



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO

ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ALINE CÁTIA DA SILVA

**COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE UM SOLO
ARENO-ARGILOSO ADICIONADO COM RESÍDUOS DE PNEUS
E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Recife-PE
2018



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

ALINE CÁTIA DA SILVA

**COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE UM SOLO
ARENO-ARGILOSO ADICIONADO COM RESÍDUOS DE PNEUS
E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, como requisito para 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
2018

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

S586c Silva, Aline Cátia da
Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso
adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição
/ Aline Cátia da Silva. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2018.
144 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, 2018.

1. Permeabilidade. 2. Resistência ao cisalhamento. 3. Microscopia
Eletrônica de Varredura. I. Engenharia Civil – Dissertação. II. Sukar,
Stela Fucale (orient.). III. Ferreira, Silvio Romero de Melo (co-orient.).
IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em
Construção Civil. V. Título.

CDD: 690.0286

ALINE CÁTIA DA SILVA

**COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE UM SOLO
ARENO-ARGILOSO ADICIONADO COM RESÍDUOS DE PNEUS E
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

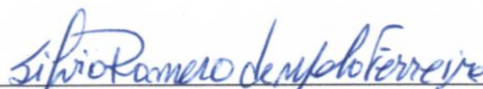
BANCA EXAMINADORA:

Orientador(a)



Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco

Co-orientador(a)



Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Universidade Federal de Pernambuco

Examinadores



Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais, Ivanilda Severina da Silva e José Caitano da Silva (*in memoriam*), pelo amor e incansáveis esforços em prol da minha educação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar saúde e coragem a cada dia, por abençoar esta caminhada, por me estender a mão e enviar pessoas para me ajudar na conclusão de mais esta etapa. Entre as pessoas que Deus enviou, gostaria de agradecer:

Aos meus pais, Ivanilda Severina da Silva e José Caitano da Silva (*in memoriam*), por cuidarem de mim, me ensinarem o que é certo e acima de tudo por me amarem.

Ao meu irmão, Adriano Manoel “Didi”, pelos gestos de confiança e por sempre torcer ao meu favor.

Ao meu grande amigo e engenheiro civil, Caio Benigno, por sua paciência, generosidade, demonstrações de carinho e por ser meu incentivador – Sem você o caminho teria sido infinitamente mais difícil!

A minha orientadora, professora Dra. Stela Fucale, pelo seu exemplo admirável de educação, delicadeza e generosidade, pelas oportunidades concedidas para que eu ingressasse no campo da docência, pela crença no meu potencial e pelos valiosos conselhos para a minha formação profissional e pessoal, sempre expressados com cuidado e paciência – Professora, para sempre lhe serei grata!

Ao meu co-orientador, professor Dr. Silvio Romero, exemplo de docente e cientista comprometido, justo e competente, pelas suas importantes observações e sugestões e por estar sempre disposto a me ajudar durante a pesquisa.

Ao professor Dr. Alexandre Gusmão, pelas suas observações provocativas e motivadoras; ao professor Dr. Joaquim Oliveira, por aceitar o convite em participar da minha banca e pelas valiosas contribuições dadas no exame de qualificação e na defesa, expressadas de uma forma muito gentil.

Ao técnico, Fábio Ferreira, pelo precioso auxílio na realização das atividades relacionadas à pesquisa, pelas conversas descontraídas e pela companhia agradável.

A secretária do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Sra. Lúcia Rosani (nossa querida “Dona Lúcia”), por sempre me dar boas notícias, pela paciência, pelos esclarecimentos e pela competência demonstrada na condução das atividades na secretaria.

Ao professor Antônio Carlos, por disponibilizar sua equipe para as coletas, se mostrando sempre solícito; à empresa Ciclo Ambiental por fornecer o agregado reciclado de RCD utilizado na pesquisa; ao professor Edval Santos, pelos serviços de microscopia eletrônica de varredura e, sobretudo, pela gentileza no atendimento; ao Programa de Fortalecimento Acadêmico da UPE pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudo.

A professora Ana Regina Uchôa, por acreditar em mim e pelo apoio inicial na seleção do mestrado.

Aos colegas do Mestrado, Eudes Rocha e Nara Almeida, por me acolherem, por passarem com carinho as suas experiências profissionais e pelos momentos bem humorados e felizes. A Rafaella Gatis, por sanar as minhas dúvidas, me atendendo sempre com muita boa vontade. A Deborah Grasielly, pela companhia durante as visitas a UNICAP e a UFPE, pela ajuda para a realização dos nossos ensaios de microscopia e por compartilhar cada notícia confortável.

Aos alunos de graduação em Engenharia civil da POLI-UPE, Amanda, Diogo, Evandro e Marcello, que me ajudaram com a realização dos ensaios em laboratório.

A todos que de alguma forma pensaram e agiram a favor da realização deste sonho. Muito obrigada!

SILVA, Aline Cátia da. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. Recife: UPE, 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

RESUMO

Diante de uma produção cada vez mais evidente dos resíduos sólidos resultantes das ações antrópicas, entende-se a necessidade de destinar adequadamente estes materiais. Por outro lado, a preocupação com as características de solos que se mostram inapropriados para utilização em obras de engenharia é crescente, tendo em vista a escassez de matérias-primas e as propriedades dos solos locais não atenderem, frequentemente, as especificações de projeto. Assim sendo, a presente pesquisa visa analisar as características hidromecânicas de um solo, a partir da incorporação de resíduos de pneus provenientes do processo de recauchutagem de pneus usados, assim como da inserção de agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), para aplicações em obras geotécnicas. O programa de investigação laboratorial consiste nas seguintes etapas: i) coleta dos materiais (solo, resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD); ii) preparação de misturas de solo-resíduo, nas proporções de 10 e 20% para os resíduos de pneus e 10, 20 e 30% para o agregado reciclado de RCD, ambos em peso de solo seco; iii) execução de ensaios de caracterização física (granulometria, densidade dos grãos, limites de Atterberg, absorção e compactação); iv) realização de ensaios de permeabilidade e cisalhamento direto; e v) obtenção de imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), tanto das amostras de solo e agregado reciclado individualmente, quanto das misturas de solo-resíduo. Os resultados apontam que o solo natural e as misturas solo-resíduo apresentam granulometrias semelhantes, sendo constituídas majoritariamente por areia. A presença dos resíduos de pneus na matriz do solo resultou na diminuição gradativa do peso específico seco máximo e umidade ótima, já o agregado reciclado de RCD proporcionou a redução da umidade ótima do solo, porém com um aumento pouco expressivo do seu peso específico seco máximo. A análise microestrutural obtida por meio do MEV revelou que o solo possui uma estrutura superficial compacta, as amostras de solo-pneu indicaram uma boa interação pneu/matriz e as amostras de solo-RCD apresentam uma superfície mais irregular, quando comparadas ao solo. A condutividade hidráulica saturada do solo é da ordem de 10^{-10} m/s, passando a assumir valores entre 10^{-8} e 10^{-6} m/s quando da inserção de resíduos de pneus em sua estrutura, enquanto que com a incorporação de agregado reciclado de RCD o coeficiente hidráulico do solo adquire valores com ordens de grandeza entre 10^{-9} e 10^{-8} m/s. As curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal do solo e das misturas solo-resíduo demonstraram, de modo geral, comportamento do tipo elasto-plástico com enrijecimento, porém as curvas do agregado reciclado de RCD são típicas de material friável. Os parâmetros de resistência obtidos para as misturas solo-pneu e solo-RCD foram, em sua maioria, superiores aos do solo, sendo a mistura com inserção de 10% de resíduos de pneus considerada ideal, pois indicou um melhor comportamento mecânico para o solo, majorando a sua tenacidade, enquanto que as misturas com 10, 20 e 30% de agregado reciclado de RCD foram julgadas aceitáveis, visto que mantiveram as características resistentes do solo. Portanto, com base nos resultados obtidos, percebe-se o potencial de aplicação dos resíduos de pneus e agregados reciclados de RCD como alternativa a melhoria de solos e utilização em obras de engenharia.

Palavras-chave: Permeabilidade. Resistência ao cisalhamento. Microscopia eletrônica de varredura.

SILVA, Aline Cátia da. **Hydromechanical behavior of the sand-clay soil added with tires wastes and construction and demolition wastes**. Recife: UPE, 2018. 144 f. Thesis (Master) – Polytechnic School of Pernambuco University, Pernambuco University, Recife, 2018.

ABSTRACT

As the production of solid waste resulting from anthropic actions has continually increased, it is understood the need to properly to destine these materials. On the other hand, the concern with the characteristics of soils that inappropriate for use in engineering works is increasing, considering the scarcity of raws materials and the properties of the local soils do not often meet the design specifications. Thus, the present research aims to analyze the hydromechanical characteristics of a soil, through the incorporation of tires waste from the retreading process of used tires, and of the insertion of recycled aggregates of Construction and Demolition Waste (CDW), for geotechnical applications. The laboratory research program consists in the steps: i) collection of materials (soil, tire waste and recycled aggregate of CDW); ii) preparation of soil-waste mixtures, in the proportions of 10 and 20% for tires waste and 10, 20 and 30% for the recycled aggregate of CDW, by weight of dry soil for both; iii) execution of physical characterization tests (particle size analysis, real density, atterberg limits, absorption and compaction); iv) execution of permeability tests and direct shear test; and v) images procurement of scanning electron microscopy (SEM), both in the soil samples and recycled aggregate individually and in soil-waste mixtures. The results indicate that the natural soil and the soil-waste mixtures present similar particle sizes, being constituted mainly by sand. The presence of tire waste in the soil matrix resulted in the gradual decrease of maximum dry specific weight and optimum water ratio, while the recycled aggregate of CDW provided a reduction in the optimum water ratio the soil, but with a low increase of its maximum dry specific weight. The microstructural analysis by means of SEM revealed that the soil has a compact surface structure, the soil-tire samples indicated a good tire/matrix interaction and the soil-CDW samples presented an more irregular surface, when compared to soil. The saturated hydraulic conductivity of the soil is of the order of 10^{-10} m/s, starting to assume values between 10^{-8} and 10^{-6} m/s when inserting waste tires in its structure, while with the incorporation of recycled aggregate of CDW the soil hydraulic coefficient acquires values with orders of magnitude between 10^{-9} and 10^{-8} m/s. On the whole, the shear stress curves versus the horizontal displacement of the soil and of the soil-waste mixtures showed elastoplastic behavior with hardening, but the curves of the recycled aggregate of CDW are typical of friable material. The resistance parameters obtained for the soil-tire and soil-CDW mixtures were, the most part, higher than those of the soil, being the mixture with 10% of tires waste insertion considered ideal, since it indicated a better mechanical behavior for the soil, increasing its tenacity, while that mixtures with 10, 20 e 30% recycled aggregates of CDW were judged acceptable, since they maintained the resistant characteristics of the soil. Therefore, based on obtained results it was observed the potential of application of the tires waste and recycled aggregates of CDW as an alternative to soils improvement and in engineering works.

Key-works: Permeability. Resistant shear. Scanning electron microscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhamento das partes de um pneu.....	27
Figura 2 – Ciclo de vida dos pneumáticos.....	30
Figura 3 – Tipos de processamento dos pneus inservíveis (sem escala): pedaços (a), lascas (b), desbastes (c) e migalhas (d).	31
Figura 4 – Microscopia eletrônica de varredura do agregado natural ampliado em 600x (a) e do agregado reciclado para uma ampliação de 200x (b).....	35
Figura 5 – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) com o teor de resíduos de pneus.	45
Figura 6 – Efeito da adição de resíduos de pneus na coesão (a) e ângulo de atrito (b).....	46
Figura 7 – Variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de resíduos de pneus.	46
Figura 8 – Condutividade hidráulica <i>versus</i> volume percolado.	47
Figura 9 – Coesão e ângulo de atrito em função da quantidade de resíduos de pneus para o solo S (a) e solo T (b).....	48
Figura 10 – Coesão (a) e ângulo de atrito (b) em diferentes teores de inserção de resíduos de pneus, para resistência máxima e deslocamentos de 5 e 10 mm.....	49
Figura 11 – Variação da tensão cisalhante máxima com o aumento do teor de resíduos de pneus.	50
Figura 12 – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) com a adição de resíduos de pneus.	50
Figura 13 – Envoltória de resistência da amostra RCD-R 05.....	53
Figura 14 – Coesão (a) e ângulo de atrito (b) para os diferentes teores de agregado reciclado de RCD.....	54
Figura 15 – Procedimento metodológico adotado na pesquisa apresentado em fluxograma. ..	57
Figura 16 – Vista frontal da escadaria de acesso a encosta NW do Alto do Reservatório (a) e local de coleta do solo (b).	59
Figura 17 – Croqui da localização do ponto de coleta do solo.....	59
Figura 18 – Perfil da encosta noroeste do Alto do Reservatório com os locais já estudados...	60
Figura 19 – Resíduos de pneus coletados.....	61
Figura 20 – Vista geral da usina de reciclagem, em Outubro de 2016 (a), e agregado miúdo de RCD reciclado (sem escala) (b).	61
Figura 21 – Pilha de britagem (a) e agregado reciclado de RCD sendo coletado (b).	62
Figura 22 – Amostras de resíduos de pneus submersas em água destilada para o ensaio de absorção.	65
Figura 23 – Corpo de prova da mistura de solo com 10% de resíduos de pneus, após a desmoldagem.	66
Figura 24 – Etapas de montagem dos permeâmetros para o ensaio de permeabilidade a carga variável.....	69
Figura 25 – Reservatório utilizado na fase de saturação (a) e surgimento de água no orifício da tampa superior do permeâmetro (b).	70
Figura 26 – Prensa utilizada para o ensaio de cisalhamento direto (a) e caixa de cisalhamento bipartida (b).....	72
Figura 27 – Elementos constituintes do molde metálico.	73

Figura 28 – Amostras sendo metalizadas (a) e após a metalização com carbono (b).	74
Figura 29 – Equipamento utilizado para a Microscopia Eletrônica de Varredura.	75
Figura 30 – Curvas granulométricas do solo e agregado reciclado de RCD (com e sem defloculante).....	77
Figura 31 – Curvas granulométricas do solo, misturas solo-pneu (com defloculante) e resíduos de pneus (sem defloculante).....	77
Figura 32 – Curvas granulométricas do solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD (com defloculante).	78
Figura 33 – Curvas de compactação das misturas solo-pneu (a) e solo-RCD (b).....	85
Figura 34 – Variação do teor de resíduos em relação ao peso específico aparente seco máximo (a) e a umidade ótima (b).	86
Figura 35 – Curvas de compactação e saturação a 100% do solo.	88
Figura 36 – Curvas de compactação e saturação a 100% das misturas com 10% (a) e 20% de resíduos de pneus (b).....	88
Figura 37 – Curvas de compactação e saturação a 100% do agregado reciclado de RCD (a), e das misturas com 10% (b), 20% (c) e 30% de agregado reciclado de RCD (d). ..	89
Figura 38 – Teor de fases, em volume, das misturas de solo-pneu (a) e solo-RCD (b), na umidade ótima.....	90
Figura 39 – Curva granulométrica do solo, antes (A.C.) e após o processo de compactação (D.C).	92
Figura 40 – Curvas granulométricas antes (A.C.) e após o processo de compactação (D.C.) das misturas com 10% (a) e 20 % de resíduos de pneus (b).	92
Figura 41 – Curvas granulométricas antes (A.C.) e após o processo de compactação (D.C.) do agregado reciclado de RCD (a) e das misturas com 10% (b), 20% (c) e 30% de agregado reciclado de RCD (d).....	93
Figura 42 – Eletromicrografias da amostra de solo ampliadas em 100x (a), 500x (b), 70x (c) e 1000x (d).....	95
Figura 43 – Eletromicrografias da amostra de agregado reciclado de RCD ampliadas em 100x (a), 500x (b), 70x (c) e 1000x (d).....	96
Figura 44 – Eletromicrografias da amostra S90/P10 ampliadas em 70x (a) e 500x (b).....	97
Figura 45 – Eletromicrografias da amostra S80/P20 aumentadas em 25x (a), 70x (b) e 100x (c).	97
Figura 46 – Eletromicrografias das amostras de solo com 10% (a), 20% (b) e 30% de agregado reciclado de RCD (c), ampliadas em 70x.....	98
Figura 47 – Variação do coeficiente de permeabilidade do solo com o teor de resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD (a) e em função do índice de vazios (b).....	99
Figura 48 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal (a) e de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal do solo (b) na condição não inundada.	102
Figura 49 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para as misturas com 10% (a) e 20% de resíduos de pneus (b); e curvas de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal das misturas com 10% (c) e 20% de resíduos de pneus (d), na condição não inundada.	104

Figura 50 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal (a) e de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal do agregado reciclado de RCD (b), na condição não inundada.	105
Figura 51 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para as misturas com 10% (a), 20% (b) e 30% de agregado reciclado de RCD (e); e curvas de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal das misturas com 10% (c), 20% (d) e 30% de agregado reciclado de RCD (f), na condição não inundada. (continua)	106
Figura 52 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal do solo e das misturas de solo-pneu para as tensões normais de 50 (a), 100 (b), 150 (c) e 200 kPa (d), na condição não inundada.	108
Figura 53 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal do solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD para as tensões normais de 50 (a), 100 (b), 150 (c) e 200 kPa (d), na condição não inundada.	109
Figura 54 – Definição da tensão cisalhante na ruptura, conforme De Campos e Carrillo (1995).	110
Figura 55 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-pneu, para as tensões cisalhantes de ruptura/critério De Campos e Carrillo (1995) (a), deslocamento horizontal de 5 mm (b) e deslocamento horizontal de 10 mm (c).	111
Figura 56 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD, para as tensões cisalhantes de ruptura/critério De Campos e Carrillo (1995) (a), deslocamento horizontal de 5 mm (b) e deslocamento horizontal de 10 mm (c).	112
Figura 57 – Relação entre o teor de resíduos de pneus e a coesão (a) e o ângulo de atrito (b) do solo, na condição de ruptura e nos deslocamentos de 5 e 10 mm.	115
Figura 58 – Relação entre o teor de agregado reciclado de RCD e a coesão (a) e ângulo de atrito (b) do solo, na condição de ruptura e nos deslocamentos de 5 e 10 mm.	115
Figura 59 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal (a) e de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal do solo saturado (b).	116
Figura 60 – Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para a mistura com 20% de resíduos de pneus (a) e 30% de agregado reciclado de RCD (b); e curvas de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal das misturas com 20% de resíduos de pneus (c) e 30% de agregado reciclado de RCD (d), na condição saturada.	117
Figura 61 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras saturadas e não inundadas de solo (a), mistura com 20% de resíduos de pneus (b) e mistura com 30% de agregado reciclado de RCD (c), na condição de ruptura/critério De Campos e Carrillo (1995).	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de condutividade hidráulica de uma areia em diferentes teores de inserção de fibras de pneus.	48
Tabela 2 – Nomenclatura adotada para as misturas estudadas.	63
Tabela 3 – Percentuais das frações por constituintes das amostras de solo, resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD, com e sem o uso de defloculante, segundo a ABNT e ASTM.	79
Tabela 4 – Percentuais das frações por constituintes das misturas com resíduos de pneus, com o uso de defloculante, conforme descrito pela ABNT e ASTM.	79
Tabela 5 – Percentuais das frações por constituintes das misturas com agregado reciclado de RCD, com o uso de defloculante, de acordo com a ABNT e ASTM.	79
Tabela 6 – Parâmetros obtidos a partir das curvas granulométricas das amostras estudadas.	80
Tabela 7 – Valores de densidade real dos grãos das amostras ensaiadas.	82
Tabela 8 – Densidade real dos grãos de desbastes de pneus inservíveis deste estudo e de outras pesquisas.	82
Tabela 9 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de limites de consistência.	83
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de compactação.	86
Tabela 11 – Volumes de sólidos, líquido e ar das amostras estudadas na umidade ótima.	90
Tabela 12 – Resumo das características dos solos investigados nesta pesquisa e por Lafayette (2000), Moura <i>et al.</i> (2012) e Macedo (2016).	91
Tabela 13 – Condutividade hidráulica, à temperatura de 20°C, das amostras estudadas.	99
Tabela 14 – Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência na condição de ruptura e para diferentes deslocamentos horizontais do solo (desta e de outras pesquisas) e das misturas solo-pneu.	113
Tabela 15 – Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência na condição de ruptura e para diferentes deslocamentos horizontais do solo (desta e de outras pesquisas) e das misturas solo-RCD.	113
Tabela 16 – Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência na condição de ruptura do solo, das misturas de solo com 20% de resíduos de pneus e 30% de agregado reciclado de RCD.	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos com resíduos de pneus e suas aplicações.....	32
Quadro 2 – Pesquisas com RCD e suas aplicações.	38
Quadro 3 – Normas técnicas voltadas para os RCD.....	40
Quadro 4 – Resumo das principais pesquisas com resíduos de pneus apresentadas. (continua)	51
Quadro 5 – Resumo das pesquisas com RCD apresentadas.	55
Quadro 6 – Ensaios de caracterização realizados neste estudo.	64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública
A.C.	Antes da compactação
AMBITEC	Grupo de Pesquisa de Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente
AN	Agregado natural
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
AR	Agregado Reciclado
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BR	Brasil (rodovias federais)
c	Coesão
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
Cc	Coefficiente de curvatura
CDW	<i>Construction and Demolition Waste</i>
CG	Grau de Compactação
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
Cu	Coefficiente de uniformidade
D.C.	Depois da compactação
dh	Deslocamento horizontal
dv	Deslocamento vertical
e	Índice de vazios
E	Leste
EC	<i>European Commission</i>
g	Grama
G _s	Densidade real dos grãos
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IA	Índice de atividade
IP	Índice de plasticidade
IRSG	<i>International Rubber Study Group</i>

JATMA	<i>Japan Automobile Tyre Manufacturers Association</i>
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
k ₂₀	Coeficiente hidráulico à temperatura de 20°C
LACC	Laboratório Avançado de Construção Civil
LL	Limite de Liquidez
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
m	Metro
MEV	Micróscopia Eletrônica de Varredura
Mh	Massa saturada
min	Minuto
mm	Milímetros
Ms	Massa seca
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mm ²	Milímetro quadrado
n	Porosidade
NBR	Norma Técnica Brasileira
NW	Noroeste
PE	Pernambuco
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos
PET	Polietileno tereftalato
PGRCC	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POLI	Escola Politécnica
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RMA	<i>Rubber Manufacturers Association</i>
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

r_{xy}	Coeficiente de correlação
R^2	Coeficiente de determinação
S	Sul
S'	Absorção de água
SC	<i>Sand clay</i> (areia argilosa)
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
SENAT	Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
SEST	Serviço Social do Transporte
SM	<i>Sand silt</i> (areia siltosa)
SP	<i>Sand poorly graded</i> (areia mal graduada)
Sr	Grau de saturação
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
t	Tonelada
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UPE	Universidade de Pernambuco
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
V _{ar}	Volume de ar
V _{pneu}	Volume de resíduos de pneus
V _{RCD}	Volume de agregado reciclado de RCD
V _s	Volume de sólidos
V _w	Volume de líquido
w	Teor de umidade
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
w _{ótima}	Umidade ótima
γ_d	Peso específico aparente seco
$\gamma_{d \text{ máx}}$	Peso específico aparente seco máximo
σ_n	Tensão normal
σ_n corrigida	Tensão normal corrigida
τ	Tensão cisalhante
τ_{rup}	Tensão cisalhante na ruptura
d _{rup}	Deslocamento horizontal na ruptura

μm	Micrômetro
ϕ	Ângulo de atrito
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
%	Porcentagem
#	Abertura da peneira
>	Sinal de maior
<	Sinal de menor
$\geq$	Sinal de maior ou igual

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	20
1.1 Considerações iniciais	20
1.2 Relevância e Justificativa da pesquisa	21
1.3 Objetivos	23
1.3.1 Objetivo geral	23
1.3.2 Objetivos específicos	23
1.4 Estrutura da dissertação	23
 CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 Indústria da construção civil e o desenvolvimento sustentável	25
2.2 Pneumáticos	26
2.2.1 Histórico e características	26
2.2.2 Geração de pneus inservíveis	28
2.2.3 Reciclagem e reutilização de pneus inservíveis	29
2.3 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	33
2.3.1 Conceitos e classificação	33
2.3.2 Geração de RCD	35
2.3.3 Reaproveitamento de RCD	37
2.4 Aspectos da legislação e instrumentos normativos	38
2.4.1 Políticas públicas sobre os resíduos de pneus	38
2.4.2 Políticas públicas sobre os RCD e normativas	39
2.5 Estabilização de solos	41
2.5.1 Melhoramento de solos com fibras	42
2.5.1.1 Tipos de fibras empregadas em compósitos fibrosos	43
2.5.1.2 Comportamento de solos misturados com fibras	44
2.5.2 Melhoramento de solos com RCD	52
 CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1 Procedimento metodológico	56
3.2 Materiais	58
3.2.1 Solo	58
3.2.2 Resíduos de pneus	60

3.2.3 Agregado reciclado de RCD.....	61
3.3 Preparação das amostras.....	62
3.4 Programa experimental.....	63
3.4.1 Ensaios de caracterização física	64
3.4.2 Ensaios de permeabilidade	67
3.4.2.1 Moldagem dos corpos de prova.....	67
3.4.2.2 Etapa de saturação.....	70
3.4.2.3 Montagem do sistema e realização das medições	70
3.4.3 Ensaios de cisalhamento direto	71
3.4.3.1 Equipamento e instrumentação	71
3.4.3.2 Moldagem dos corpos de prova.....	72
3.4.4 Ensaios Microestruturais	74
3.4.4.1 Preparação das amostras.....	74
3.4.4.2 Etapa de metalização	74
 CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	 76
4.1 Caracterização física.....	76
4.1.1 Análise granulométrica.....	76
4.1.2 Densidade real dos grãos	81
4.1.3 Limites de Atterberg.....	83
4.1.4 Absorção de água	84
4.1.5 Compactação	84
4.1.6 Influência da compactação na granulometria.....	91
4.2 Análise Microestrutural	94
4.3 Permeabilidade.....	99
4.4 Resistência ao cisalhamento	101
4.4.1 Ensaios não inundados	102
4.4.1.1 Solo	102
4.4.1.2 Misturas solo-pneu	103
4.4.1.3 Agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD	104
4.4.1.4 Comparativos	108
4.4.2 Ensaios saturados	116

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	120
5.1 Principais conclusões	120
5.2 Sugestões para futuras pesquisas.....	123
 REFERÊNCIAS	 124
 APÊNDICE A – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de permeabilidade.....	 139
APÊNDICE B – Índices físicos dos corpos de prova nos ensaios não inundados de cisalhamento direto.....	141
APÊNDICE C – Índices físicos dos corpos de prova nos ensaios saturados de cisalhamento direto.....	143
APÊNDICE D – Parâmetros de resistência, obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto não inundado, das amostras estudadas na condição de ruptura.....	144

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O presente capítulo expõe a problemática sobre os resíduos sólidos, com ênfase nos pneus inservíveis e resíduos da construção e demolição (RCD), e sobre o melhoramento de solos, sendo abordada a importância destes temas, a fim de se conhecer seus principais aspectos. O capítulo estabelece também os objetivos, geral e os específicos, e a estrutura da dissertação.

1.1 Considerações iniciais

Apesar dos grandes avanços trazidos pela indústria, as questões relacionadas à influência das ações antrópicas sobre o meio ambiente têm ganho importância nos últimos anos, isso em decorrência não apenas da extração de matérias-primas não renováveis, mas também da grande quantidade de resíduos produzidos, pois além destes materiais atingirem volumes preocupantes, afetam inclusive a saúde e qualidade de vida das pessoas.

As atividades humanas têm contribuído com o aumento da geração de resíduos sólidos, seja individual ou coletivamente. Tal geração é influenciada por diversos fatores, dos quais se pode destacar o crescimento populacional de forma desordenada e gradativa, a rápida urbanização, a produção industrial cada vez mais expansiva em virtude do consumo de bens descartáveis, juntamente com as produções em grande escala, e a inexistência de políticas eficientes que disciplinem a gestão dos resíduos produzidos (TAM; LI; CAI, 2014; MACEDO, 2016).

Relacionado a este tema estão os pneus inservíveis, cuja elevada taxa de geração, cerca de 1 bilhão de unidades por ano em todo o mundo (WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2010), associada ao descarte ilegal impactam diretamente a sociedade. Além de estes materiais ocuparem extensas áreas no perímetro urbano, por serem volumosos, trazendo desconforto para a população, possuem um tempo indeterminado de decomposição na natureza, atuando de forma degradante sobre o meio ambiente.

Envolvida também nesta problemática está a indústria da construção civil, que embora ocupe uma importante posição na economia dos países, representando 5,6% do Produto Interno

Bruto (PIB) brasileiro (CBIC – CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2017), por estar diretamente relacionada com a geração de empregos e com o desenvolvimento da infraestrutura, é um dos responsáveis por diversos problemas de ordem sócio-ambiental, devido ao atual modelo de construção praticado.

Outro ponto que merece destaque consiste nos problemas concernentes ao crescimento demográfico e a ocupação desordenada do solo, que influenciam na disponibilidade de áreas que apresentem solos cujas propriedades sejam adequadas para utilização em obras de engenharia, visto a escassez de matérias-primas e os materiais locais, muitas vezes, não possuírem características satisfatórias. Este cenário abre a possibilidade de melhorar as características do solo componente dessas áreas, criando assim um novo material, que além de poder ser aplicado na própria obra, tem propriedades que se enquadram as necessidades de projeto.

1.2 Relevância e Justificativa da pesquisa

Durante muito tempo as atividades da indústria da construção civil consistiam em um passivo ambiental, tendo em vista que não se levava em consideração as consequências da produção de resíduos deste setor, assim como da disposição final destes materiais. Atualmente, em alguns países, o setor da construção civil passa pela redução de suas atividades por efeito das mudanças no ciclo econômico, contudo os impactos causados pela geração de resíduos devem ser cogitados de forma contínua (SÁEZ; MERINO; PORRAS-AMORES, 2011).

Aliada a este cenário, pode-se destacar a produção cada vez mais crescente de pneus inservíveis, pois o descarte inadequado dos pneumáticos não gera apenas impactos para o meio ambiente, mas também exerce influência nas esferas social e econômica da sociedade, uma vez que este descarte promove a degradação da paisagem urbana, a transformação dos locais de deposição em atrativos de vetores patogênicos, trazendo sérios riscos a saúde da população, e tornam onerosas as ações para a retirada destes materiais das vias públicas, quando não gerenciadas corretamente.

Os pneus de borracha possuem uma difícil e lenta decomposição, provocam a poluição do ar e a contaminação das águas subterrâneas, pois lançam gases nocivos na atmosfera e produzem substâncias que percolam e contaminam o solo quando são queimados de forma acidental ou

provocada (REDDY; STARK; MARELLA, 2010; RAMIREZ, 2012). Além disso, podem causar obstrução nos cursos de água ao serem dispostos próximos a estes locais, afetando o escoamento de rios, canais, córregos e galerias de águas pluviais, colaborando com a ocorrência de inundações.

Ainda que, segundo Souza *et al.* (2004), a indústria da construção consoma de 100 a 200 vezes mais materiais naturais do que a indústria automotiva, seja em quantidade ou diversidade, as ações de ambos os setores devem ser controladas em função dos impactos que causam.

Por outro lado, existe a problemática relacionada aos solos com características inadequadas, que não podem ser utilizados em obras de engenharia por não atenderem as especificações necessárias de projeto. Nesse contexto, a busca por opções que proporcionem a melhoria das características de solos com certas inapropriações para serem aplicados na área geotécnica, assim como a oferta de uma adequada destinação dos resíduos sólidos provenientes das ações humanas, a exemplo dos resíduos oriundos da construção civil e os resíduos de pneus inservíveis, torna possível a associação do solo a esses materiais alternativos, mitigando assim os problemas que envolvem tais materiais.

Diante disso, estudos foram desenvolvidos pelo grupo de pesquisa de Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (AMBITEC/POLI/UPE) com o uso destes tipos de resíduos e de determinados tipos de solos, visando melhorar o seu desempenho para fins de aplicação geotécnica, a citar Moura *et al.* (2012), Proença (2012), Farias (2013), Macedo (2013), Santos Neto (2015), Macedo (2016) e Silva *et al.* (2016).

Assim, perante os problemas apresentados e da busca por práticas que visem incentivar uma consciência sustentável pelos setores da construção civil e automotivo, analisar a aplicação de agregados reciclados de RCD e de resíduos de pneus inservíveis incorporados a um solo mostra-se relevante, para que a partir da investigação das propriedades destes novos materiais, da forma como podem ser combinados e de suas limitações quando associados, possa-se melhor compreender o comportamento hidráulico e mecânico de misturas solo-resíduo aplicadas em obras de engenharia, visto que o solo, amplamente utilizado como material de

construção, apresenta-se susceptível muitas vezes as ações de agentes externos como a água e solicitações de carregamentos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar o comportamento hidromecânico de misturas de solo e resíduos de pneus, bem como de misturas de solo e agregados miúdos reciclados provenientes de RCD, para aplicações geotécnicas.

1.3.2 Objetivos específicos

A fim de se alcançar o objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos estão previstos:

- i) analisar as propriedades físicas do solo, dos resíduos de pneus e agregado miúdo reciclado de RCD selecionados para a pesquisa, bem como de compósitos elaborados com estes materiais;
- ii) avaliar a condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e as características microestruturais de amostras de solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-resíduo, em diferentes percentuais de substituição dos resíduos de pneus e agregados reciclados em peso, compactadas em laboratório;
- iii) verificar a influência da incorporação de resíduos de pneus, em diferentes proporções, no comportamento físico, hidráulico e mecânico das misturas solo-resíduo, em comparação com o mesmo teor de agregado reciclado de RCD;
- iv) identificar quais teores de resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD melhor se aplicam ao solo estudado.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos, constando no primeiro uma breve introdução, na qual é apresentado o tema de forma mais abrangente, a justificativa do trabalho, os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento da pesquisa e a organização do documento.

O Capítulo 2 é formado por um referencial teórico, que contempla aspectos importantes na contextualização do tema da pesquisa e suas interfaces, tais como conceitos, características e tipos de aplicações a cerca dos materiais estudados.

No Capítulo 3 é descrito o procedimento metodológico empregado para a realização da pesquisa, abordando informações sobre os materiais que são utilizados, o processo de coleta e os procedimentos aplicados na análise de laboratório.

No Capítulo 4 são expostos os resultados e discussões relacionados ao estudo, de forma detalhada.

O Capítulo 5 apresenta uma síntese com as considerações finais da pesquisa a partir dos objetivos alcançados e algumas sugestões para pesquisas futuras que venham agregar conhecimento ao presente estudo.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os principais temas relacionados aos resíduos de pneus e aos resíduos de construção e demolição, como suas definições, características físicas e dispositivos legais pertinentes. Em seguida, é apresentada uma revisão sobre os conceitos e aspectos técnicos relacionados à melhoria e reforço de solos, sendo estes inseridos ao contexto de materiais compósitos. Ainda são expostas informações a cerca dos ensaios de permeabilidade e cisalhamento direto, pontuando os fatores de influência, além da inclusão de breves exemplos de estudos experimentais relativos ao tema.

2.1 Indústria da construção civil e o desenvolvimento sustentável

O ser humano tem usufruído dos bens que a natureza produz há muitos anos, porém esta relação foi impulsionada após a Segunda Revolução Industrial (séculos XIX e XX), intensificando as atividades das fábricas e com elas o seu potencial poluidor, causando uma notável instabilidade entre o meio ambiente e o homem. As consequências advindas das ações antrópicas têm sido acompanhadas nos tempos modernos, despertando o interesse em controlar e atenuar os efeitos ambientalmente agressivos identificados.

