCD, compreendendo os solos constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.

**Índice A-4:** abrange as misturas de solo-RCD e solo-pneu. Nesta classificação os solos possuem uma parcela expressiva de materiais finos, mais precisamente na fração de silte, geralmente são não plásticos ou moderadamente plásticos com 5% ou mais de material passante na peneira nº200.

#### ***4.1.2 Limites de Consistência***

Os resultados obtidos para os limites de liquidez e plasticidade do solo, RCD e misturas solo-RCD são apresentados na Tabela 12 e 13. Vale ressaltar que tanto para o resíduo de pneus quanto para o RCD e as misturas solo-pneu, os limites se apresentaram não líquido e não plástico.

**Tabela 12** – Resultados dos Limites de Consistência para o solo e o RCD.

<b>Amostra</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Classificação</b>
<b>Solo</b>	26,69	20,56	6,14	Fracamente plástico
<b>RCD</b>	NL	NP	-	Não Plástico

Assim como na pesquisa de Lafayette (2000) em que se tem em um dos poços de investigação na profundidade de 1,0 m a 3,5m a presença de um solo fracamente plástico e IP de 5,0, constata-se para o solo comportamento semelhante, reafirmando desta forma as características do mesmo.

**Tabela 13** – Resultados dos Limites de Consistência das amostras de solo-RCD.

<b>Amostra</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Classificação</b>
<b>S90R10</b>	27,66	25,17	4,48	Fracamente plástico
<b>S80R20</b>	27,38	21,47	5,91	Fracamente plástico
<b>S70R30</b>	26,18	19,79	6,39	Fracamente plástico
<b>S60R40</b>	26,26	19,84	6,42	Fracamente plástico
<b>S50R50</b>	23,53	17,77	5,76	Fracamente plástico

Observa-se que para as misturas S90R10 e S80R20 ocorre um discreto aumento dos limites em relação ao solo, decrescendo a partir desse valor, contudo, sem alterações significativas, estando mais evidente apenas na mistura S50R50. Vale destacar que tanto para o solo, o RCD e as misturas, a classificação segundo o índice de Plasticidade (IP) demonstrou que estes são fracamente plásticos ( $1 < IP < 7$ ).

#### **4.1.3 Densidade Real dos grãos**

A Tabela 14 apresenta os valores para a densidade real dos grãos dos materiais (solo, resíduo de pneus e RCD) utilizados nesta pesquisa, bem como das misturas do solo com os resíduos em diferentes teores.

**Tabela 14** – Densidade real das amostras individualmente e das misturas solo-pneus e solo-RCD.

<b>Amostra</b>	<b>Densidade Real</b>
<b>Solo</b>	2,66
<b>RCD</b>	2,62
<b>Pneus</b>	1,08
<b>S90P10</b>	2,46
<b>S80P20</b>	2,34
<b>S70P30</b>	2,16
<b>S60P40</b>	1,93
<b>S90R10</b>	2,63
<b>S80R20</b>	2,62
<b>S70R30</b>	2,65
<b>S60R40</b>	2,62
<b>S50R50</b>	2,63

Analisando-se os resultados, observou-se que o solo apresenta uma densidade real dos grãos de 2,66, valor próximo ao encontrado por Moura (2011) que foi de 2,68.

Para os resíduos de pneus foi encontrado o valor de 1,08, resultado coerente quando comparado a outras pesquisas, como mostrado na Tabela 15.

**Tabela 15** – Comparação da densidade real dos grãos com outras pesquisas.

<b>Pesquisas</b>	<b>Amostra</b>	<b>Densidade Real dos grãos</b>
Esta Pesquisa	Desbastes (dimensões de 0,1 a 27mm)	1,08
Edinçliler e Ayhan (2010)	Desbastes (1 a 3 mm)	1,08
Nakhaei <i>et al.</i> (2012)	Granulado de borracha (0,15 a 9,5 mm)	1,10
Franco (2012)	Desbastes (tamanho médio de 1,6 mm)	1,11
Chrusciak (2013)	Pedaços de borracha (4 a 25,4 mm)	1,18

No que se refere ao RCD foi obtido o valor de 2,62, resultado compatível aos encontrados em pesquisas anteriores, como Lira Jr. (2010) que obteve valores variando entre 2,63 a 2,76 e Macedo (2013) que apresentou o valor de 2,63.

Em relação às misturas, percebe-se que o solo-pneu, possui uma tendência na diminuição da densidade a partir da adição das fibras de pneus ao solo, comportamento compatível devido às características do material que possuem uma densidade bastante inferior ao solo (Tabela 14). Para o solo-RCD, a inclusão de RCD ao solo não proporcionou alterações relevantes quando comparados os resultados encontrados para o solo e o RCD puro, estando delimitado dentro dessa faixa de valores.

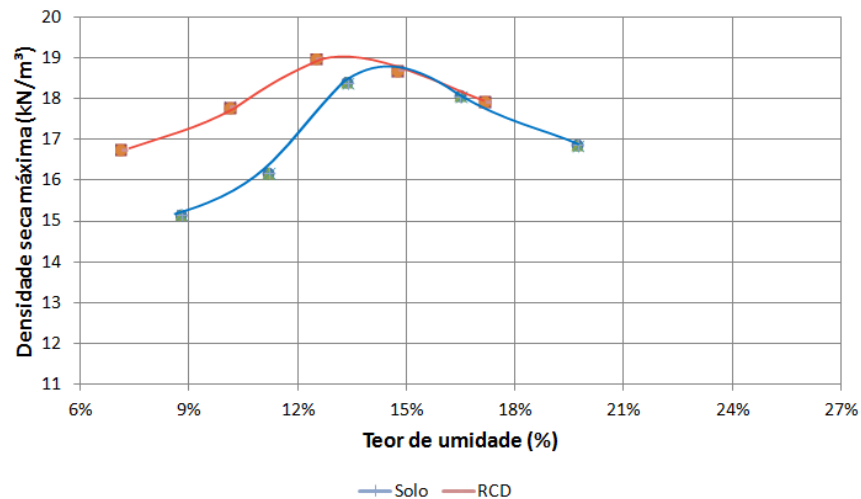
#### ***4.1.5 Compactação Proctor Normal***

As curvas de compactação do solo e RCD são apresentadas na Figura 41, enquanto que os valores relacionados ao peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótima são mostrados na Tabela 16. Vale



salientar que para os resíduos de pneu puro, não foi possível realizar o ensaio devido às características do material.

**Figura 41** - Curvas de compactação do solo e do RCD



**Tabela 16** - Umidade ótima e peso específico aparente seco do solo e RCD.

Materiais	$\gamma_s$ máx (kN/m <sup>3</sup> )	Wot (%)
Solo	18,7	14,9
RCD	19,1	13,4

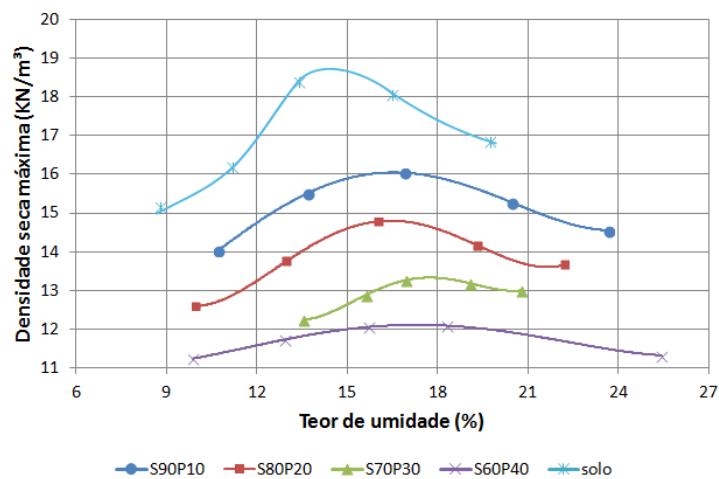
A partir dos resultados, observa-se que o solo apresenta um peso específico seco máximo de 18,70 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 14,90%, valores próximos aos encontrados por Moura (2011), que foi de 17,83 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 17,23%.

Comparativamente, o solo e o RCD não apresentam variação significativa em relação ao peso específico aparente seco máximo, diferenciando-se, apenas, pelo teor de umidade ótima. Analisando-se outras pesquisas, percebe-se que o RCD estudado possui valores semelhantes aos encontrados por outros autores. Medeiros Jr (2008) apresentou em seu estudo para 02 (dois) tipos de RCD provenientes de etapas de estrutura e acabamento, valores de 16,3 kN/m<sup>3</sup> e 17,5 kN/m<sup>3</sup> para o peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de 13,8 e 14,4%. Já Macedo (2013) obteve para peso específico aparente seco o valor de 17,1kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 15,5%.

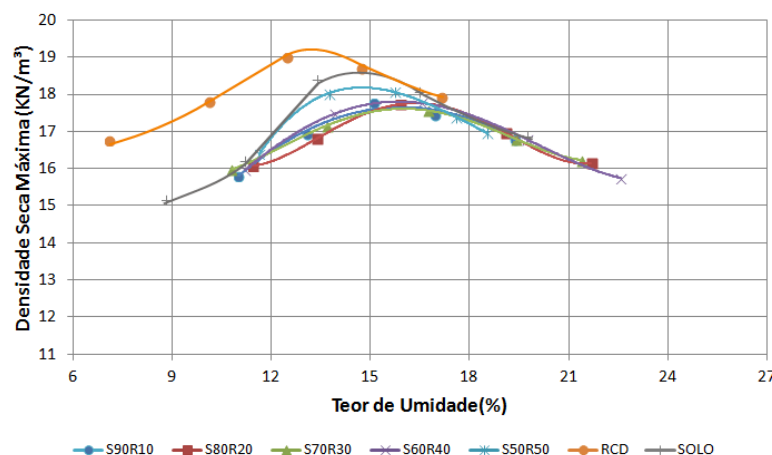
Nas Figuras 42 e 43 são apresentadas as curvas de compactação para as misturas de solo com resíduos de pneus e solo com RCD respectivamente, enquanto que as Tabelas 17 e 18 apresentam os valores de peso específico seco máximo e teor de umidade ótima para estas misturas.

Avaliando-se as curvas de compactação para as misturas de solo com resíduos de pneus, observa-se um clara distinção entre as amostras, com o efeito da diminuição do peso específico a medida que é adicionado mais resíduos, ao contrário das misturas solo-RCD. Verifica-se que as misturas com teor de RCD entre 20% e 40% possuem um comportamento muito semelhante, com teores de úmida ótima com pequenas variações e peso específico com grande aproximação.