Diante deste contexto, se adaptar a modelos sustentáveis tem forçado a indústria e o governo incorporarem mudanças culturais, tecnológicas e de conduta, permitindo que sejam atingidas atividades de caráter menos explorador e prejudicial ao meio ambiente (GOLDEMBERG, 2011). A adoção de mudanças nessas dimensões também influencia o cotidiano da própria população, uma vez que esta se vê incentivada a conciliar o seu padrão de consumo a uma melhor qualidade de vida, desenvolvendo, assim, ações que visem o bem-estar coletivo.

Estas transformações afetam diversos setores do país, principalmente aqueles intimamente relacionados com a economia, como a construção civil, que ao longo de toda a sua cadeia produtiva imprime atividades de extração de matérias-primas não renováveis, sendo o setor responsável, de acordo com Taipale (2012), por consumir cerca de um terço dos recursos naturais existentes no mundo, além do processamento de insumos, construção, demolição e produção de resíduos.

O setor construtivo tem a função de elaborar um ambiente construído adequado a execução de diversas atividades dentro da sociedade, porém suas ações devem ser compatíveis com os preceitos de desenvolvimento sustentável, sendo eles descritos por Souza *et al.* (1993) como o atendimento correto das necessidades básicas de toda população, garantindo a oportunidade das gerações presentes e futuras suprirem suas próprias necessidades sem que, no entanto, o progresso de uma delas seja alcançado devido a degradação da outra, o que inclui, por consequência, a minimização dos efeitos negativos provocados ao meio ambiente.

Perante o exposto, para se atingir esta ética de desenvolvimento deve-se considerar então a reciclagem como alternativa de preservação ambiental, assim como rever o consumo de bens considerados necessários pela sociedade, pois isto colabora com a redução de desperdícios, estabelece um controle na utilização de matérias-primas e busca o equilíbrio entre a produção e a preservação ambiental.

2.2 Pneumáticos

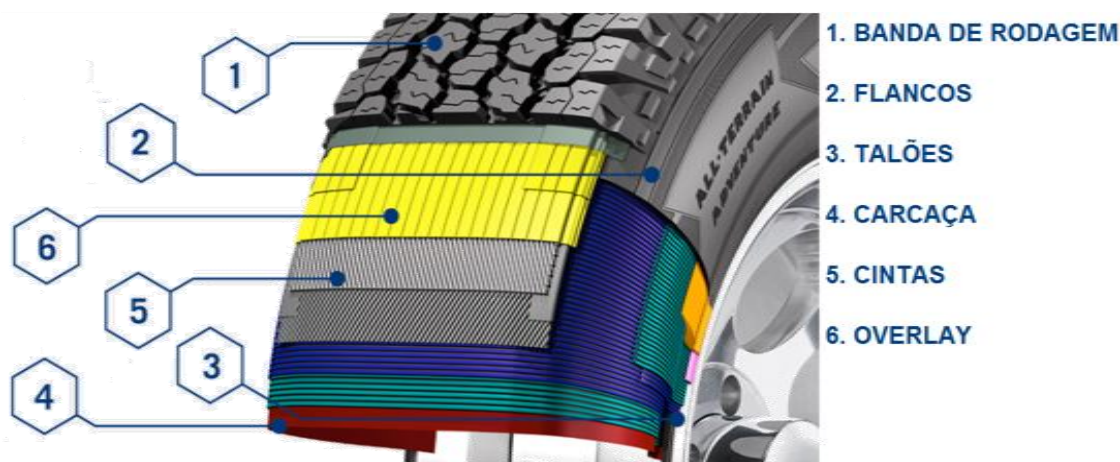
2.2.1 Histórico e características

Após a primeira guerra mundial, desenvolveu-se na Alemanha a tecnologia para produzir a borracha sintética. Contudo, para que esta adquirisse características físicas e mecânicas mais apropriadas, como elasticidade e resistência à abrasão, foi atribuída a sua composição uma fração de borracha natural, tornando sua estrutura mais resistente. A partir deste material surgiram os pneus de borracha, que são utilizados como proteção para as rodas dos veículos, reduzindo o atrito destas com a superfície do solo e permitindo uma maior durabilidade e melhor desempenho do sistema de rodagem dos veículos (RAMOS FILHO, 2005; CHRUSCIAK, 2013).

De forma geral, incorpora-se a estrutura dos pneus a borracha vulcanizada – borracha que passa por um processo de fortalecimento a quente – em conjunto com malhas de aço, arames de aço e tecido de *nylon*. A maior parte dos pneus é composta por 10% de borracha natural, proveniente do látex, 30% de borracha sintética, cuja matéria prima é o petróleo, e os 60% restantes compreendem o aço e os tecidos, que proporcionam reforço a estrutura (FRANÇA, 2004; PARANÁ, 2010).

Segundo Ramirez (2012), Chrusciak (2013) e Goodyear (2017) os pneus são constituídos, basicamente, pela banda de rodagem (parte superficial do pneu que entra diretamente em contato com o solo), carcaça ou aro de aço (parte interna do pneu), cintas (proporcionam suporte a estrutura, mantendo a forma do pneu), talão (responsável por manter o pneu acoplado ao aro de aço), flancos (parede lateral do pneu) e *Overlay* (limita as deformações sofridas pela banda de rodagem). Tais constituintes podem ser identificados na Figura 1.

Figura 1 – Detalhamento das partes de um pneu.



Fonte: Goodyear (2017).

A borracha dos pneus, que é de origem polimérica, possui baixo peso específico, baixa condutividade elétrica, elevada durabilidade, por ser não biodegradável e resistente a intempéries, absorve pouca água, é compressível e capaz de reter vibrações (MOO-YOUNG *et al.*, 2003; SHALABY; KHAN, 2005; BALUNAINI; PREZZI, 2010; HAZARIKA *et al.*, 2010; CASAGRANDE, 2013; THAKUR; KAUSHIK, 2016).

Entretanto, os pneus caracterizam-se por possuírem um grande volume, tornando difícil a identificação de locais apropriados para o seu descarte quando atingem a condição de inservível. Além disso, reduzem a vida útil dos aterros já existentes, pois dificultam a compactação destes ambientes e ocupam um espaço físico incompatível com o disponível nestes locais (EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010; RISSOLI; ARAÚJO, 2014).

2.2.2 Geração de pneus inservíveis

O consumo de borracha no planeta, tanto natural quanto sintética, chegou a 27,4 milhões de toneladas em 2016. Em 2017, o consumo mundial, apenas no terceiro trimestre, girou em torno de 7,1 milhões de toneladas, sendo quase 60% deste valor absorvido pela indústria automotiva (IRSG – INTERNATIONAL RUBBER STUDY GROUP, 2018).

De acordo com o IRSG (2017), a produção mundial de pneus novos para o ano de 2016 é ponderada em 15,95 milhões de toneladas, representando um aumento de aproximadamente 3%, se comparada com a estimativa do ano de 2015. As regiões da Ásia e Oceania contribuem com 66% do total gerado, seguidos pela Europa, Oriente Médio e África com 18% da produção mundial, enquanto que o continente americano é responsável por 16% da geração de pneus novos em todo o mundo (JATMA – JAPAN AUTOMOBILE TYRE MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2017).

A produção brasileira de pneus novos, no ano de 2016, foi de 67,9 milhões, sendo esta produção 1% inferior ao ano anterior, com cerca de 68,6 milhões de unidades fabricadas. No terceiro trimestre do ano de 2017, a geração de pneus novos no país atingiu um valor próximo de 19,2 milhões de unidades, mantendo uma média mensal de 6,4 milhões de pneus produzidos, indicando ainda um acréscimo de 9,4% em relação ao mesmo período de 2016 (ANIP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS, 2017a, 2017b).

Diante de uma produção cada vez maior dos pneumáticos, percebe-se também o crescimento acelerado do descarte de pneus, tendo em vista se tratar de bens com vida útil limitada. Nesse contexto, estima-se que no mundo são descartados cerca de 1 bilhão de pneus usados por ano (WBCSD, 2010). Nos Estados Unidos, a quantidade descartada em 2013, foi superior a 233 milhões de unidades, enquanto que no Brasil estima-se um valor de descarte em torno de 450 mil toneladas de pneus por ano (RMA – RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2014; SEST SENAT – SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE/ SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DO TRANSPORTE, 2017). Isso mostra o quanto se torna fundamental a procura por alternativas ecologicamente corretas para destinação desses materiais.

2.2.3 Reciclagem e reutilização de pneus inservíveis

Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 416, de 30 de Setembro de 2009 (BRASIL, 2009, Art. 2º), pneu inservível é o “pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma” e se enquadra na classe II (material não perigoso), de acordo com a NBR 10004 (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a), por não possuir características de inflamabilidade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

No entanto, embora os pneus inservíveis, segundo a norma supracitada, não possuam periculosidade, estes materiais são responsáveis por diversos problemas ao serem descartados irregularmente próximos a locais públicos, como terrenos baldios, corpos hídricos e vias de tráfego, atraindo o descarte de outros resíduos para estes ambientes e contribuindo com a proliferação de vetores de doenças.

A problemática relacionada ao descarte irregular dos pneumáticos torna o seu reaproveitamento uma alternativa potencial a ser investigada. Atualmente, já se observam técnicas para reutilizar e recuperar estes materiais, sendo indicado sempre como primeira opção o reuso e em seguida a reciclagem.

Os pneus usados podem passar por métodos de reutilização, reciclagem ou reforma (recuperação), sendo esta última uma opção para aumentar a vida útil dos pneumáticos, pois torna possível prolongar o seu uso e retardar o descarte. A recuperação é subdividida em processos de recapagem, remoldagem e recauchutagem. Todos esses sistemas de reforma são realizados no Brasil e seguem o padrão de execução dos Estados Unidos e de países da Europa. Entretanto, quando o pneu não se encontra em condições aceitáveis de conservação para este fim, os processos de reforma não são realizados, gerando a maior parte dos pneus inservíveis (MOREIRA *et al.*, 2010; CHRUSCIAK, 2013).

Na recapagem há a remoção da banda de rodagem para a colagem de uma nova superfície, enquanto que na recauchutagem remove-se também a borracha desgastada da parte lateral do pneu, sendo necessário para este serviço apenas 20% dos recursos utilizados na fabricação de um pneu novo. Já no sistema de remoldagem retira-se a borracha até a parte mais resistente do

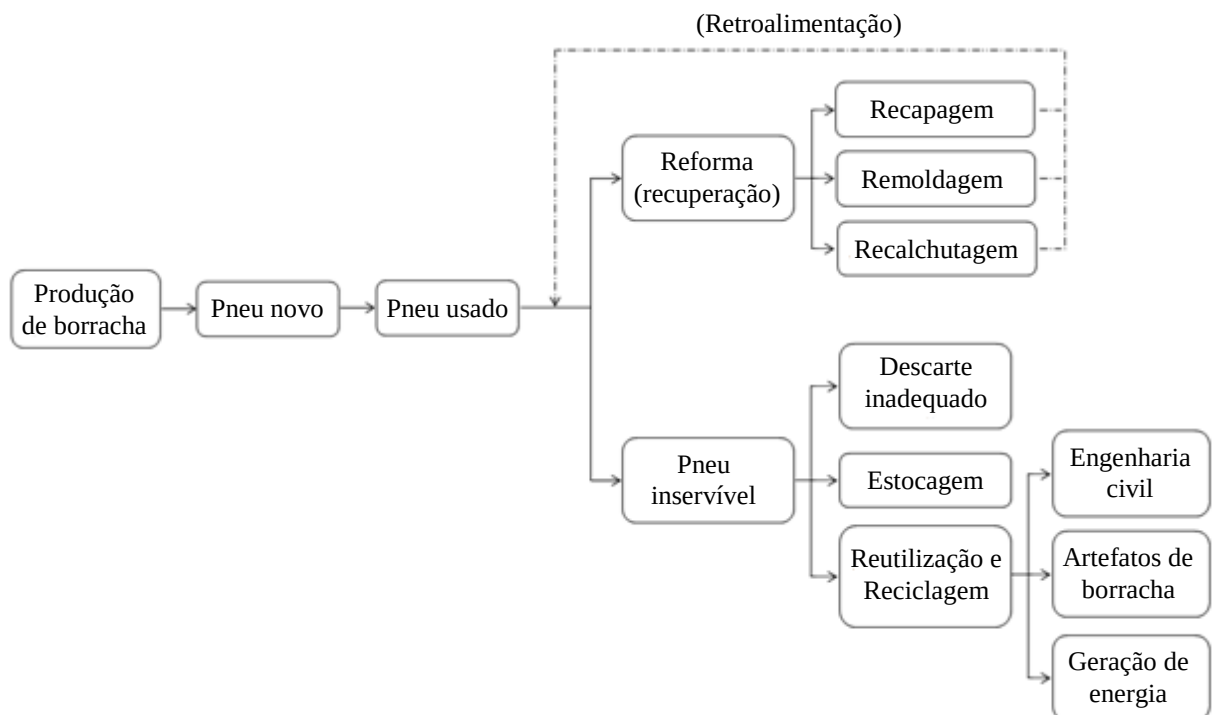
pneu, que será posteriormente reconstruído e vulcanizado, sem que haja emendas (MOREIRA *et al.*, 2010; FRANCO, 2012; RAMÍREZ, 2012; MORENO, 2016).

De acordo com Franco (2012), na reutilização os pneus inservíveis são empregados em sua forma original ou aproveitados na fabricação de artefatos de borracha, enquanto que na reciclagem há a necessidade de separar a borracha das partes metálicas e reduzir o tamanho dos pneus por meio de trituração, descaracterizando-os de seu formato inicial.

Além destas opções, estes materiais podem ser encaminhados para indústrias e utilizados como fonte de energia calorífera, inteiros ou sob trituração, devido ao seu potencial energético. Nesta alternativa a borracha é enviada a empresas licenciadas pelos órgãos ambientais para uso em fornos ou caldeiras de fábricas de cimento, papel e celulose (CHRUSCIAK, 2013).

Diante destas considerações, um resumo com os principais campos que envolvem o ciclo de vida dos pneumáticos é apresentado na Figura 2.

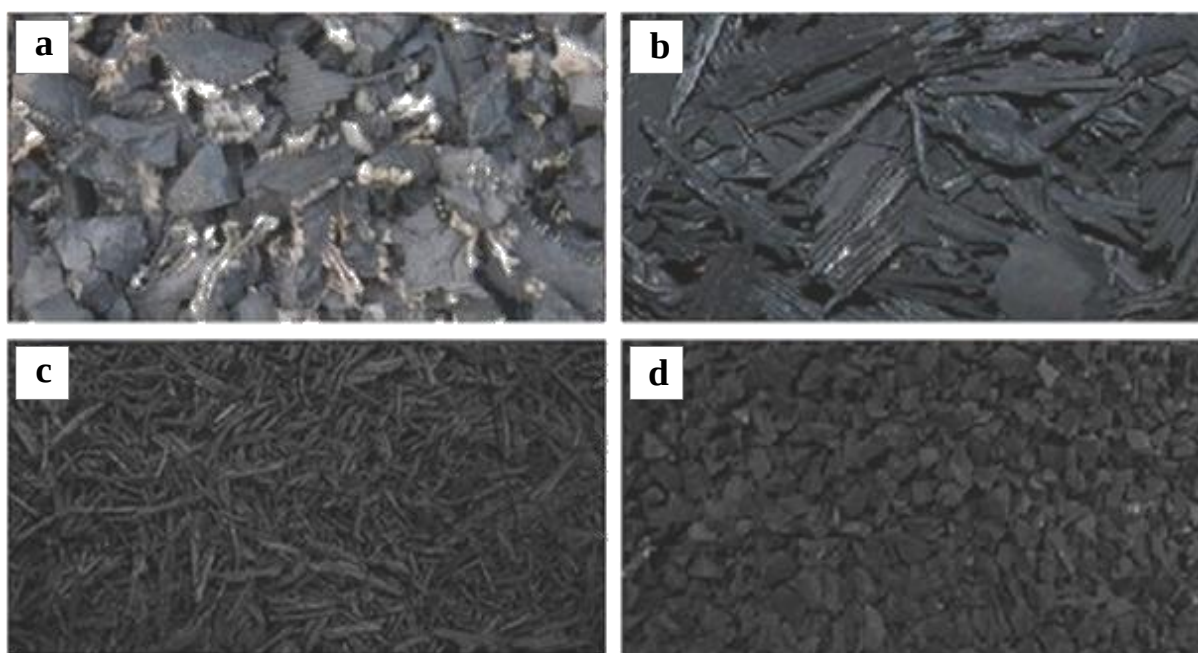
Figura 2 – Ciclo de vida dos pneumáticos.



Fonte: elaborado pela autora.

Uma das formas mais bem sucedidas de reciclar os pneumáticos é submetê-los a um processamento, pois assim obtêm-se materiais com diferentes tipos de trituração, tais como pedaços (do inglês *shreds*), lascas (do inglês *chips*), desbastes (do inglês *buffings*) e migalhas (do inglês *crump*), ilustrados na Figura 3 (EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010; RISSOLI; ARAÚJO, 2014). Este tipo de classificação baseia-se na normativa D 6270 (ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008).

Figura 3 – Tipos de processamento dos pneus inservíveis (sem escala): pedaços (a), lascas (b), desbastes (c) e migalhas (d).



Fonte: Edinçliler; Baykal e Saygili (2010).

As lascas de pneus possuem forma retangular ou quadrada, apresentando, geralmente, tamanhos que variam de 12 a 50 mm. Os desbastes caracterizam-se por serem fibrosos e com dimensões inferiores às apresentadas pelas lascas de pneus, sendo estas compreendidas entre 2 e 12 mm, enquanto que as migalhas exibem uma geometria mais arredondada, medindo entre 0,6 e 2 mm. Os pedaços de pneus não possuem uma geometria definida, podendo se apresentar de diversas formas a depender do tipo de máquina de processamento, mas abrangem, de forma geral, tamanhos entre 50 e 305 mm. Ainda existem partículas de borracha chamadas de pó de borracha ou borracha moída, com tamanhos de, no máximo, 0,6 mm (ASTM, 2008; CHRUSCIAK, 2013).

No processo de reforma dos pneus, ao ser removida a superfície de borracha antiga e posta uma nova, resíduos em forma de fibras – filamentos em que o tamanho de uma das dimensões é superior ao das demais – podem ser produzidos, sendo chamados de desbastes. Estes resíduos, subprodutos da indústria de recauchutagem, são apontados como ideais para a formação de compósitos com o solo e serem aplicados em obras geotécnicas por possuírem pequenos diâmetros e forma fibrilar (CASAGRANDE, 2005; EDINÇLILER; AYHAN, 2010; EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010; CHRUSCIK, 2013).

As aplicações para os pneus inservíveis dentro da engenharia civil são diversas, podendo ser utilizados tanto inteiros quanto triturados. No que se refere a esta última situação, no Quadro 1 são descritas algumas das diferentes aplicações para os fragmentos de pneus.

Quadro 1 – Estudos com resíduos de pneus e suas aplicações.

Aplicação	Fonte
Concreto leve	Eldin e Senouci (1993) Hernandez-Olivares e Barluenga (2004) Guerra <i>et al.</i> (2010)
Blocos de concreto/ blocos intertravados de concreto	Fioriti; Ino e Akasaki (2007) Silva, F. <i>et al.</i> (2017) Silva, T. <i>et al.</i> (2017)
Composição de aterros para rodovias	Boocher; Edil e Kuraoka (1997) Cetin; Fener e Gunaydin (2006) Nascimento (2015)
Sistema de drenagem em aterros	Hudson <i>et al.</i> (2007) Reddy; Stark e Marella (2010) Thakur e Kaushik (2016)
Aditivo em pavimento asfáltico	Cambuim (2004) Specht (2004) Rosa <i>et al.</i> (2012) Merighi (2014) Rodriguez-Alloza <i>et al.</i> (2014)
Estruturas de contenção	Balunaini e Prezzi (2010) Gerscovich; Sayão e Valle (2006)
Aterro leve sobre solos moles	Ahmed e Lovell (1993)

Fonte: elaborado pela autora.

De acordo com Edinçliler; Baykal e Saygili (2010), a utilização de resíduos de pneus de borracha em obras de engenharia, principalmente as de caráter geotécnico, vem crescendo ao

longo dos anos, sendo justificada pelos vultosos materiais necessários a execução dessas obras e pela escassez de recursos naturais disponíveis.

Diante deste quadro, diversos trabalhos vêm sendo realizados para analisar o efeito da incorporação de resíduos de pneus no melhoramento das propriedades geotécnicas de solos, dentre os quais podem ser citados os estudos de Foose; Benson e Bosscher (1996), Ghazavi (2004), Edinçliler; Baykal e Dengili (2004), Zornberg; Cabral e Viratjandr (2004), Ghazavi e Sakhi (2005), Attom (2006), Sellaf *et al.* (2014), Franco (2012), Jaramillo e Casagrande (2016), Macedo (2016) e Moreno (2016).

2.3 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

2.3.1 Conceitos e classificação

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010a, Art 13º), resíduos oriundos da construção civil são os materiais “[...] gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis”.

Para a Resolução nº 307 do CONAMA, de 05 de julho de 2002 (BRASIL, 2002b), estes resíduos, também denominados de entulhos de obras, calça ou metralha, são compostos por elementos, tais como tijolos, concreto, argamassa, gesso, pavimento asfáltico, solo, rochas, vidros, madeira, tintas, tubulações, metais, entre outros.

Ainda segundo a referida resolução, em seu Art 3º, os RCD podem ser inseridos em quatro classes, a depender da sua possibilidade de reciclagem, sendo classe A os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, classe B os recicláveis para outras destinações, classe C os que não possuem tecnologia que viabilize economicamente a sua reciclagem e classe D os resíduos considerados perigosos.

Além desta classificação, os RCD enquadram-se, em quase sua totalidade, na definição de resíduos sólidos não perigosos e inertes (Classe II B), de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a), por não terem propriedades como biodegradabilidade e combustibilidade, e não possuírem constituintes solúveis em água acima de seus padrões de potabilidade, com exceção

do gesso e de elementos como tintas, solventes e óleos, podendo receber outra classificação em decorrência da possibilidade de contaminação.

Freitas (2009) ressalta que a classificação dos RCD de forma objetiva auxilia o gerador tanto no manejo quanto na identificação da destinação mais adequada para cada tipo de resíduo, reduzindo desperdícios e possibilitando a sua reutilização.

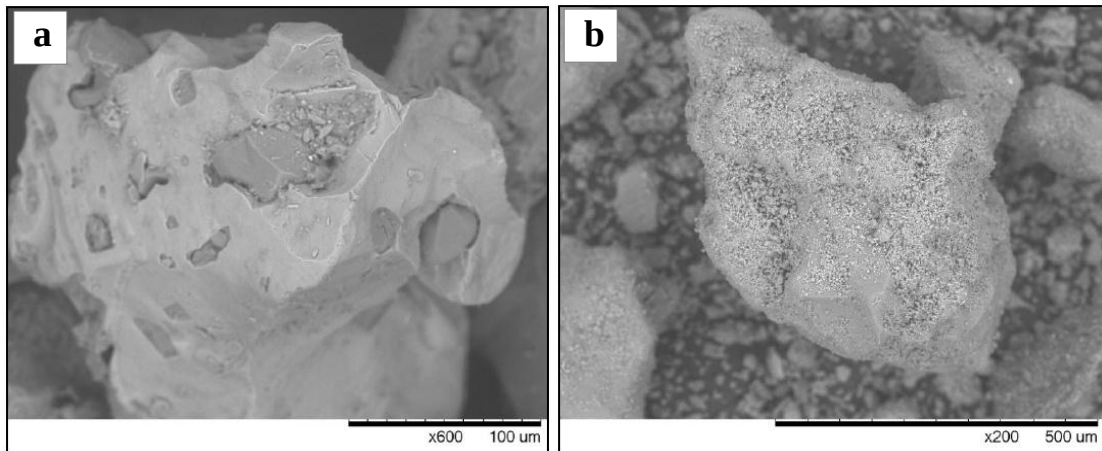
Os resíduos provenientes das atividades construtivas podem ser aplicados como agregados reciclados (AR), sendo estes definidos como materiais com características granulares e que ao passar por um processo de beneficiamento exibem propriedades técnicas satisfatórias para aplicações em obras de engenharia (ABNT, 2004f). Os AR podem ser classificados como agregado reciclado de concreto (ARC) ou agregado reciclado misto (ARM), em que para este a fração graúda ($> 4,75$ mm) possui menos do que 90% de fragmentos cimentícios e para aquele a porcentagem dos mesmos fragmentos é superior a 90% (ABNT, 2011).

De acordo com Santos (2007), geralmente, nas centrais de reciclagem os AR são rotulados e classificados em resíduo cinza, quando a parcela com maior representatividade é composta por materiais cimentícios, em resíduo vermelho, quando há a predominância de materiais cerâmicos vermelhos em sua composição, e misto, quando a presença dominante é diversificada, apresentando, por exemplo, argamassas, concreto, materiais cerâmicos, betuminosos, entre outros.

A diversidade de componentes existente nos agregados produzidos a partir da reciclagem dos RCD exerce influência sobre as propriedades destes materiais, se comparados com os agregados naturais (AN). Os AR são mais porosos e a superfície de seus grãos é rugosa, como pode ser observado na Figura 4b. Esta característica é atribuída aos agregados reciclados em função da presença de materiais cerâmicos em sua composição e a argamassa aderida às suas partículas; enquanto que os AN apresentam textura superficial, preponderantemente, lisa e homogênea, Figura 4a, (LIMA; LEITE, 2012; ARAÚJO, 2014).

Devido a sua elevada porosidade, os AR possuem geralmente uma densidade menor do que a encontrada para os agregados naturais, se tornando uma das principais características físicas que diferencia os agregados reciclados dos agregados naturais (MACEDO, 2013).

Figura 4 – Microscopia eletrônica de varredura do agregado natural ampliado em 600x (a) e do agregado reciclado para uma ampliação de 200x (b).



Fonte: Araújo (2014).

2.3.2 Geração de RCD

Embora as tecnologias estejam cada dia mais difundidas no cotidiano da sociedade e serem desenvolvidas constantemente novas técnicas voltadas para o setor construtivo, ainda são percebidos traços artesanais e rústicos na parcela majoritária das atividades da indústria da construção civil, tendo como consequência a geração de grandes quantidades de resíduos.

Estima-se uma produção mundial de 2 a 3 bilhões de toneladas de RCD anualmente, representando de 30 a 40% dos resíduos sólidos produzidos em todo o mundo (TAIPALE, 2012; MÁLIA *et al.*, 2013). Incluída nesta estimativa está a União Européia, que contribui com uma geração média anual de 100 milhões de toneladas de RCD (APA – AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, 2016).

Dados mostram que, no Brasil, para cada tonelada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletada são recolhidas duas toneladas de entulho proveniente da construção civil e a quantidade destes materiais tem apresentado um crescimento três vezes mais rápido do que a população (ERPEN, 2009; FIRMO, 2013). De acordo com Castilho (2009), em média 60% dos RSU gerados nas cidades brasileiras advêm do setor construtivo, já para Fonseca (2012) a quantidade de RCD está compreendida em uma faixa que varia de 51 a 70% da massa total de RSU.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2017), em 2016, cerca de 45,1 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição foram coletados pelos municípios em todo o Brasil, implicando em uma redução inferior a 1% em relação ao ano anterior. Porém, apesar deste ser um valor elevado, se refere apenas a estatística do que foi coletado pelos logradouros públicos e não representa a produção total.

Da quantidade de RCD produzida em Pernambuco, cerca de 30% do total é proveniente de empresas de pequeno a grande porte, já o restante é gerado por pessoas físicas, por meio de reformas, construções de pequeno porte, entre outros (PERNAMBUCO, 2012). Embora seja indicado que a maior porcentagem da produção se refira aos geradores informais, a quantificação dos resíduos torna-se difícil, pois ainda há indisponibilidade de dados estatísticos para representar este valor de forma atualizada e com segurança.

No entanto, mesmo com a dificuldade em se obter valores de geração, foram realizados estudos que se propõem a estimar e/ou indicar uma quantidade, como é o caso de Monteiro *et al.* (2001), que apontam uma taxa de geração de aproximadamente 0,300 t/m² para novas construções, e Morales; Mendes e Angulo (2006), que mensuraram a produção de RCD por unidade de área de reforma, sendo ela de 0,470 t/m².

De forma mais localizada, a partir de dados do grupo de pesquisa Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (AMBITEC/POLI/UPE), Falcão (2014) avaliou que em Recife a geração de RCD equivale a 4.000 t/dia, sendo consideradas atividades como reformas, demolições e novas construções.

Em se tratando de demolições, a geração de resíduos independe da qualidade da obra e dos procedimentos construtivos utilizados, pois estes aspectos são inerentes ao próprio processo de demolição, porém a falta de segregação de componentes é um fator condicionante da geração nesta fase; enquanto que os resíduos produzidos a partir de novas construções relacionam-se diretamente às perdas que ocorrem em virtude da dinâmica da construção, seja pelos processos de transporte, recebimento, estocagem ou execução (MORAIS, 2006; PONTES, 2007).

2.3.3 Reaproveitamento de RCD

Tem-se observado um aumento do interesse em reaproveitar ou destinar adequadamente os resíduos produzidos pela indústria da construção civil, mostrando uma tendência de mudança nas atividades deste setor. De acordo com Ortiz; Pasqualino e Castells (2010), 80% dos RCD podem ser reciclados, já para Gusmão (2008) o potencial de reciclagem dos RCD assume um percentual maior, chegando a 91% do total de resíduos produzidos. Apesar da possibilidade de utilização ser elevada, Miranda; Angulo e Careli (2009) afirmam que a capacidade instalada de reciclagem do RCD gerado no país é de apenas 3,6%.

Diante deste contexto, já são perceptíveis as vantagens na utilização dos RCD como material reciclado dentro da própria dinâmica das obras, a exemplo, tem-se países como Alemanha, Dinamarca e Holanda, cuja capacidade real de reciclagem varia de 50% a 90% do total de RCD produzido. Abaixo deste intervalo se encontram a Espanha e Portugal, mas ainda apresentam índices de reciclagem próximos a 50% (EC – EUROPEAN COMMISSION, 2000).

Alternativas viáveis de aplicação dos RCD vêm sendo estudadas por vários autores, incentivados não apenas pela redução da disponibilidade de recursos naturais no setor construtivo, mas pela resposta positiva de adaptabilidade dos resíduos às técnicas amplamente difundidas na engenharia civil. No Quadro 2 são apontadas algumas pesquisas que englobam os RCD.

A reinserção destes materiais nas atividades construtivas permite diminuir o acúmulo de resíduos, assim como minorar a exploração de jazidas minerais, tendo em vista que estas se apresentam cada vez mais escassas e os bens que as compõem não são renováveis. Nesse contexto, contabiliza-se que, apenas em 2007, a indústria da construção civil consumiu em torno de 20 bilhões de toneladas de agregados naturais existentes no planeta (BLEISCHWITZ; BAHN-WALKOWIAK, 2007).

Quadro 2 – Pesquisas com RCD e suas aplicações.

Aplicação	Fonte
Concreto não estrutural	Sá (2006) Veras (2012) Sampaio (2013) Cavalcanti (2014) Rodrigues (2014) Lima (2017)
Blocos de concreto	Rodrigues (2015)
Estabilização e reforço de solos	Santos (2007) Santos Neto (2015) Macedo (2016) Silva <i>et al.</i> (2016)
Estacas de compactação	Araújo Júnior (2010) Medeiros Júnior; Fucale e Gusmão (2010)
Pavimentação	Proença (2012) Farias (2013) Macedo (2013) Lima (2016) Barbosa (2017)

Fonte: elaborado pela autora.

2.4 Aspectos da legislação e instrumentos normativos

A primeira ferramenta legal que diz respeito a assuntos de interesse coletivo, mas de abrangência local, foi a Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988), na qual é determinado como competência do município organizar e prestar serviços públicos, seja diariamente ou sob regime de concessão ou permissão.

A partir disso, a implantação de legislações referentes ao adequado gerenciamento dos resíduos sólidos produzidos pelas atividades humanas foi incentivada, sendo atribuídas competências não mais apenas em âmbito municipal. Entretanto, ainda se observa a falta de políticas públicas em todos os níveis de governo que tratem da destinação dos resíduos produzidos, bem como da prevenção de sua geração.

2.4.1 Políticas públicas sobre os resíduos de pneus

Com relação aos materiais pneumáticos, destaca-se a Resolução CONAMA nº 416, de 30 de Setembro de 2009 (BRASIL, 2009), que revoga as Resoluções do CONAMA nº 258

(BRASIL, 1999) e nº 301 (BRASIL, 2002a) e estabelece a obrigatoriedade na coleta e descarte dos pneus inservíveis por parte dos fabricantes e importadores, além de incorporar informações relativas à prevenção dos impactos causados pela disposição inadequada desses materiais.

As atividades da indústria da borracha são consideradas, perante a Lei nº 10.165, de 27 de Dezembro de 2000 (BRASIL, 2000), grandes consumidoras dos recursos naturais, assim como promotoras em potencial de poluição, devendo ser gerenciadas e fiscalizadas. Esta lei altera a Lei nº 6.938 (BRASIL, 1981), de 31 de Agosto de 1981, incluindo em seu texto a categoria e descrição dos tipos de atividades apontadas como poluidoras.

2.4.2 Políticas públicas sobre os RCD e normativas

No que se refere aos RCD, a necessidade de gerenciar e manusear de forma correta este tipo de resíduo, tornando viável o seu reaproveitamento, resultou na Resolução CONAMA nº 307, de 05 de Julho de 2002 (BRASIL, 2002b), que dispõe sobre a gestão dos resíduos advindos da construção civil. Nela são determinados critérios, diretrizes e procedimentos para minimizar os impactos ambientais, econômicos e sociais decorrentes da elevada geração dos RCD.

A Resolução CONAMA nº 307 foi alterada pelas resoluções CONAMA nº 348 (BRASIL, 2004), nº 469 (BRASIL, 2015) e nº 431 (BRASIL, 2011), modificando a classificação do amianto, embalagens vazias de tintas imobiliárias e do gesso, respectivamente. Além dessas, foi publicada em 2012 a resolução CONAMA nº 448 (BRASIL, 2012), que altera algumas definições estabelecidas pela CONAMA nº 307.

Com a Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010 (BRASIL, 2010a), regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010b), instituiu-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dando aos RCD uma classificação diferente dentro da determinada para os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Esta lei modificou a Lei nº 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998), na qual estabelece punições para as práticas lesivas ao meio ambiente, incluindo a destinação inadequada dos resíduos sólidos.

Em âmbito estadual, pode-se destacar a Lei nº 14.236, de 13 de Dezembro de 2010 (PERNAMBUCO, 2010), que concebe a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS),

implementando aspectos de gestão de resíduos no estado. Esta lei, em conjunto com a Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010a), define as respectivas responsabilidades dos geradores e do poder público para a gestão integrada dos resíduos sólidos.

Na cidade do Recife, foi elaborada a Lei nº 17.072, de 04 de janeiro de 2005 (RECIFE, 2005), que trata particularmente dos resíduos provenientes da construção civil, atribuindo a cada agente envolvido no processo de geração a suas obrigações, além de designar os critérios para elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil (PGRCC), submetido à aprovação do órgão gestor da limpeza urbana do município para o licenciamento ambiental das atividades construtivas.

Outro dispositivo legal que concerne ao município é o Decreto nº 27.399, de Setembro de 2013 (RECIFE, 2013). Este documento regulamenta as Ecoestações – unidades de recebimento de RSU de pequenos geradores dentro da cidade do Recife –, fornecendo informações a cerca de sua infraestrutura e funcionamento, como a área de instalação, horários, controle de recebimento, tipos de resíduos aceitos na unidade, entre outros.

Para orientar no tratamento específico dos RCD foram publicadas algumas normas pela ABNT, identificadas no Quadro 3. Estes instrumentos normativos podem auxiliar os estados e municípios na reciclagem desses resíduos, permitindo sua utilização em algumas aplicações na engenharia e fornecendo diretrizes para instalação e organização de locais de recebimento e manejo dos RCD.

Quadro 3 – Normas técnicas voltadas para os RCD.

Norma	Título
NBR 15112/2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15113/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15114/2004	Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15115/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação – procedimentos
NBR 15116/2004	Agregados reciclados de resíduos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos

Fonte: elaborado com base em ABNT (2004b, 2004c, 2004d, 2004e, 2004f).

A maioria das pesquisas desenvolvidas com o uso dos RCD tem sido voltada para pavimentação, já sendo constatada a utilização destes resíduos de forma promissora. Contudo, as normas descritas no Quadro 3 não acompanharam os avanços das aplicações com RCD em diversas áreas da engenharia. A atualização destas diretrizes, abrangendo novas aplicações dos RCD, poderia proporcionar estímulos a diferentes formas de utilização destes materiais, bem como consolidar técnicas e procedimentos experimentalmente testados, que de forma destacada vem acumulando bons resultados nos estudos com aplicação, inclusive, em obras geotécnicas, a citar os estudos de Santos (2007), Araújo Júnior (2010), Medeiros Júnior; Fucale e Gusmão (2010), Rodrigues (2015), Macedo (2016) e Silva *et al.* (2016).

2.5 Estabilização de solos

Em obras de engenharia é comum a ocorrência de solos locais que não atendem a determinadas especificações de projeto, possuindo características impróprias para sua utilização. Nesses casos, segundo Casagrande (2013) e Pedroso *et al.* (2014), pode-se evitar o uso destes solos substituindo-os por outro de melhor qualidade ou modificar as propriedades do solo existente, permitindo que desenvolvam parâmetros viáveis para a sua aplicação, como densidade, condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento.

Estabilizar ou melhorar um solo consiste na utilização de processos de origem física ou mecânica (estabilização granulométrica, rearranjo das partículas por compactação, dentre outros), química (adição de cal, cimento, betume, resinas, dentre outros) ou físico-química (utilização de materiais compósitos) para modificar qualquer uma de suas propriedades, a fim de tornar o solo adequado para ser utilizado dentro de seus limites, melhorando o seu comportamento mediante solicitações externas e ações adversas de agentes naturais (BAPTISTA, 1976; SOLIZ, 2007; PINTO, 2008).

Guimarães (2002) menciona que a escolha por um dos métodos supracitados condiciona-se a diversos fatores, dentre os quais podem ser apontados o propósito da obra, as propriedades do solo local a serem corrigidas, as características e disponibilidade dos materiais, além de aspectos econômicos.

A técnica de melhorar os solos, seja com fibras ou com agregados, tem se enquadrado cada vez mais na tecnologia dos materiais compósitos, sendo estes originados da combinação de

dois ou mais materiais diferentes, cujas propriedades não são encontradas nos materiais de origem. De forma geral, o material resultante desta combinação possui duas fases: uma matriz, que ocupa a maior parte do volume do compósito, e um elemento que otimiza as características do material resultante (BUDINSKI, 1996; MONTARDO, 1999).

A área onde ocorre efetivamente o contato entre os elementos constituintes de um compósito recebe o nome de interface, podendo esta ser fraca ou mais intensa, a depender se o tipo de relação é física e/ou química. Um ponto que deve ser observado na formação de um compósito é a aderência entre as fases, pois este vínculo irá definir os resultados ideais de mobilização para o conjunto (DANIEL; ISHAI, 1994; TAYLOR, 1994).

Para Higgins (1994), os materiais compósitos podem ser classificados em materiais compósitos particulados, quando se adiciona a matriz elementos cuja forma se assemelha a partículas, ou materiais compósitos fibrosos, quando são incorporados materiais com geometria fibrilar. Ambos os elementos podem agir como um reforço no solo ao interferir em características como resistência e deformabilidade, pois segundo Sayão; Sieira e Santos (2009), caso um solo possua agentes resistentes em sua estrutura, suas movimentações, sejam verticais (de compressão) ou laterais (de tração), são limitadas e o comportamento da matriz é melhorado pela ação dos elementos de reforço.

2.5.1 Melhoramento de solos com fibras

O emprego de fibras junto ao solo para fins de melhorar suas características, bem como o seu comportamento, é uma técnica considerada comum, sendo utilizada pelo homem desde a antiguidade. Há indícios da utilização de palhas na fabricação de tijolos no antigo Egito e de mantas de raízes misturadas com argila ou cascalho na construção dos templos (Zigurates) na Mesopotâmia, em partes da Grande Muralha da China e em obras do Império Romano, com o intuito de reforçar as estruturas (ÊXODO 5:6-7; AGUIAR; VERTEMATTI, 2004; SAYÃO; SIEIRA; SANTOS, 2009).

Casagrande (2005) comenta que as propriedades de um solo podem ser modificadas através de vários processos, como a compactação mecânica ou a inclusão de elementos para fins de reforço, tais como geotêxteis, grelhas e fibras. Acerca deste último elemento, os solos podem sofrer alterações em suas propriedades pela incorporação de diversos tipos de fibras, sejam

elas naturais ou sintéticas, como, por exemplo, bambu, coco, linho, sisal, prolipropileno, poliéster, pneus, entre outros (OZKUL; BAYKAL, 2006; EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010; GUEDES, 2013).

Edinçliler e Ayhan (2010) afirmam que a melhoria das propriedades do solo pela inclusão de fibras é influenciada por um conjunto de fatores, como o tipo, comprimento, geometria, rugosidade, teor e orientação das fibras, além de fatores inerentes ao próprio solo. O processo de fabricação e o material do qual são compostas as fibras também devem ser considerados, pois podem ajudar a entender o mecanismo de interação desses materiais com a matriz (CASAGRANDE, 2005; GUEDES, 2013).

A inclusão de fibras aos solos pode ser de forma orientada, sendo indicadas direções preferenciais, ou de maneira aleatória. Esta última é a técnica mais utilizada quando se trata de misturas solo-fibra, pois este tipo de configuração proporciona a redução de ocorrência de pontos frágeis. Por outro lado, ao serem introduzidos os elementos de fibras com certa orientação no solo pode-se melhorar as suas características resistentes, bem como reduzir a sua deformabilidade (EDINÇLILER; AYHAN, 2010).

2.5.1.1 Tipos de fibras empregadas em compósitos fibrosos

Atualmente, já se encontram vários estudos que mostram o emprego de fibras de diversas naturezas no reforço de solos. De acordo com Casagrande (2005), a definição do tipo de fibra a ser aplicado está atrelada às características resultantes que se deseje que a matriz adquira e seu potencial de adaptação a matriz. Heineck (2002) considera importante que, além desta informação, deva ser verificado também, durante a escolha da fibra, se esta é quimicamente neutra, resistente a intempéries e não cause efeitos adversos à saúde das pessoas.

De forma geral, as fibras podem ser classificadas em naturais, poliméricas, minerais e metálicas. As fibras naturais são de origem vegetal, apresentam baixa durabilidade, em decorrência de sua biodegradabilidade, alta absorção de água e foram os primeiros tipos de fibras utilizados pelo ser humano. Destaca-se como exemplo deste tipo de fibra as advindas do bambu, coco, linho, cana-de-açúcar e sisal. Esta última tem sido a mais usada por sua elevada resistência e tenacidade (CASAGRANDE, 2005; HEINECK, 2002; GUEDES, 2013).

No que se refere às fibras poliméricas, estas podem ser subdivididas em fibras de polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida. As fibras de polipropileno possuem flexibilidade e tenacidade elevadas. As de polietileno destacam-se por sua durabilidade, porém são fracamente aderidas à matriz. Fibras de poliéster, também conhecidas pela sigla PET (polietileno tereftalato), dispõem de alta densidade e resistência, podendo ser utilizadas para as mesmas aplicações das de polipropileno. Por fim, as fibras de poliamida caracterizam-se, geralmente, pela baixa resistência e rigidez (TAYLOR, 1994; HEINECK, 2002).

Ao se tratar das fibras minerais, Taylor (1994) ressalta, por exemplo, as de carbono e vidro, cuja baixa densidade distingue a primeira, enquanto que a segunda pode sofrer facilmente degradação. Em relação às fibras metálicas, pode-se exemplificar as de aço, cujo formato é diversificado e são susceptíveis à corrosão, dependendo do ambiente em que estejam inseridas (TAYLOR, 1994; HEINECK, 2002).

2.5.1.2 Comportamento de solos misturados com fibras

Dentre as propriedades conferidas ao solo pela adição de fibras, destaca-se, por exemplo, o aumento da capacidade de carga, da tenacidade e do coeficiente hidráulico (KAUSHIK; KUMAR; BANSAL, 2014; THAKUR; KAUSHIK, 2016). É importante destacar que este cenário pode sofrer variações em função dos diferentes tipos de fibras empregados, tendo em vista que cada fibra apresenta particularidades.

Segundo Bueno (1996), a incorporação de fibras ao solo permite que este desenvolva, de forma mais acentuada, aspectos de ductilidade, coesividade e compressibilidade. Nota-se também a influência no coeficiente de permeabilidade dos solos com a adição de fibras, podendo reduzir os valores deste parâmetro em solos mais permeáveis e atuar inversamente em solos menos permeáveis. Referente ao teor de fibras, Maher e Ho (1994) e Jaramillo e Casagrande (2016) relatam que o valor do coeficiente hidráulico do solo pode ser maior à medida que a quantidade de fibras aumenta.

No que tange, exclusivamente, ao comportamento de solos com fibras de pneus, estudos comprovam que, de forma mais ampla, as fibras de borracha melhoram a resistência ao cisalhamento das misturas, aumentando o valor deste parâmetro, tornando atraentes as

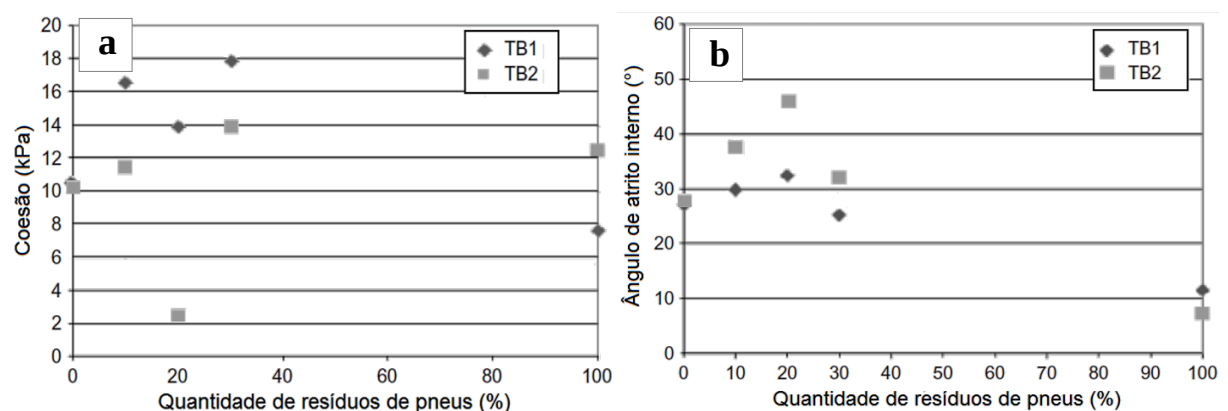
características do compósito resultante para o emprego em obras de terra (EDINÇLILER; BAYKAL; DENGILI, 2004; EDINÇLILER; AYHAN, 2010; FRANCO, 2012).

Além disso, quando misturados ao solo, os resíduos de pneus têm suas características de compressibilidade e reações exotérmicas – reação de liberação de calor – reduzidas, pois no que se refere a segunda, há fluxo de calor para a matriz, diminuindo os riscos de combustão (GACKE; LEE; BOYD, 1997; EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010).

No estudo de Edinçliler e Ayhan (2010) foi avaliado o comportamento mecânico de uma areia, desbastes de pneus, divididos em dois grupos (TB1 – comprimentos entre 8 e 10 mm e TB2 – comprimentos variando de 10 a 50 mm), e misturas de areia com 10, 20 e 30% de resíduos de pneus. Os parâmetros de resistência foram obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto em grande escala (300 mm x 300 mm), nas tensões normais de 20, 40 e 80 kPa.

A adição do material pneumático aumentou os parâmetros de resistência da areia, Figura 5. O ângulo de atrito sofreu um acréscimo, principalmente para a inserção com resíduos de comprimentos superiores a 10 mm (TB2) e proporções de até 20%. Os resíduos mais alongados apresentaram uma maior superfície de contato com o solo e o teor intermediário de 20% exerceu um melhor efeito sobre a resistência ao cisalhamento da areia, alcançando assim o valor máximo de resistência dentre as misturas.

Figura 5 – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) com o teor de resíduos de pneus.

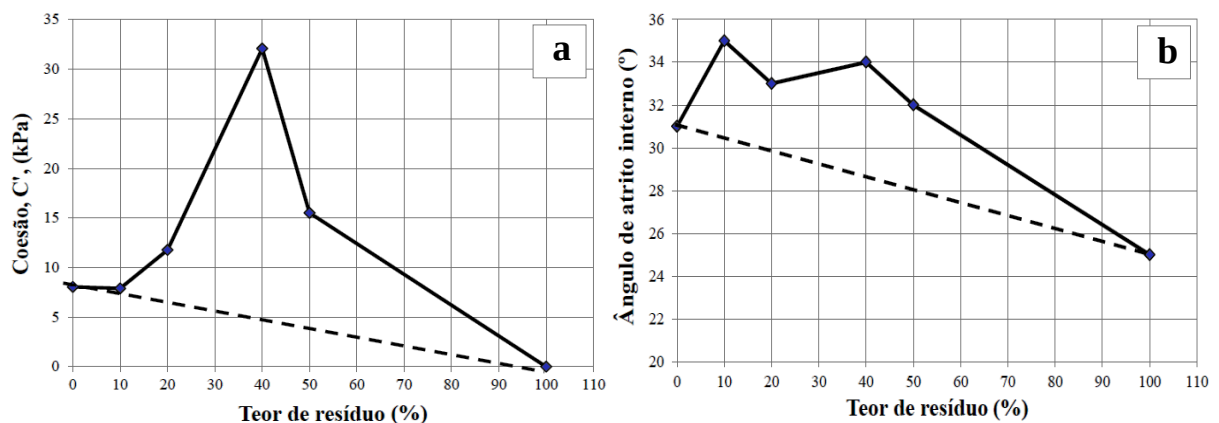


Fonte: Edinçliler e Ayhan (2010).

Franco (2012) avaliou por meio de ensaios de cisalhamento direto (50 mm de diâmetro e 20 mm de altura) e permeabilidade à carga variável o comportamento de compósitos fibrosos para aplicação em aterros. Neste estudo foram incluídos a um solo laterítico 10, 20, 40 e 50% de desbastes de pneus, cujo tamanho médio era da ordem de 1,6 mm.

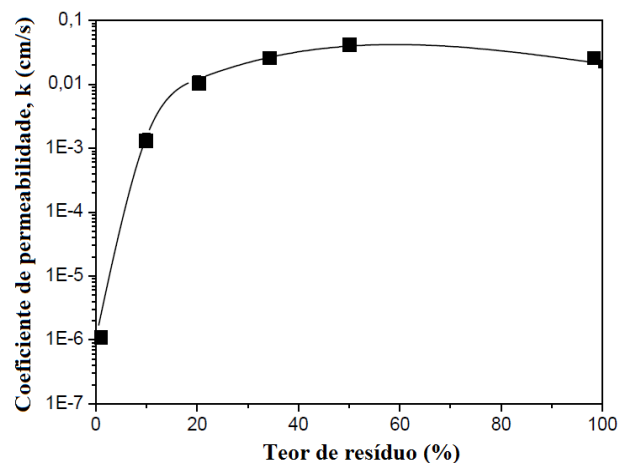
Nos ensaios de cisalhamento direto realizados por Franco (2012) foram aplicadas tensões normais de 50, 100 e 200 kPa e velocidade de 0,05 mm/min. Na Figura 6 é apresentada graficamente a relação entre o teor de resíduos de pneus e a coesão e o ângulo de atrito. O autor afirma que a inclusão dos resíduos de pneus aumenta a resistência ao cisalhamento do solo, especialmente com a mistura de 40%, correspondendo aos maiores valores de coesão e ângulo de atrito dentre as misturas. Com relação aos ensaios de permeabilidade, os pneus tornaram o solo mais permeável até um teor de 20%, estabilizando em seguida, Figura 7.

Figura 6 – Efeito da adição de resíduos de pneus na coesão (a) e ângulo de atrito (b).



Fonte: Franco (2012).

Figura 7 – Variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de resíduos de pneus.

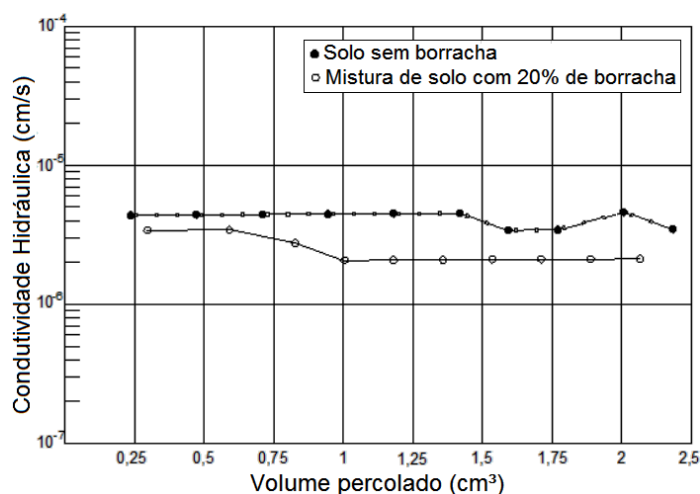


Fonte: Franco (2012).

Olandosky Neto (2013) pesquisou o comportamento hidráulico, conduzido em permeâmetros de parede rígida, de um solo silto arenoso e mistura deste solo com 20% em massa de borracha triturada de pneus inservíveis, sendo estudada a aplicação destes materiais em cobertura de aterros sanitários.

O autor verificou que a adição dos resíduos de pneus não altera a ordem de grandeza da permeabilidade do solo, Figura 8, e que tal mistura pode ser empregada em camadas de cobertura de resíduos não perigosos, tais como aterros de resíduos sólidos urbanos, uma vez que para esta aplicação são requeridas barreiras à infiltração com coeficientes hidráulicos inferiores a 1×10^{-7} m/s (1×10^{-5} cm/s), conforme especificações de Austin (1992) e Daniel e Koerner (1993). Porém, não atende as prescrições para camadas de base de aterros de RSU (1×10^{-6} cm/s), conforme indica a NBR 13896 (ABNT, 1997).

Figura 8 – Condutividade hidráulica *versus* volume percolado.



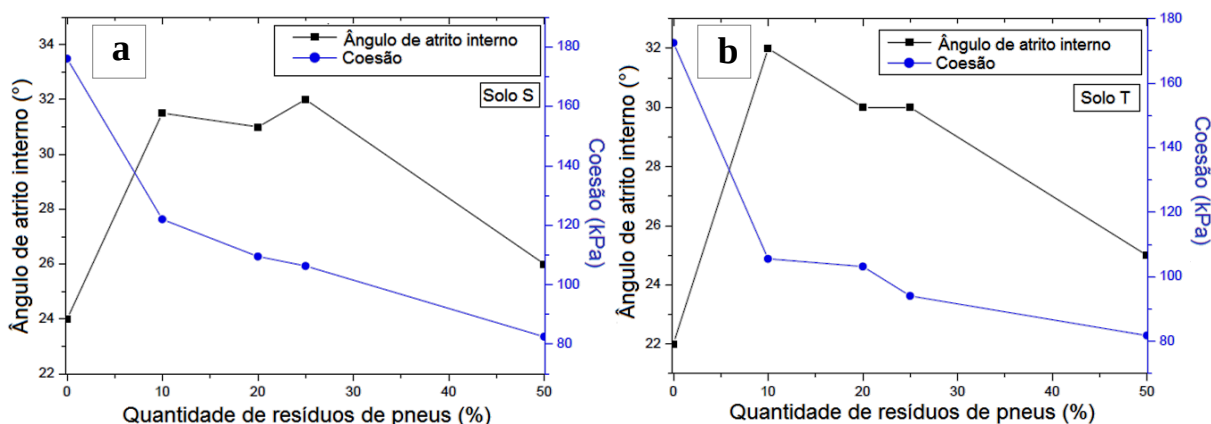
Fonte: Olandosky Neto (2013).

Em estudo realizado por Sellaf *et al.* (2014), analisou-se a influência da inclusão de desbastes de pneus inservíveis nas propriedades, sobretudo as mecânicas, de dois tipos de solos: sedimentos dragados de uma barragem (solo S) e um solo vulcânico (solo T). As misturas foram preparadas nos teores de 10, 20, 25 e 50%. Os ensaios de cisalhamento direto, cuja caixa possui seção transversal de 60 x 60 mm e altura de 50,8 mm, foram realizados sob tensões de 100, 200 e 300 kPa para os dois tipos de solo.

Os resultados indicaram uma expressiva redução da coesão para ambos os solos, à medida que a quantidade de resíduos de pneus aumentava, e uma oscilação no ângulo de atrito entre as

misturas com o acréscimo do teor de resíduos de pneus, demonstrando um comportamento não linear, mas com um pico no teor de 10%, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Coesão e ângulo de atrito em função da quantidade de resíduos de pneus para o solo S (a) e solo T (b).



Fonte: Sellaf *et al.* (2014).

O estudo de Jaramillo e Casagrande (2016) analisou a influência de fibras de pneus, de comprimento médio igual a 10 mm, no coeficiente hidráulico de uma areia, tomando-se como base o método de permeabilidade à carga constante. Foram preparadas misturas com teores de 5 e 10% em relação ao peso do solo seco. As autoras observaram que a condutividade hidráulica da areia aumenta, porém discretamente, visto que os valores de permeabilidade obtidos apresentam-se na mesma ordem de grandeza, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de condutividade hidráulica de uma areia em diferentes teores de inserção de fibras de pneus.

Teor de fibra de borracha (%)	Condutividade hidráulica (m/s)
0	$2,02 \times 10^{-5}$
5	$2,11 \times 10^{-5}$
10	$4,65 \times 10^{-5}$

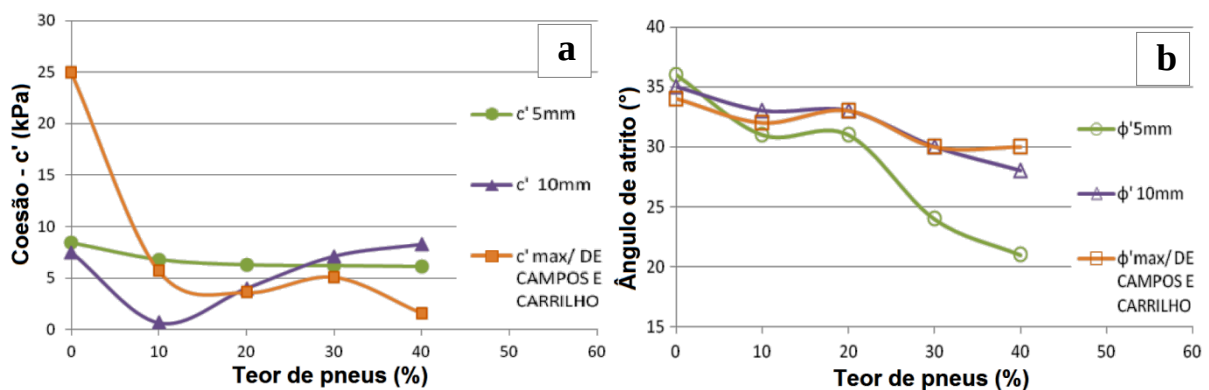
Fonte: Jaramillo e Casagrande (2016).

Macedo (2016) investigou as propriedades mecânicas de misturas de desbastes de pneus, com comprimentos que variam de 0,1 a 27 mm, e um solo areno-argiloso, nas proporções de 10, 20, 30 e 40% de substituição por meio de ensaios de cisalhamento direto convencionais (100 x 100 x 40 mm), realizados sob as tensões de 50, 100, 150 e 200 kPa.

Com o intuito de analisar o efeito da mobilização das fibras dentro da matriz do solo, a autora apresentou os valores de coesão e ângulo de atrito do solo e das misturas solo-pneu para a resistência máxima, conforme critério de De Campos e Carrillo (1995), e para diferentes níveis de deslocamento (5 e 10 mm). A variação dos parâmetros supracitados com a adição de resíduos de pneus pode ser observada na Figura 10.

Macedo (2016) considerou que, dentre as misturas de solo-pneu investigadas, a introdução de até 20% de resíduos de pneus inservíveis foram as inserções que obtiveram os melhores parâmetros de resistência, sendo adequadas para o emprego em estruturas que necessitem absorver maiores deslocamentos.

Figura 10 – Coesão (a) e ângulo de atrito (b) em diferentes teores de inserção de resíduos de pneus, para resistência máxima e deslocamentos de 5 e 10 mm.

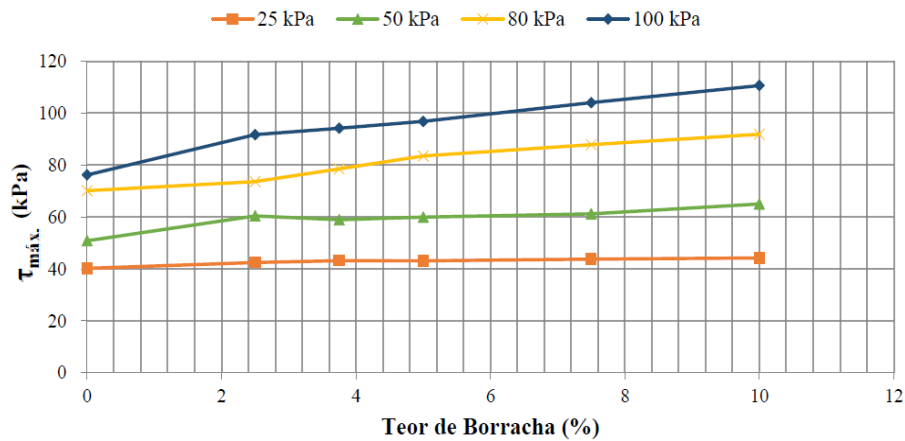


Fonte: Macedo (2016).

Moreno (2016) realizou em seu trabalho ensaios de cisalhamento direto em média escala (300 x 300 mm) com o intuito de analisar a resposta mecânica de misturas de solo e borracha triturada de pneus usados (tamanho médio de 20 mm), nos teores de 2,5, 3,75, 5, 7,5 e 10%, submetidas as tensões de 25, 50, 80 e 100 kPa, confrontando os resultados com os dos materiais de origem.

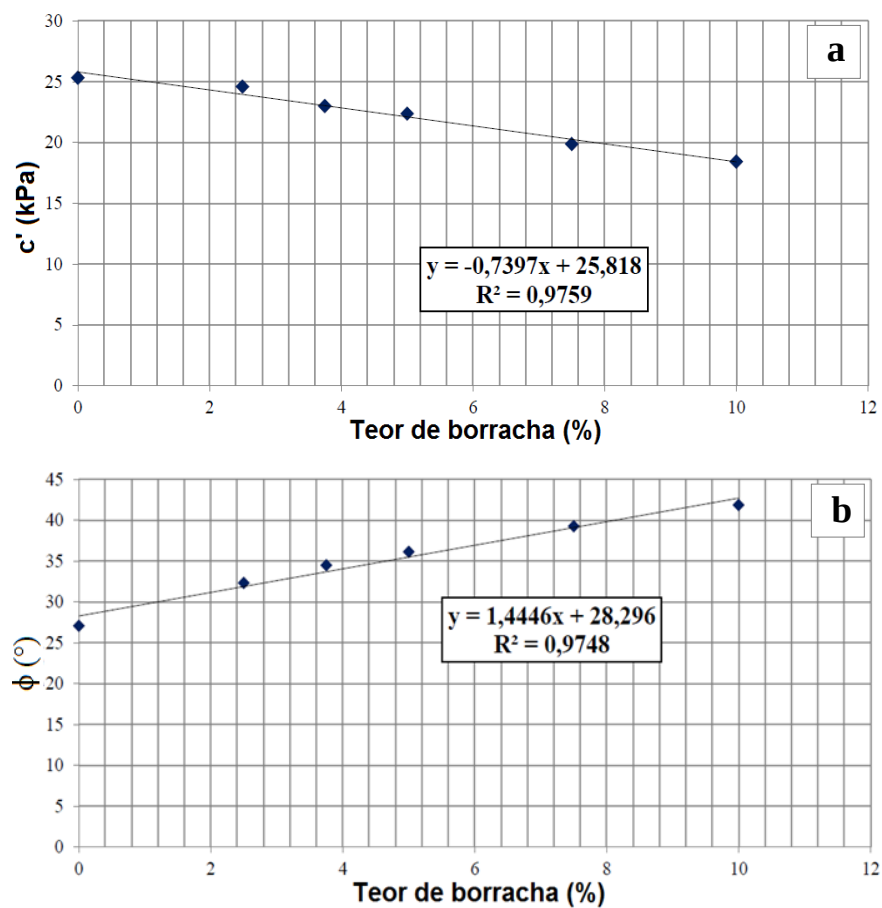
Os resultados apontaram um acréscimo da tensão cisalhante à medida que o teor de resíduos triturados de pneus aumenta, como mostra a Figura 11. Com relação ao efeito da adição de resíduos de pneus na coesão e no ângulo de atrito do solo, verificou-se que este parâmetro sofreu um aumento, enquanto que aquele demonstrou uma redução, Figura 12.

Figura 11 – Variação da tensão cisalhante máxima com o aumento do teor de resíduos de pneus.



Fonte: Moreno (2016).

Figura 12 – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) com a adição de resíduos de pneus.



Fonte: Moreno (2016).

No Quadro 4 é apresentada uma síntese com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e permeabilidade dos principais estudos abordados sobre resíduos de pneus, dando-se ênfase ao tipo de solo e os percentuais de resíduo empregados nas misturas.

Quadro 4 – Resumo das principais pesquisas com resíduos de pneus apresentadas. (continua)

Referência	Tipo de solo	Resíduo		Parâmetros		
		Percentual (%)	Comprimento (mm)	c* (kPa)	ϕ^* (°)	k (m/s)
Edinçliler e Ayhan (2010)	Areia	0	-	0	34,2	-
		10	8 a 10	16,5	29,8	-
			10 a 50	11,5	37,4	-
		20	8 a 10	13,9	32,4	-
			10 a 50	2,2	45,4	-
		30	8 a 10	17,8	25,2	-
			10 a 50	13,4	32	-
Franco (2012)	Areia argilosa	0	1,6**	8,05	31	$1,05 \times 10^{-8}$
		10		7,89	35	$1,50 \times 10^{-5}$
		20		11,77	33	$1,20 \times 10^{-4}$
		40		32,09	34	$1,40 \times 10^{-4}$
		50		15,51	32	$1,60 \times 10^{-4}$
Olandosky Neto (2013)	Silte arenoso	0	0,7	-	-	$3,89 \times 10^{-8}$
		20		-	-	$2,17 \times 10^{-8}$
Sellaf <i>et al.</i> (2014)	Silte (solo S)	0	7**	33,5	24	-
		10		27,5	31,5	-
		20		26,2	31	-
		25		26	32	-
		50		23,5	26	-
	Turfa (solo T)	0	7**	32,2	22	-
		10		24,8	32	-
		20		24,5	30	-
		25		23,5	30	-
		50		22,5	25	-
Jaramillo e Casagrande (2016)	Areia	0	10**	-	-	$2,02 \times 10^{-5}$
		5		-	-	$2,11 \times 10^{-5}$
		10		-	-	$4,65 \times 10^{-5}$
Moreno (2016)	Argila	0	20**	25	27	-
		2,5		25	32	-
		3,75		23	35	-
		5		22	36	-
		7,5		20	39	-
		10		18	42	-

Onde: (*) – parâmetros determinados para a resistência de ruptura; (**) – tamanho médio.

Quadro 4 – Resumo das principais pesquisas com resíduos de pneus apresentadas. (conclusão)

Referência	Tipo de solo	Resíduo		Parâmetros		
		Percentual (%)	Comprimento (mm)	c* (kPa)	ϕ^* (°)	k (m/s)
Macedo (2016)	Areia argilosa	0	0,1 a 27	25	34	-
		10		5,7	32	-
		20		3,6	33	-
		30		5,1	30	-
		40		1,6	30	-

Onde: (*) – parâmetros determinados para a resistência de ruptura; (**) – tamanho médio.

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se, com base no Quadro 4, a possibilidade de associação dos resíduos de pneus a diversos tipos de solos. De forma geral, há a melhoria dos parâmetros de resistência dos solos, sendo mais evidente a atuação dos resíduos com maiores comprimentos, em comparação com os resíduos de menores dimensões. Verifica-se ainda o aumento do coeficiente hidráulico dos solos com a inserção dos resíduos de pneus.

2.5.2 Melhoramento de solos com RCD

Diversos fatores podem diminuir a resistência dos solos e estimular, por exemplo, os escorregamentos, a citar, infiltração de águas pluviais, vazamento de águas servidas, cravação de estacas, intemperismo, entre outras (LEROUEIL, 2001). Diante deste tipo de problema, existem métodos que oferecem a melhoria do desempenho dos solos com a utilização de agregados, sendo-lhes atribuídas características resistentes.

De acordo com Fang (1991), ao preencher os vazios existentes na estrutura do solo com agregados, a sua capacidade de carga é modificada, caracterizando este caso como uma estabilização granular – uma associação entre os métodos de estabilização física e química.

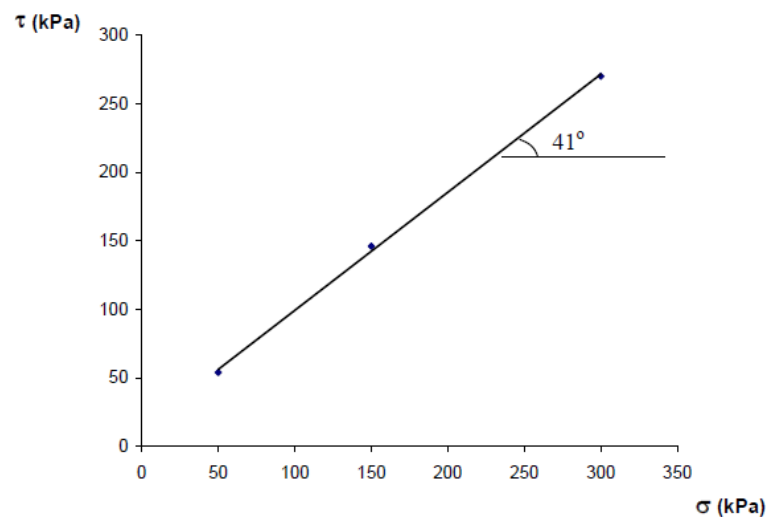
Os agregados reciclados de RCD têm sido empregados em diversas áreas na engenharia, inclusive no reforço de solos, por meio de sua estabilização granulométrica, proporcionando a estes menores deformações e melhorias na capacidade de suporte, como é o caso do estudo de Ferreira e Tomé (2011), que analisaram a utilização de agregados provenientes de RCD como alternativa de melhoramento em um solo de basalto. Os autores empregaram uma camada do

novo material compactado na base de fundações superficiais, obtendo como resultado o aumento da capacidade de carga e redução do recalque do solo que se encontrava na base da fundação.