**Figura 42** - Curvas de compactação das misturas solo-pneu.



**Figura 43** - Curvas de compactação das misturas Solo-RCD.



**Tabela 17** - Umidades ótimas e pesos específicos seco máximo das misturas solo-Pneu.

Misturas	$\gamma_s$ máx (KN/m <sup>3</sup> )	Wot (%)
Solo	18,70	14,90
S90P10	15,93	17,48
S80P20	14,57	17,18
S70P30	13,26	18,30
S60P40	12,09	17,89

**Tabela 18** - Umidades ótimas e pesos específicos seco máximo das misturas solo-RCD.

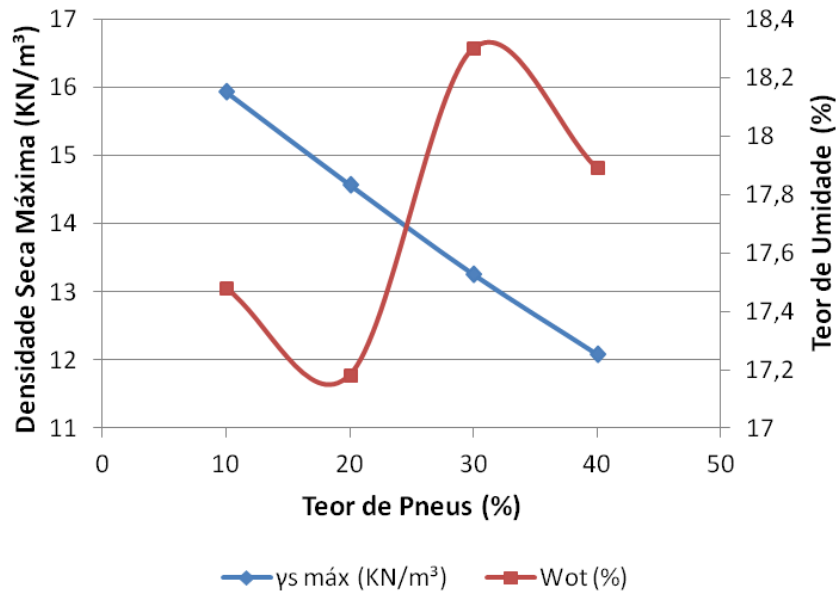
Misturas	$\gamma_s$ máx (KN/m <sup>3</sup> )	Wot (%)
Solo	18,70	14,90
RCD	19,10	13,40
S90R10	17,65	15,95
S80R20	17,51	16,59
S70R30	17,47	16,24
S60R40	17,67	16,52
S50R50	18,17	15,31

Analisando-se a Tabela 17 e 18, percebe-se que a variação da umidade ótima das misturas delimita-se numa faixa de 15,31% a 18,30%, não apresentando uma constante em relação a estas variações. Ao contrário do peso específico, em especial, das amostras solo-pneus, que demonstram uma gradativa diminuição, proporcional ao aumento do teor de resíduos ao solo. Resultado semelhante foi observado nos estudos de Franco (2012), que apresentou uma variação de 18,8 kN/m<sup>3</sup> para 12,2 kN/m<sup>3</sup> em relação a amostra de solo puro e a mistura solo-pneu na proporção de 50% de resíduo de pneus.

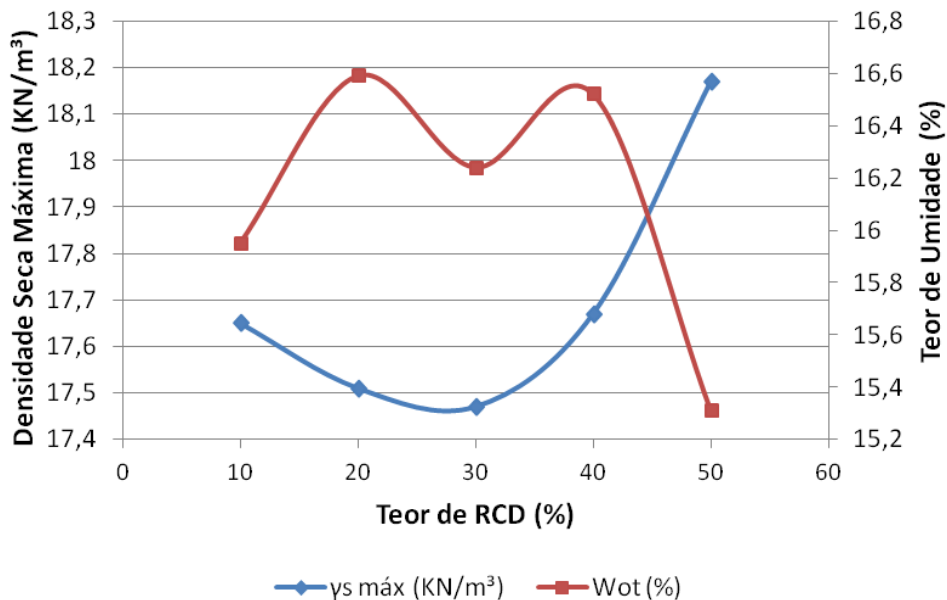
Os valores obtidos no ensaio são sintetizados nas Figuras 44 e 45, demonstrando de forma mais clara o comportamento das misturas a partir

do aumento gradual do teor de resíduos. Reafirmando os resultados expostos nas Tabelas 17 e 18.

**Figura 44** - Gráfico de variação dos parâmetros de compactação das misturas de Solo-Pneu.



**Figura 45** - Gráfico de variação dos parâmetros de compactação das misturas de Solo-RCD.



Para as misturas solo-pneu é perceptível a diminuição progressiva da densidade seca máxima à medida que se introduz mais resíduos ao solo enquanto que a umidade ótima apresenta oscilação desuniforme. Com relação às misturas de solo-RCD visualiza-se diferentemente das amostras

com resíduo de pneus uma tendência ao aumento da densidade seca máxima ao passo que a umidade ótima tende a diminuir.

#### **4.2 Ensaio de Cisalhamento Direto**

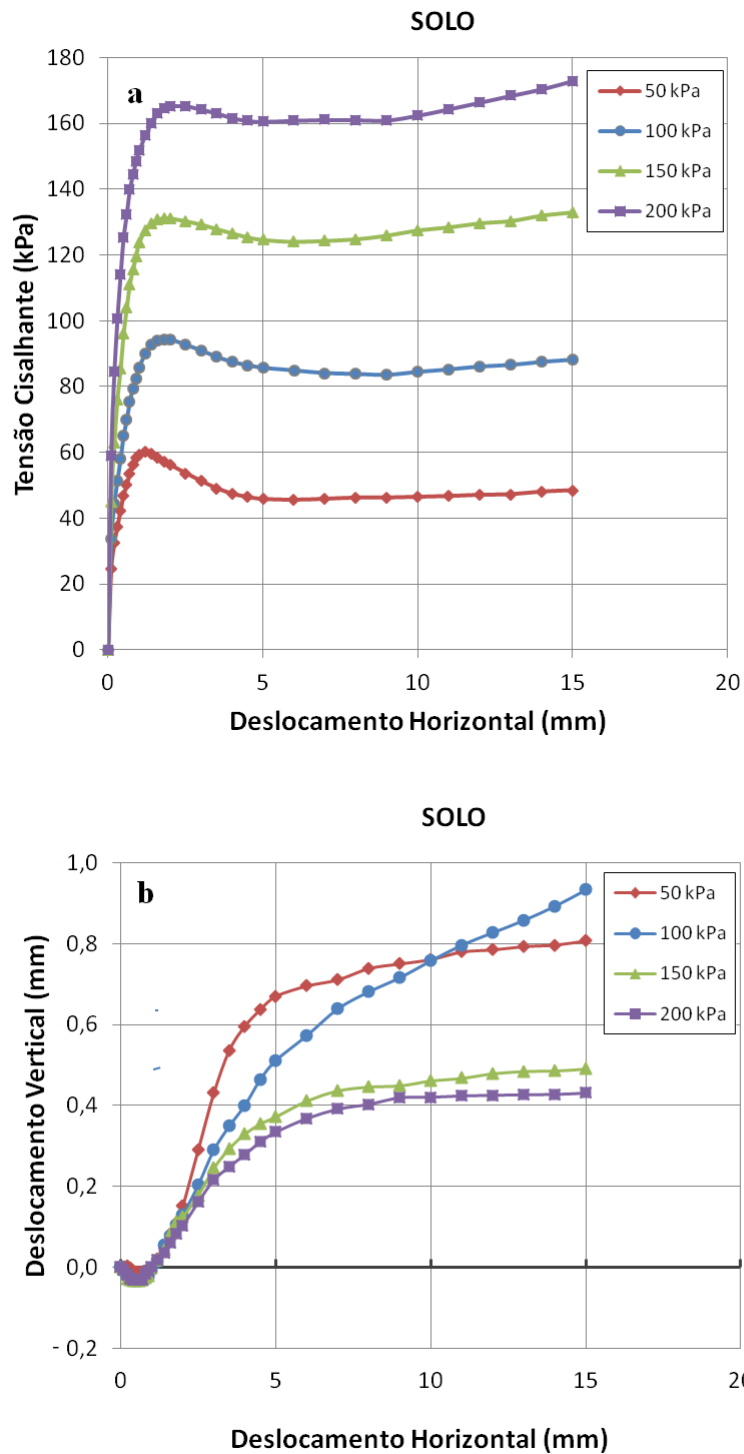
Apresentam-se por meio das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, os resultados obtidos da realização dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras de solo e RCD, assim como para as misturas solo-pneus e solo-RCD. Os índices físicos das amostras utilizadas nos ensaios estão apresentados no Apêndice.

Inicialmente são mostrados os resultados encontrados para o solo (Figura 46) e a partir deste, é traçado um comparativo com as misturas, a fim de se observar as mudanças ocorridas da inserção destes resíduos à matriz natural do solo.

Analisando-se as curvas de resistência do solo, percebe-se um claro comportamento de pico, em que se tem um aumento da tensão cisalhante até a faixa entre 2 mm e 3 mm de deslocamento horizontal e após este percurso um decréscimo para todas as tensões aplicadas. É observado também que a partir de 10 mm há um “falso” acréscimo de resistência, ocasionado pelo efeito de rotação das tensões principais, que por vezes ocorre durante o ensaio de cisalhamento.