Santos (2007) avaliou a aplicação de cinco amostras de agregados reciclados de RCD em estruturas de solo reforçado, como material de preenchimento, sendo para tal realizados ensaios de resistência ao cisalhamento de grandes dimensões (500 x 500 x 500 mm), sob tensões de 50, 150 e 300 kPa. A Figura 13 ilustra a envoltória de resistência da amostra de agregado reciclado de RCD obtido na coleta de nº 5 (RCD-R 05).

O autor apresenta, além do ângulo de atrito da amostra RCD-R 05 ($\phi = 41^\circ$), os valores deste parâmetro para outros dois materiais tomados como referência (solo e areia), sendo $\phi = 33^\circ$ para o solo e $\phi = 32^\circ$ para a areia. Estes resultados indicam que o agregado reciclado de RCD possui potencial de aplicação como material de construção, visto o seu bom desempenho mecânico.

Figura 13 – Envoltória de resistência da amostra RCD-R 05.



Fonte: Santos (2007).

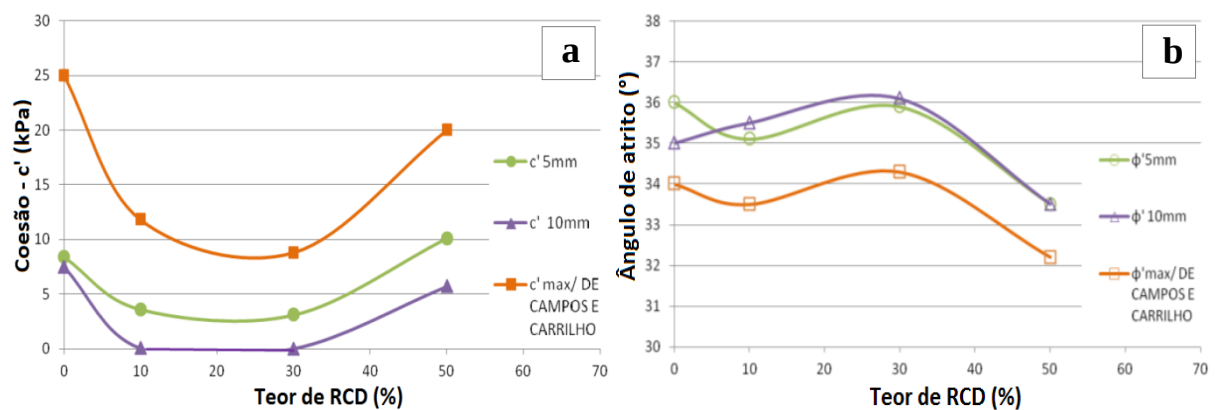
No estudo de Dias (2014) foram utilizados agregados reciclados de RCD em mistura com um solo tropical, na proporção de 50%, visando analisar a viabilidade técnica deste novo material em sistemas de cobertura de aterro sanitário. Para tal análise, ensaios de cisalhamento direto convencionais (100 x 100 x 40 mm) na condição saturada, sob tensões confinantes de 25, 100, 200 e 400 kPa, e de permeabilidade à carga variável foram realizados.

A autora comenta que a mistura de solo com 50% de agregado reciclado de RCD apresentou valores maiores de tensões cisalhantes em relação ao solo individualmente. Foi observado ainda um aumento do valor de coesão do solo ao ser inserido a sua matriz o RCD, já o ângulo de atrito não sofreu alterações. No que se refere ao coeficiente hidráulico dos materiais, tanto o solo quanto a mistura podem ser empregados em camadas de cobertura de aterros sanitários, porém o RCD não atendeu aos requisitos para esta utilização.

A inserção de agregados como material de reforço em solos também foi investigada por Macedo (2016). A autora utilizou agregados reciclados provenientes de RCD como adição em um solo areno-argiloso, nas proporções de 10, 30 e 50%, com o intuito de melhorar seus parâmetros de resistência, analisados por meio de ensaios de cisalhamento direto convencionais (100 x 100 x 40 mm), realizados sob tensões de 50, 100, 150 e 200 kPa.

A coesão e o ângulo de atrito das amostras investigadas pela autora foram determinados para a resistência de ruptura, conforme critério de De Campos e Carrillo (1995), e para deslocamentos de 5 e 10 mm, sendo seus comportamentos, à medida que o teor de agregado reciclado aumenta, ilustrados na Figura 14.

Figura 14 – Coesão (a) e ângulo de atrito (b) para os diferentes teores de agregado reciclado de RCD.



Fonte: Macedo (2016).

Macedo (2016) observou uma redução da coesão até a proporção de 30% de inserção de agregado reciclado, sofrendo em seguida um acréscimo, enquanto que os ângulos de atrito das amostras demonstraram valores próximos, com exceção da mistura com 50% de agregado reciclado de RCD, que apresentou o menor valor dentre as misturas. Diante dos resultados, a

autora considerou que a proporção de 30% adicionada ao solo foi a ideal, pois este teor indicou resultados mais satisfatórios dentre todas as inserções.

Um resumo com os resultados encontrados para as pesquisas com RCD é apresentado no Quadro 5, sendo expostas informações a cerca dos tipos de materiais investigados, parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) e coeficientes hidráulicos obtidos para cada material.

Quadro 5 – Resumo das pesquisas com RCD apresentadas.

Referência	Material	Parâmetros		
		c* (kPa)	ϕ^* (°)	k (m/s)
Santos (2007)	Solo	-	33	-
	Areia	-	32	-
	RCD	13	41	-
Dias (2014)	Solo	24,49	32	$5,98 \times 10^{-8}$
	RCD	14,03	41	$2,79 \times 10^{-7}$
	Solo + 50%RCD	29,42	32	$8,69 \times 10^{-8}$
Macedo (2016)	Solo	25	34	-
	Solo + 10%RCD	11,8	33,5	-
	Solo + 30%RCD	8,8	34,4	-
	Solo + 50%RCD	20	32,2	-

Onde: (*) – parâmetros determinados para a resistência de ruptura.

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que a inserção de agregados reciclados de RCD ao solo pode modificar de forma positiva seu comportamento mecânico, porém as mudanças ocasionadas são pouco expressivas. No que se refere à permeabilidade dos materiais, percebe-se uma baixa variação entre os seus coeficientes hidráulicos, indicando que as características hidráulicas dos RCD são semelhantes as dos agregados naturais.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais investigados e o procedimento metodológico empregado na pesquisa, a fim de se atingir os objetivos traçados anteriormente. Este estudo dá continuidade aos trabalhos desenvolvidos por Moura *et al.* (2012) e Macedo (2016), que apresentaram uma análise acerca das propriedades geomecânicas dos desbastes de pneus inservíveis e dos agregados miúdos de RCD reciclados em conjunto com um solo da encosta do Alto do Reservatório, na Região Metropolitana do Recife (RMR).

3.1 Procedimento metodológico

A pesquisa está dividida em 5 etapas. A primeira contempla a coleta do solo e dos resíduos empregados na pesquisa, bem como a caracterização física destes materiais a partir de ensaios executados em laboratório, conforme as normas da ABNT.

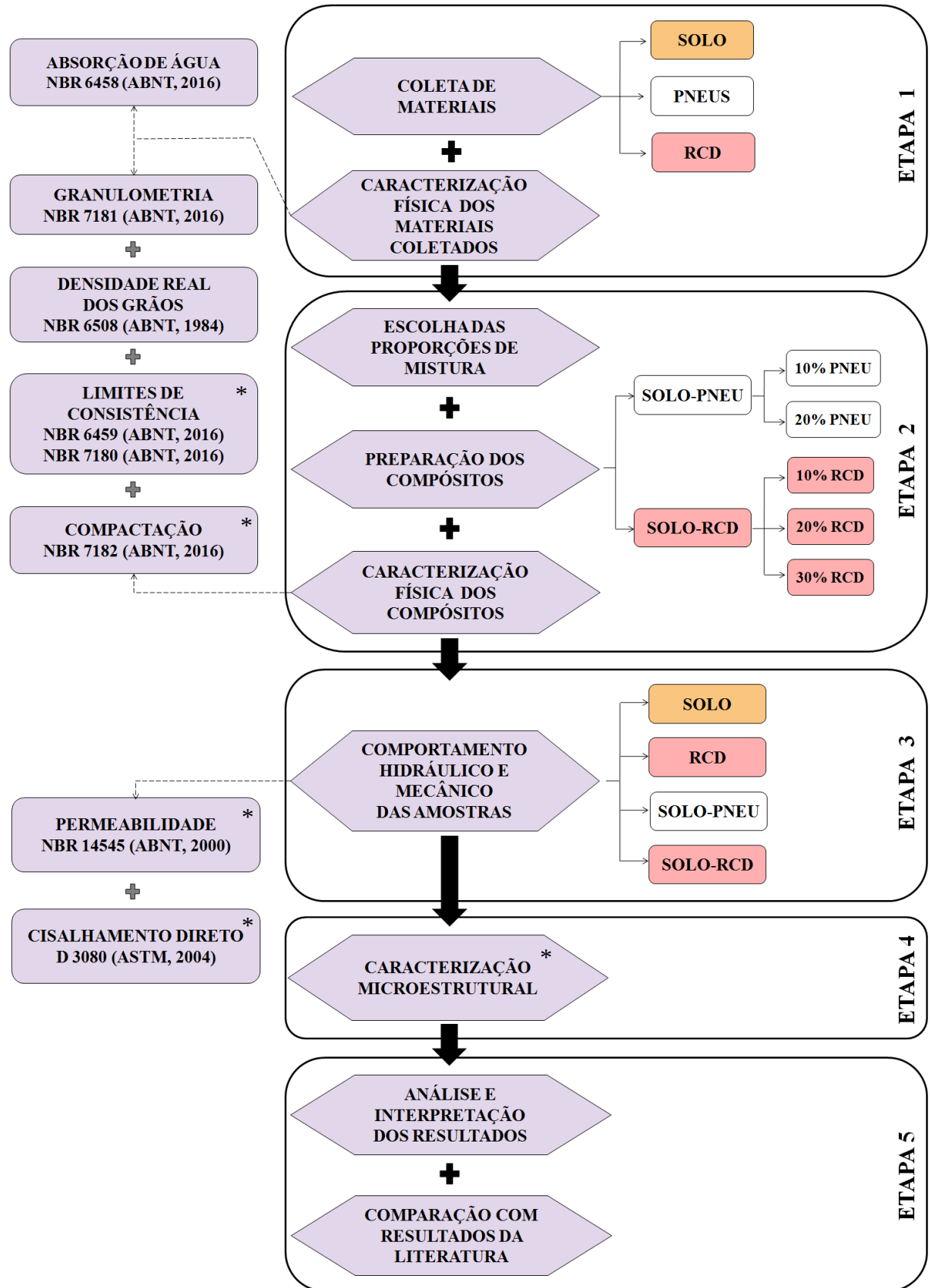
A segunda fase está direcionada a escolha dos percentuais de resíduos a serem incorporados ao solo, com base nos estudos de Macedo (2016), a preparação das misturas definidas e a caracterização dos compósitos formados.

Na terceira etapa são realizados ensaios hidráulicos e mecânicos nos materiais investigados (nestes os resíduos de pneus não foram ensaiados). A quarta etapa inclui a caracterização microestrutural do solo, agregado reciclado de RCD e compósitos estudados, a partir do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Na quinta e última etapa são desenvolvidas a análise e interpretação dos resultados dos ensaios de laboratório realizados, sendo estes confrontados com a literatura.

O procedimento metodológico adotado pode ser visualizado na Figura 15, que apresenta em fluxo todas as etapas a serem executadas.

Figura 15 – Procedimento metodológico adotado na pesquisa apresentado em fluxograma.



3.2 Materiais

3.2.1 Solo

O solo investigado nesta pesquisa foi coletado em um único dia no bairro de Nova Descoberta, em Recife-PE, numa encosta do Alto do Reservatório, Figura 16. O terreno desta localidade possui sedimentos não consolidados da Formação Barreiras, caracterizada por depósitos de areias grossas intercalados de areia fina e/ou argila, conforme descreve Pfaltzgraff (2007).

A área do Alto do reservatório é composta por três encostas: encosta Sul (S), que compreende o Córrego do Boleiro, Leste (E) e Noroeste (NW), voltada para a BR 101. A coleta do solo foi realizada na encosta noroeste, aproximadamente na meia encosta, como mostra o “croqui” da Figura 17.

O solo desta área foi escolhido por se tratar de um local de risco, caracterizado por uma intensa ocupação antrópica, com destaque para os cortes e aterros sem intervenção técnica pertinente, construções próximas a taludes quase verticais, irrigação do solo com águas servidas e remoção da vegetação primária, assim como pelos antecedentes de movimentos de massa, uma vez que o solo possui uma estrutura facilmente erodível devido a suas características granulométricas e origem mineralógica.

Foram obtidas amostras deformadas, em torno de 100 kg, recolhidas próximo da superfície do terreno, com auxílio de ferramentas manuais (pá e enxada). Vale destacar que antes da coleta foram removidos da superfície alguns centímetros de solo, de forma a evitar a retirada de material modificado.

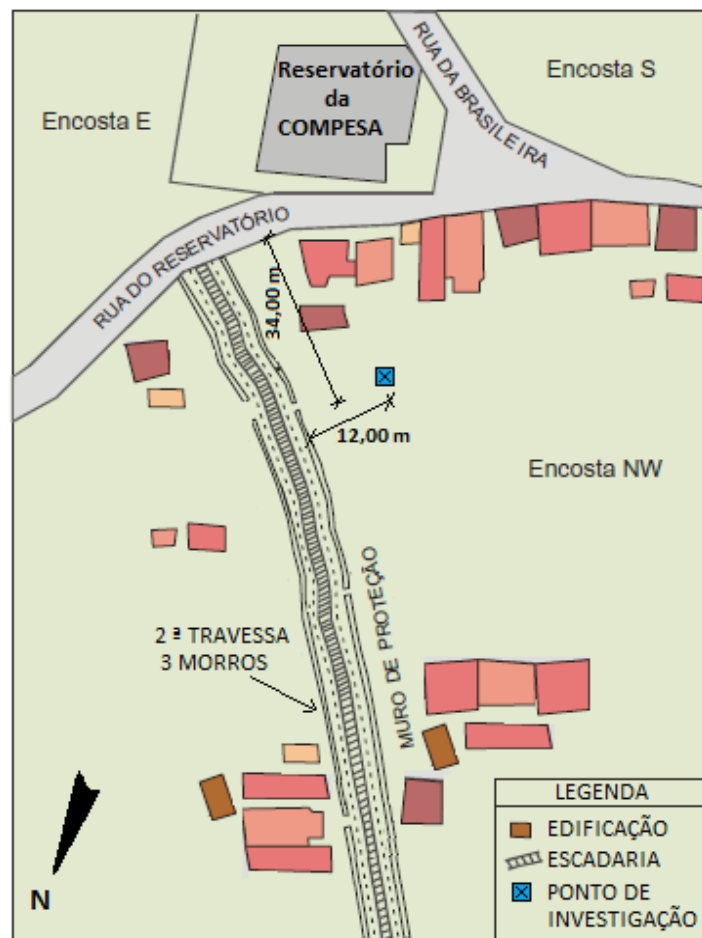
A amostra de solo coletada foi acondicionada em sacos plásticos para preservar o material fino, etiquetada e, em seguida, transportada até o Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC), da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE).

Figura 16 – Vista frontal da escadaria de acesso a encosta NW do Alto do Reservatório (a) e local de coleta do solo (b).



Fonte: arquivo pessoal.

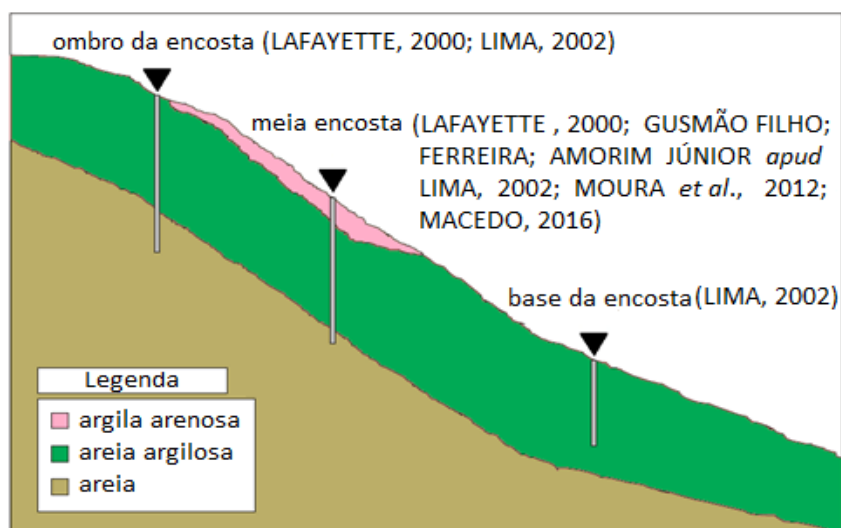
Figura 17 – Croqui da localização do ponto de coleta do solo.



Fonte: adaptado de Lima (2002).

Pesquisas anteriores investigaram o solo desta área, como por exemplo, os estudos de Lafayette (2000), Gusmão Filho; Ferreira e Amorim Júnior *apud* Lima (2002), Lima (2002), Moura *et al.* (2012) e Macedo (2016). Na Figura 18 podem ser observados os locais da encosta NW explorados e suas respectivas pesquisas.

Figura 18 – Perfil da encosta noroeste do Alto do Reservatório com os locais já estudados.



Fonte: adaptado de Lima (2002).

3.2.2 Resíduos de pneus

Os resíduos de pneus utilizados neste estudo, apresentados na Figura 19, denominam-se desbastes – resíduos em forma de pequenos filamentos, provenientes do processo de recauchutagem de pneus usados – e possuem comprimentos que variam de 0,1 a 37 mm. Os resíduos pneumáticos foram escolhidos por serem inertes quimicamente, pela possibilidade de aquisição na indústria de reforma de pneus e por serem de fácil manuseio.

Estes resíduos foram coletados por Macedo (2016) em uma empresa renovadora de pneus, no município de Jaboatão dos Guararapes-PE. A quantidade coletada foi de, aproximadamente, 80 kg, não existindo no material adquirido tiras de aço ou materiais têxteis, visto que foram retirados da camada superficial dos pneus.

Figura 19 – Resíduos de pneus coletados.



Fonte: arquivo pessoal.

3.2.3 Agregado reciclado de RCD

O agregado miúdo reciclado provém de uma usina de reciclagem, Figura 20, localizada no município de Camaragibe-PE, na Região Metropolitana do Recife, a cerca de 12 km da capital do estado.

Foram coletados cerca de 200 kg de material por Macedo (2016), com dimensões inferiores a 4,8 mm, recolhidos na própria pilha de saída do britador, Figura 21. A circunstância da coleta não permitiu que se conhecesse a origem (composição gravimétrica) do material coletado, uma vez que este já havia sido beneficiado. O agregado reciclado foi posto em sacos plásticos para evitar a perda de material fino, etiquetado e transportado até o LACC, da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE), onde foi armazenado.

Figura 20 – Vista geral da usina de reciclagem, em Outubro de 2016 (a), e agregado miúdo de RCD reciclado (sem escala) (b).



Fonte: arquivo pessoal.

Figura 21 – Pilha de britagem (a) e agregado reciclado de RCD sendo coletado (b).



Fonte: Macedo (2016).

3.3 Preparação das amostras

Previamente à execução do programa experimental, todos os materiais foram secos ao ar, conforme NBR 6457 (ABNT, 2016). Em seguida, foram preparadas misturas de solo juntamente com resíduos de pneus e agregados miúdos reciclados de RCD em diferentes proporções de substituição.

Os compósitos que incluem os resíduos de pneus foram preparados nos teores de 10 e 20%, enquanto que aqueles com o agregado reciclado de RCD foram elaborados nos percentuais de 10, 20 e 30%, sendo todas as incorporações feitas em relação ao peso do solo seco.

A escolha dos teores levou em consideração a pesquisa de Macedo (2016), que obteve melhores resultados mecânicos com a inserção de até 20% de resíduos de pneus e até 30% de agregado reciclado de RCD misturados a um solo areno-argiloso. As nomenclaturas utilizadas para identificar as misturas de solo-resíduo investigadas encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Nomenclatura adotada para as misturas estudadas.

Mistura	Solo (%)	Resíduos de pneus (%)	Agregado reciclado de RCD (%)	Nomenclatura
1	90	10	-	S90/P10
2	80	20	-	S80/P20
3	90	-	10	S90/R10
4	80	-	20	S80/R20
5	70	-	30	S70/R30

Onde: “S” representa a parcela de solo, “P” indica a presença de resíduos de pneus e “R” se refere ao agregado reciclado de RCD.

3.4 Programa experimental

Como a presente pesquisa mostra a incorporação de resíduos de pneus inservíveis e agregados miúdos reciclados de RCD em mistura com um solo, para que se possa conhecer as propriedades destes materiais e comparar o seu desempenho em relação ao solo isoladamente, as amostras de resíduo e misturas solo-resíduo foram submetidas aos ensaios de caracterização física, condutividade hidráulica e comportamento mecânico dos agregados minerais, uma vez que ainda não há normatização específica relacionada à caracterização dos resíduos empregados neste estudo.

Todos os ensaios de caracterização, inclusive os de comportamento hidráulico e mecânico, foram realizados nas dependências do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE), enquanto que os de microscopia foram executados no laboratório de eletrônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da UFPE.

As determinações do teor de umidade nas amostras que envolvem os resíduos de pneus, tanto em mistura quanto isolados, foram feitas a temperatura de 50 °C, devido às limitações dos resíduos pneumáticos ao serem submetidos a temperaturas mais elevadas. As amostras foram consideradas completamente secas quando não houvesse diferença entre duas pesagens no intervalo de 24 horas, caracterizando a estabilização da umidade. Esta situação foi verificada de forma unânime em 48 horas de permanência das amostras na estufa, conforme procedimento adotado por Macedo (2016).

3.4.1 Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização realizados na pesquisa seguiram os procedimentos contidos nas normas indicadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Ensaios de caracterização realizados neste estudo.

Ensaio	Norma
Absorção	NBR 6458 (ABNT, 2016b)
Limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016c)
Densidade real dos grãos	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016d)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016e)
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016f)

O ensaio de granulometria foi executado com o uso de defloculante em todas as amostras investigadas, salvo com os resíduos de pneus, que não sofrem influência deste agente. Com o intuito de analisar a granulometria no estado natural (condições de campo) e verificar as possíveis interferências nas curvas granulométricas do solo e do agregado reciclado de RCD, o ensaio também foi feito sem o defloculante nestas amostras.

A análise granulométrica foi realizada em todas as amostras em sua forma inicial e pós-compactação, exceto no que diz respeito aos resíduos de pneus, que não passaram pelo processo de compactação. A análise da quebra dos grãos provocada pela compactação também foi um aspecto estudado por diversos autores, como Santos (2007), Araújo Júnior (2010), Proença (2012), Macedo (2013) e Santos Neto (2015).

No ensaio de densidade real dos grãos fez-se uso do método do picnômetro e da bomba a vácuo, sendo realizados quatro ensaios para cada amostra, obtendo-se a densidade pela média destas quatro determinações. O picnômetro utilizado para a realização do ensaio em todas as amostras foi o de 500 ml, pois os resíduos de pneus, devido ao seu elevado volume, não permitiram que a massa ficasse abaixo da linha d'água sem que esta estivesse próxima do gargalo nos picnômetros menores, o que poderia ocasionar na sucção de partículas de pneus durante a retirada do ar pela bomba a vácuo.

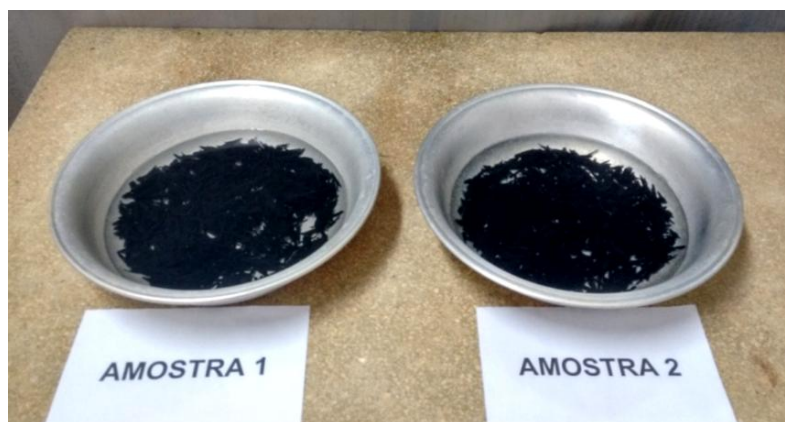
A determinação dos limites de Atterberg foi realizada para todas as amostras estudadas, excetuando-se as amostras de resíduos de pneus individualmente, visto que este material não interage com a água.

Devido aos resíduos de pneus possuírem características de absorção pouco investigadas, esta será uma das propriedades analisadas neste estudo, pois se entende que a capacidade de retenção de água pelos materiais interfere na quantidade de água presente nas misturas solo-resíduo e, conseqüentemente, no tempo de saturação do compósito formado.

O ensaio de absorção de água foi realizado apenas para os resíduos de pneus, pois o agregado reciclado de RCD não se enquadra nos critérios de execução prescritos em norma, isto é, tem sua massa passada integralmente na peneira de nº 4 (4,8 mm), quando se faz necessário que o material possua grãos com dimensões superiores a 4,8 mm.

Para o ensaio de absorção foram preparadas duas amostras de resíduos de pneus, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a). Ambas as amostras foram retiradas do mesmo saco, possuíam pesos semelhantes e passaram por uma lavagem prévia na peneira de nº 4 para retirada do material mais fino. Em seguida, foram imersas em água destilada, como mostra a Figura 22, permanecendo nesta condição por um período de seis dias. Após este intervalo de tempo, as amostras foram encaminhadas para a estufa, à temperatura de 50 °C, obtendo-se sua massa seca no tempo de 48 horas.

Figura 22 – Amostras de resíduos de pneus submersas em água destilada para o ensaio de absorção.



Fonte: arquivo pessoal.

O teor de absorção de água das partículas retidas na peneira # 4,8 mm é calculado por meio da Equação 1. O valor de absorção dos resíduos de pneus foi obtido pela média da absorção das duas amostras de resíduos de pneus preparadas.

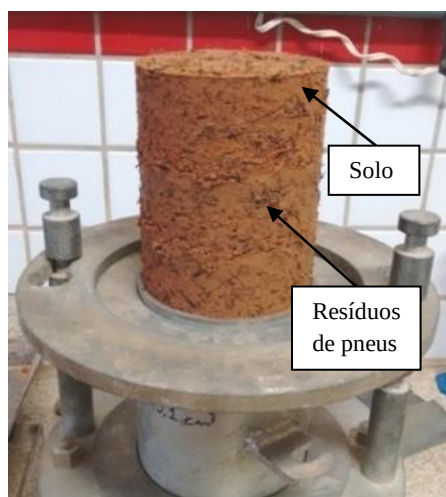
$$S' = [(M_h - M_s) / M_s] \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: S' – absorção de água, em %; M_h – massa da amostra na condição saturada, em g; M_s – massa da amostra seca, em g.

No que se refere aos ensaios de compactação, estes foram do tipo Proctor normal e com reuso de material, sendo executados nas amostras de solo, agregado reciclado de RCD e todas as misturas de solo-resíduo secas ao ar. Os resíduos de pneus separadamente não tiveram os parâmetros de compactação determinados, devido a sua característica de absorver pouca água, não existindo interação entre suas partículas (adesão), impossibilitando, assim, a execução do ensaio.

Ao longo da execução dos ensaios de compactação nas misturas solo-pneu, notou-se uma resistência a compactação nestas amostras, sendo maior a relutância à medida que se aumentava o teor de resíduos de pneus, indicando que o resíduo tem a capacidade de absorver parte da energia de compactação aplicada. Apesar desta circunstância, conseguiu-se compactar corpos de prova bem estruturados, como mostra a Figura 23, avaliados por meio de exame visual após a desmoldagem.

Figura 23 – Corpo de prova da mistura de solo com 10% de resíduos de pneus, após a desmoldagem.



Fonte: arquivo pessoal.

Além dos parâmetros convencionais de compactação, foi possível analisar a interferência do ensaio nas curvas granulométricas dos materiais estudados, sendo comparadas às curvas originais com as de pós-compactação. Este aspecto torna-se importante no que diz respeito a durabilidade dos materiais perante as solicitações impostas pela obra ou até mesmo durante o processo de construção.

3.4.2 Ensaios de permeabilidade

Embora o solo, o agregado miúdo reciclado de RCD e as misturas solo-resíduo desta pesquisa apresentem, de modo geral, características de materiais arenosos, a obtenção dos seus parâmetros hidráulicos segue as recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2000), visto que mais do que 10% dos grãos das amostras passa na peneira de abertura 0,075 mm. Este ensaio não foi realizado para os resíduos de pneus isoladamente, por não poderem ser compactados nas condições do ensaio de Proctor normal.

Para a análise do comportamento hidráulico dos materiais investigados foram executados três ensaios para cada amostra, sendo os parâmetros obtidos pela média dos três ensaios.

A água utilizada foi a tratada, proveniente da rede de abastecimento pública, comumente utilizada como permeante neste tipo de ensaio, além de ser o líquido recomendado pela NBR 14545 (ABNT, 2000).

Todos os ensaios foram realizados em local com temperatura controlada, pois a condutividade hidráulica (k) dos solos varia com a temperatura, uma vez que este parâmetro influencia no peso específico e na viscosidade do líquido permeante. Segundo Daniel e Trautwein (1994), quando o fluido é a água existe alteração, em torno de 3%, no valor de k para variação de cada grau de temperatura.

3.4.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Os ensaios de permeabilidade foram realizados em corpos de prova compactados no peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de cada material (solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-resíduo), obtidos nos ensaios de compactação, sendo as amostras então preparadas no teor de umidade correspondente às suas umidades ótimas. Durante o

processo de moldagem uma pequena porção das amostras foi separada para a determinação da umidade, sendo esta considerada a umidade do corpo de prova.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada por compactação no cilindro pequeno do Proctor normal. Ao final deste procedimento, os corpos de prova foram extraídos e transferidos para a câmara do permeâmetro de carga variável. A montagem dos permeâmetros foi realizada de acordo com o método de preparo (método B) descrito na NBR 14545 (ABNT, 2000), cujas etapas podem ser visualizadas na Figura 24.

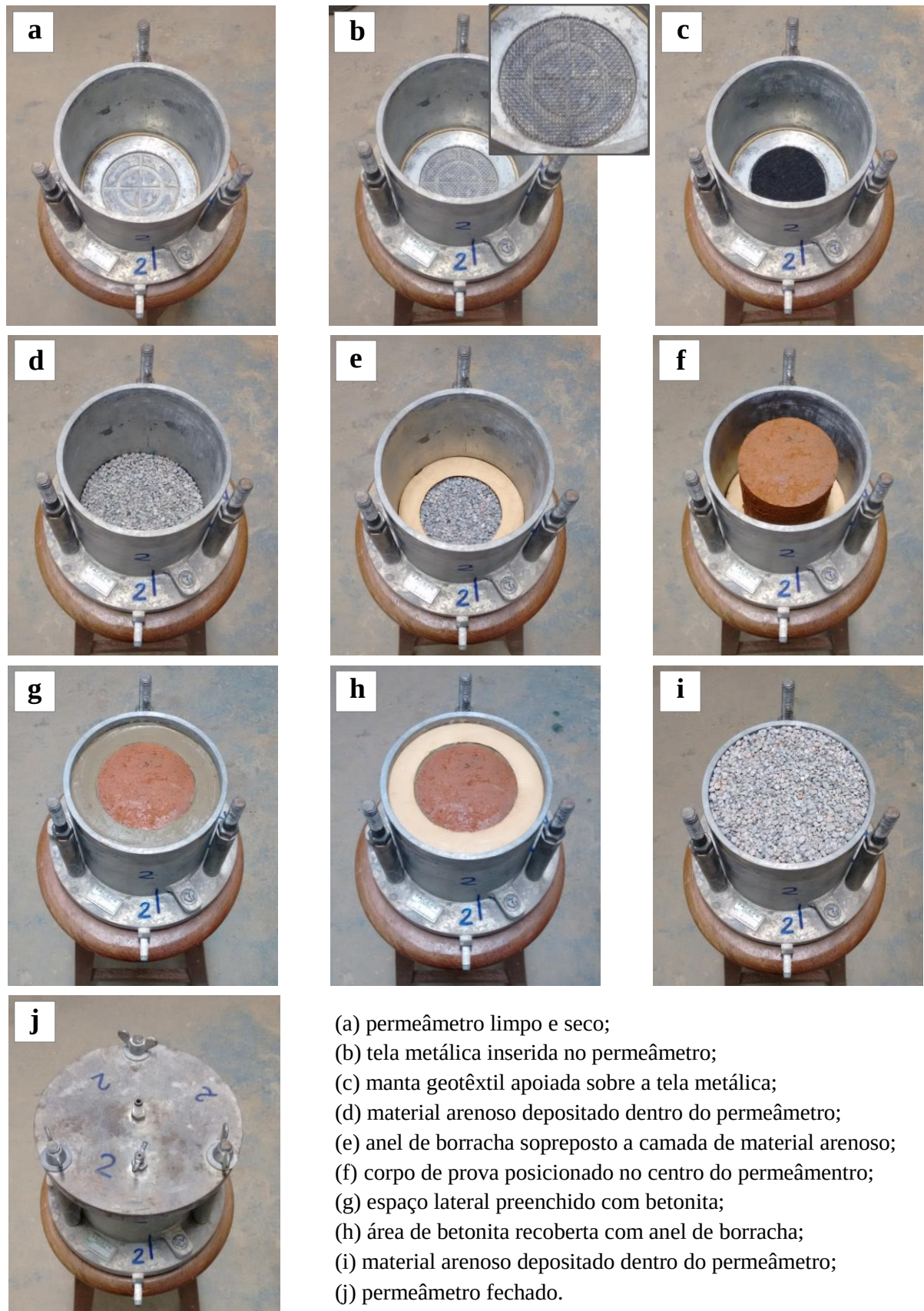
Dentro do permeâmetro limpo e seco (Figura 24a) colocava-se uma tela metálica (Figura 24b), sobre a qual era apoiada uma manta geotextil (Figura 24c). Ambos os itens (tela e manta) possuíam dimensões suficientes para os seus encaixes na depressão que compreende as canaletas de escoamento, visando evitar o carreamento de finos do material a ser ensaiado e o entupimento das canaletas subjacentes.

Acima da membrana geotextil depositava-se uma camada com cerca de 1 cm de material arenoso, conforme recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2000) (Figura 24d), sobreposta por um anel de borracha (Figura 24e).

Em seguida, posicionava-se o corpo de prova, que foi previamente moldado no cilindro pequeno do ensaio de Proctor normal e extraído, no centro do permeâmetro (Figura 24f). O espaço entre a parede do permeâmetro de carga variável e o corpo de prova foi preenchido com camadas de pasta de betonita e cimento, na proporção de 1:1 (Figura 24g), com o intuito de evitar a ocorrência de caminhos preferenciais da água pelas laterais.

Após esta etapa, recobria-se a área formada pela betonita com um anel de borracha (Figura 24h), evitando o seu contato com a camada sobrejacente. O espaço entre o corpo de prova e a tampa superior da câmara do permeâmetro foi completado com material arenoso (Figura 24i). Por fim, o conjunto era fechado com a tampa superior do permeâmetro (Figura 24j) e encaminhado para a etapa de saturação.

Figura 24 – Etapas de montagem dos permeâmetros para o ensaio de permeabilidade a carga variável.



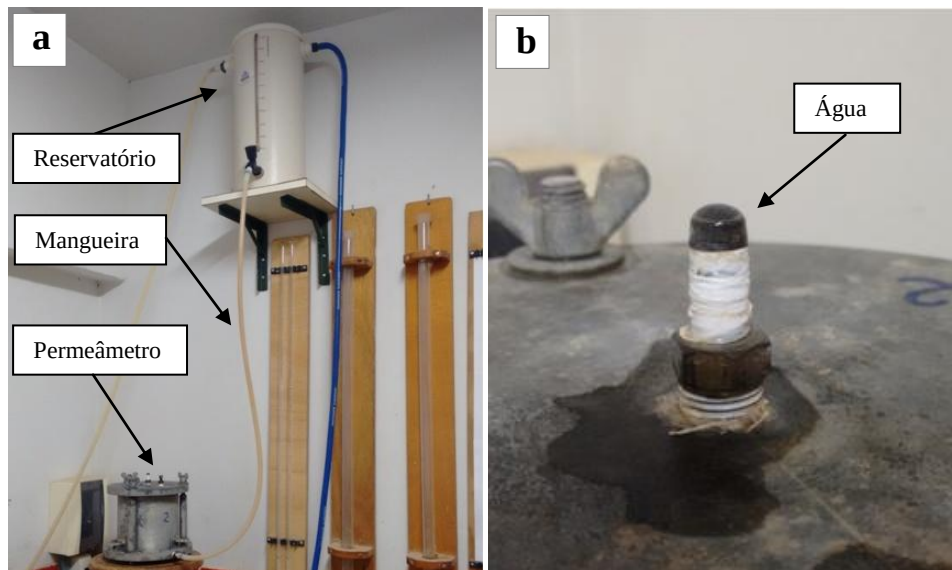
Fonte: arquivo pessoal.

3.4.2.2 Etapa de saturação

Nesta etapa, o orifício existente na tampa inferior dos permeâmetros era ligado a um reservatório, contendo água da rede de abastecimento, por uma mangueira, Figura 25a, para que a água percolasse o corpo de prova de forma ascendente dentro do permeâmetro até a sua completa saturação.

Esta fase foi considerada encerrada após 72 horas do aparecimento de água no orifício da tampa superior do permeâmetro, Figura 25b, não sendo verificada inclusive a existência de bolhas de ar misturadas à água, garantindo, assim, que os corpos de prova estivessem mais próximos possível da condição de saturação.

Figura 25 – Reservatório utilizado na fase de saturação (a) e surgimento de água no orifício da tampa superior do permeâmetro (b).



Fonte: arquivo pessoal.

3.4.2.3 Montagem do sistema e realização das medições

Após a etapa de saturação, o permeâmetro era colocado em um recipiente provido de extravasor, que permitia o controle do nível da carga hidráulica durante as medições, e imerso em água. Em seguida, era acoplada uma mangueira ao orifício da tampa superior do permeâmetro, e esta por sua vez ligada a uma bureta de vidro graduada, utilizada para a leitura das cargas hidráulicas na etapa das medições. As medições eram finalizadas após a

obtenção de, no mínimo, quatro valores próximos que não apresentassem tendência de aumento ou redução.

3.4.3 Ensaios de cisalhamento direto

Foram executados ensaios de cisalhamento direto não inundados e na condição saturada, com o objetivo de analisar o comportamento dos materiais investigados em diferentes níveis de umidade. Todo o procedimento de ensaio foi conduzido de acordo com a norma D 3080 (ASTM, 2004).

Os ensaios não inundados foram realizados para as amostras de solo, agregado reciclado de RCD e todas as misturas solo-resíduo, enquanto que na condição saturada optou-se por executar ensaios nas amostras de solo e misturas com os maiores teores de incorporação dos dois tipos de resíduos utilizados na pesquisa (20% de resíduos de pneus e 30% de agregado de RCD). As amostras usadas nos ensaios de cisalhamento, tanto inundado quanto saturado, foram previamente passadas na peneira de nº 4, limitando assim o tamanho dos grãos.

Vale salientar que este tipo de ensaio não foi realizado para os resíduos de pneus puros, devido a impossibilidade de preparação deste material nas condições ótimas do ensaio de Proctor normal.

Após a realização dos ensaios de cisalhamento direto não inundado, foram colhidas amostras para analisar a estrutura microscópica dos materiais investigados, utilizando o MEV.

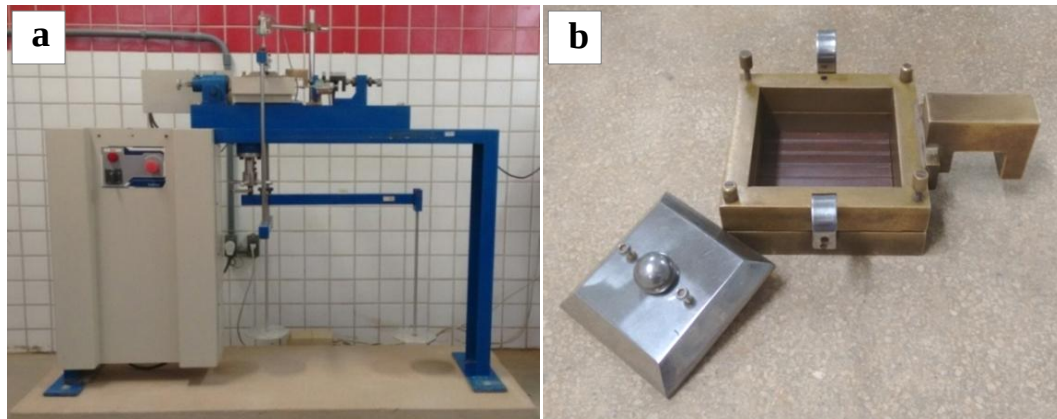
3.4.3.1 Equipamento e instrumentação

Para a determinação dos parâmetros de resistência das amostras compactadas de solo, agregado reciclado de RCD, misturas solo-pneu e solo-RCD realizou-se o ensaio de cisalhamento direto, cujo equipamento possui uma capacidade de 500 kgf e sensibilidade de 0,001 mm.

O equipamento apresenta ainda um sistema de carregamento por meio de peso em pendural, uma caixa de cisalhamento bipartida, a qual possui seção interna com cerca de 10000 mm² (100 x 100 mm), Figura 26, e monitoramento com 2 transdutores de deslocamento do tipo

LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), sendo um para medição do deslocamento vertical e outro para o deslocamento horizontal, assim como uma célula de carga para efetuar leituras de forças horizontais, que juntos formam um sistema de aquisição de dados.

Figura 26 – Prensa utilizada para o ensaio de cisalhamento direto (a) e caixa de cisalhamento bipartida (b).



Fonte: arquivo pessoal.

3.4.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados com base no conhecimento da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo das amostras, obtidos no ensaio de compactação. Após a preparação, as amostras foram inseridas em câmara úmida para melhor homogeneização durante 24 horas, sendo posteriormente moldadas para realização do ensaio.

A moldagem das amostras foi executada diretamente dentro da caixa de cisalhamento, em duas camadas iguais de 20 mm, mediante compactação estática em uma prensa hidráulica manual. Com a finalidade de promover uma maior interação entre as camadas, foi realizada uma leve escarificação antes da prensagem da última camada em todos os corpos de prova.

A etapa de moldagem foi controlada, pois houve a determinação da umidade no momento da montagem e anotadas as alturas e o peso após a prensagem de cada corpo de prova, para ser verificado ao final deste processo o atendimento dos seguintes requisitos:

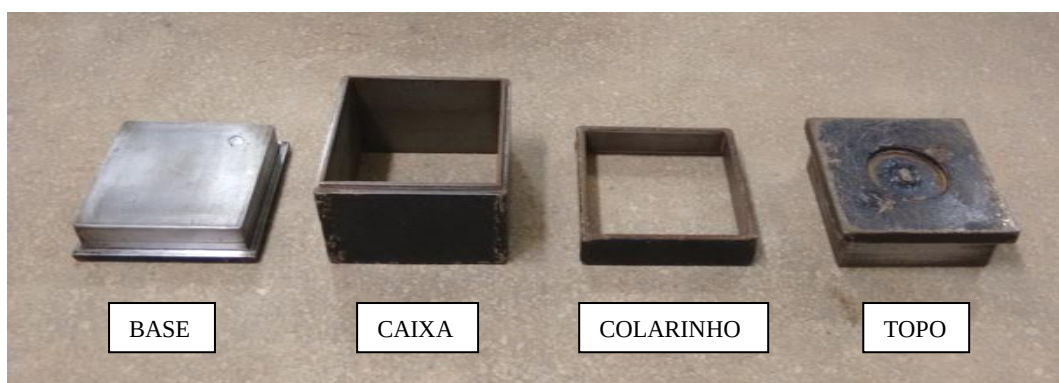
- Grau de compactação (GC) de $100\% \pm 1,0$, sendo este parâmetro obtido pelo peso específico aparente seco (γ_d) após a moldagem, dividido pelo $\gamma_{d \text{ máx}}$ advindo do ensaio de Proctor normal;

- Umidade correspondente a $w_{ótima} \pm 1,0\%$;
- Altura do corpo de prova igual a $40 \pm 0,5$ mm.

Caso os corpos de prova não atendessem tais exigências, estes eram descartados.

Para a moldagem dos corpos de prova das amostras de solo-pneu contou-se com o auxílio de um molde de aço, cujos elementos estão expostos na Figura 27. As características deste molde podem ser consultadas detalhadamente em Macedo (2016). A necessidade de sua confecção advém da dificuldade de moldagem das misturas solo-pneu, visto que os resíduos de pneus são volumosos. Ressalta-se que os resíduos de pneus foram misturados ao solo de forma aleatória para evitar o desenvolvimento de planos potenciais de fraqueza.

Figura 27 – Elementos constituintes do molde metálico.



Fonte: arquivo pessoal.

A fase de consolidação das amostras foi desenvolvida para as tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa, pela aplicação de forças normais à área dos corpos de prova, tanto nos ensaios não inundados quanto nos saturados. Esta fase teve duração de 1 hora, período suficiente para que as deformações fossem praticamente constantes, sendo estas acompanhadas através do sensor de leitura vertical do equipamento de cisalhamento.

Após a fase de consolidação, o processo de cisalhamento propriamente dito dos corpos de prova era iniciado, utilizando-se uma velocidade de 0,083 mm/min, de forma que o deslocamento horizontal da caixa de cisalhamento correspondesse a 15 mm em 3 horas de ensaio, conforme Macedo (2016).

3.4.4 Ensaios Microestruturais

Os ensaios de MEV foram realizados com o intuito de se verificar desde mudanças gerais na estrutura do solo com adição dos resíduos de pneus e do agregado reciclado de RCD até alterações específicas.

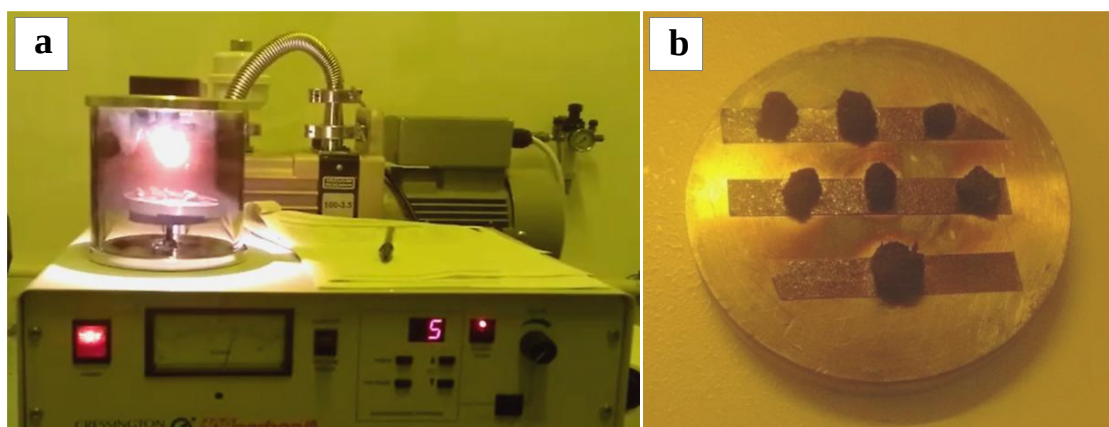
3.4.4.1 Preparação das amostras

As amostras foram extraídas da parte interior dos corpos de prova provenientes do ensaio de cisalhamento direto não inundado. Em seguida, as amostras, de forma prismática, foram colocadas para secar ao ar. Vale ressaltar que a manipulação foi realizada com luvas, para que não houvesse o contato das mãos com as amostras, evitando a transferência de gordura dos dedos para a superfície de observação, e de modo que nenhum instrumento cortante influenciasse na superfície do material, preservando a superfície de fratura.

3.4.4.2 Etapa de metalização

As amostras foram fixadas em um suporte metálico (com diâmetro de 75 mm e altura aproximada de 10 mm) por meio de uma fita de carbono dupla face. Em seguida, foram colocadas em uma câmara de vácuo do tipo Cressington Carbon Coater 108 Carbon/A para metalização, recebendo a partir disto uma película fina de carbono, Figura 28. Em alguns corpos de prova foi necessário fazer uma segunda metalização, pois a primeira não cobria totalmente a amostra, permitindo assim a obtenção de uma melhor resolução.

Figura 28 – Amostras sendo metalizadas (a) e após a metalização com carbono (b).



Fonte: arquivo pessoal.

Após o processo de metalização as amostras foram observadas e fotografadas no equipamento JSM 6460 Scanning Electron Microscope (SEM), de marca Jeol, Figura 29, no laboratório de eletrônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da UFPE, operando a 30 Kv.

Figura 29 – Equipamento utilizado para a Microscopia Eletrônica de Varredura.



Fonte: arquivo pessoal.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo trata da apresentação e análise dos resultados obtidos pelos ensaios de caracterização, microscopia, comportamento hidráulico e mecânico do solo investigado, diante da variação do teor de resíduos de pneus inservíveis e do agregado reciclado de RCD incorporados, assim como os resultados obtidos com o programa de investigação experimental de laboratório destes resíduos isoladamente. Ao longo da discussão os resultados são comparados com a literatura.

4.1 Caracterização física

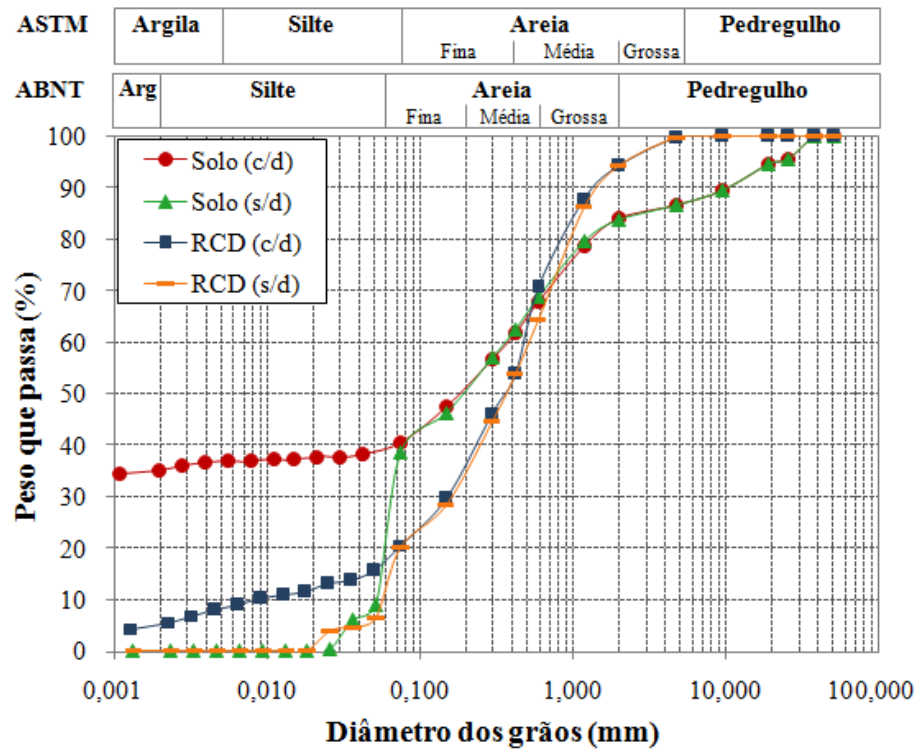
São apresentadas e discutidas as características físicas, obtidas por meio de ensaios de laboratório, do solo, agregado reciclado de RCD, resíduos de pneus e dos compósitos formados.

4.1.1 Análise granulométrica

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria, foram elaboradas, inicialmente, as curvas de distribuição granulométrica das amostras de solo e agregado reciclado de RCD, com e sem o uso de defloculante, Figura 30. As curvas granulométricas dos compósitos com uso do reagente, em comparação com o solo e seus respectivos resíduos, são mostradas nas Figuras 31 e 32. As escalas granulométricas empregadas são as adotadas pela NBR 6502 (ABNT, 1995) e D 422-63 (ASTM, 2007).

Ao serem comparados os resultados da análise granulométrica das amostras de solo e agregado reciclado de RCD com e sem o uso de defloculante, Figura 30, verifica-se que as parcelas mais grossas ($> 0,075$ mm) permaneceram praticamente inalteradas e as frações de argila de ambos os agregados decrescem quando não há a atuação do reagente, indicando que o solo em campo está flocculado e as partículas do agregado reciclado de RCD encontram-se agrupadas em grumos, sendo o agente defloculante proporcionador da dispersão.

Figura 30 – Curvas granulométricas do solo e agregado reciclado de RCD (com e sem defloculante).



Onde: c/d – com defloculante; s/d – sem defloculante.

Figura 31 – Curvas granulométricas do solo, misturas solo-pneu (com defloculante) e resíduos de pneus (sem defloculante).

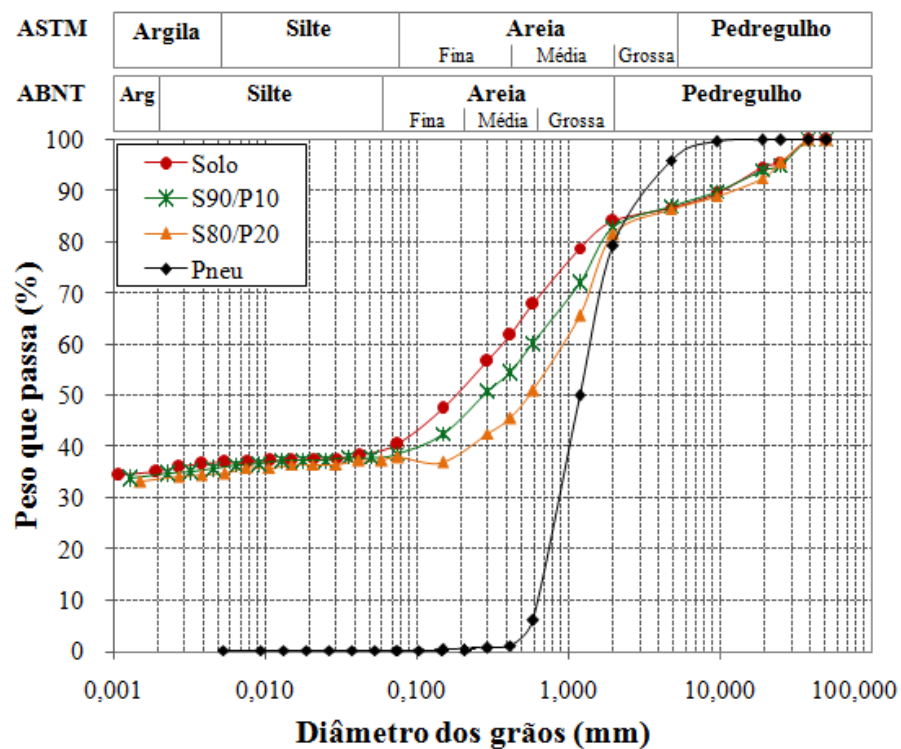
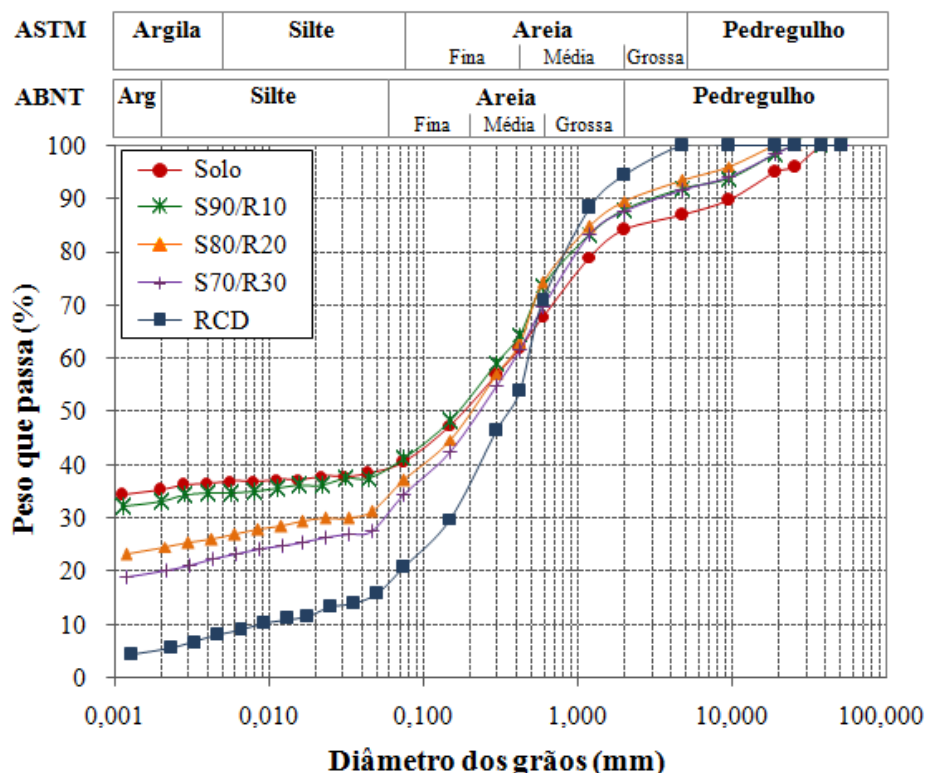


Figura 32 – Curvas granulométricas do solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD (com defloculante).



As curvas granulométricas das misturas solo-RCD, Figura 32, apresentam uma variação em relação às do solo e do agregado reciclado, situando-se entre as curvas dos materiais de origem. O mesmo comportamento foi observado para as curvas dos compósitos fibrosos, Figura 31, com destaque para as frações de argila e silte, cujos valores são muito próximos aos do solo, indicando que os resíduos de pneus não possuem frações finas ($< 0,075$ mm) para causar variações na distribuição granulométrica das misturas.

Analisando os gráficos de distribuição granulométrica, Figuras 30 a 32, identificou-se as percentagens das frações de argila, silte, areia e pedregulho das amostras de solo, agregado reciclado de RCD e resíduos de pneus, com e sem o uso de defloculante, Tabela 3, e das misturas solo-resíduo (solo-pneu e solo-RCD) com uso do reagente, Tabelas 4 e 5, conforme determinações da NBR 6502 (ABNT, 1995) e D 422-63 (ASTM, 2007).

Em seguida, tem-se a Tabela 6, que apresenta os coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc) de todas as amostras, obtidos por meio das curvas granulométricas com uso do defloculante, exceto para os resíduos de pneus que não utilizaram o reagente, juntamente com

as respectivas classificações pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS (ASTM, 2011) e pelo *Transportation Research Board* – TRB (antigo HRB).

Tabela 3 – Percentuais das frações por constituintes das amostras de solo, resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD, com e sem o uso de defloculante, segundo a ABNT e ASTM.

Granulometria	NBR 6502/1995					D 422-63/2007				
	Solo		RCD		Pneu	Solo		RCD		Pneu
	c/d	s/d	c/d	s/d	s/d	c/d	s/d	c/d	s/d	s/d
Argila (%)	37	0	7	0	0	38	0	8	0	0
Silte (%)	2	15	10	12	0	3	39	13	20	0
Areia fina (%)	13	37	21	24	0	21	24	33	34	1
Areia média (%)	16	17	33	29	6	22	21	41	41	78
Areia grossa (%)	16	15	24	30	73	3	3	5	5	17
Pedregulho (%)	16	16	5	5	21	13	13	0	0	4

Onde: c/d – com defloculante; s/d – sem defloculante.

Tabela 4 – Percentuais das frações por constituintes das misturas com resíduos de pneus, com o uso de defloculante, conforme descrito pela ABNT e ASTM.

Granulometria	NBR 6502/1995		D 422-63/2007	
	S90/P10	S80/P20	S90/P10	S80/P20
Argila (%)	37	37	36	35
Silte (%)	1	1	1	1
Areia fina (%)	8	2	19	16
Areia média (%)	14	12	27	30
Areia grossa (%)	23	30	4	5
Pedregulho (%)	17	18	13	13

Tabela 5 – Percentuais das frações por constituintes das misturas com agregado reciclado de RCD, com o uso de defloculante, de acordo com a ABNT e ASTM.

Granulometria	NBR 6502/1995			D 422-63/2007		
	S90/R10	S80/R20	S70/R30	S90/R10	S80/R20	S70/R30
Argila (%)	33	24	19	36	26	23
Silte (%)	6	8	10	5	10	12
Areia fina (%)	15	19	20	23	26	27
Areia média (%)	20	23	21	24	27	26
Areia grossa (%)	14	15	18	4	4	4
Pedregulho (%)	12	11	12	8	7	8

Tabela 6 – Parâmetros obtidos a partir das curvas granulométricas das amostras estudadas.

Amostra	Cc	Cu	Distribuição	Classificação SUCS (ASTM, 2011)	Classificação TRB
Solo	-	-	Mal graduada	SC	A-7-6
Pneu	0,9	2,2	Mal graduada	SP	A-1-b
S90/P10	-	-	Mal graduada	SC	A-7-6
S80/P20	-	-	Mal graduada	SC	A-7-6
RCD	5,3	52,2	Mal graduada	SM	A-2-4
S90/R10	-	-	Mal graduada	SC	A-6
S80/R20	-	-	Mal graduada	SC	A-2-6
S70/R30	-	-	Mal graduada	SC	A-2-4

A partir da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação feita no solo, com o uso do agente defloculante, segundo as duas classificações utilizadas, verifica-se que este material possui maior porcentagem de partículas na classe da areia, frações $\geq 45\%$, Tabela 3, constando ainda em sua composição 37% de argila e uma pequena porcentagem de silte (2%) pela classificação da ABNT. O índice de atividade (IA) do solo é igual a 0,57, apresentando comportamento inativo conforme Skempton (1953).

De acordo com o SUCS, a amostra de solo pertence ao grupo SC (areia argilosa), e pela classificação TRB é um material argiloso do tipo A-7-6, cujo comportamento enquanto subleito é tido como sofrível a mau. Os coeficientes de curvatura e uniformidade não puderam ser mensurados, visto que mais de 30% do material (com defloculante) é passante na peneira de menor abertura (# 0,001 mm), como pode ser observado na Figura 30, o que impossibilita a obtenção do diâmetro efetivo e, conseqüentemente, dos coeficientes supracitados. Contudo, a forma da curva do solo é considerada mal graduada, segundo Caputo e Caputo (2015).

Os resíduos de pneus possuem uma granulometria essencialmente granular e as frações mais finas da amostra ($\% < 0,075$ mm) inexistem, Tabela 3. A distribuição granulométrica das partículas de pneus corresponde a de um solo SP (areia mal graduada) pelo SUCS e a um material granular segundo o sistema TRB, uma vez que sua classe é A-1-b. Este material denota uma distribuição uniforme ($Cu < 5$).

Com relação ao agregado reciclado de RCD, observa-se que sua composição granulométrica, com uso do defloculante, equivale a um solo composto majoritariamente por areia, com

percentuais superiores a 75%, tanto pela ABNT quanto pela ASTM, Tabela 3. Este material equipara-se a um solo do grupo SM (areia siltosa), segundo a classificação do SUCS, por apresentar mais de 12% de seus grãos menores do que 0,075 mm, e enquadra-se no tipo A-2-4 pelo TRB, admitindo uma capacidade de suporte excelente a boa em aplicações como subleito de pavimentos. Sua granulometria é considerada desuniforme, pois o $C_u > 15$.

Com a incorporação de resíduos de pneus ao solo as percentagens das partículas correspondentes as dimensões de silte, argila e pedregulho permaneceram, praticamente, inalteradas, Tabela 4, enquanto que a adição de agregado reciclado de RCD reduziu as frações de argila e pedregulho, todavia exerceu uma maior influencia na fração de areia do solo, aumentando-a, Tabela 5.

Conforme a classificação do SUCS, todas as misturas de solo com resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD se enquadram como um solo SC (areia argilosa). Pelo sistema de classificação TRB, as misturas de solo-pneu classificam-se como A-7-6, ou seja, a adição de resíduos de pneus não melhorou as características do solo para aplicação como subleito de pavimentos. Já as misturas com 10, 20 e 30% de agregado reciclado de RCD pertencem às classes A-6, A-2-6 e A-2-4, respectivamente, de acordo com o TRB, indicando que, apesar das curvas das misturas solo-RCD serem mal graduadas, o agregado de RCD tende a melhorar as características do solo para uso como subleito, pois o seu comportamento passa de sofrível a mau para excelente a bom, à medida que o teor de agregado reciclado aumenta.

Embora os coeficientes de curvatura e uniformidade das misturas solo-resíduo sejam considerados indefinidos, devido à impossibilidade da quantificação do diâmetro efetivo, as misturas de solo-pneu e solo-RCD exibem curvas com distribuição granulométrica mal graduada, segundo Caputo e Caputo (2015).

4.1.2 Densidade real dos grãos

Os resultados encontrados nos ensaios de densidade real das amostras de solo, resíduos de pneus, agregado reciclado de RCD e misturas solo-resíduo são exibidos na Tabela 7, sendo apresentados os valores referentes às médias de quatro determinações para cada amostra. O valor de densidade real obtido para o solo foi de 2,66, Tabela 7, sendo maior do que o encontrado para os resíduos de pneus (1,12) e para o agregado reciclado de RCD (2,64). Este

resultado é considerado coerente, uma vez que os materiais pneumáticos são caracteristicamente mais leves e a densidade dos agregados reciclados é geralmente inferior a dos agregados naturais, devido a sua elevada porosidade.

Tabela 7 – Valores de densidade real dos grãos das amostras ensaiadas.

Amostra	Densidade real dos grãos
Solo	2,66
Pneu	1,12
S90/P10	2,29
S80/P20	1,98
RCD	2,64
S90/R10	2,66
S80/R20	2,65
S70/R30	2,64

A densidade real dos resíduos de pneus inservíveis deste estudo (1,12) situa-se dentro da faixa indicada por Edil e Bosscher (1994), que vai de 1,02 a 1,36. Segundo os autores, os maiores valores desta variação são justificados pela existência de tiras de aço entre os resíduos, decorrente do processo de trituração. Os valores de densidade de desbastes de pneus inservíveis de outras pesquisas, para efeito comparativo com o valor encontrado neste estudo, são mostrados na Tabela 8. Verifica-se que a densidade do material utilizado nesta pesquisa coincide com a literatura.

Tabela 8 – Densidade real dos grãos de desbastes de pneus inservíveis deste estudo e de outras pesquisas.

Fonte	Tamanho (mm)	Densidade real dos grãos
Moo-Young <i>et al.</i> (2003)	< 50	1,10
Akbulut; Arasan e Kalkan (2007)	2 a 15	1,15 a 1,19
Edinçliler e Ayhan (2010)	8 a 50	1,08
Guerra <i>et al.</i> (2010)	Não consta	1,20
Franco (2012)	1,6*	1,11
Sellaf <i>et al.</i> (2014)	7,0*	1,15 a 1,19
Macedo (2016)	0,1 a 27	1,08
Esta pesquisa	0,1 a 37	1,12

Onde: (*) – tamanho médio.

A densidade do agregado reciclado de RCD é de 2,64, semelhante aos valores obtidos por Couto e Santos (2016), Macedo (2013), Macedo (2016) e Barbosa (2017), ao investigarem agregados reciclados provenientes da mesma usina de beneficiamento que o desta pesquisa. Os valores encontrados nestes trabalhos foram, respectivamente, 2,625; 2,63; 2,62 e 2,64.

Referente aos compósitos fibrosos e particulados, os valores de suas densidades estão situados entre os obtidos para o solo e para os respectivos resíduos, como esperado. Nas misturas de solo-pneu há uma diminuição da densidade à medida que o teor de resíduos de pneus aumenta, enquanto que a densidade do solo com o acréscimo da porcentagem de agregado reciclado de RCD praticamente não é modificada, uma vez que a densidade do agregado de RCD é próxima a do solo.

4.1.3 Limites de Atterberg

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e plasticidade (LP) encontram-se na Tabela 9, bem como o valor do índice de plasticidade (IP) de cada material.

Tabela 9 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de limites de consistência.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação*
Solo	44,5	23,5	21	Altamente plástico
Pneu	-	-	-	Não plástico
S90/P10	47	25	22	Altamente plástico
S80/P20	46	26	20	Altamente plástico
RCD	-	-	-	Não plástico
S90/R10	35	21	14	Medianamente plástico
S80/R20	31,5	18,5	13	Medianamente plástico
S70/R30	28	18	10	Medianamente plástico

Onde: (*) – classificação segundo Jenkins, obtida em Caputo e Caputo (2015).

O solo investigado possui alta plasticidade ($IP > 15\%$), assim como nos estudos de Lafayette (2000). As características quanto às propriedades plásticas dos resíduos de pneus e do agregado reciclado de RCD equivalem a materiais granulares, uma vez que esses resíduos apresentam comportamento não-plástico, exibindo um índice de plasticidade nulo, Tabela 9.

Não há uma tendência clara de variação dos limites de consistência do solo com o incremento de resíduos de pneus, Tabela 9. Todos os compósitos fibrosos se classificam como altamente plásticos, apresentando parâmetros semelhantes aos do solo. Este cenário pode ser justificado pela baixa capacidade de interação dos resíduos de pneus com a água, o que resulta na resposta apenas do solo existente nos compósitos.

Para as misturas solo-RCD constata-se uma variação mais clara dos limites de consistência, pois tanto o LL quanto o LP do solo decrescem com o aumento do teor de agregado reciclado de RCD, Tabela 9. Entretanto, os limites de liquidez das misturas solo-RCD diminuem em proporções maiores do que os limites de plasticidade, causando uma redução no IP. Assim sendo, a adição do agregado reciclado ao solo resultou na redução da sua plasticidade, tornando-a média ($7\% < IP < 15\%$), todavia as misturas com 10 e 20% de agregado reciclado exprimem valores próximos ao limite superior.

4.1.4 Absorção de água

A absorção média de água obtida depois de seis dias de imersão das duas amostras de resíduos de pneus foi de 6,9%. Moo-Young *et al.* (2003) obteve uma absorção de 6,7% com resíduos de pneus de tamanhos inferiores a 50 mm e Franco (2012), ao estudar desbastes de pneus, encontrou valores de absorção de 5,4 e 5,6%. Estes resultados apontam a baixa capacidade de retenção de água dos resíduos pneumáticos, indicando que estes materiais levam mais tempo para atingir a condição de saturação.