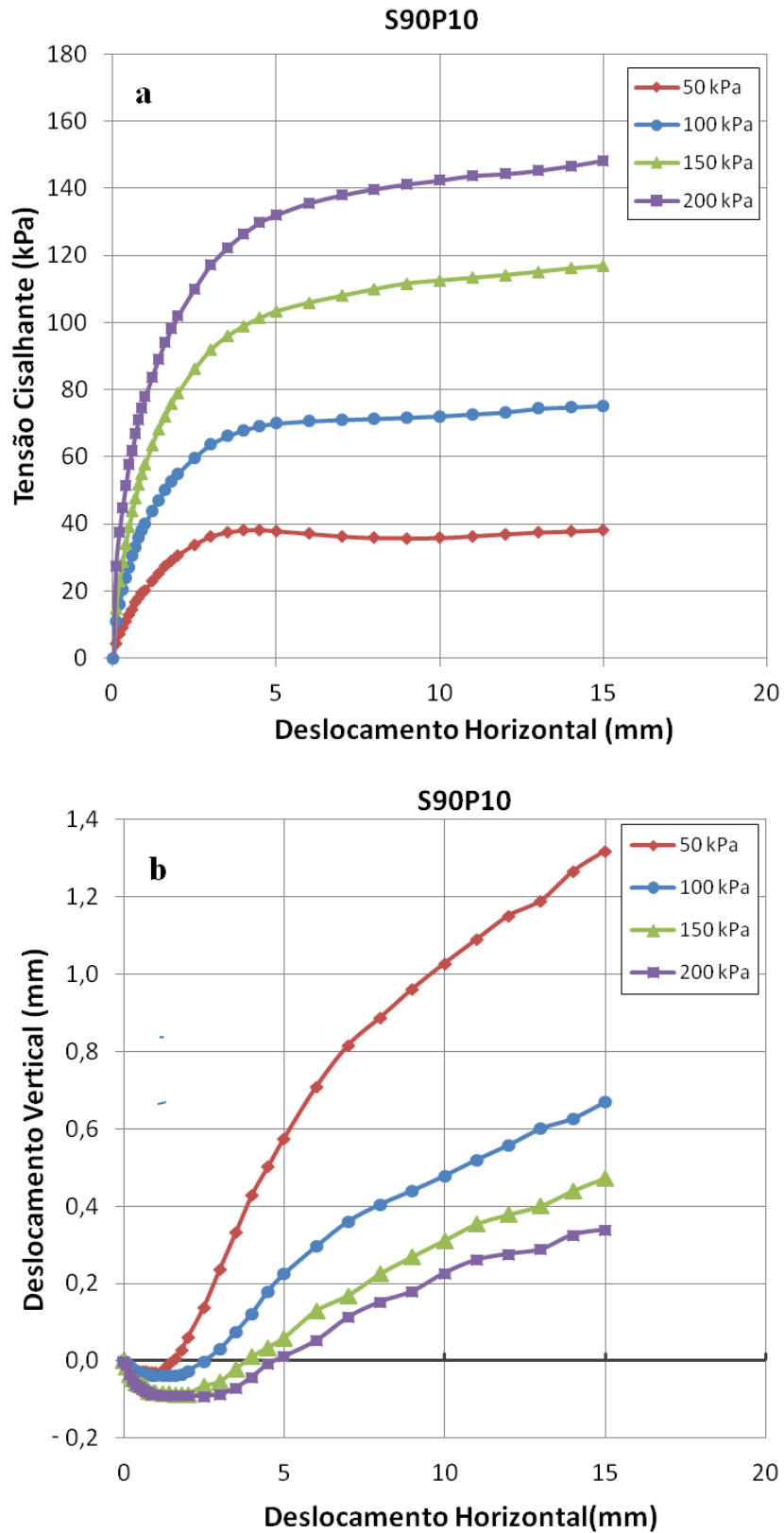
Com relação às curvas de deslocamento horizontal versus deslocamento vertical, visualiza-se um efeito de compressão semelhante para todas as tensões aplicadas no início do deslocamento até cerca de 1,5 mm, assumindo posteriormente um comportamento de dilatância, sendo mais acentuado para as tensões normais de 50 kPa e 100 kPa.

**Figura 46** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) – Solo.

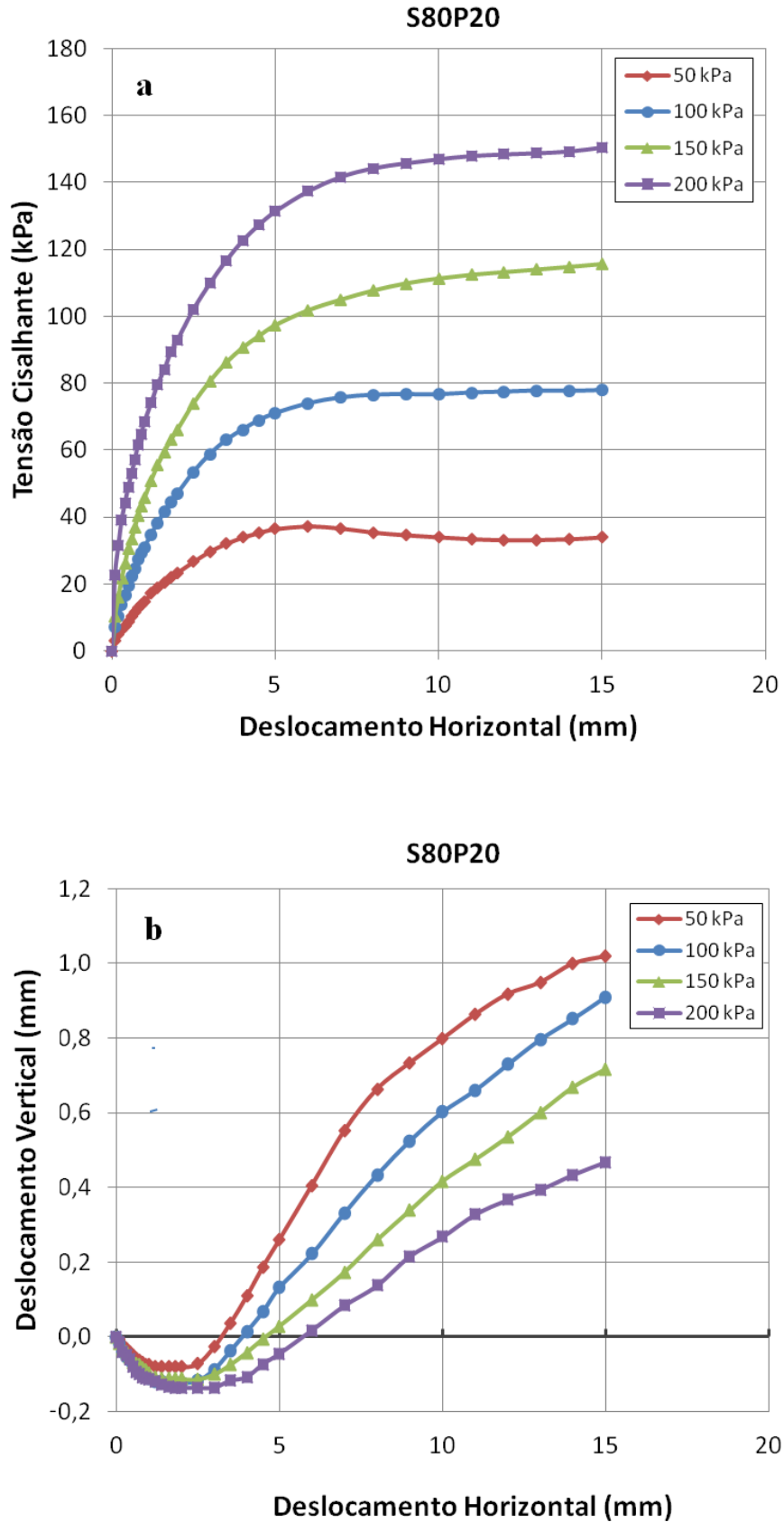


Para as misturas de solo-pneus, são apresentadas as curvas de resistência bem como as curvas de deslocamento horizontal versus deslocamento vertical (Figuras 47 a 50), de acordo com a porcentagem de resíduos presentes no solo.

**Figura 47** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 10% de resíduos de pneus.

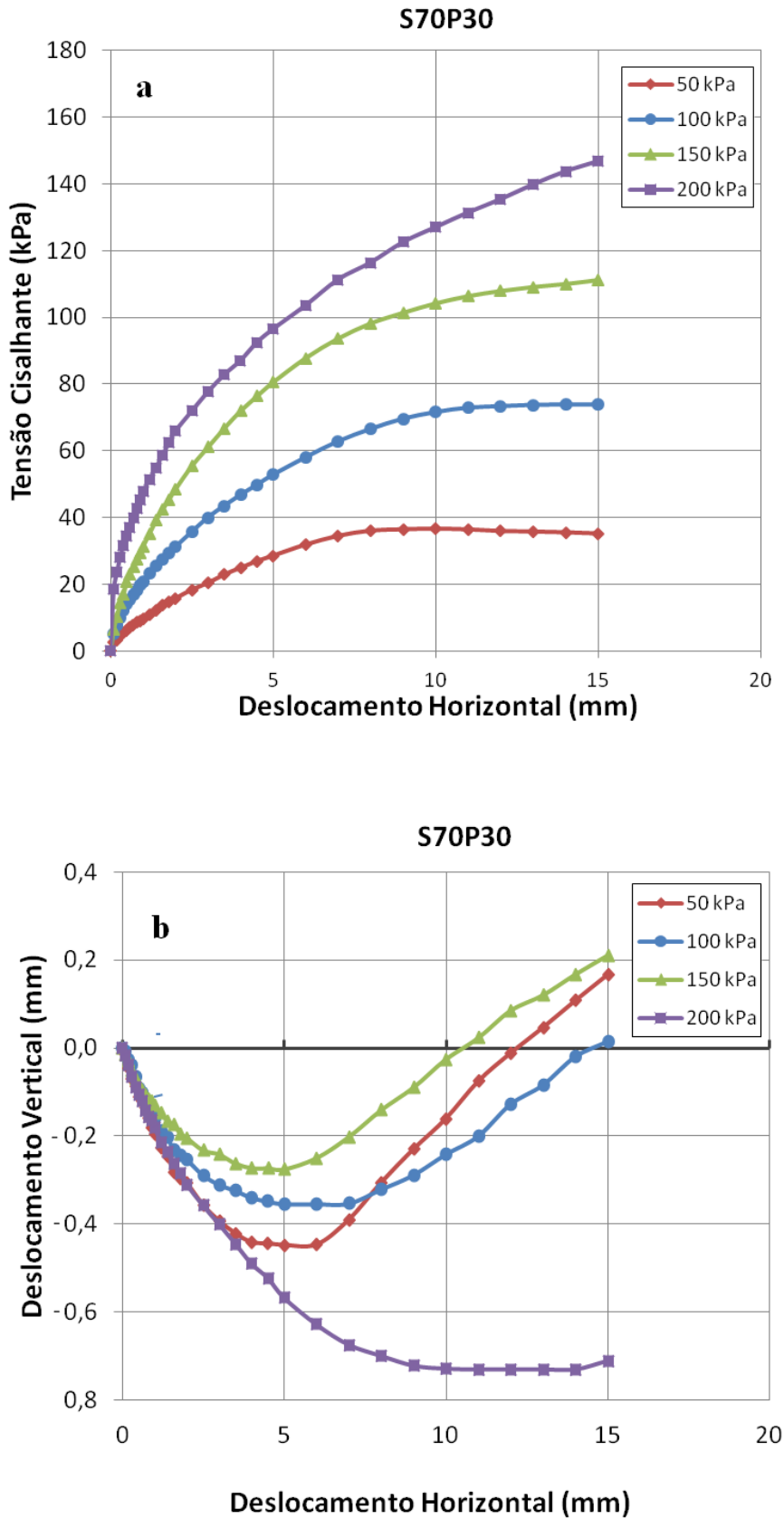


**Figura 48** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 20% de resíduos de pneus.

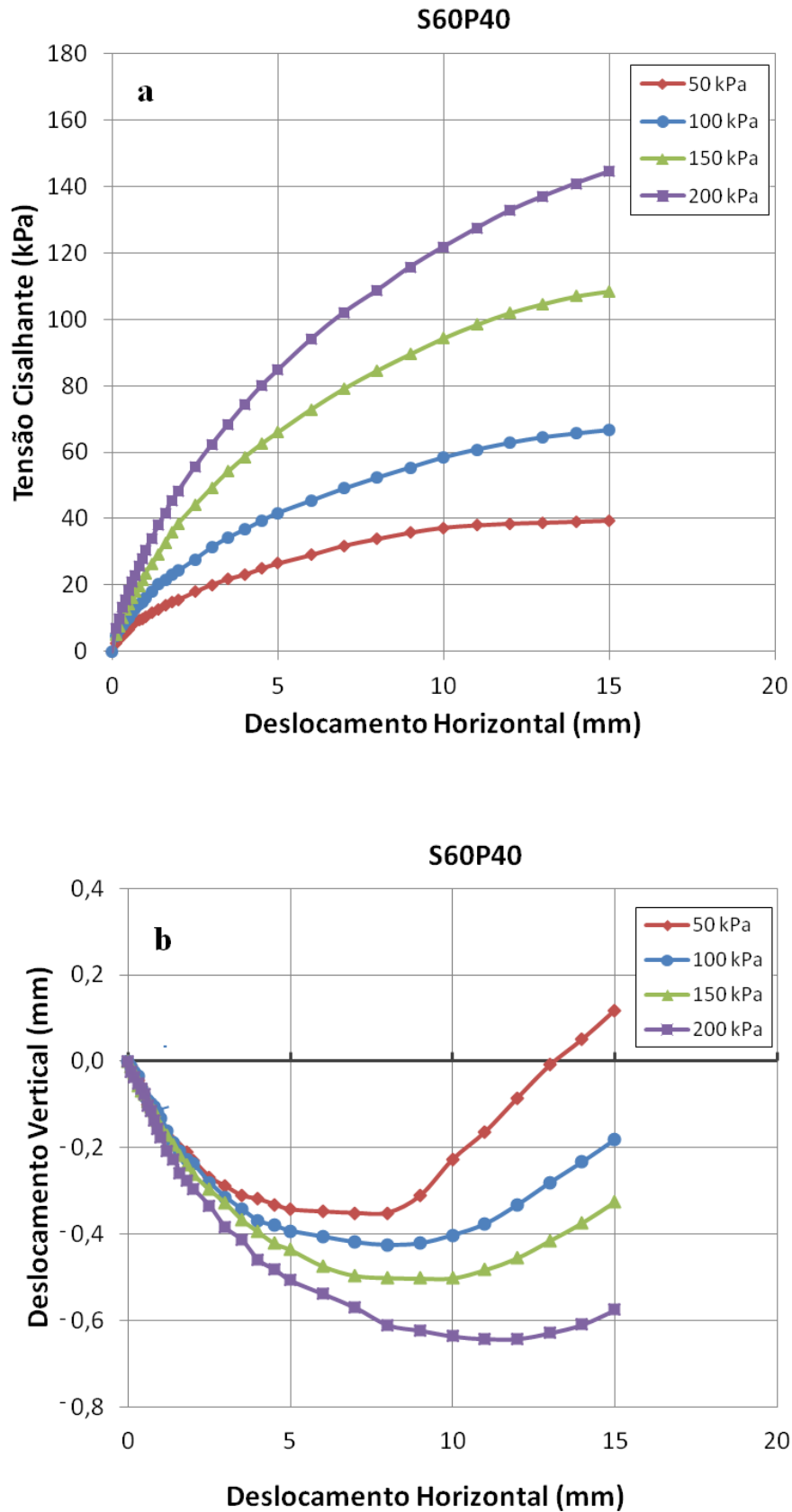




**Figura 49** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 30% de resíduos de pneus.



**Figura 50** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 40% de resíduos de pneus.



Ao traçar um comparativo entre as curvas de resistência do solo com as das misturas de solo-pneus fica evidente a mudança ocorrida na forma de desenvolvimento das curvas a partir da inserção de resíduos ao solo. Observa-se que enquanto o solo possui um comportamento de pico definido, as misturas apresentam, de modo geral, um aumento de resistência ao longo do deslocamento horizontal (Figuras 47 a 50), havendo um comportamento plástico com endurecimento.

Para a mistura com 10% de resíduos de pneus (S90P10), Figura 47a, as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal apresentam para as tensões de 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa crescimento com o aumento do deslocamento horizontal, sendo mais expressivo este crescimento até cerca de 8mm, mostrando em seguida uma tendência à estabilização. Para a tensão de 50 kPa, ocorre este acréscimo de resistência até 4 mm, havendo uma discreta diminuição desta após este valor, demonstrando assim um comportamento elasto-plástico.

Analisando-se a amostra de solo com 20% de resíduos de pneus (S80P20), Figura 48a, observa-se comportamento similar em comparação à mistura com 10% de resíduos, tanto para as curvas de resistência quanto para as de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, demonstrando desta forma que teores até 20% adicionados ao solo não apresentavam distinção.

Com relação à mistura com 30% de resíduos de pneus (S70P30), conforme Figura 49a, nota-se também uma ausência de comportamento de pico, visualizando-se um crescimento da tensão cisalhante durante o deslocamento horizontal. Para as tensões normais de 50 kPa e 100 Kpa, este aumento de resistência ocorre até cerca de 10 mm, apresentando-se em seguida um processo de estabilização, caracterizando um comportamento elasto-plástico. No que se refere às tensões de 150 kPa e 200 kPa, é observado um aumento da resistência proporcional ao deslocamento horizontal, sem atingir contanto a ruptura, mesmo alcançando o deslocamento máximo do equipamento. Indica desta forma um comportamento plástico com endurecimento e uma tendência de

crescimento, em especial para a tensão de 200kPa, além dos 15 mm de deslocamento delimitados no ensaio.

O mesmo comportamento é visto para a amostra com 40% de resíduos de pneus (S60P40), segundo a Figura 50a, em que se tem para as baixas tensões (50 kPa e 100 Kpa) um efeito de estabilização e para tensões de consolidação mais altas um movimento de ascensão. Dessa forma, conclui-se que as fibras necessitam de deslocamentos maiores, assim como a aplicação de tensões normais mais altas para permitir a mobilização das mesmas e assim obter resultados mais expressivos do efeito de reforço.

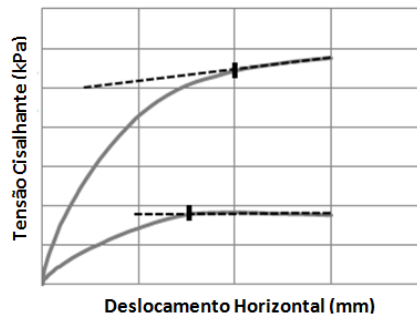
A respeito das curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, constata-se que, quanto maior o teor de resíduos de pneus presentes na amostra e a tensão aplicada mais evidente percebe-se o efeito de compressão. Para a mistura S90P10, Figura 47b, verifica-se um efeito de compressão crescente proporcionalmente a tensão aplicada, numa faixa que vai de 2 mm a 5 mm, sendo posteriormente dilatante, comportamento semelhante ao encontrado para a amostra S80P20 (Figura 48b).

Para todas as tensões aplicadas ao solo com 30% de resíduos de pneus é notado um processo de compressão mais prolongado (Figura 49b). Destacando-se a tensão normal de 200 kPa, em que se observa um gradual aumento da compressão ao longo do deslocamento horizontal sem tão pouco apresentar dilatância. No solo com 40% de resíduos de pneus, o comportamento assemelha-se com o anterior, com a amostra comprimindo-se, de modo geral, durante todo ensaio (Figura 50b).

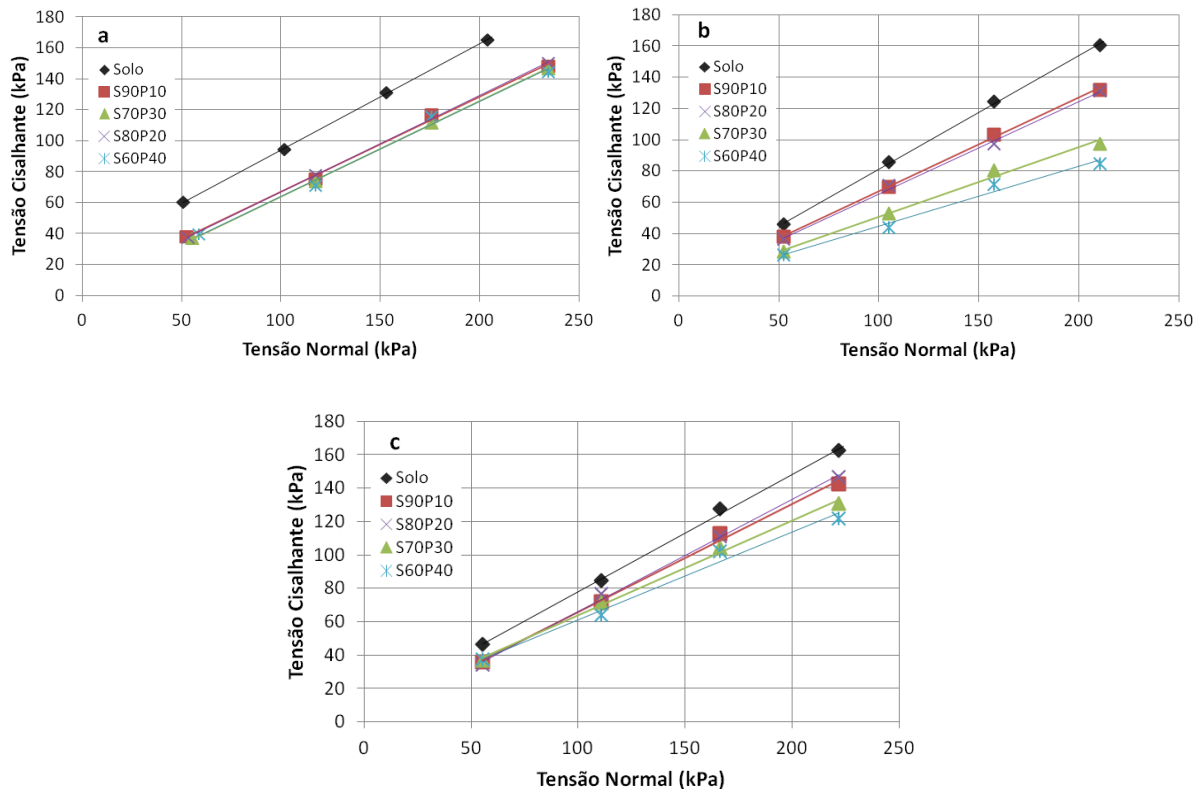
É válido salientar que para as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal com ausência de pico definido, o critério de ruptura adotado foi a partir do ponto em que a curva apresenta uma razoável inclinação constante como mostrado na Figura 51. A Figura 52 apresenta as envoltórias de Mohr-Coulomb para tensões cisalhantes máximas e para as obtidas com 5 mm e 10 mm de deslocamento

horizontal para analisar o efeito da mobilização das fibras. Não foi considerada as de 15 mm por haver maior influência da reorientação das tensões durante o processo de cisalhamento.

**Figura 51** - Definição da tensão de cisalhamento de ruptura (DE CAMPOS & CARRILHO, 1995).



**Figura 52** - Envoltórias de resistência Mohr-Coulomb: a) para tensões cisalhantes máximas/ critério de CAMPOS & CARRILHO; deslocamento horizontal de 5 mm (b); e deslocamento horizontal de 10 mm (c).



Na Tabela 19 são indicados os parâmetros de resistência de acordo com os dados obtidos nas envoltórias de resistência máxima, e deslocamentos de 5 mm e 10 mm do solo compactado na umidade ótima, e das misturas

solo-pneu. Comparativamente são apresentados também os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras de solo indeformado, com peso específico médio de 20 KN/m<sup>3</sup> e umidade ótima variando de 20% a 25%, na mesma área de estudo (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002).

**Tabela 19** - Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência máxima e os diferentes níveis de deslocamento do solo e das misturas.