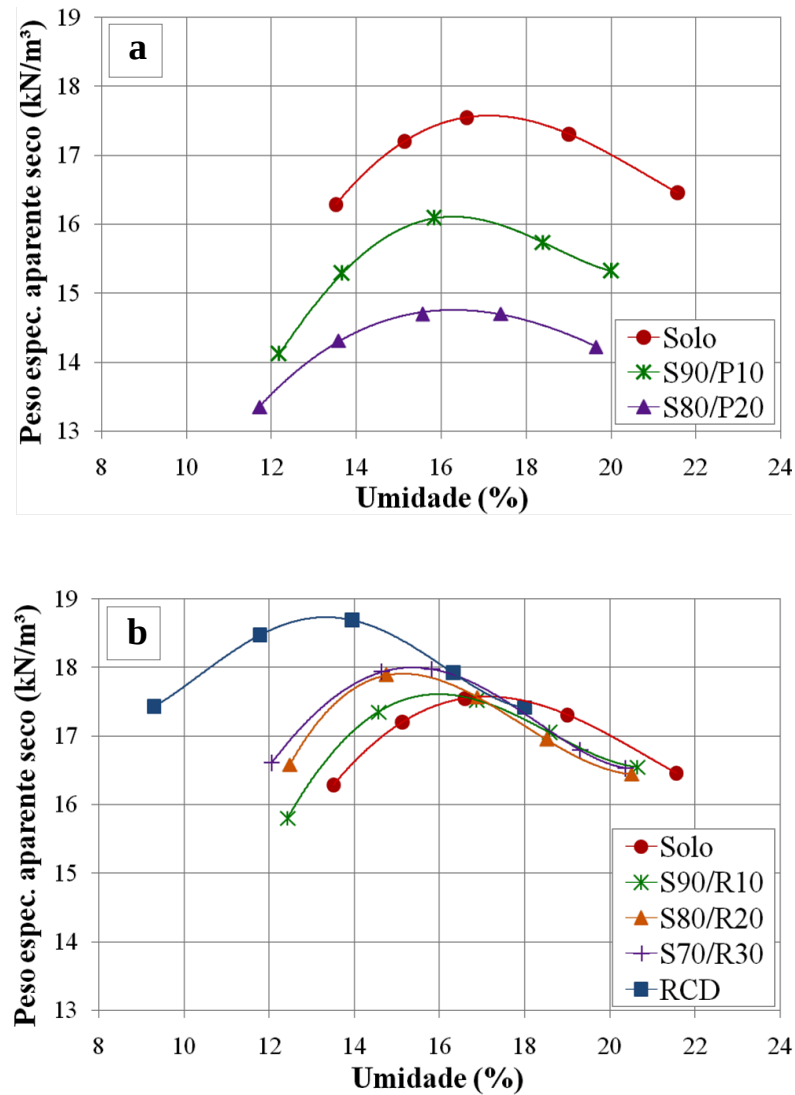
4.1.5 Compactação

As curvas de compactação das amostras de solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-resíduo, aplicando-se a energia normal, são exibidas na Figura 33.

O agregado de RCD expõe um peso específico aparente seco máximo superior ao do solo, Figura 33b, possivelmente, pela distribuição mais graduada das partículas do agregado reciclado, permitindo que haja uma melhor acomodação dos seus grãos ao longo do processo de compactação. Já a umidade ótima do agregado de RCD é inferior a do solo, visto o baixo teor de finos do agregado reciclado, o que reduz a superfície específica e, consequentemente, a quantidade de água nesse material.

Tomando-se como referencial a curva de compactação do solo, observa-se que as umidades ótimas dos compósitos fibrosos estão localizadas no lado do ramo seco, Figura 33a, assim como nas misturas solo-RCD, contudo os pesos específicos dos compósitos particulados são discretamente maiores, Figura 33b.

Figura 33 – Curvas de compactação das misturas solo-pneu (a) e solo-RCD (b).

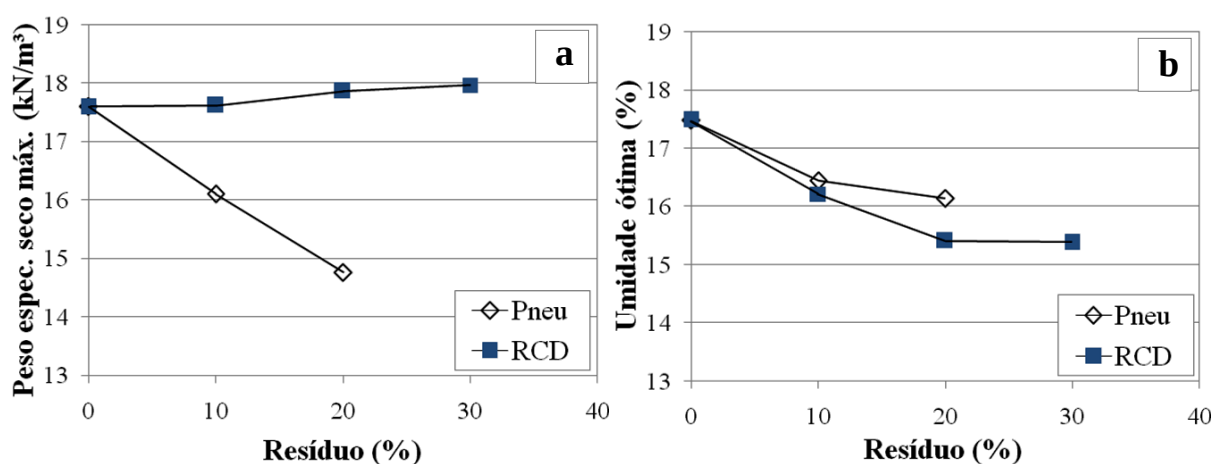


Os resultados dos pesos específicos aparentes secos máximos (γ_d máx) das amostras estudadas e seus respectivos teores de umidade ótima ($w_{ótima}$), a partir dos quais foram conduzidas as moldagens nos ensaios de permeabilidade e cisalhamento direto, se encontram resumidos na Tabela 10. Os gráficos que associam o teor de resíduos com os pesos específicos secos máximos e as umidades ótimas das amostras ensaiadas podem ser visualizados na Figura 34.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de compactação.

Amostra	γ_d máx (kN/m ³)	w _{ótima} (%)
Solo	17,60	17,49
S90/P10	16,11	16,45
S80/P20	14,77	16,14
RCD	18,72	13,52
S90/R10	17,63	16,22
S80/R20	17,87	15,42
S70/R30	17,97	15,39

Figura 34 – Variação do teor de resíduos em relação ao peso específico aparente seco máximo (a) e a umidade ótima (b).



Há uma redução do γ_d máx e da w_{ótima} do solo à medida que se aumenta o teor de resíduos de pneus, sendo observado um comportamento quase linear de queda destes parâmetros, Figura 34. O decréscimo do peso específico aparente seco máximo decorre da resistência à compactação dos resíduos de pneus, além destes materiais expressarem uma massa específica bem inferior a do solo compactado, caracterizando-se como um material mais leve, que pode ser aplicado em aterros rodoviários, estruturas de contenção, taludes artificiais, entre outros.

No estudo de Moura *et al.* (2012) foi encontrado, para uma mistura de solo com 10% de resíduos de pneus, um peso específico seco máximo de 16,65 kN/m³ e umidade ótima de 17,21%. Macedo (2016), ao investigar misturas de solo-pneu, com a mesma energia de compactação que esta pesquisa, encontrou valores de peso específico seco máximo da ordem de 15,93 e 14,57 kN/m³ e umidades ótimas de 17,48 e 17,18%, para a adição de 10 e 20% de resíduos de pneus, respectivamente. Estes valores são próximos aos expostos na Tabela 10.

Para os compósitos particulados, verifica-se que a inserção de agregado reciclado ao solo aumenta o γ_d máx, devido a este parâmetro no agregado reciclado de RCD ser superior, porém a variação é pequena, e reduz a umidade ótima em até 2%. Observa-se, ainda, que o γ_d máx das misturas solo-RCD varia de forma menos expressiva do que nas misturas solo-pneu, enquanto que a umidade ótima em ambas as misturas varia de forma semelhante.

Este tipo de comportamento também foi relatado por outros autores, dentre eles Ferreira e Tomé (2011), Macedo (2013) e Dias (2014), visto que durante o processo de compactação houve uma melhor acomodação das partículas dos materiais, aumentando o seu peso específico, pela incorporação de agregados reciclados a matriz dos solos.

Apesar destas variações, percebe-se que não há uma constância na diferença das umidades ótimas e dos pesos específicos máximos das misturas de solo-RCD, demonstrando que a mudança destes parâmetros não é proporcional ao aumento do teor dos resíduos introduzidos ao solo.

A indicação gráfica da umidade de saturação das amostras compactadas, tomando-se como referência o peso específico aparente seco máximo e a curva de saturação a 100% dos materiais, é apresentada nas Figuras 35 a 37.

A partir das curvas de compactação e saturação do solo, do agregado reciclado de RCD e das misturas solo-pneu e solo-RCD, Figuras 35 a 37, constata-se uma baixa diferença entre os valores das umidades ótimas e de saturação das amostras, variando de 1,8 a 2,9%. A variação entre estas umidades nas amostras de solo com 10% de resíduos de pneus e 10% de agregado reciclado de RCD é discretamente maior do que a observada no solo separadamente, porém a diferença entre as umidades decresce quando há o incremento dos teores de ambos os resíduos.

Analisando-se as curvas de compactação das amostras, conforme critérios propostos por Lee e Suedkamp (1972), percebe-se que a forma das curvas de compactação dos materiais deste estudo enquadra-se no Tipo A, visto que todas possuem forma de sino com um único pico, característico de solos com limites de liquidez na faixa de 30 a 70%.

Segundo a classificação de Maccarini *et al.* (1988), todas as amostras ensaiadas são do tipo III, pois há um acréscimo do peso específico seco com o aumento da umidade até o ponto crítico. Isto indica que a inclusão de resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD não altera a forma da curva de compactação do solo.

Figura 35 – Curvas de compactação e saturação a 100% do solo.

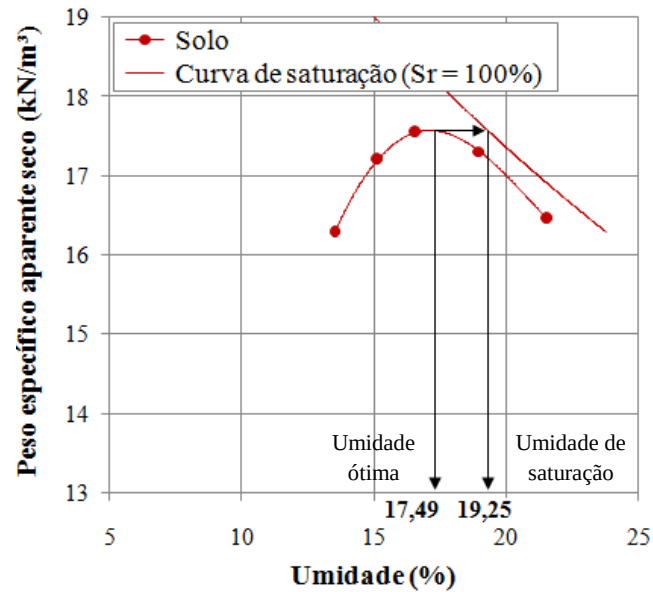


Figura 36 – Curvas de compactação e saturação a 100% das misturas com 10% (a) e 20% de resíduos de pneus (b).

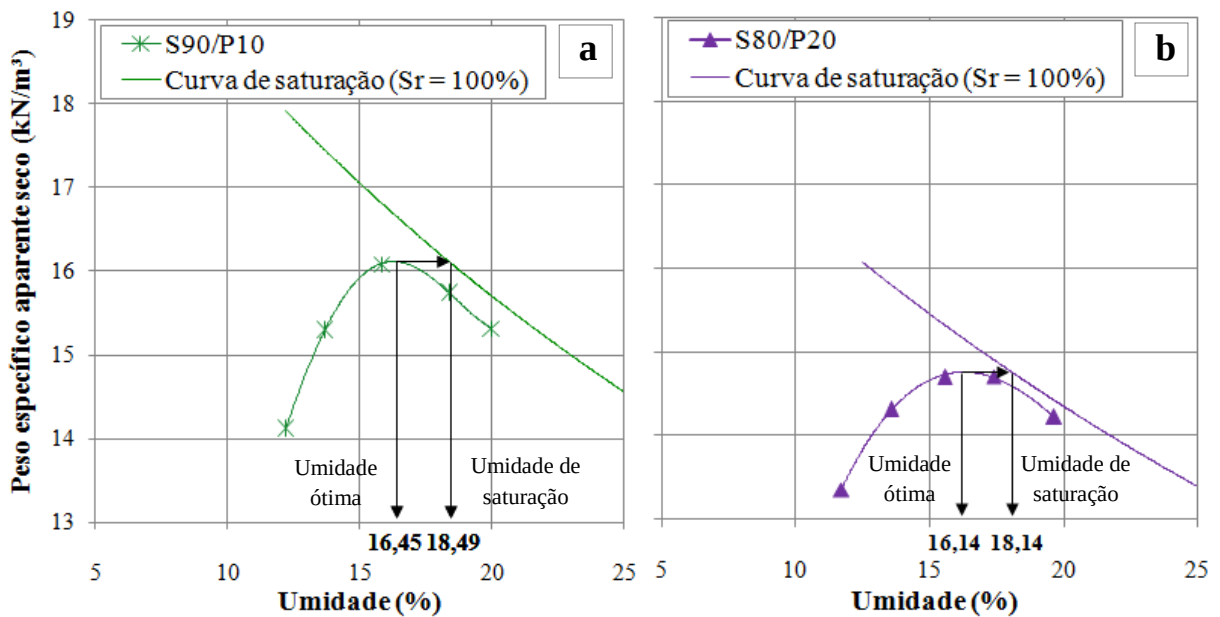
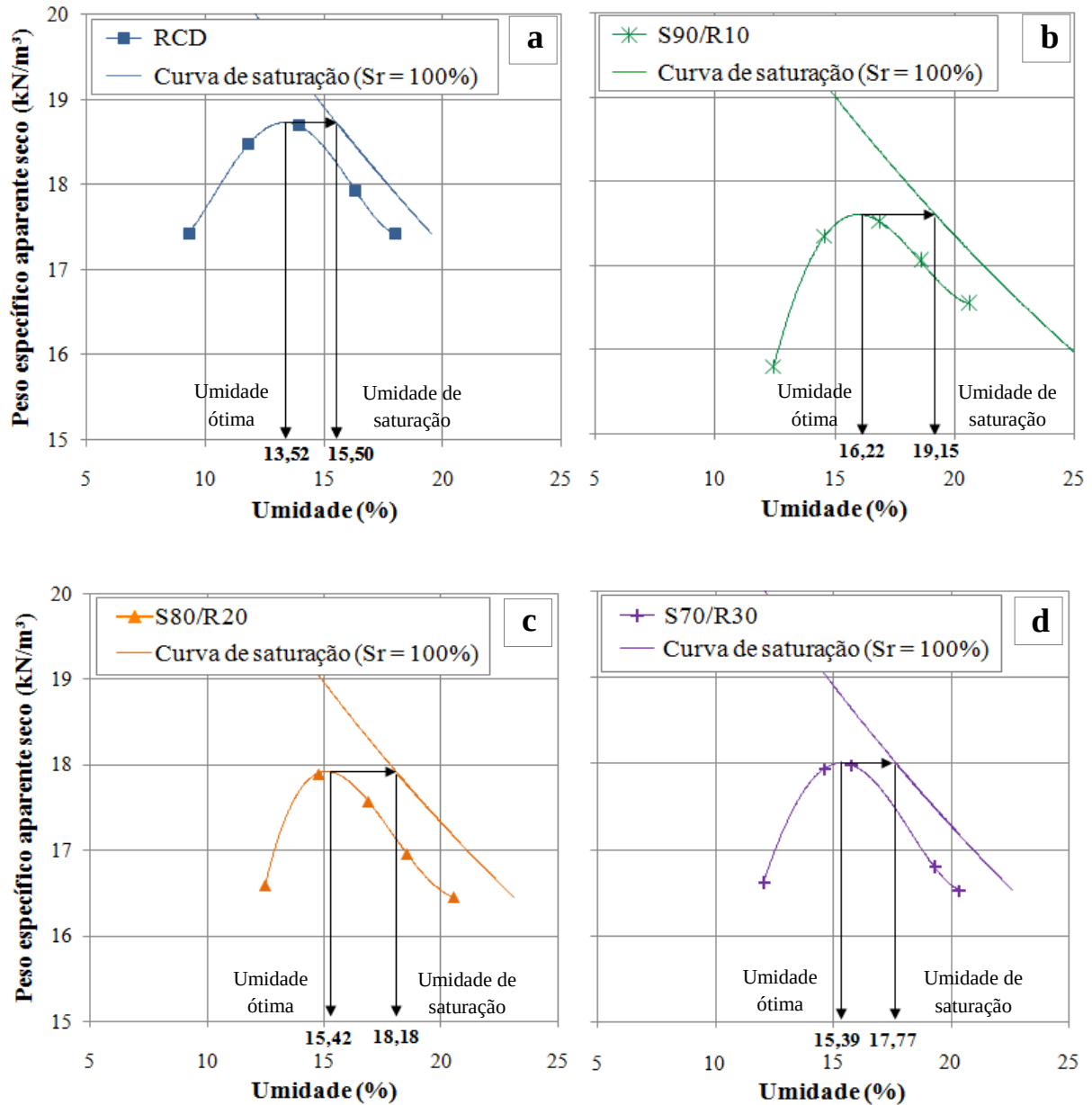


Figura 37 – Curvas de compactação e saturação a 100% do agregado reciclado de RCD (a), e das misturas com 10% (b), 20% (c) e 30% de agregado reciclado de RCD (d).



A variação gráfica de sólidos, líquido e ar de cada amostra, a partir do ensaio de compactação nos seus respectivos pesos específicos secos máximos e umidades ótimas, é apresentada na Figura 38. Os valores em percentual do volume das fases estão organizados na Tabela 11.

À medida que o teor de resíduos de pneus cresce no solo, o volume total de partículas sólidas aumenta e os volumes de água e ar diminuem, Tabela 11, repercutindo na redução da porosidade. O volume total de partículas sólidas no solo sofre pequena ou nenhuma variação quando da inserção de agregados reciclados de RCD, enquanto que há uma pequena redução no volume de líquido e um discreto acréscimo no volume de ar, Figura 38b.

Figura 38 – Teor de fases, em volume, das misturas de solo-pneu (a) e solo-RCD (b), na umidade ótima.

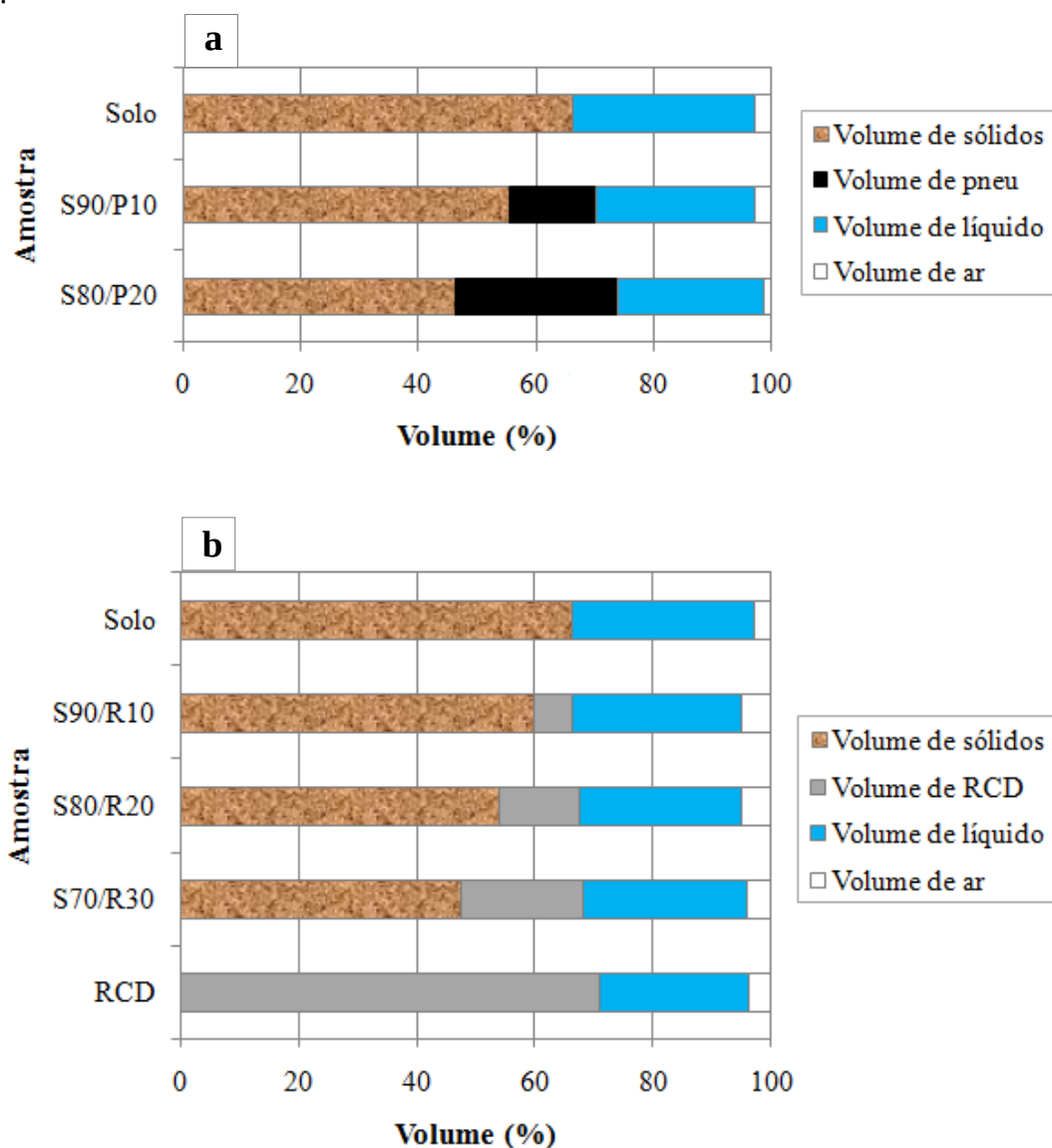


Tabela 11 – Volumes de sólidos, líquido e ar das amostras estudadas na umidade ótima.

Amostra	V_s (%)	V_{RCD} (%)	V_{pneu} (%)	V_w (%)	V_{ar} (%)	e	n (%)
Solo	66	-	-	31	3	0,51	34
S90/P10	55,5	-	14,5	27	3	0,43	30
S80/P20	47,5	-	27,5	24	1	0,33	25
RCD	-	71	-	25	4	0,41	29
S90/R10	59,5	6,5	-	29	5	0,51	34
S80/R20	53,5	13,5	-	28	5	0,49	33
S70/R30	47	21	-	28	4	0,47	32

Onde: V_s – volume de sólidos; V_{RCD} – volume de agregado reciclado de RCD, V_{pneu} – volume de resíduos de pneus; V_w – volume de líquido; V_{ar} – volume de ar; e – índice de vazios; n – porosidade.

Uma comparação geral dos resultados das caracterizações dos solos da encosta NW do Alto do Reservatório, investigados por Lafayette (2000), Moura *et al.* (2012), Macedo (2016) e por esta pesquisa, com o uso de defloculante, está apresentada na Tabela 12.

O solo desta pesquisa se apresenta predominantemente granular, sendo denominado como SC, coincidindo com os resultados encontrados por Lafayette (2000), Moura *et al.* (2012) e Macedo (2016), Tabela 12, cujos solos também foram classificados como areias argilasas. Nota-se, ainda, que todos os solos são considerados inativos por possuírem $IA < 0,75$, apresentam densidades próximas e pesos específicos secos máximos e umidades ótimas semelhantes, reafirmando as características do solo da área de estudo.

Tabela 12 – Resumo das características dos solos investigados nesta pesquisa e por Lafayette (2000), Moura *et al.* (2012) e Macedo (2016).

Parâmetros	Solo natural			
	Lafayette (2000)*	Moura <i>et al.</i> (2012)**	Macedo (2016)**	Esta pesquisa
Argila (%)	47	19	8,33	37
Silte (%)	3	6	5,70	2
Areia (%)	47	71	85,22	45
Pedregulho (%)	3	4	0,75	16
Índice de plasticidade (%)	18	8,39	6,14	21
Índice de atividade	0,39	0,45	0,73	0,57
Classificação SUCS	SC	SC	SC	SC
Umidade ótima (%)	-	17,23	14,90	17,49
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	-	17,83	18,70	17,60
Densidade real dos grãos	2,64	2,68	2,66	2,66

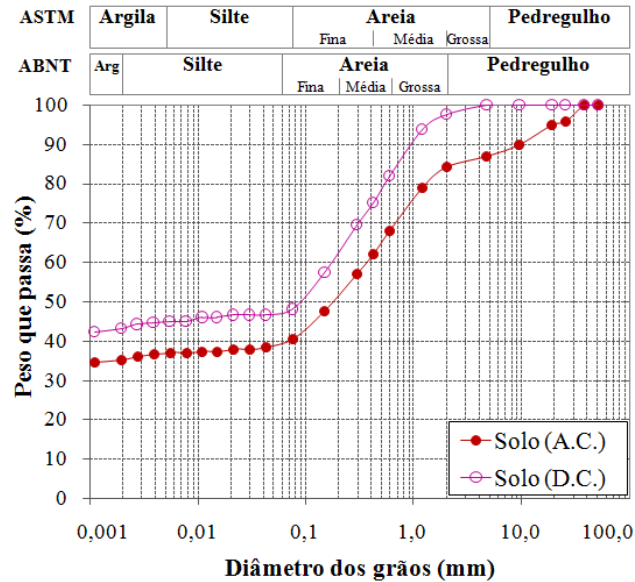
Onde: (*) – solo coletado entre 1,0 e 2,0 m de profundidade; (**) – solo coletado na camada superficial do terreno.

4.1.6 Influência da compactação na granulometria

Foram realizadas análises granulométricas em amostras de solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-pneu e solo-RCD que já tinham sido submetidas ao ensaio de compactação. Nas Figuras 39 a 41 são apresentadas as curvas granulométricas das amostras antes da compactação (A.C.) e depois da compactação (D.C.), com o uso de agente defloculante.

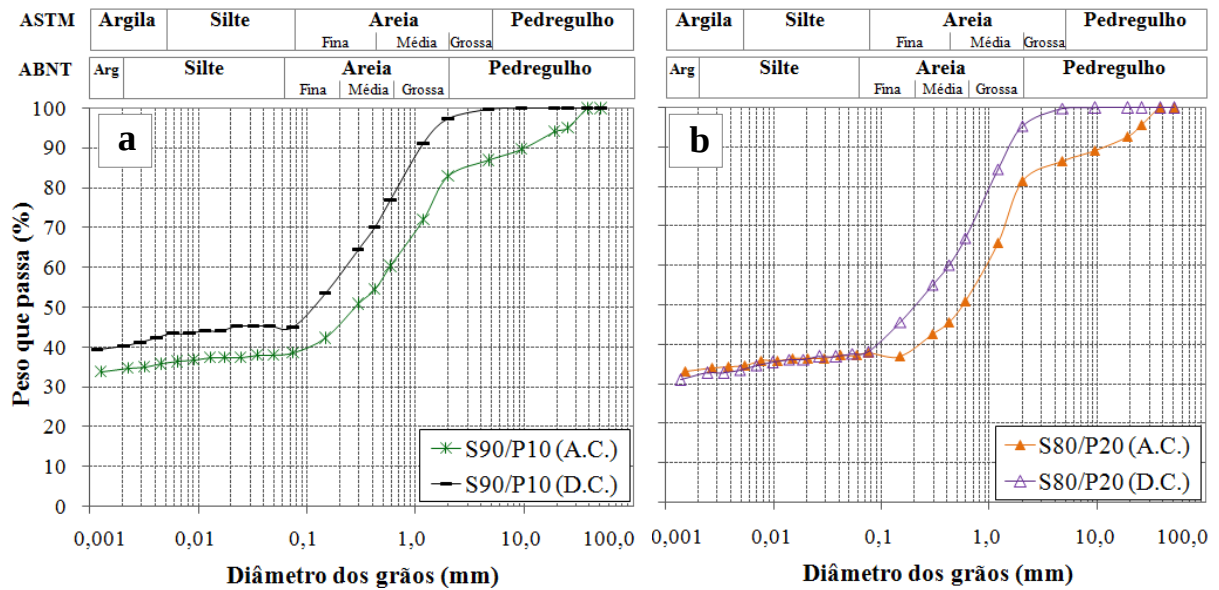
Analisando as curvas granulométricas do solo, antes e depois de ser compactado na energia normal, observa-se a ocorrência de uma quebra significativa dos grãos, visto o aumento do percentual de material passante ao longo de toda a curva, Figura 39.

Figura 39 – Curva granulométrica do solo, antes (A.C.) e após o processo de compactação (D.C.).



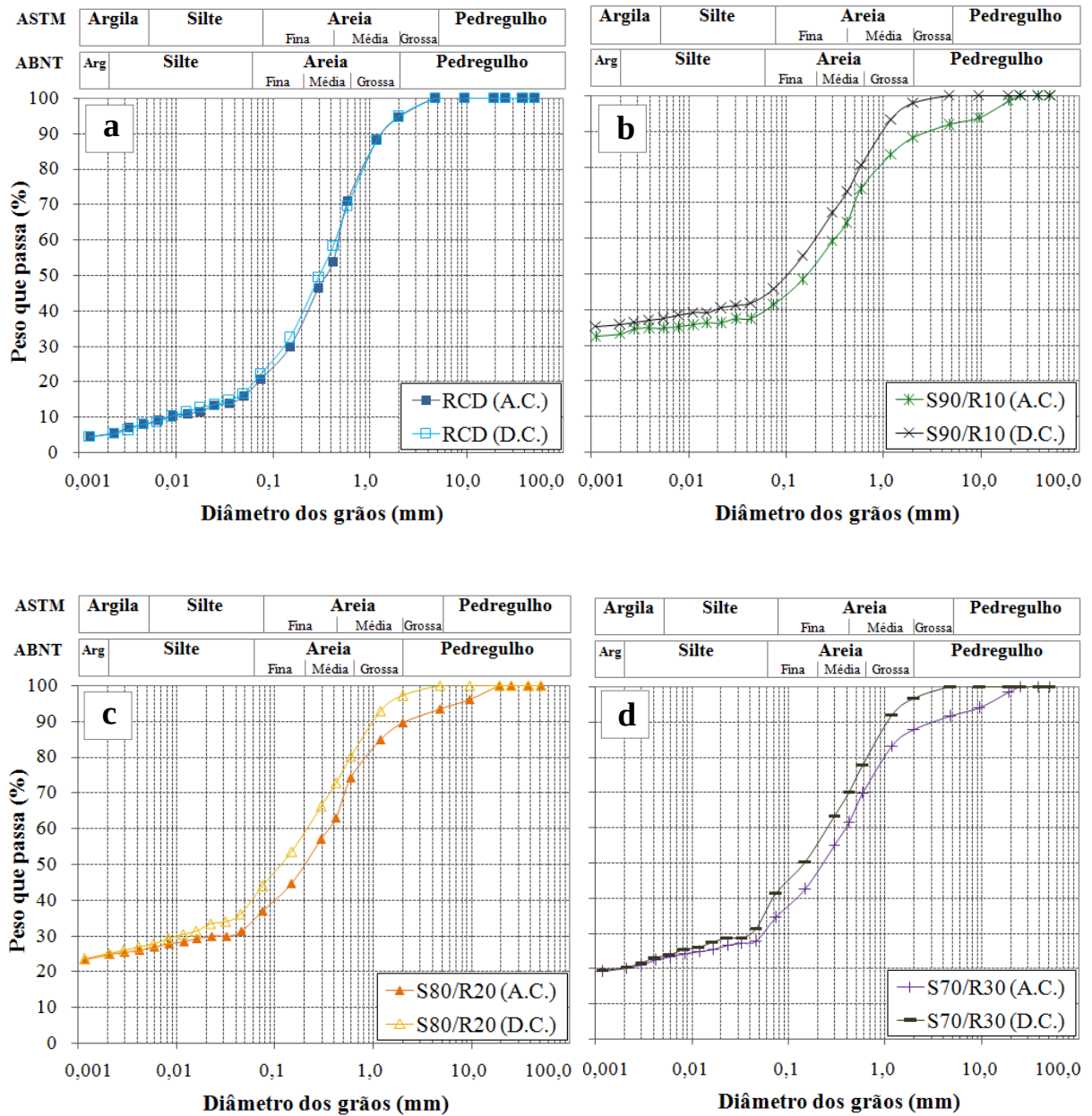
Onde: A.C. – antes da compactação; D.C. – depois da compactação.

Figura 40 – Curvas granulométricas antes (A.C.) e após o processo de compactação (D.C.) das misturas com 10% (a) e 20 % de resíduos de pneus (b).



Onde: A.C. – antes da compactação; D.C. – depois da compactação.

Figura 41 – Curvas granulométricas antes (A.C.) e após o processo de compactação (D.C.) do agregado reciclado de RCD (a) e das misturas com 10% (b), 20% (c) e 30% de agregado reciclado de RCD (d).



Onde: A.C. – antes da compactação; D.C. – depois da compactação.

Nos compósitos fibrosos nota-se uma alteração expressiva na distribuição dos grãos em toda extensão das curvas, com exceção da parcela inferior a 0,075 mm referente a mistura com 20% de resíduos de pneus, Figura 40b. Isto pode ser explicado pela resistência ao impacto, característico da borracha que compõe os materiais pneumáticos, e maior volume de resíduos de pneus incorporado ao solo na mistura com 20% de participação do resíduo, o que diminui a quebra dos grãos mais finos da matriz do solo.

Com relação a curva granulométrica original e pós-compactação do agregado reciclado de RCD, Figura 41a, há uma quase sobreposição entre as curvas, denotando uma baixa interferência do processo de compactação na granulometria do material, sendo este resistente à energia aplicada no ensaio. Resultado semelhante foi relatado por Santos (2007) e Araújo Júnior (2010), no qual o ensaio de compactação não provocou alterações no tamanho dos grãos do RCD reciclado estudado.

A quebra dos grãos após a compactação é observada ao longo de todas as curvas granulométricas das misturas solo-RCD, visto o aumento do percentual de material passante, Figuras 41b a 41d. Entretanto, à medida que o teor de agregado reciclado de RCD cresce, esta quebra torna-se menos acentuada nas frações mais finas ($< 0,075$ mm).

A alteração nas curvas granulométricas das misturas solo-resíduo, ocasionada pelo processo de compactação, foi semelhante à apresentada pelo solo separadamente. Contudo, as alterações das frações inferiores a 0,075 mm foram pouco expressivas na maioria das misturas, se comparadas ao solo.

4.2 Análise Microestrutural

Todas as amostras apresentaram-se estáveis sob a varredura do feixe de elétrons no ensaio de MEV, indicando que o processo de metalização foi bem sucedido e as amostras possuíram uma boa capacidade de refletir os elétrons a que foram expostas. Uma comparação das eletromicrografias das amostras de solo e agregado reciclado de RCD é apresentada nas Figuras 42 e 43, sendo ampliadas em 70x, 100x, 500x e 1000x.