	Máximo / Critério de Campos & Carrilho		Para deslocamento horizontal de 5 mm		Para deslocamento horizontal de 10 mm	
	c'(kPa)	φ'(°)	c'(kPa)	φ'(°)	c'(kPa)	φ'(°)
Solo Indeformado (LAFAYETTE, 2000)	25	28	38,1	16	25,8	29
Solo Indeformado (LIMA, 2002)	28	31	6,9	29	13,9	29
Solo Compactado	25	34	8,4	36	7,5	35
S90P10	5,7	32	6,8	31	0,67	33
S80P20	3,6	33	6,3	31	4,0	33
S70P30	5,1	30	6,2	24	7,1	30
S60P40	1,6	30	6,1	21	8,3	28

Para o solo compactado os valores de coesão e ângulo de atrito para resistência máxima foram de 25 kPa e 34°, respectivamente. Comparando estes valores com os encontrados para as amostras de solo indeformada, percebe-se que a variação de resultados é muito pequena sendo mais expressiva para o ângulo de atrito que varia de 28° a 34°.

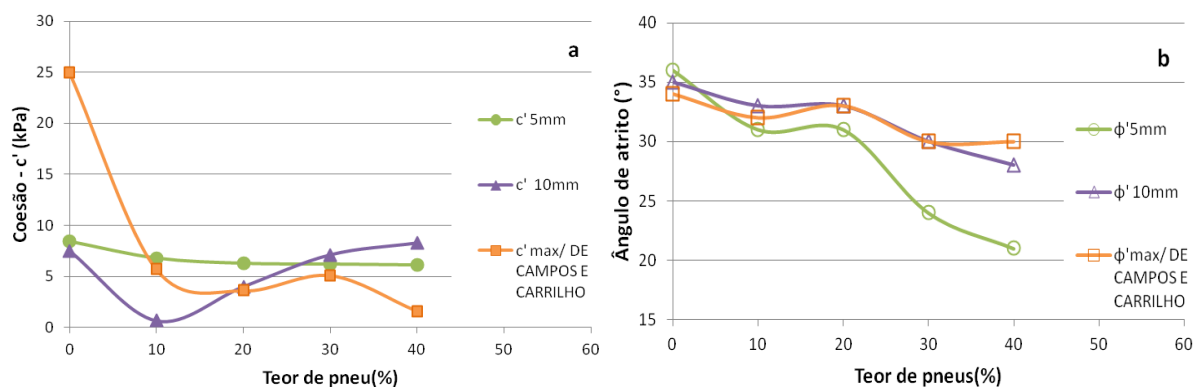
No solo compactado, à medida que os deslocamentos horizontais crescem, há redução da parcela da coesão de 25,0 kPa a 7,5 kPa e o ângulo de atrito tem pequena variação (34° a 36°) com valor médio de 35°.

Analisando-se as envoltórias e os parâmetros de resistência obtidos (Figura 52 e Tabela 19), percebe-se que, de modo geral, para os valores máximos de resistência considerados, o ângulo de atrito do solo em relação às misturas não houve alterações expressivas. Do contrário, a coesão demonstrou uma diminuição de valor, influenciada de certo modo pelo resíduo, seja pela heterogeneidade do material que apresenta formas diversificadas; seja pela transformação do solo em uma matriz mais granular a partir da inserção das fibras.

Em relação aos valores encontrados para os diferentes níveis de deslocamento horizontal, foi observado que o desenvolvimento do percurso não proporcionou para a mistura com 10% de resíduos uma constância de crescimento dos parâmetros de resistência, havendo um decréscimo da coesão, ao passo que o ângulo de atrito apresentou um discreto aumento. O mesmo comportamento se deu para o teor de 20%. Diferentemente da mistura com 30% de resíduos, que demonstrou uma tendência de crescimento dos parâmetros a partir do deslocamento horizontal, mesmo comportamento notado para o teor de 40%.

Na Figura 53, de forma sintética, são apresentados os valores tanto para a coesão quanto para o ângulo de atrito a partir dos diferentes níveis de deslocamento, 5 mm e 10 mm, e teor de resíduos.

**Figura 53** - Síntese dos valores de coesão (a) e ângulo de atrito (b) para o diferentes teores e níveis de deslocamento de 5 mm e 10 mm, e resistência máxima / critério de ruptura De Campos e Carrilho (1995) das misturas de solo-pneus.

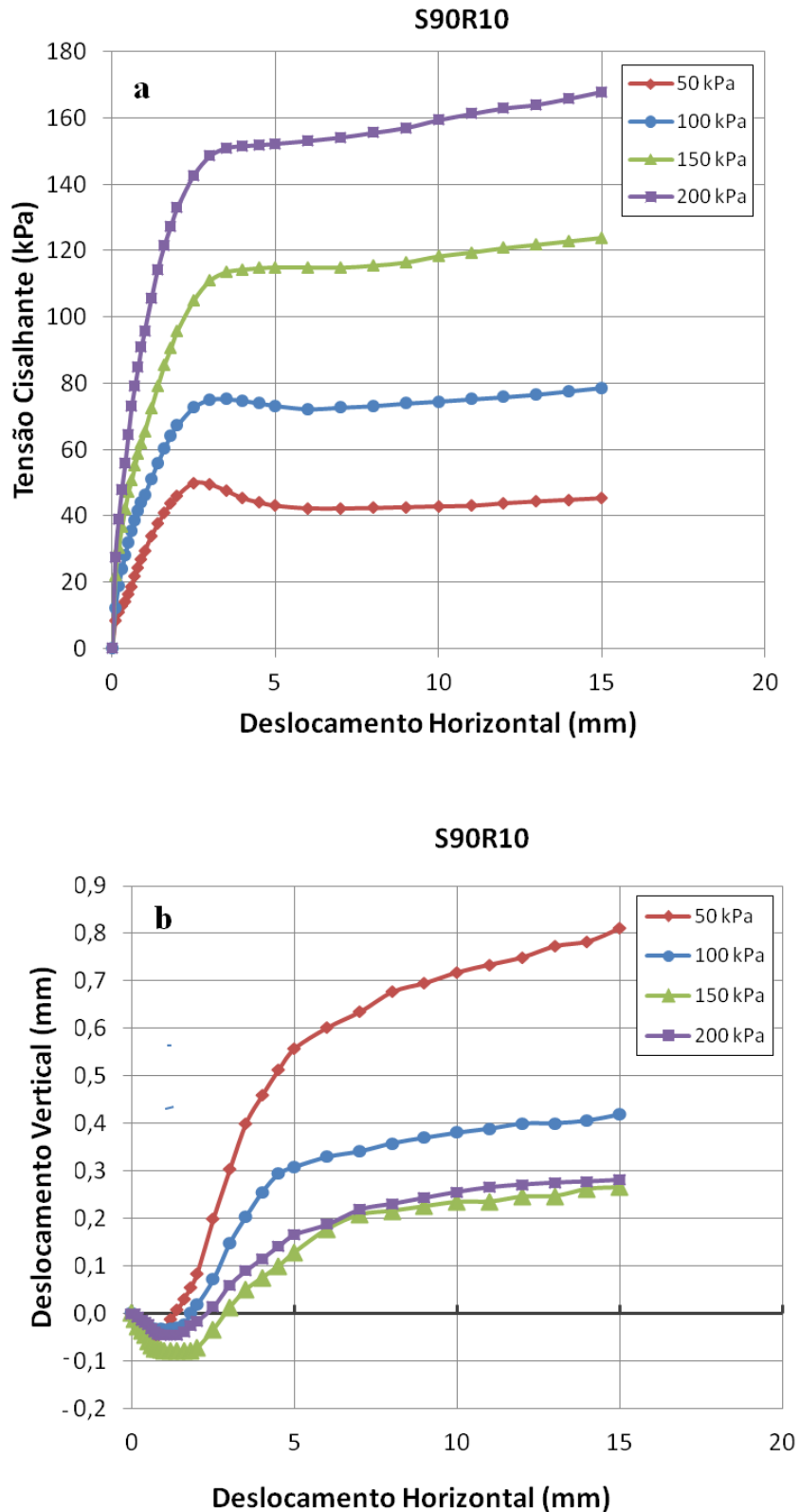


Analisando-se o gráfico, é possível perceber que o ângulo de atrito tanto para o deslocamento de 5 mm quanto para o de 10 mm há um decréscimo de valor a medida que se aumenta o teor de resíduos, enquanto que a coesão assume um comportamento de ascensão, principalmente para o ponto correspondente aos 10 mm. Com relação a coesão máxima (solo) e DE CAMPOS e CARRILHO (1995) o que observa-se é um tendência de diminuição.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizado nas amostras de solo-RCD são mostradas nas Figuras 54, 55 e 56, sendo apresentadas

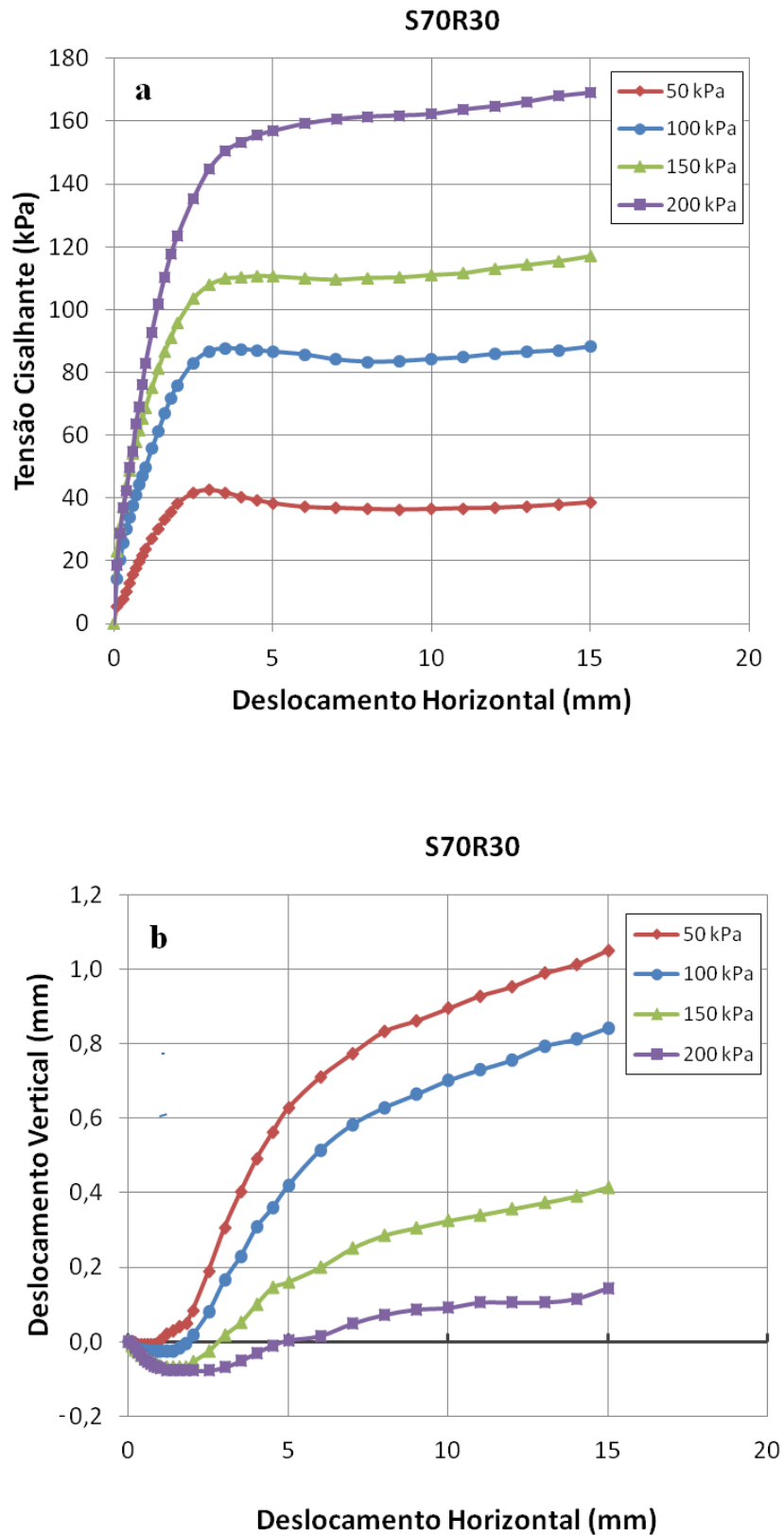
as curvas de tensão cisalhante e deslocamento vertical com relação ao deslocamento horizontal.