A estrutura do solo (areia argilosa – SC) compactado é constituída por agregados naturais com grãos subarredondados a arredondados inseridos em uma matriz argilosa, Figuras 42a e 42b. A forma dos grãos é compatível com processo de formação dos solos (Formação Barreiras). Observa-se também a presença de flóculos formados pelo arranjo de grãos de areia interligados por partículas de silte e argila de forma densa, devido ao processo de compactação, conferindo ao solo um arranjo de baixa permeabilidade (item 4.3).

A estrutura do RCD compactado é constituída de agregados de RCD que não se conectam entre si, formando uma estrutura granular simples, com semelhança a de um solo. Observa-se

a existência de partículas finas (material pulverulento do RCD) que formam uma película revestindo os agregados, Figuras 43a e 43b.

As imagens mostram que o solo possui uma aparência mais compacta, perceptível ao longo da superfície da amostra, Figura 42c, com pequenas floculações melhor agregadas umas as outras, Figura 42d, em comparação a amostra de agregado reciclado de RCD, que apresenta uma estrutura superficial irregular, Figura 43c, possuindo uma microestrutura mais granular, com pequenas floculações esparsas, Figura 43d. Há uma maior densidade de partículas no agregado reciclado do que no solo, isto também pode ser comprovado pelo menor índice de vazios e maior peso específico seco do agregado de RCD se comparado a areia argilosa (Apêndice B).

Figura 42 – Eletromicrografias da amostra de solo ampliadas em 100x (a), 500x (b), 70x (c) e 1000x (d).

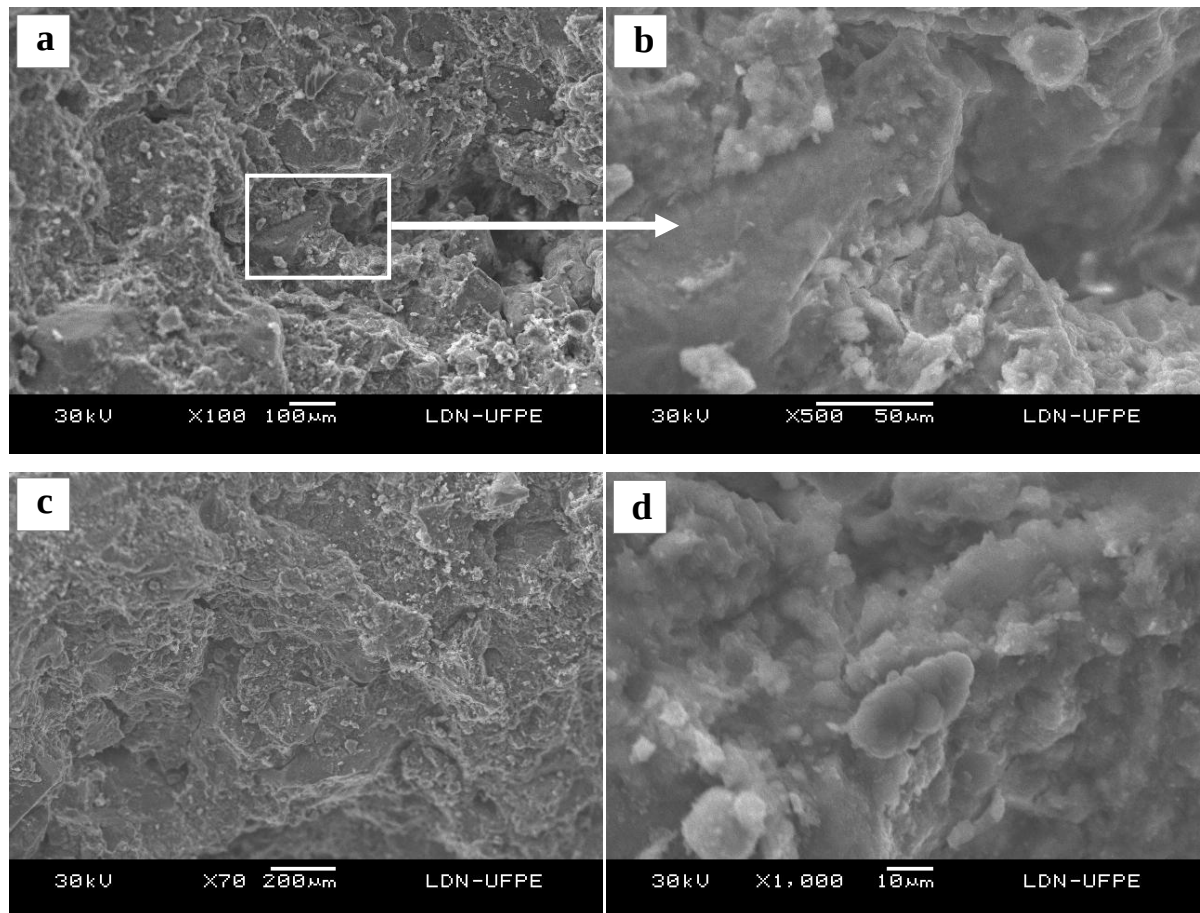
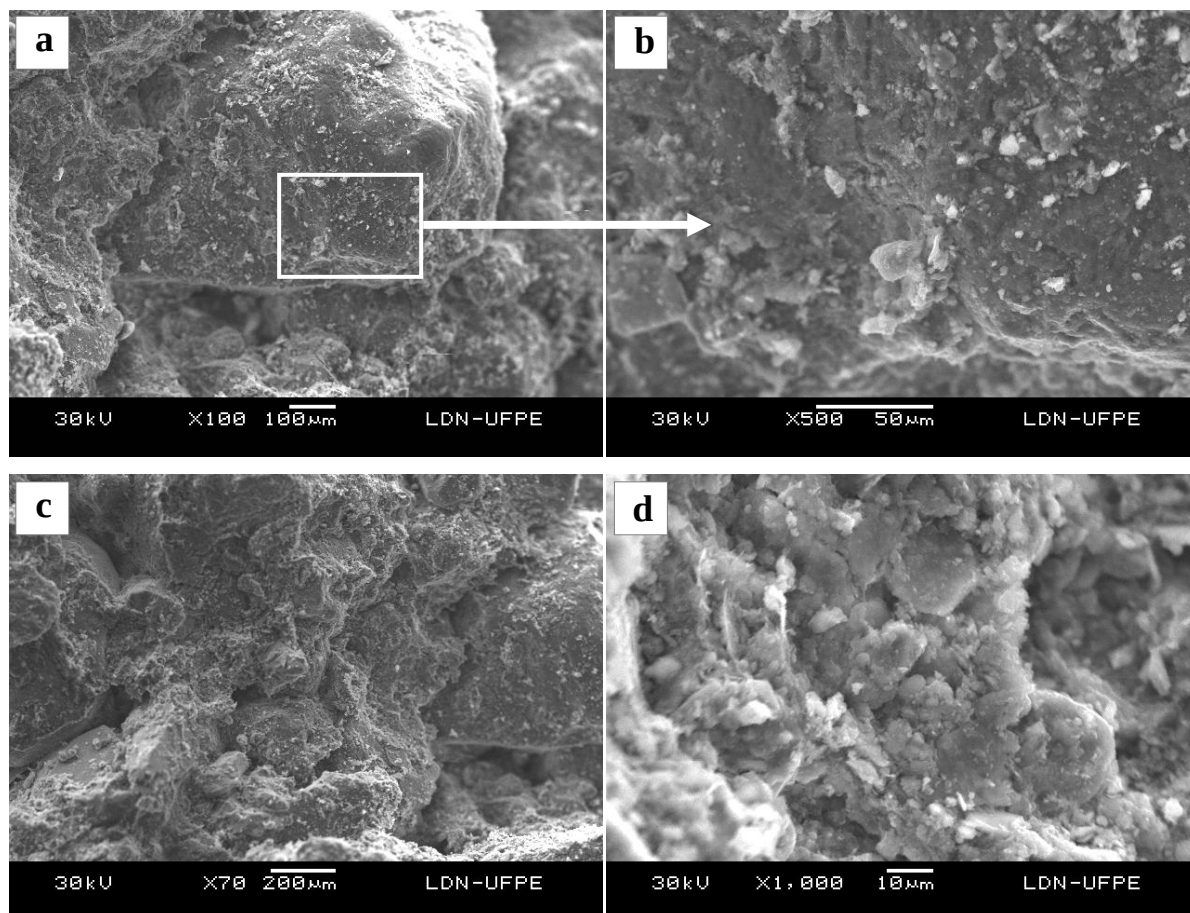


Figura 43 – Eletromicrografias da amostra de agregado reciclado de RCD ampliadas em 100x (a), 500x (b), 70x (c) e 1000x (d).



Na Figura 44 são apresentadas as eletromicrografias da amostra de solo com 10% de resíduos de pneus (S90/P10), aumentadas em 70x e 500x. Nessa amostra, apesar de não terem sido visualizados claramente os resíduos de pneus no ensaio de MEV, nota-se a ocorrência de fissuras (canalículos) na superfície da amostra, indicando a presença do material pneumático no local, isso devido à relaxação elástica dos resíduos de pneus. Embora a inserção de 10% de resíduos de pneus tenha alterado o aspecto superficial da amostra, pode-se ainda inferir que há uma boa interação entre as partículas dos pneus e a matriz do solo, justificando os resultados mecânicos obtidos (item 4.4).

A Figura 45 mostra as eletromicrografias da mistura de solo com 20% de resíduos de pneus (S80/P20), em diferentes níveis de ampliação (25x, 70x e 100x). Nota-se uma partícula de pneu parcialmente aderida à matriz do solo, sendo visíveis os vazios na interface entre eles (macroporos), Figura 45c. Porém, na mesma composição se percebe uma partícula de pneu bem envolvida pelo solo, sem uma zona clara de separação, Figura 45b, mostrando que não há

uma total fragilização da estrutura pela presença de resíduos de pneus, corroborando assim com os resultados dos ensaios mecânicos (item 4.4), de que a aderência entre os dois materiais é suficiente para melhorar as características resistentes do compósito.

Figura 44 – Eletromicrografias da amostra S90/P10 ampliadas em 70x (a) e 500x (b).

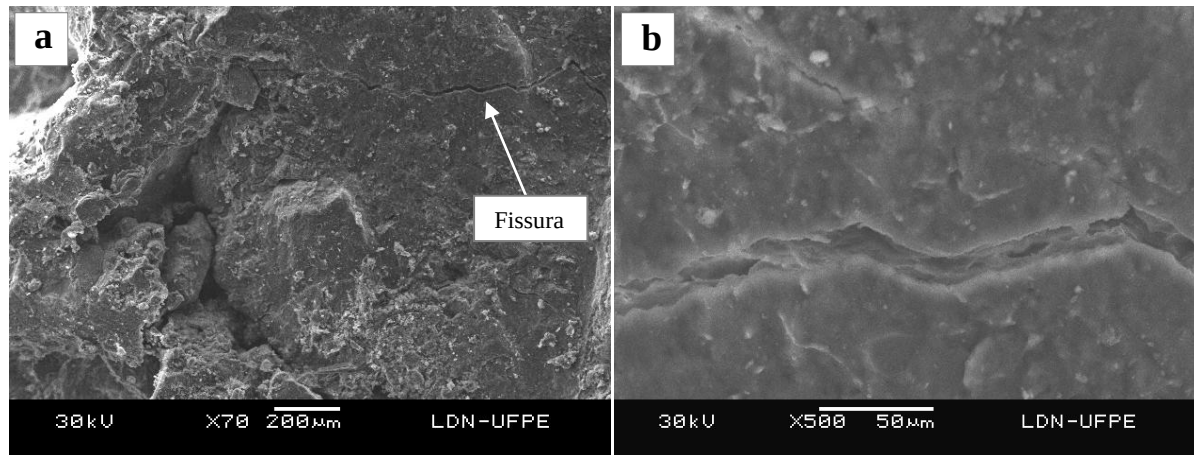
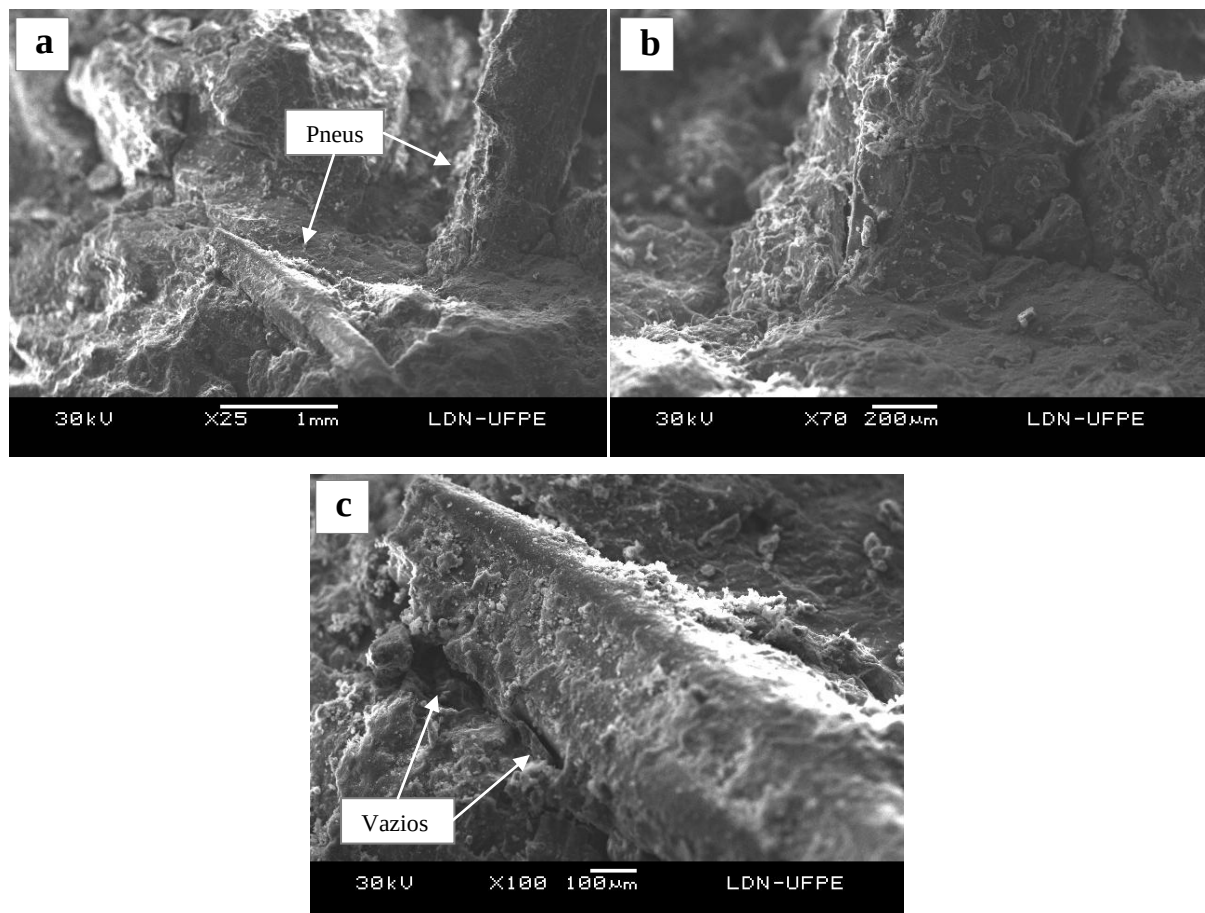


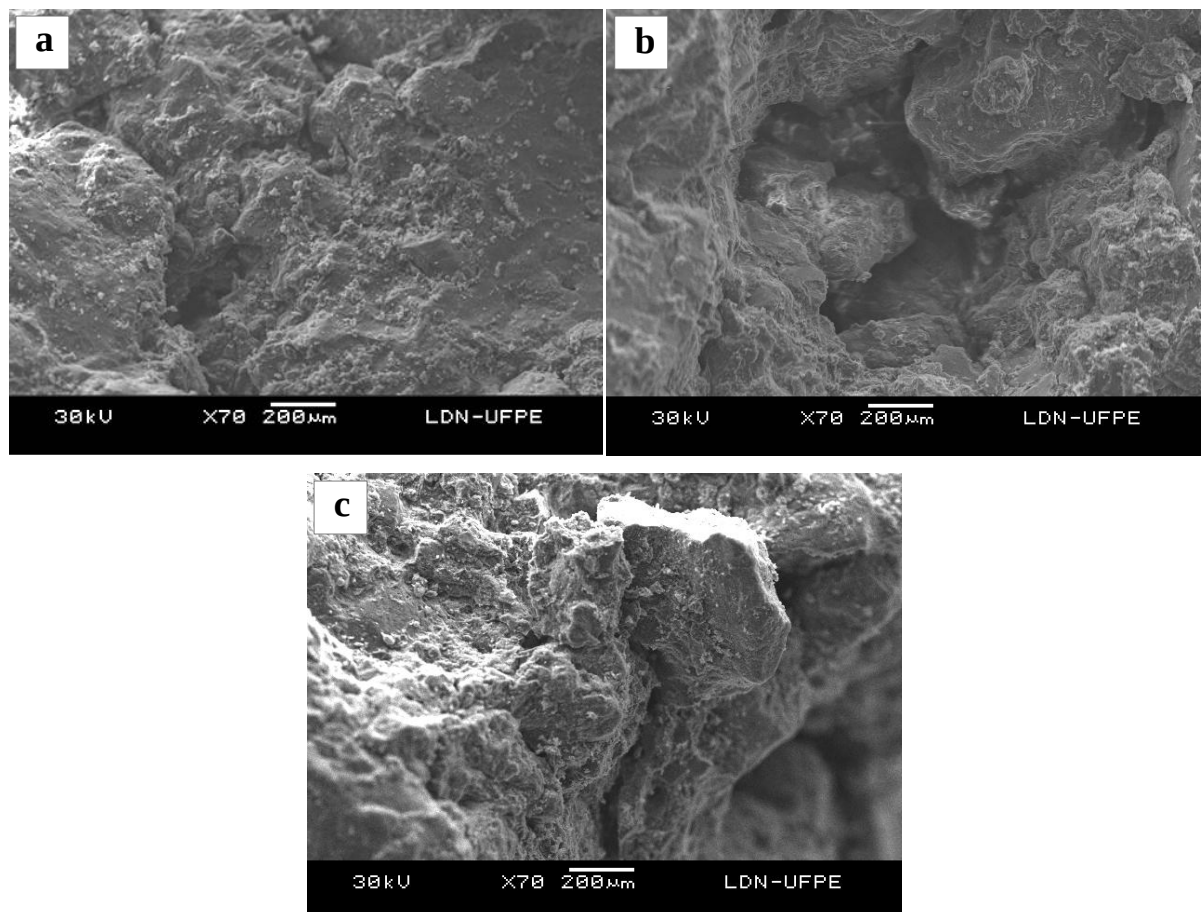
Figura 45 – Eletromicrografias da amostra S80/P20 aumentadas em 25x (a), 70x (b) e 100x (c).



Conforme ilustrado na Figura 45, os resíduos de pneus possuem tamanhos diferentes e a sua disposição dentro da matriz do solo é aleatória. Cabe salientar que a inserção dos resíduos de pneus no solo exerce uma maior influência na macroestrutura das misturas, pois as fissuras e vazios identificados nos compósitos fibrosos indicam os caminhos preferenciais da água, explicando os valores superiores de coeficiente hidráulico das misturas solo-pneu se comparados ao solo separadamente (item 4.3).

São apresentadas na Figura 46 as imagens referentes às amostras de solo com 10, 20 e 30% de agregado reciclado de RCD, ampliadas em 70x.

Figura 46 – Eletromicrografias das amostras de solo com 10% (a), 20% (b) e 30% de agregado reciclado de RCD (c), ampliadas em 70x.



As misturas de solo-RCD apresentam reentrâncias e saliências em suas superfícies de forma mais acentuada do que no solo. As partículas mais finas do solo se agregam as partículas do RCD, formando flóculos com diferentes formas e grumos de maiores dimensões, o que propicia a ocorrência de caminhos preferenciais de percolação de água, resultando,

consequentemente, no aumento da permeabilidade do solo (item 4.3). Embora a adição do agregado reciclado ao solo tenha favorecido a ocorrência de caminhos preferenciais, este material alternativo não tornou a estrutura dos compósitos facilmente desagregável.

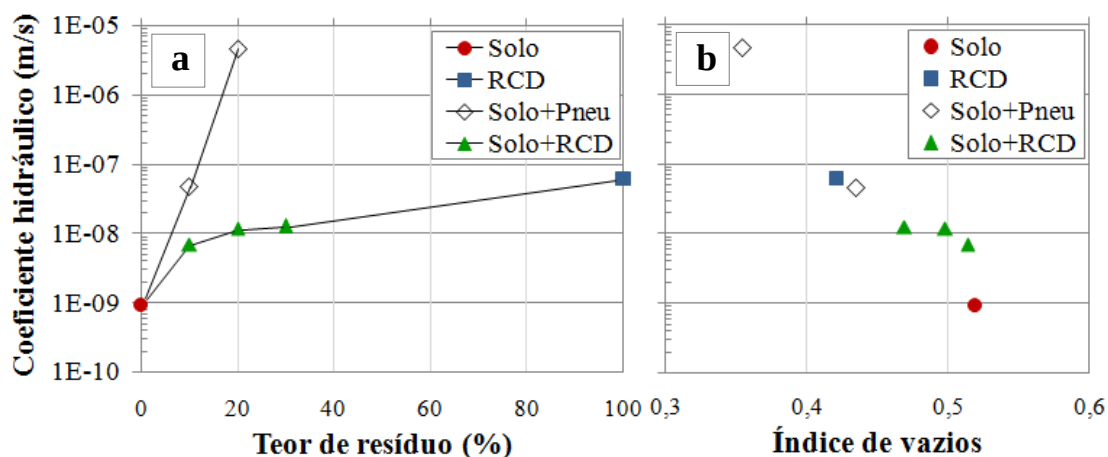
4.3 Permeabilidade

Os valores de coeficiente hidráulico, referentes à temperatura de 20°C, das amostras saturadas de solo, agregado reciclado de RCD, misturas solo-pneu e solo-RCD, compactadas em laboratório inicialmente na umidade ótima e peso específico seco máximo, são apresentados na Tabela 13. A variação do coeficiente de permeabilidade do solo com a inserção dos diferentes teores de resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD é apresentada na Figura 47. Os índices físicos iniciais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade encontram-se no Apêndice A.

Tabela 13 – Condutividade hidráulica, à temperatura de 20°C, das amostras estudadas.

Amostra	$k_{20^{\circ}\text{C}}$ (m/s)
Solo	$9,31 \times 10^{-10}$
S90/P10	$4,64 \times 10^{-8}$
S80/P20	$4,70 \times 10^{-6}$
RCD	$6,16 \times 10^{-8}$
S90/R10	$7,09 \times 10^{-9}$
S80/R20	$1,19 \times 10^{-8}$
S70/R30	$1,28 \times 10^{-8}$

Figura 47 – Variação do coeficiente de permeabilidade do solo com o teor de resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD (a) e em função do índice de vazios (b).



O solo, de textura areno-argilosa, apresenta um coeficiente hidráulico médio da ordem de $9,31 \times 10^{-10}$ m/s, Tabela 13, o que indica a sua baixa permeabilidade, atendendo aos requisitos para barreira hidráulica ($< 1 \times 10^{-9}$ m/s), conforme indica USEPA – *United States Environmental Protection Agency* (1993), devido ao arranjo granulométrico que possui.

O valor de condutividade hidráulica do agregado reciclado de RCD ($6,16 \times 10^{-8}$ m/s) se enquadra no intervalo das areias muito finas e siltes, misturas de ambos e argila (10^{-5} a 10^{-9} m/s), segundo Caputo e Caputo (2015). Este resultado revela que o agregado reciclado de RCD possui características hidráulicas próximas a de agregados naturais.

A incorporação de resíduos de pneus ao solo resultou em um crescimento significativo e quase linear da permeabilidade para valores na ordem de 10^{-8} a 10^{-6} m/s, Figura 47a. Com o aumento do teor de pneus ao solo, o índice de vazios dos compósitos diminui, devido ao maior volume ocupado pelo material pneumático dentro do compósito, e a permeabilidade cresce (contrário ao que se observa nos solos), Figura 47b. Isto se deve ao efeito dos resíduos de pneus na matriz do solo, como foi apresentado no item 4.2. O crescimento nos valores de permeabilidade de um solo areno-argiloso misturado com resíduos de pneus também foi um aspecto observado por Franco (2012).

As eletromicrografias, mostradas nas Figuras 44b e 45c, indicam a existência de canalículos, em virtude da presença dos resíduos de pneus, e de poros maiores no contato solo-pneu. Assim, a água percola mais facilmente no contato solo-pneu (macroporos) do que entre as partículas do solo (microporos), devido a menor perda de carga hidráulica sofrida pela água ao percolar pela macroestrutura, apontando uma maior permeabilidade. Dessa forma, a condutividade hidráulica da macroestrutura tem uma importância maior do que da microestrutura.

O coeficiente hidráulico do solo sofre um acréscimo quando misturado com o agregado reciclado de RCD, superando em mais de 13 vezes o valor obtido para o solo separadamente, porém a elevação do valor da permeabilidade entre as misturas é pequena, chegando a menor variação entre os teores de 20 e 30%, Figura 47a, demonstrando que não há uma diferença expressiva entre as características hidráulicas dos compósitos particulados formados.

Ressalta-se que a inserção de agregado de RCD ao solo facilita a redução da pressão neutra, gerando um efeito associado à dissipação desta pressão mais rapidamente, podendo as misturas serem aplicadas em obras de compactação. Há uma redução do índice de vazios do solo com a incorporação do agregado reciclado, Figura 47b, porém a condutividade hidráulica cresce devido ao aumento das floculações e grumos formados nas misturas, que propiciam caminhos preferenciais de percolação.

O agregado reciclado de RCD, as misturas solo-RCD e a mistura de solo com 10% de resíduos de pneus (S90/P10) podem ser utilizados em sistemas de cobertura para resíduos não perigosos, como aterros de RSU, uma vez que os níveis recomendáveis de condutividade hidráulica para esta aplicação são de até 1×10^{-7} m/s, segundo Austin (1992) e Daniel e Koerner (1993). Todavia, a mistura com 20% de resíduos de pneus (S80/P20) não se enquadra nesta aplicação, pois sua permeabilidade é de $4,70 \times 10^{-6}$ m/s, valor superior ao recomendado. Conforme a NBR 13896 (ABNT, 1997), a única mistura que pode ser aplicada em bases de aterros de RSU é a S90/R10, visto que possui uma permeabilidade inferior a 1×10^{-8} m/s.

Observa-se ainda que o solo e as misturas solo-resíduo concordam com as suas classificações como areias argilosas (SC), assim como o agregado reciclado de RCD como areia siltosa (SM), por apresentarem coeficientes hidráulicos típicos de uma areia com uma porção considerável de partículas finas.

4.4 Resistência ao cisalhamento

Os índices físicos correspondentes a etapa de moldagem e após a realização dos ensaios de cisalhamento direto das amostras estudadas, nas condições não inundada e saturada, podem ser vistos nos Apêndices B e C, respectivamente. O controle na moldagem das amostras para os ensaios de cisalhamento direto resultou em corpos de prova com pequena variação entre os índices físicos, se comparados aos desejados, o que mostra uma boa reprodutividade das condições de moldagem adotadas, garantindo a aplicabilidade da técnica de compactação estática empregada.

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal ($\tau \times dh$) e de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal ($dv \times dh$), nas quais o processo de dilatação é considerado negativo e o de compressão positivo, das amostras de solo, agregado reciclado de

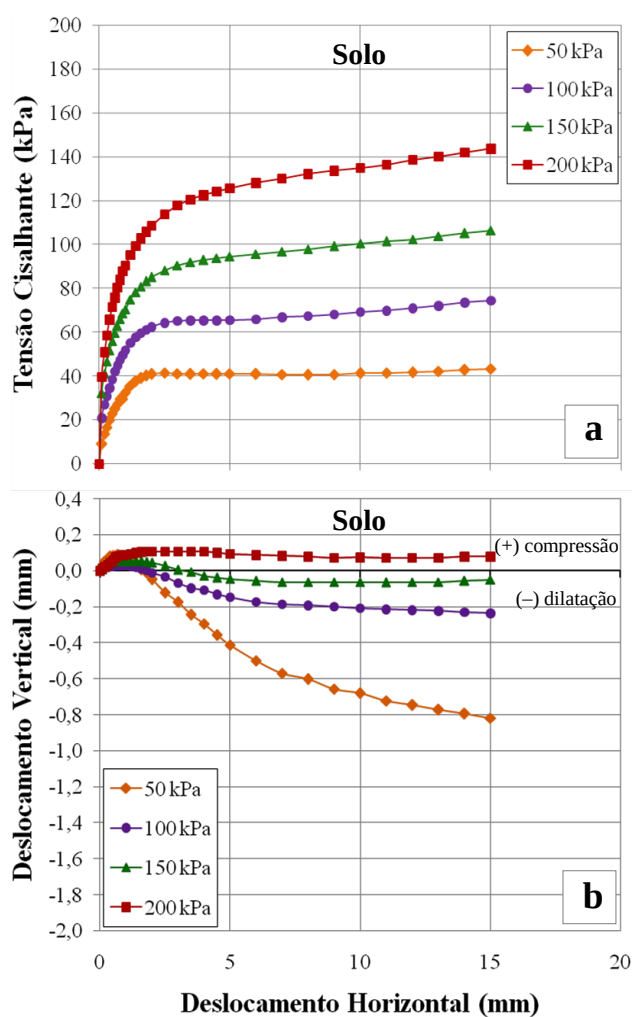
RCD e misturas solo-resíduo são expostas ao longo do deslocamento horizontal de 15 mm e para cada tensão normal (σ_n) adotada.

4.4.1 Ensaios não inundados

4.4.1.1 Solo

As curvas de τ x dh e de dv x dh do solo são apresentadas na Figura 48. Percebe-se que as curvas de resistência ao cisalhamento do solo crescem continuamente sem apresentar um pico de resistência, exceto para tensão de 50 kPa, que demonstra uma estabilização, Figura 48a.

Figura 48 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (a) e de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal do solo (b) na condição não inundada.



Com relação às curvas $d_v \times d_h$, observa-se que o solo compactado apresenta compressão total apenas para a tensão normal mais elevada (200 kPa) e nas demais tensões há uma inicial compressão com posterior dilatação em deslocamentos horizontais entre 1,5 e 3,5 mm, Figura 48b. Os deslocamentos verticais referentes às tensões normais de 150 e 200 kPa foram considerados mínimos, tanto no que diz respeito ao comportamento de compressão como ao de dilatação. A curva que atingiu o maior deslocamento vertical corresponde a tensão de 50 kPa, cujo valor foi da ordem de 0,8 mm.

4.4.1.2 Misturas solo-pneu

A Figura 49 ilustra as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, bem como as curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal das misturas de solo com 10 e 20% de resíduos de pneus, respectivamente.

A resistência máxima da mistura de solo com 10% de resíduos de pneus (S90/P10) é alcançada, com pico, em um deslocamento de 4 mm para a tensão de 50 kPa e 7 mm para a tensão de 100 kPa, já nas tensões de 150 e 200 kPa a resistência sofre um acréscimo sem apresentar uma condição de pico, Figura 49a.

A mistura S90/P10 apresenta-se por inteiro na área de dilatação para a tensão confinante de 50 kPa, Figura 49c, enquanto que nas demais tensões as curvas exprimem uma compressão inicial, sendo esta menos expressiva nas tensões de 100 e 150 kPa e de maior magnitude para a maior tensão aplicada (200 kPa), seguidas por um processo de dilatação.

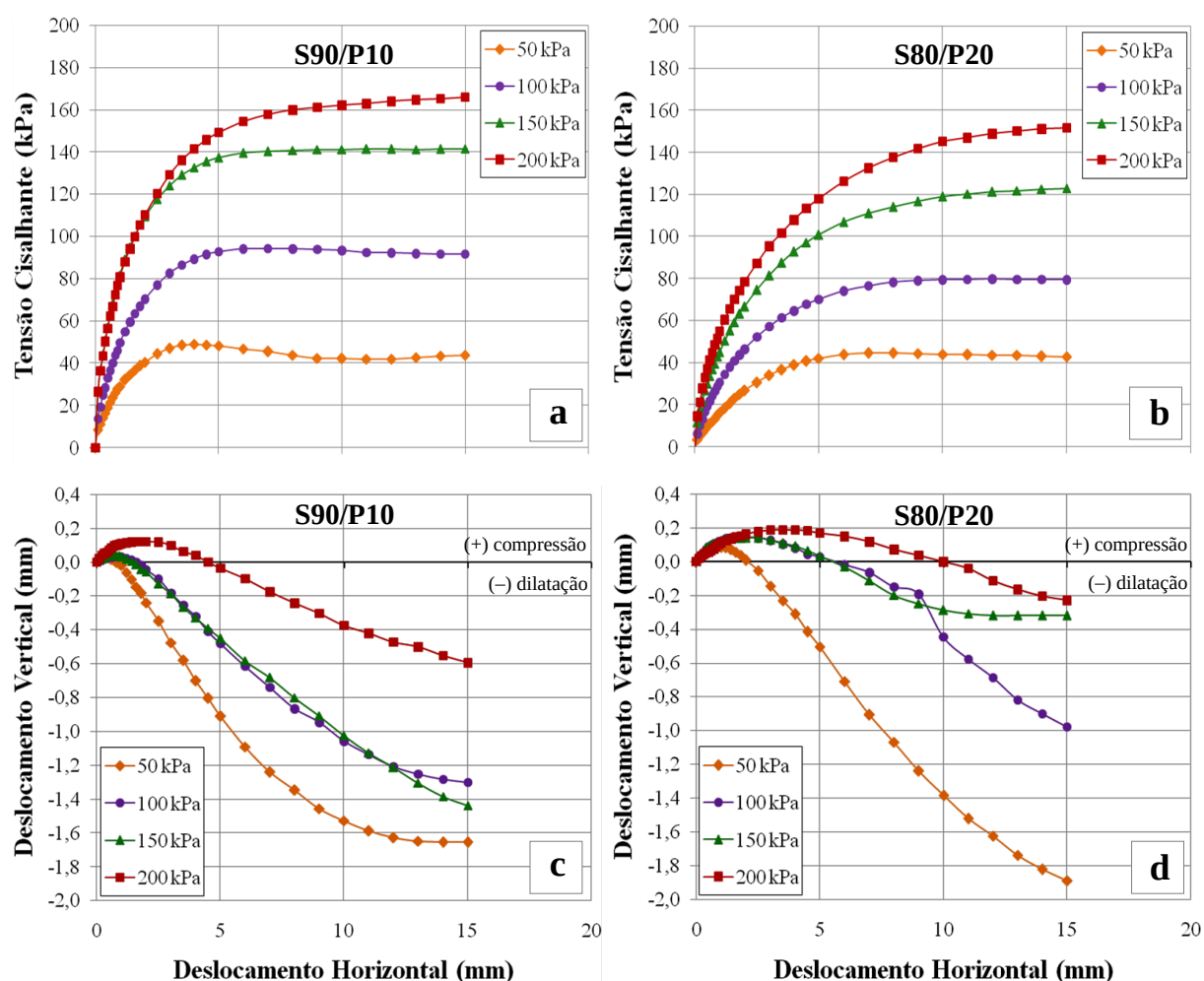
Para a mistura de solo com 20% de resíduos de pneus (S80/P20), a resistência ao cisalhamento apresenta um constante acréscimo para $\sigma_n \geq 100$ kPa, diferentemente da tensão de 50 kPa, que demonstra um ganho máximo de resistência até um deslocamento da ordem de 8 mm, com uma suave queda da resistência ao longo do deslocamento horizontal até o fim do ensaio, como pode ser visto na Figura 49b.