**Figura 54** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 10% de RCD.

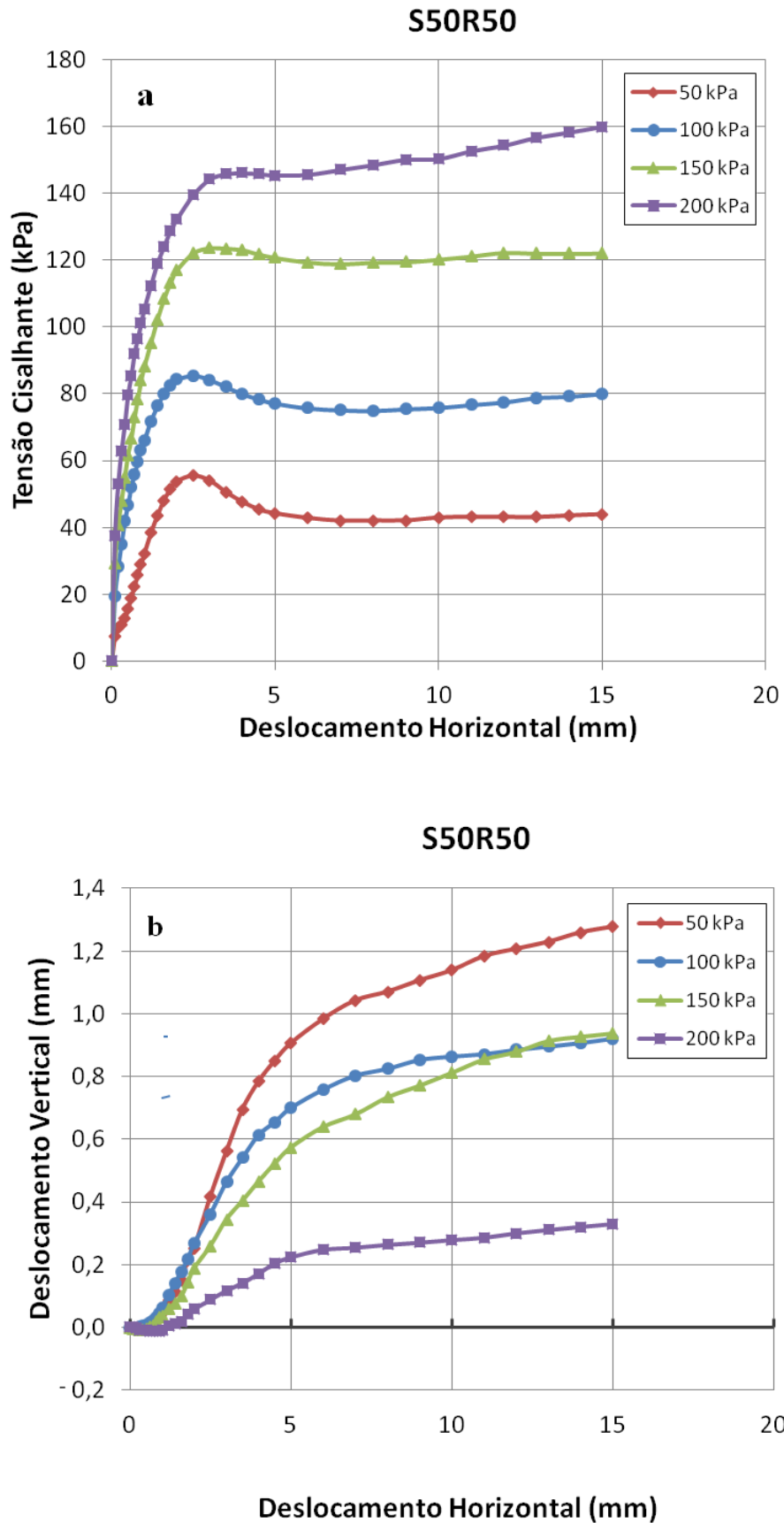




**Figura 55** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 30% de RCD.



**Figura 56** - Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 50% de RCD.



Analisando-se as curvas de resistência das amostras ficam perceptíveis as alterações ocasionadas a partir da inserção do RCD ao solo. Para a mistura de solo com 10% de RCD, Figura 54a, observa-se a ausência de comportamento de pico diferentemente do solo, excetuando-se a tensão de 50 kPa em que se observa um ganho máximo de resistência até certo ponto e um decréscimo posterior, estabilizando-se. É observado de forma geral, um crescimento da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal até 3,5 mm, tendendo posteriormente a estabilização ou pequena diminuição desta resistência, caracterizando-se como um comportamento elasto-plástico. É válido ressaltar para as tensões de 100kPa, 150 kPa e 200 kPa, entre 7 mm e 10 mm, ocorre um crescimento de resistência não compatível com o material, demonstrando, assim como no solo, uma distorção resultante da rotação das tensões principais.

Para a amostra de solo com 30% de RCD, as curvas de resistência apresentam o mesmo comportamento elasto-plástico com endurecimento, em que se observa um acréscimo gradual de resistência entre 3 mm e 5mm, alcançando a estabilização ou mesmo apresentando uma discreta diminuição de resistência (Figura 55a). Nota-se também o efeito da rotação das tensões nos resultados obtidos.

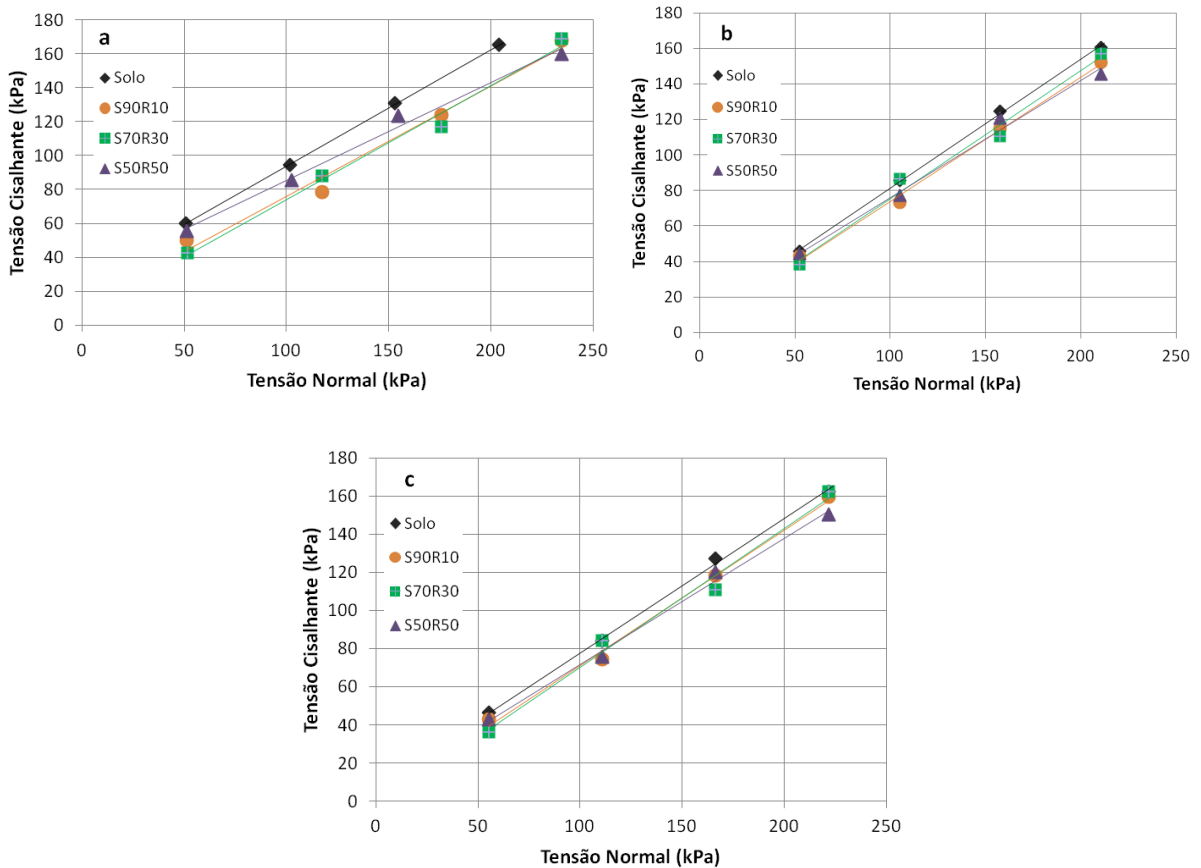
Com relação ao compósito com 50% de RCD, percebe-se, ao analisar as curvas, um desenvolvimento semelhante ao do solo, constatando-se um comportamento de pico (Figura 56a). Nas tensões de 50 kPa, 100 Kpa e 150Kpa observa-se um ganho de resistência na faixa entre 2,5 mm e 3mm, havendo um diminuição após este valor e a estabilização. Para a tensão de 200 Kpa visualiza-se, de forma não tão definida quanto às tensões anteriores, um crescimento da tensão cisalhante até cerca de 3mm, uma pequena redução a partir deste ponto e um efeito de ascensão, assim como na tensão de 100 Kpa após 11 mm, intuindo-se a ocorrência do movimento de rotação já citado.

No que se refere às curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, é observado um processo de compressão muito pequeno, para todas as amostras (Figuras 55b, 55b e 56b). No início do deslocamento,

quase imperceptível para a amostra com 50% de RCD, assumindo logo posteriormente um comportamento totalmente dilatante, menor para as tensões mais altas e maior para as mais baixas.

Na Figura 57 são apresentadas as envoltórias para os valores máximos de resistência considerados, de acordo com o comportamento da curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, traçando-se um comparativo aos resultados encontrados para o solo. Em síntese é mostrado também na Tabela 20 os parâmetros de resistência tanto para o solo quanto para as misturas de solo-RCD.

**Figura 57** - Envoltórias de resistência Mohr-Coulomb: a) para tensões cisalhantes máximas/ critério de CAMPOS & CARRILHO, b) para tensões cisalhantes correspondentes a 5 mm de deslocamento horizontal e c) para tensões cisalhantes correspondentes a 10 mm de deslocamento



**Tabela 20** – Parâmetros de resistência para o solo e misturas de solo-RCD.

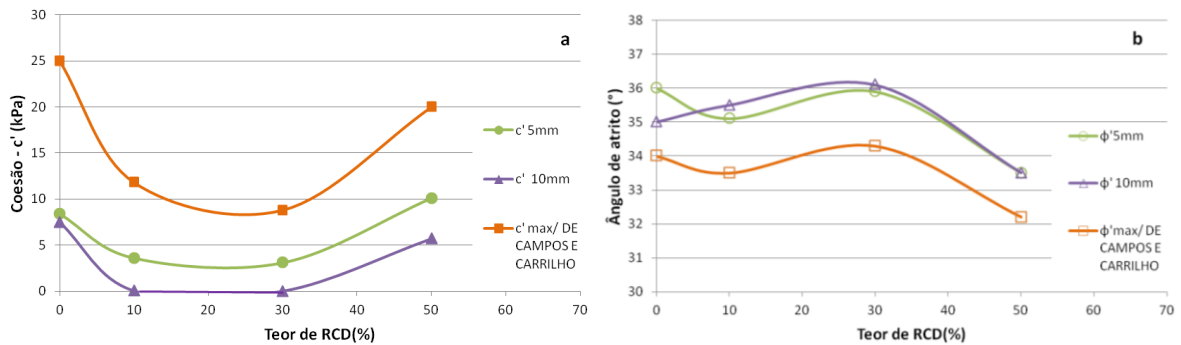
	Máximo / Critério de Campos & Carrilho		Para deslocamento horizontal de 5 mm		Para deslocamento horizontal de 10 mm	
	c'(kPa)	$\phi'$ (°)	c'(kPa)	$\phi'$ (°)	c'(kPa)	$\phi'$ (°)
Solo Indeformado (LAFAYETTE, 2000)	25	28	38,1	16	25,8	29
Solo Indeformado (LIMA, 2002)	28	31	6,9	29	13,9	29
Solo Compactado	25	34	8,4	36	7,5	35
S90R10	11,8	33,5	3,6	35,1	0,03	35,5
S70R30	8,8	34,4	3,1	35,9	0	36,1
S50R50	20	32,2	10,1	33,5	5,7	33,5

Analisando-se as envoltórias (Figura 57) e os parâmetros de resistência obtidos para as misturas de solo-RCD (Tabela 20), percebe-se que, de modo geral, não houve alterações expressivas em relação ao ângulo de atrito, aproximando-se do resultado encontrado para o solo compactado. No que se refere a coesão, foi observada uma diminuição com o aumento do teor de resíduos, excetuando-se a amostra de solo com 50% de RCD que apresentou uma coesão superior as demais amostras aproximando-se do resultado encontrado para o solo compactado.

Tanto para as misturas quanto para o solo compactado foi observado que a medida que os deslocamentos horizontais crescem, há a redução da parcela da coesão enquanto o ângulo de atrito tem pequena variação (Tabela 20).

O comportamento da coesão e do ângulo de atrito das amostras, a partir dos diferentes níveis de deslocamento, 5 mm e 10 mm, assim como de resistência máxima para as amostras com presença de comportamento de pico e tensão de ruptura de acordo com o critério de Campos & Carrilho, para os teores de resíduos adicionados ao solo, podem também ser visualizados por meio da Figura 58.

**Figura 58** - Síntese dos valores de coesão (a) e ângulo de atrito (b) para o diferentes teores e níveis de deslocamento de 5 mm e 10 mm, e resistência máxima das misturas de solo-RCD.



Analisando-se a Figura 58, percebe-se que o ângulo de atrito tanto para o deslocamento de 5 mm quanto para o de 10 mm, assim como para a resistência máxima (solo)/ DE CAMPOS e CARRILHO possui valores muito aproximados, não apresentando variação expressiva. Quanto a coesão, verifica-se que a medida que aumenta o teor de resíduos e o deslocamento horizontal, ocorre um decréscimo na coesão das misturas, excetuando-se a mistura com 50% de RCD que apresenta um movimento de ascensão.

### 4.3 Análise da Influência da adição dos resíduos de pneu e RCD nas características física e mecânica das misturas

No Quadro 7, é mostrado, de forma resumida, as principais percepções em relação às características físicas e mecânicas das misturas de solo com a adição de resíduos de pneu e resíduos de construção e demolição.

**Quadro 7** – Resumo das principais características físicas e mecânicas dos materiais

Características		Pneu	RCD
Física	Granulometria	Aumento das partículas com dimensões equivalentes a faixa compreendida entre a areia média e o silte.	Diminuição da porcentagem de grãos com dimensão da fração de areia grossa e aumento da faixa que abrange a fração de dimensão de areia média a argila.
	Plasticidade	Ausência de LL e LP.	Assim como o solo, as misturas classificam-se como fracamente plásticas, com aumento do índice de plasticidade quanto maior o teor de resíduos até a faixa de 40%.
	Densidade Real	Diminuição gradativa da densidade a partir do aumento do teor de resíduos.	Pequena variação, oscilando na faixa entre 2,62 e 2,65.
	Compactação	Redução da densidade seca máxima proporcional ao gradual acréscimo de resíduos. Apresenta variação do teor de umidade sem uma constância de valores.	Diminuição da densidade seca máxima até 30% e tendência ao aumento a partir deste ponto. Com relação à umidade ótima observa-se uma oscilação dos valores com redução expressiva para o teor de 50%
Mecânica	Coesão	Observou-se um aumento da coesão no decorrer do deslocamento e para o deslocamento horizontal de 10 mm houve um acréscimo proporcional à inserção de resíduos ao solo.	Houve um decréscimo da coesão com o aumento do teor de RCD, excetuando-se a amostra com 50% que houve um aumento.
	Ângulo de Atrito	Para o ângulo de atrito houve também um crescimento de valores no transcórre do deslocamento horizontal sendo constatado um decréscimo a partir do teor de 20%, embora ocorra a partir de 30% um tendência de acréscimo de resistência	De modo geral o ângulo de atrito para as amostras se igualou ou ficou com valor abaixo do obtido para o solo.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e das análises obtidas, foi possível chegar a algumas conclusões acerca dos materiais e misturas avaliadas nesta pesquisa.

### 5.1 Principais Conclusões

O solo foi classificado, segundo SUCS, como uma areia argilosa (SC), já os resíduos foram enquadrados como areias pedregulhosas (SP). A partir da inserção destes resíduos ao solo esta classificação foi modificada, as misturas solo-pneus apresentaram características de uma areia siltosa (SM) enquanto a misturas solo-RCD de uma areia silte-argilosa.

A adição de resíduos de pneus provenientes da indústria de recauchutagem ao solo tornou as misturas com menor densidade seca máxima e teor de umidade com pouca oscilação.

A mistura dos resíduos de construção e demolição ao solo não causou alterações significativas quanto a granulometria. Isto é devido ao tamanho da partícula de RCD e do solo serem muito semelhantes. Com relação a compactação, a densidade seca máxima apresentou grande aproximação dentre os valores encontrados para as misturas com diferentes teores, assim como o teor de umidade ótima que mostrou pequena variação.

As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a mistura de solo-pneus apresentaram comportamento típicos de material elastoplástico com endurecimento e a mistura solo-RCD de material friável ou plástico, dependendo da tensão de consolidação. A mistura de solo-pneus é mais adequada para uso em estruturas que suportem maiores deslocamento enquanto que a mistura de solo-RCD seja mais apropriada para suportar estruturas com deslocamentos menores.

A mistura de solo-pneus apresentou os melhores parâmetros de resistência quando misturado 80% do solo com 20% de fibras de pneus (S80P20) e a mistura de solo-RCD apresentou os melhores parâmetros de



resistência ao cisalhamento quando misturado 70% do solo com 30 % RCD (S70R30).

Concluiu-se, diante disso, que o uso de resíduos tanto de pneus quanto de RCD apresenta um grande potencial quanto a aplicação no melhoramento do solo. Fortalecendo não só o uso de materiais alternativos em obras geotécnicas, mas também o conceito de sustentabilidade com a destinação adequada desses resíduos.

## 5.2 Sugestões para futuras pesquisas

- Diante dos resultados e análises expostos, é possível apresentar algumas recomendações para futuras pesquisas, tais como:
- Investigar o efeito de tração das fibras nas propriedades mecânicas do solo
- Analisar a caracterização física e mecânica do solo com diferentes teores de resíduos de pneus, separados por faixas de comprimentos.
- Avaliar a interação das fibras com o solo a partir do processamento de imagens digitais
- Realizar ensaios de permeabilidade no solo a partir da inserção do pneu e do RCD
- Realizar ensaios de cisalhamento direto em grandes dimensões com maiores tensões e deslocamentos

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984d.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: solos: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2014. São Paulo: ABRELPE, 2015.

ANGULO, SC; MIRANDA, L. F. R; JOHN, V. M. Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. In: **Proceedings of sustainable building**, Oslo; 2002.

ANGULO, Sérgio Cirelli et al. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 299-306, 2011.

ANIP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Dados do Segmento**. Disponível em: <http://www.anip.com.br>>. Acesso em: 06 mai. 2014.

APA. Agência Portuguesa do Ambiente. **Resíduos de construção e demolição**. Disponível em: <<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>>. Acesso em: 10 de Jun. de 2016

ARAÚJO, N. N.. **Desempenho de argamassas de revestimentos produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da Grande Natal-RN**. Dissertação (Mestrado)—Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6270/08**: Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. Estados Unidos, 2008.

ATTOM, Mousa F. The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sands. **Environmental geology**, v. 49, n. 4, p. 497-503, 2006.

BBC. **Spain toxic tyre dump at Sesena forces mass evacuation**. Disponível em: < <http://www.bbc.com/news/world-europe-36288586>>. Acesso em 30 de maio de 2016.

BERTOLLO, S. M. *et al.* Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. In: **XVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Cancún, México**. 2002.

BLEISCHWITZ, Raimund; BAHN-WALKOWIAK, Bettina. Aggregates and construction markets in Europe: towards a sectoral action plan on sustainable resource management. **Minerals & Energy-Raw Materials Report**, v. 22, n. 3-4, p. 159-176, 2007.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Negro de Fumo**. Área de Operações Industriais 1. In: Gerência Setorial 4. Janeiro de 1998.

\_\_\_\_\_. Panorama da Indústria de Pneus no Brasil: Ciclo de Investimentos, Novos Competidores e a Questão do Descarte de Pneus Inservíveis. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 25, p. 107-130, mar. 2007

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2002.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2009.

\_\_\_\_\_. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

BURKE, Bill; KEELER, Marian. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis**. Tradução técnica de Alexandre Salvaterra. 1 ed. Porto Alegre: Bookman Companhia, 362p. 2010.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Solo: Do Comportamento a Aplicações**. Fundações e Obras Geotécnicas. São Paulo, ano 3, nº 31, p. 80 – 91, abr. 2013.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. In: **Mecânica dos solos e suas aplicações**. LTC, 1981.

CETIN, Hasan; FENER, Mustafa; GUNAYDIN, Osman. Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material. **Engineering Geology**, v. 88, n. 1, p. 110-120, 2006.

CHRUSCIAK, Mariana Ramos. **Análise da melhoria de solos utilizando fragmentos de borracha**. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

DE CAMPOS, T. M. P., CARRILHO, C. W. **Direct shear testing on an unsaturated soil from rio de janeiro**. In: Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soils/ unsat'95/paris/france/6-8 september 1995. Vol. 1.

DE SOUZA, J. M. ; REIS, J. H. **Avaliação da viabilidade do uso de misturas de solo e RCD para a confecção de bases de pavimentos asfálticos**. In: 24º Encontro Anual de Iniciação Científica e Encontro Anual de Iniciação Científica Júnior, 2015.

DNIT-Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Dnit, 2006.

DIAS, M. C. C. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário**. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

EDINÇLILER, A.; AYHAN, V. Influence of tire fiber inclusions on shear strength of sand. **Geosynthetics International**, v. 17, n. 4, p. 183-192, 2010.

EDINÇLILER, A., BAYKAL, G., SAYGILI, A. Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction. **Waste Management**, v. 30, n. 6, p. 1073-1080, 2010.

EIGENHEER, E. **A história do lixo: A limpeza urbana através dos tempos**, Rio de Janeiro: Editora Campus, 2009.

ETRMA – EUROPEAN TYRE RECYCLING ASSOCIATION. **Statistics: Edition 2012**. Brussels: European Tyre & Rubber Manufacturers' Association. Disponível em: <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20121119-etrmastatistics-2012.pdf>. Acessado em: 8 out. 2015

\_\_\_\_\_. **Did you know ?**. [ S.I.], ETRA, 2014. Disponível em: <<http://www.etra-eu.org>>. Acessado em: 10 de mai. 2014.

FARIAS, A. B. **Análise Técnica e Econômica de Resíduos da Construção Civil Aplicados em Pavimentação**. Dissertação (mestrado em engenharia civil), Universidade de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2013.

FERREIRA, M. C.; THOMÉ, A. **Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais**. Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº 18, pp. 1-12, 2011.

FRANCO, K. L. B. **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. 2012.

FUJII, L. M. T.. **Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias**. Dissertação (Mestrado de Geotecnia)— Universidade de Brasília, Brasília, 137.p 2012.

GOMES, A. M. **End-of-life Tyres Management**. Department of Sciences and Environmental Engineering - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova. Caparica, 2013.

GUSMÃO, A.D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Gráfica Editora, Camaragibe, PE, 140p. 2008

HAZARIKA, Hemanta et al. Multifaceted potentials of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical applications and their evaluation. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 3, p. 303-315, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Relatório de Pneumáticos 2013 – Resolução CONAMA nº 416/09**. IBAMA: Brasília, 2013.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Pneus novos e Reformados. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/pneusRefor.asp>>. Acesso em: 25 Jul. de 2016

JIA, Xiaoyang; YE, Fen; HUANG, Baoshan. Utilization of Construction and Demolition Wastes in Low-Volume Roads for Rural Areas in China. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2474, p. 39-47, 2015.

LAFAYETTE, K. P. V. **Comportamento Geomecânico de Solos de uma Topossequência na Formação Barreiras em uma Encosta na Área Urbana do Recife-PE**. Dissertação (mestrado, em engenharia civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2000.

LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife**. Dissertação (mestrado, em engenharia civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2002.

LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B. Influence of CDW recycled aggregate on drying shrinkage of mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2012, 2012.

LIMA, F. M. R. S. **A Formação da Mineração Urbana no Brasil: Reciclagem de RCD e a Produção de Agregados**. Tese (Doutorado em engenharia mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

LIRA JR., E. A. de. **Uso de resíduos de construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos**. Recife. UPE, 2010. 166f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

LUNDGREN, N. **Avaliação de Agregados Reciclados de RCC para Produção de Concreto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2014.

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação**. Recife. UPE, 2013. 162f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

MARK, James E.; ERMAN, Burak; ROLAND, Mike (Ed.). **The science and technology of rubber**. Academic Press, 2013.

MARTÍNEZ, Juan Daniel et al. Waste tyre pyrolysis—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 179-213, 2013.

MARTINEZ, I. L. et al. Generation of recycled aggregates and technical requirements for some applications. **Dyna**, v. 77, n. 161, p. 89-97, 2010.

MEDEIROS JUNIOR, R. A. M. **Análise da Viabilidade Técnica do Uso de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) em Estacas de Compactação para Melhoramento de Solos**. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica. Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2008.

MICHELIN. **Tudo sobre pneus**. Disponível em: <<http://www.michelin.com.br/tudo-sobre-carros/Conheca-seu-pneu/michelin-por-dentro>>. Acesso em: 15 mai. 2014.

MOURA, S. F. A. **Estudo da Interação Solo-Pneu para Utilização em Estrutura de Contenção**. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica. Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2011.

NAKHAEI, A. et al. Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 43, p. 124-132, 2012.

OIKONOMOU, N.; MAVRIDOU, S. The use of waste tyre rubber in civil engineering works. **Sustainability of construction materials**. WoodHead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge, 2009.

ORTIZ, Oscar; PASQUALINO, J. C.; CASTELLS, F. Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. **Waste management**, v. 30, n. 4, p. 646-654, 2010.

PACHECO-TORGAL, Fernando. Introduction to the recycling of construction and demolition waste (CDW). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**, p. 1-6, 2013.

PERNAMBUCO. Lei nº 14.236, de 13 de Dezembro de 2010. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. **Diário Oficial Estado de Pernambuco**, Recife, 2010.

**PROENÇA, F. T. T. C. Análise das Propriedades Físicas e Mecânicas de Agregados Reciclados de Resíduos da Construção Civil para o Aproveitamento em Obras de Pavimentação.** Dissertação (mestrado em engenharia civil), Universidade de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2012.

**RAMOS FILHO, L. S. N. A Logística Reversa de Pneus Inservíveis: o problema da localização dos pontos de coleta.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2005.

**RECICLANIP. Para onde vão os pneus inservíveis.** Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/formas-de-destinacao-para-onde-vao>>. Acessado em: 27 de mai. 2014.

**RECIFE. Lei nº 17.072, de 03 de Janeiro de 2005. Estabelece as Diretrizes e Critérios para o Programa de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Diário Oficial do Recife, Recife, 2005.**

**ROCHA, G. Volume de Recapagem cresce 17% na DPaschoal, ago. 2013.** Disponível em: <<http://cargapesada.com.br/revista/2013/08/20/volume-de-recapagem-cresce-17-na-dpaschoal/>> Acesso em: 06 ago. 2015

**RODRIGUES, C. R. S. Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduos da Construção Civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.

**RODRIGUES, C. B. Blocos de Concreto produzidos com Agregados Reciclados Mistos: Avaliação das Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

**SÁ, W. B.. Estudo da interação solo-muro em concreto convencional, com resíduo de construção e demolição (RCD) e alvenaria de pedra.** Dissertação (mestrado, em engenharia civil) – Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP, Recife, PE, Brasil, 2002.

**SANTOS, E. C. G. dos. Aplicação de Resíduos da Construção e Demolição reciclados (RCD-R) em Estruturas de solos Reforçados.** Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

**SANTOS NETO, F. C. Uso de Resíduos da Construção Civil para Melhoramento de Solos Colapsíveis.** Dissertações (mestrado em engenharia civil), Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2015.

**SAYÃO, A.; SIEIRA, A. C.; SANTOS, P. Manual Técnico: Reforço de solos.** São Paulo: MACCAFERRI, 2009

**SILVA, P. J. R. S. Princípios para a eficiência dos sistemas de gestão de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa. 2011.

SILVA, E. M. ; SANTOS, E.C.G ; PALMEIRA, E. M. . **Fatores de redução de resistência de geotêxtil tecido devido a danos mecânicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)**. In: VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2015) e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2015), 2015, Brasília-DF. VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2015) e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2015), 2015.

SOGANCI, A. Strength Characteristics of Tire-sand Mixtures. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**, v. 6, n. 51, p. 306-309, 2015

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. **Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 12, nº 2, pp. 205-212, 2008

TAPAS, Das; BALESHWAR, Singh. Benefits and impacts of scrap tyre use in geotechnical engineering. **Journal of Environmental Research And Development Vol**, v. 7, n. 3, 2013.

TORGAL, Fernando Pacheco; SHASAVANDI, Arman; JALALI, Said. Tyre rubber wastes based concrete: a review. **Wastes 2011**, 2011.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ULSEN, C. et al. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1168-1173, 2013.

ZORNBERG, Jorge G.; CABRAL, Alexandre R.; VIRATJANDR, Chardphoom. Behaviour of tire shred sand mixtures. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 41, n. 2, p. 227-241, 2004.

WANG, Hui-zhi; HE, X. U.; XUAN, Xue-jian. Review of Waste Tire Reuse& Recycling in China—current situation, problems and countermeasures. **Advances in Natural Science**, v. 2, n. 1, p. 31-39, 2010.

WBSCD. End-of-life tires: a framework for effective management systems prepared by the WBSCD Tire Industry Project. 2010. Disponível em: < <http://www.wbcds.org/work-program/sector-projects/tires/end-of-life-tires.aspx>>. Acessado em: 28 de jul. 2015.

WCED. World Comission on Environment and Development. **Our Commom Future**. Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.



**APÊNDICE – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento  
direto**

Quadro – Índices físicos.

**SOLO** ( $w_{ot} = 15,5\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 18,70\text{ KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC(%)
50	15,35	15,0	18,69	0,42	97,21	99,94
100	15,35	14,9	18,71	0,42	97,21	100
150	15,35	14,8	18,67	0,42	97,21	99,83
200	15,35	15,1	18,69	0,42	97,21	99,94

$w_i$ (umidade inicial);  $w_f$  (umidade final)

**S90P10** ( $w_{ot} = 17,5\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 15,93\text{ KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC(%)
50	17,2	15,3	15,30	0,61	69,36	96,05
100	17,2	15,3	15,39	0,60	70,52	96,61
150	17,2	15,2	15,32	0,61	69,36	96,17
200	17,2	15,1	15,32	0,61	69,36	96,17

**S80P20** ( $w_{ot} = 17,2\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 14,57\text{ KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC(%)
50	16,7	14,7	13,71	0,71	55,03	94,10
100	16,7	14,3	13,96	0,68	57,46	95,81
150	16,7	14,9	14,03	0,67	58,32	96,29
200	16,7	14,9	14,04	0,67	58,32	96,36

**S70P30** ( $w_{ot} = 18,3\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 13,26\text{ KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	18,3	14,45	11,66	0,85	46,50	87,93
100	18,3	14,45	11,65	0,85	46,50	87,85
150	18,3	14,40	11,60	0,86	45,96	87,48
200	18,3	14,40	11,68	0,85	46,50	88,08

**S60P40** ( $w_{ot} = 17,9\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 12,09\ \text{KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	17,5	14,40	9,50	1,03	32,79	78,57
100	17,5	14,20	9,59	1,01	33,44	79,32
150	17,5	13,90	9,60	1,01	33,44	79,40
200	17,5	13,80	9,58	1,01	33,44	79,23

**S90R10** ( $w_{ot} = 16\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 17,65\ \text{KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	16,2	15,80	17,65	0,49	86,95	100
100	16,2	15,70	17,65	0,49	86,95	100
150	16,2	15,70	17,54	0,50	85,21	99,38
200	16,2	15,60	17,61	0,49	86,95	99,77

**S70R30** ( $w_{ot} = 16,2\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 17,47\ \text{KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	16,5	16,00	17,35	0,53	82,50	99,31
100	16,5	16,00	17,31	0,53	82,50	99,08
150	16,5	15,80	17,35	0,53	82,50	99,31
200	16,5	15,70	17,30	0,53	82,50	99,02

**S50R50** ( $w_{ot} = 15,3\%$ ;  $\gamma_{s\ Max} = 18,17\ \text{KN/m}^3$ )

Tensão (kPa)	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	S (%)	GC (%)
50	15,5	14,90	18,00	0,46	88,61	99,06
100	15,5	14,80	17,98	0,46	88,61	98,95
150	15,5	14,90	17,89	0,47	86,73	98,45
200	15,5	14,80	17,68	0,49	83,19	97,30