As curvas $d_v \times d_h$ da mistura S80/P20 comprimem inicialmente, apresentando uma posterior dilatação, Figura 49d, entretanto tais curvas demonstram um comportamento mais prolongado de compressão, se comparadas a mistura de solo com 10% de resíduos de pneus, propondo

que os deslocamentos horizontais nos quais se desenvolve compressão aumentam com o acréscimo do teor de resíduos de pneus na mistura.

Com relação as deformações volumétricas, observa-se que todas as curvas das misturas S90/P10 e S80/P20 apresentam uma tendência de expandir-se em função da movimentação da caixa do equipamento, sobretudo na tensão de 50 kPa.

Figura 49 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as misturas com 10% (a) e 20% de resíduos de pneus (b); e curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal das misturas com 10% (c) e 20% de resíduos de pneus (d), na condição não inundada.



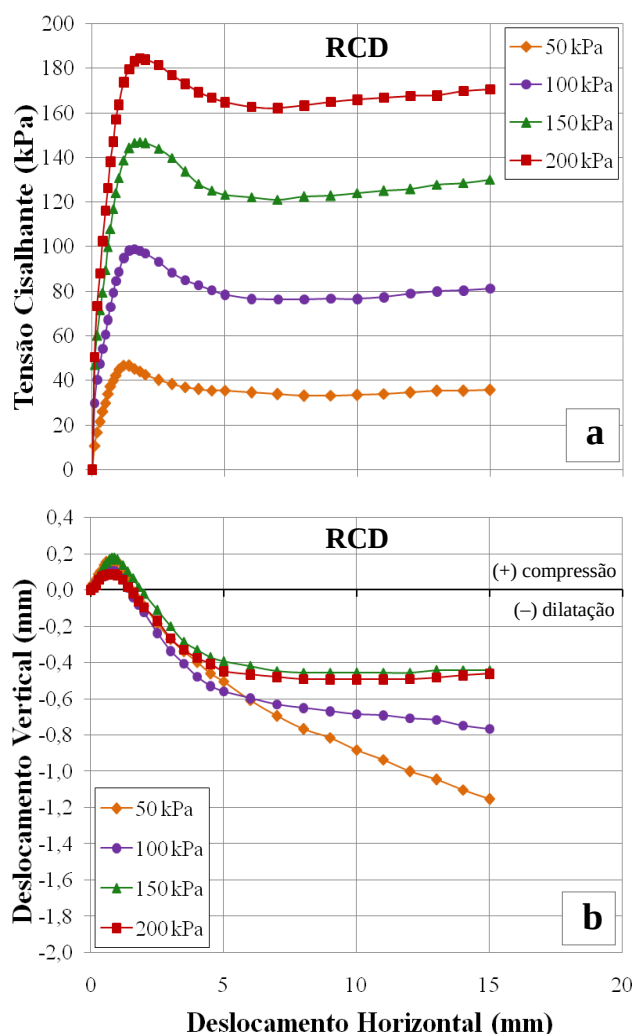
4.4.1.3 Agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD

As curvas de $\tau \times dh$ e de $dv \times dh$ para as amostras de agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD estão nas Figuras 50 e 51, respectivamente. O agregado reciclado exprime comportamento $\tau \times dh$ com a ocorrência de pico de resistência bem definido em todas as

tensões normais aplicadas, apresentando uma reação de material friável, sendo o máximo de resistência atingido na faixa entre 1 e 2 mm de deslocamento horizontal, Figura 50a. Nota-se também que, após o alcance da máxima resistência, há uma posterior redução da mesma em todas as tensões normais, denotando uma resistência residual, contudo esta não atinge patamares constantes até o fim do ensaio, pois se constata um “falso” aumento de resistência a partir de 8 mm de deslocamento, Figura 50a, podendo ser explicado pela eventual ocorrência da rotação dos principais planos de tensões existentes durante a execução do ensaio.

O agregado reciclado de RCD, em todas as tensões normais, apresenta um comportamento inicial de compressão com posterior dilatação ao atingir um deslocamento no intervalo de 1 a 2 mm, Figura 50b. O maior deslocamento vertical neste material foi exibido para tensão normal de 50 kPa, cujo valor é 1,1 mm.

Figura 50 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (a) e de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal do agregado reciclado de RCD (b), na condição não inundada.



As curvas de $\tau \times dh$ dos compósitos particulados ascendem continuamente em todas as tensões normais com o aumento do deslocamento horizontal, exceto para a tensão de 50 kPa na mistura S80/R20, que apresenta uma mobilização suave da tensão cisalhante máxima em um deslocamento de 3 mm, Figura 51b, e para a tensão de 50 kPa nas demais misturas (S90/R10 e S70/R30), que indicam uma estabilização, Figuras 51a e 51e.

Nas misturas de solo-RCD, as curvas relacionadas à maior tensão normal (200 kPa) exibem sempre comportamento compressivo. As demais curvas assumem um processo de contração inicial seguido por um comportamento dilatante, com exceção das curvas referentes às tensões de 50 e 100 kPa da mistura S70/R30, que encontram-se totalmente inseridas na dilatância, como pode ser observado na Figura 51f.

Figura 51 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as misturas com 10% (a), 20% (b) e 30% de agregado reciclado de RCD (e); e curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal das misturas com 10% (c), 20% (d) e 30% de agregado reciclado de RCD (f), na condição não inundada. (continua)

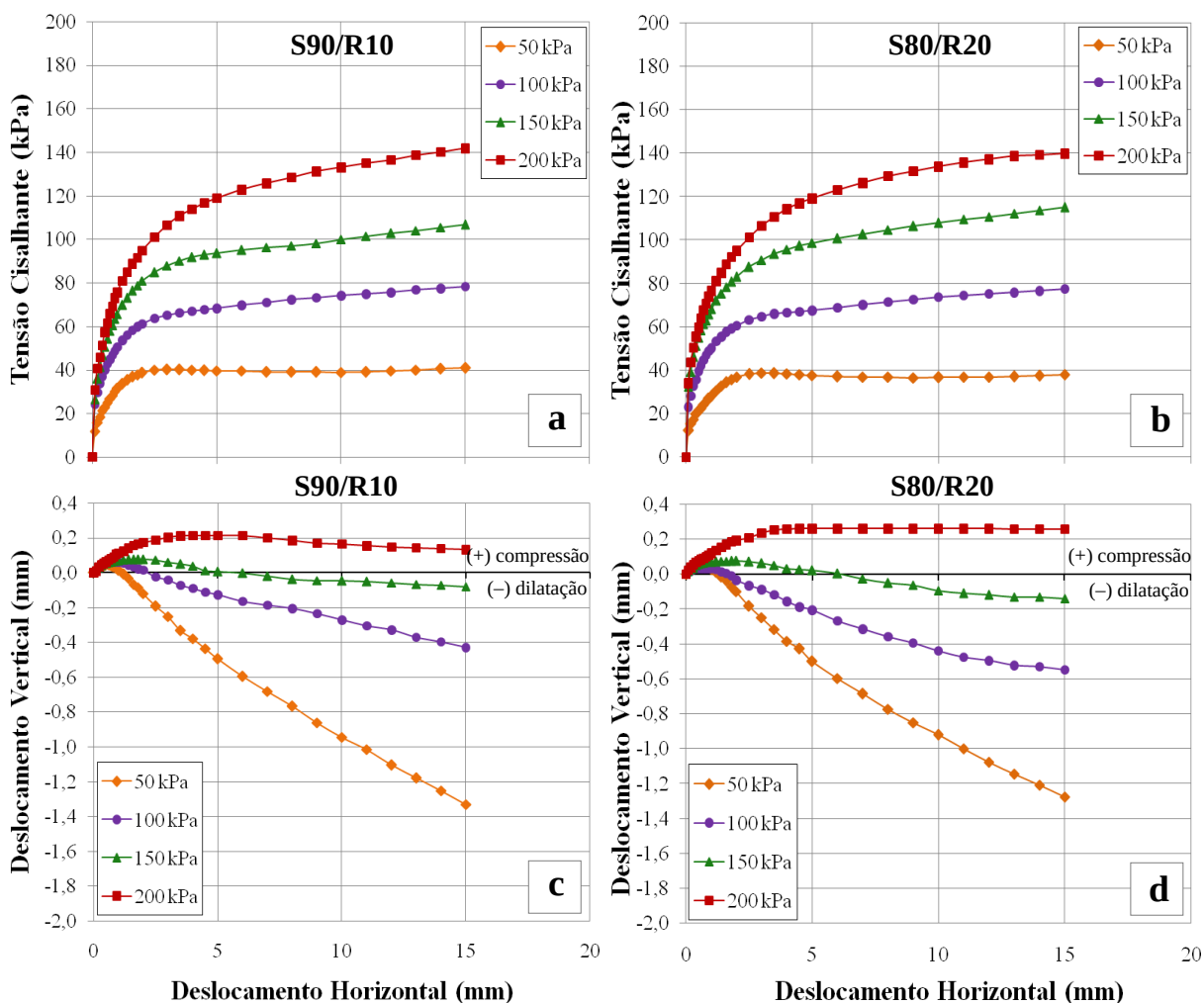
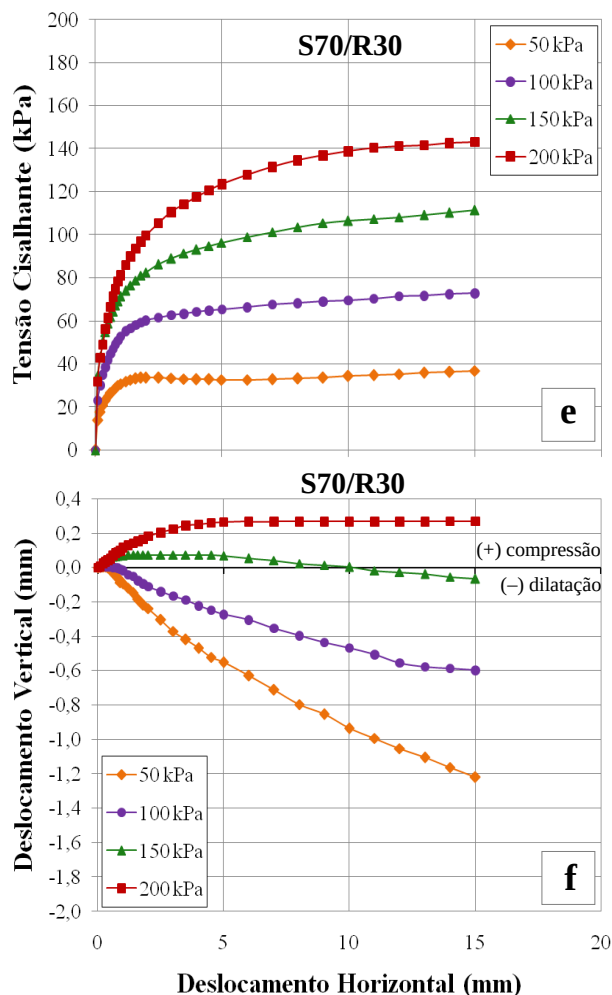


Figura 51 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as misturas com 10% (a), 20% (b) e 30% de agregado reciclado de RCD (e); e curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal das misturas com 10% (c), 20% (d) e 30% de agregado reciclado de RCD (f), na condição não inundada. (conclusão)



Como exposto nas Figuras 48 a 51, todas as amostras apresentaram variações dos deslocamentos verticais, revelando a ocorrência de alterações volumétricas dos corpos de prova durante a realização dos ensaios. Também foi observado que o efeito de dilatância sofre uma redução com o aumento da tensão normal em todas as amostras.

Cabe ressaltar que os maiores deslocamentos verticais foram observados nos compósitos fibrosos, em função dos resíduos de pneus serem materiais altamente deformáveis e compressíveis. Este comportamento foi mais acentuado com o teor de 10% de resíduos de pneus adicionados ao solo.

4.4.1.4 Comparativos

Uma comparação entre as curvas das misturas solo-resíduo e seus respectivos materiais de origem, para cada tensão normal aplicada nos ensaios de cisalhamento direto não inundado, é apresentada nas Figuras 52 e 53.

As curvas $\tau \times d_h$ do solo, de modo geral, apresentam um comportamento elasto-plástico com enrijecimento, diferentemente de Macedo (2016), cujas curvas do solo apresentam um pico, denotando um comportamento elasto-plástico com endurecimento/amolecimento, característico de um material friável.

Figura 52 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal do solo e das misturas de solo-pneu para as tensões normais de 50 (a), 100 (b), 150 (c) e 200 kPa (d), na condição não inundada.

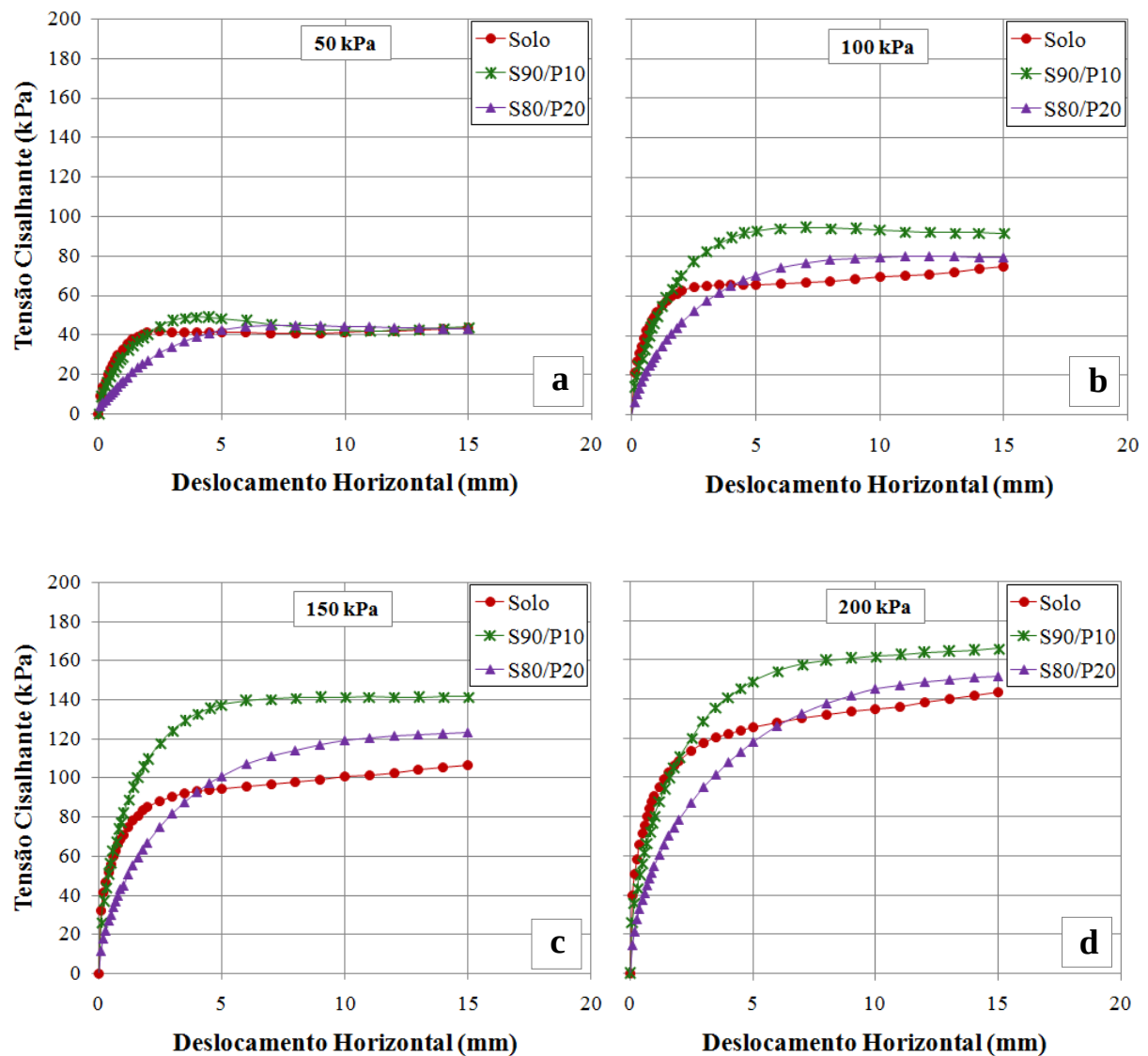
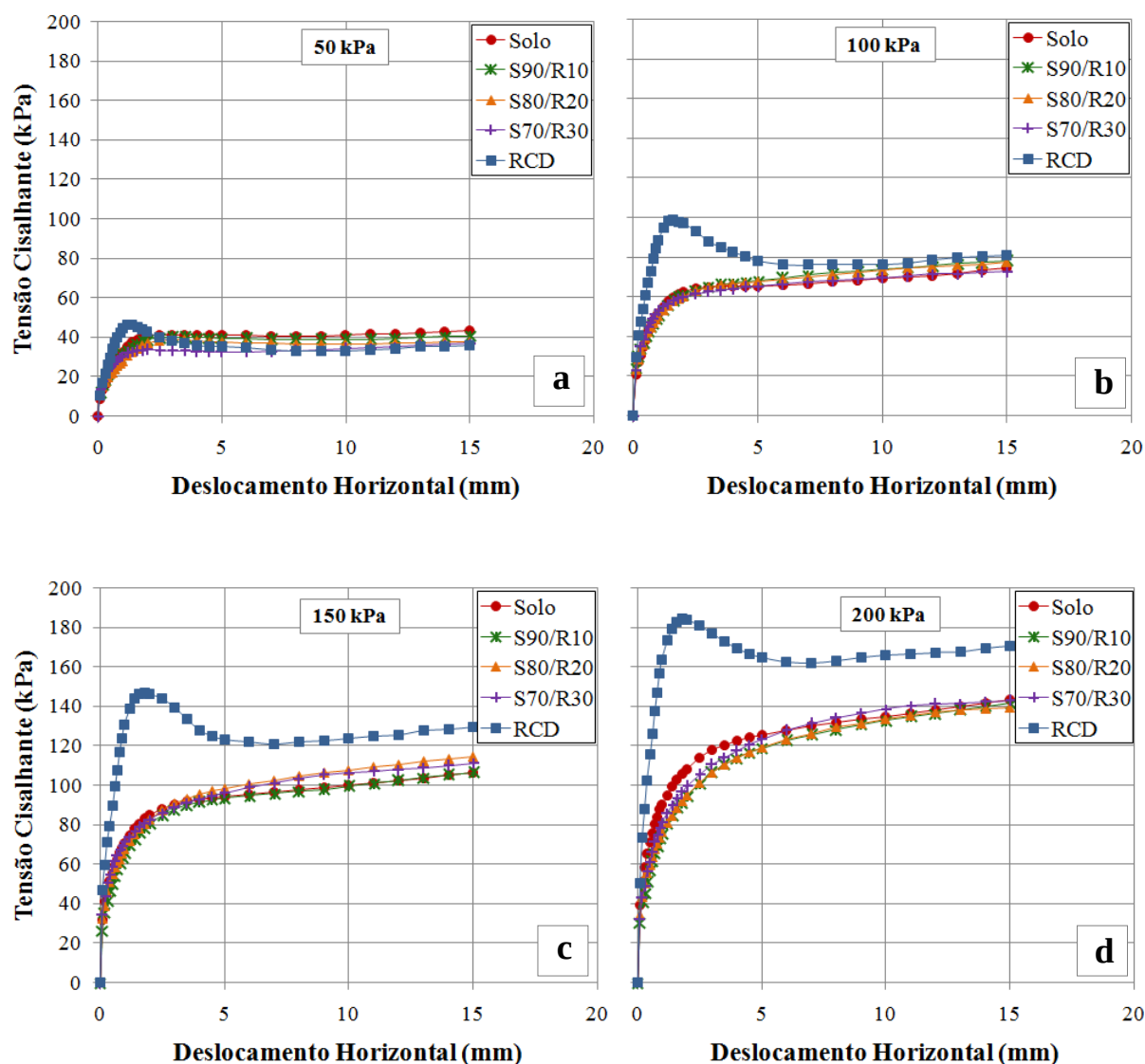


Figura 53 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal do solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD para as tensões normais de 50 (a), 100 (b), 150 (c) e 200 kPa (d), na condição não inundada.



O tipo de comportamento obtido para o solo também é observado para as misturas solo-pneu, Figura 52, sendo perceptível ainda uma tendência à estabilização nas tensões normais de 150 e 200 kPa para a mistura com 10% de resíduos de pneus e nas tensões de 100, 150 e 200 kPa para a mistura com 20% do mesmo resíduo.

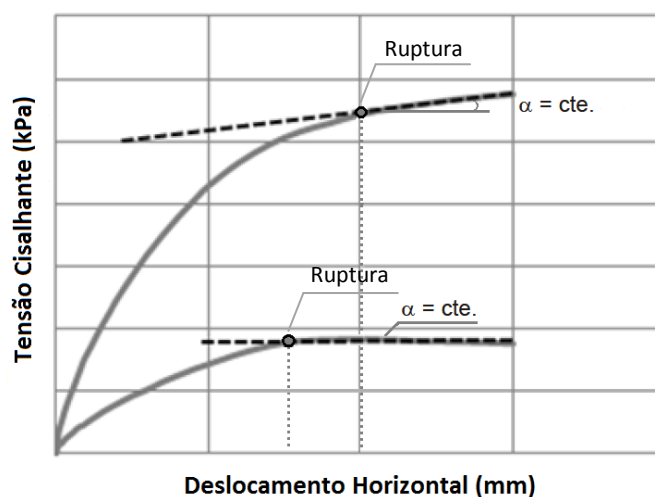
Nota-se ainda que as tensões de rotação aparecem menos nas misturas solo-pneu e os resíduos pneumáticos tendem a ser mais mobilizados em elevadas tensões, requerendo inclusive maiores deslocamentos para que seus efeitos contribuam de forma mais significativa sobre as propriedades resistentes do solo, ou seja, os materiais pneumáticos contribuem com a ductilidade do solo.

A boa interação entre os constituintes dos compósitos fibrosos resulta em uma transferência de esforços da matriz do solo para os resíduos pneumáticos, proporcionando o aumento da sua resistência. Este tipo de comportamento também foi relatado por Macedo (2016).

As amostras de solo e misturas solo-RCD apresentam curvas de $\tau \times dh$ semelhantes, como ilustra a Figura 53. Há uma estabilização da tensão cisalhante em 50 kPa, tanto para o solo quanto para os compósitos particulados, com exceção da mistura S80/R20, porém nas demais tensões há um acréscimo de resistência ao longo do deslocamento horizontal, caracterizando um comportamento típico de material elasto-plástico com endurecimento. Já o agregado reciclado de RCD separadamente apresenta ruptura do tipo elasto-plástica envolvendo endurecimento/amolecimento e uma resistência superior as obtidas para o solo e para as misturas solo-RCD.

É importante destacar que para as amostras que não apresentam um comportamento de pico bem definido nas curvas de tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal, os pontos de ruptura foram obtidos a partir do momento em que as curvas $\tau \times dh$ apresentassem uma inclinação razoavelmente constante, conforme definido por De Campos e Carrillo (1995), Figura 54, sendo este o critério de ruptura adotado.

Figura 54 – Definição da tensão cisalhante na ruptura, conforme De Campos e Carrillo (1995).

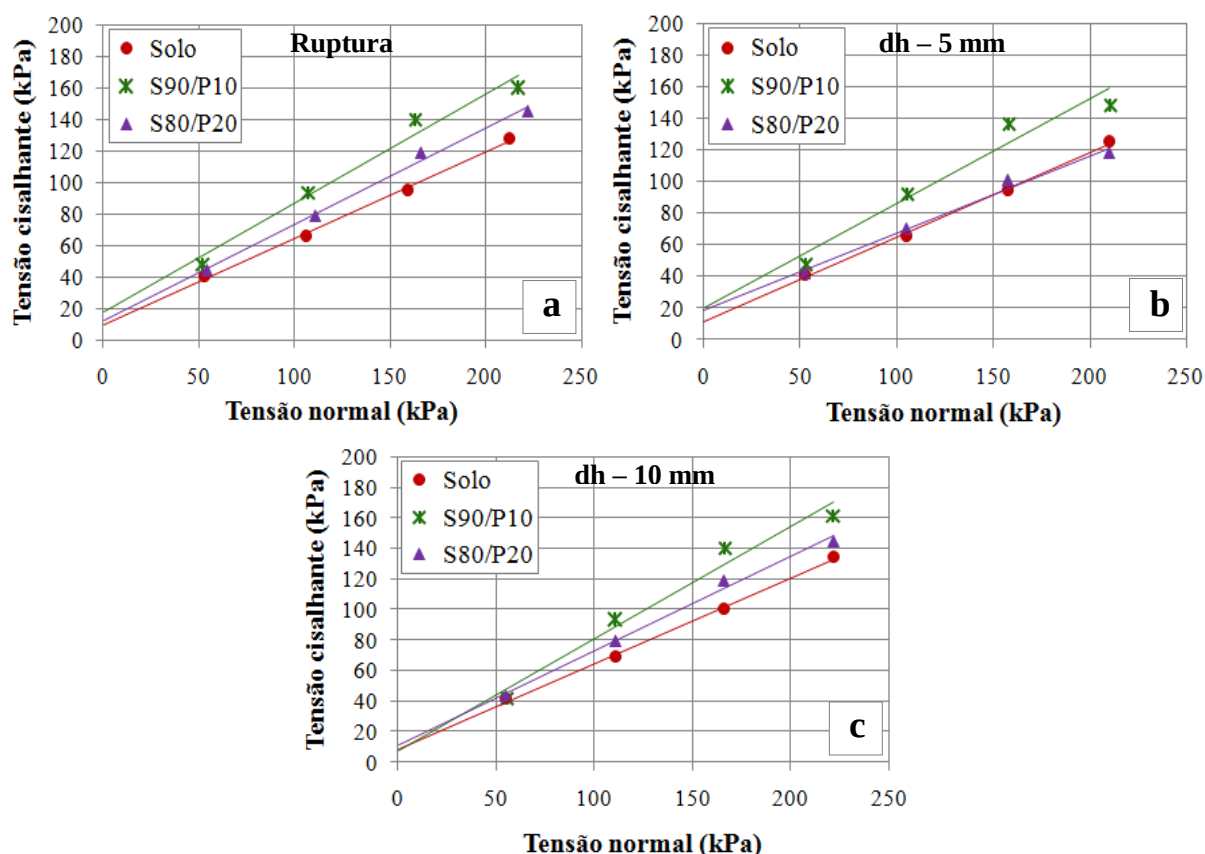


Onde: α – inclinação da curva tensão x deslocamento horizontal.

As envoltórias de resistência Mohr-Coulomb do solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-resíduo, traçadas a partir das curvas de tensão cisalhante ao longo do deslocamento

horizontal, são ilustradas nas Figuras 55 e 56. Os pontos plotados correspondem aos valores das tensões cisalhantes na ruptura e nos deslocamentos horizontais de 5 e 10 mm, para cada tensão normal imposta, sendo estas corrigidas segundo o plano de ruptura.

Figura 55 – Envolvórias de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-pneu, para as tensões cisalhantes de ruptura/critério De Campos e Carrillo (1995) (a), deslocamento horizontal de 5 mm (b) e deslocamento horizontal de 10 mm (c).

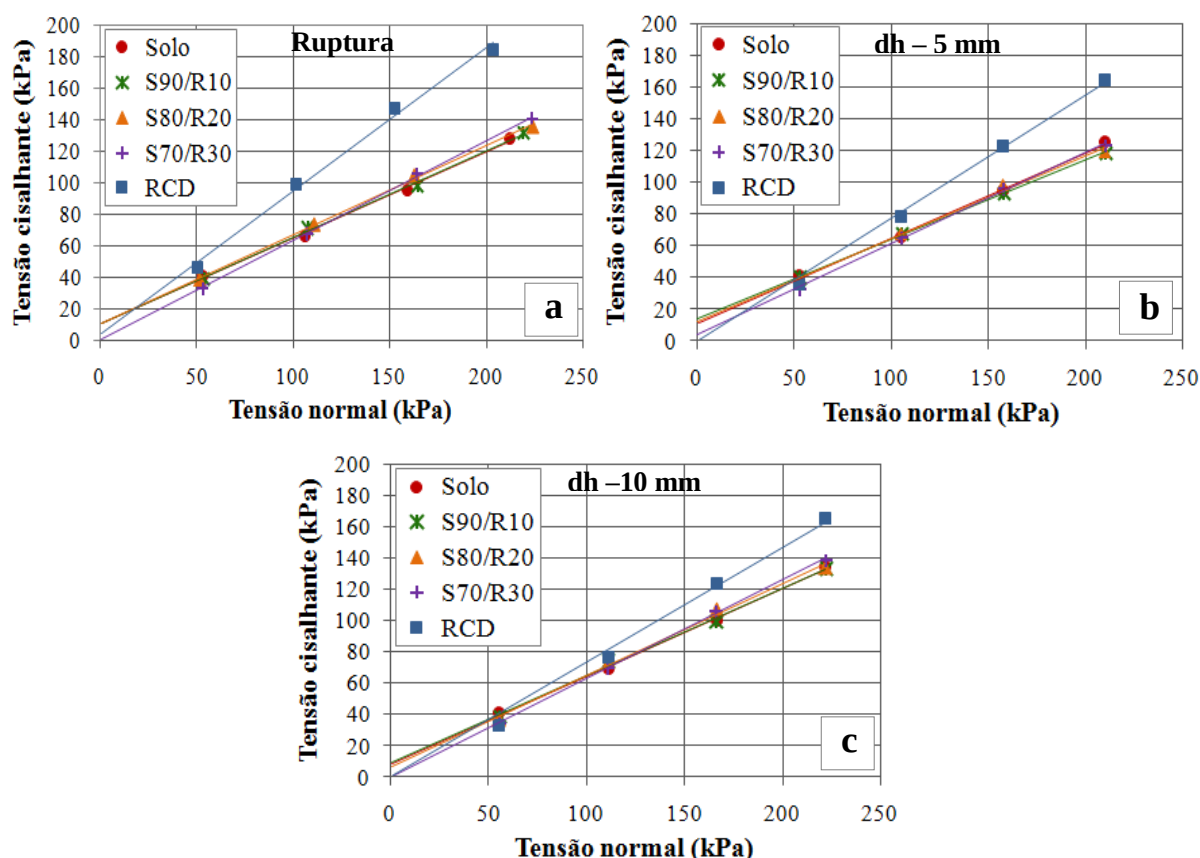


Onde: dh – deslocamento horizontal.

Ao se comparar os pontos de tensão cisalhante máxima do solo e das misturas solo-pneu expostos na Figura 55, verifica-se que a adição de resíduos de pneus causou um aumento da resistência de ruptura do solo em todos os níveis de tensões normais, visto que o material pneumático pode absorver mais energia do que o solo isoladamente, isto é, os resíduos de pneus majoram a tenacidade do solo. Este efeito é contrário aos resultados apresentados por Macedo (2016), que embora também tenha estudado a inserção de resíduos de pneus em um solo areno-argiloso, este possui uma composição granulométrica diferente da do solo utilizado nesta pesquisa.

Embora exista um aumento das tensões cisalhantes do solo com a inserção de resíduos de pneus, este acréscimo não ocorreu proporcionalmente ao teor de resíduos incorporado a matriz do solo, pois a resistência foi superior para o caso da mistura com 10% de resíduos pneumáticos, em todos os níveis de deslocamento, Figura 55, propondo haver um teor ótimo.

Figura 56 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo, agregado reciclado de RCD e misturas solo-RCD, para as tensões cisalhantes de ruptura/critério De Campos e Carrillo (1995) (a), deslocamento horizontal de 5 mm (b) e deslocamento horizontal de 10 mm (c).



Onde: dh – deslocamento horizontal.

As tensões cisalhantes das misturas solo-RCD, tanto de ruptura quanto nos deslocamentos de 5 e 10 mm, Figura 56, situam-se muito próximas do valor obtido para o solo compactado, sendo este cenário também constatado por Macedo (2016). Por outro lado, o agregado reciclado de RCD apresenta valores superiores aos do solo e de todas as misturas solo-RCD, como já indicado pelas curvas $\tau \times dh$.

Os parâmetros de resistência, coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), dos materiais na ruptura e em diferentes níveis de deformação encontram-se nas Tabelas 14 e 15, sendo tais valores comparados com os encontrados em outras pesquisas.

Os valores de tensão normal corrigida, tensão cisalhante e deslocamento horizontal obtidos na ruptura, bem como os coeficientes de correlação e determinação das envoltórias de resistência dos materiais ensaiados são apresentados no Apêndice D.

Tabela 14 – Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência na condição de ruptura e para diferentes deslocamentos horizontais do solo (desta e de outras pesquisas) e das misturas solo-pneu.

Amostra	Deslocamento horizontal de 5 mm			Deslocamento horizontal de 10 mm			Condição de ruptura/ critério De Campos e Carrillo (1995)		
	c (kPa)	Φ (°)	R ²	c (kPa)	Φ (°)	R ²	c (kPa)	Φ (°)	R ²
Solo (LAFAYETTE, 2000)	6**	14**	-	7**	19**	-	7	26	-
Solo* (MOURA <i>et al.</i> , 2012)	-	-	-	-	-	-	31	30	-
Solo* (MACEDO, 2016)	38,1	16	-	25,8	29	-	25	34	-
Solo*	11	28	0,99	8,5	29	0,99	10	29	0,99
S90/P10	20,1	33,5	0,95	7,8	36	0,97	18,1	34,5	0,97
S80/P20	18,3	26	0,99	11,1	32	0,99	12,4	31,5	0,99

Onde: (*) – solo compactado; (**) – valores obtidos com base no estudo de Lafayette (2000) em solo natural indeformado.

Tabela 15 – Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência na condição de ruptura e para diferentes deslocamentos horizontais do solo (desta e de outras pesquisas) e das misturas solo-RCD.

Amostra	Deslocamento horizontal de 5 mm			Deslocamento horizontal de 10 mm			Condição de ruptura/ critério De Campos e Carrillo (1995)		
	c (kPa)	Φ (°)	R ²	c (kPa)	Φ (°)	R ²	c (kPa)	Φ (°)	R ²
Solo (LAFAYETTE, 2000)	6**	14**	-	7**	19**	-	7	26	-
Solo* (MOURA <i>et al.</i> , 2012)	-	-	-	-	-	-	31	30	-
Solo* (MACEDO, 2016)	38,1	16	-	25,8	29	-	25	34	-
Solo*	11	28	0,99	8,5	29	0,99	10	29	0,99
RCD	0	38	1,00	0	36	1,00	4,3	42	0,99
S90/R10	14,3	26,5	1,00	9,5	29	0,99	10,3	29	0,99
S80/R20	12	27,5	0,99	6,6	30,5	0,99	10,6	29,5	1,00
S70/R30	3,8	30	1,00	0	32	1,00	0	32	1,00

Onde: (*) – solo compactado; (**) – valores obtidos com base no estudo de Lafayette (2000) em solo natural indeformado.

O solo desta pesquisa apresenta coesão de 10 kPa e ângulo de atrito de 29°, na condição de ruptura. Lafayette (2000) relatou, para este mesmo cenário, coesão de 7 kPa e ângulo de atrito de 26° para o solo indeformado de um de seus poços de investigação na encosta do Alto do

Reservatório. Moura *et al.* (2012) e Macedo (2016), ao investigarem amostras deformadas de solo da mesma área de estudo que o desta pesquisa, apresentaram coesões de 31 e 25 kPa e ângulos de atrito de 30° e 34°, respectivamente. Os resultados do solo, comparados com outras pesquisas, indicam uma pequena variação entre os ângulos de atrito, enquanto que a variação dos valores de coesão é mais significativa.

Com base no critério de ruptura, nota-se que os compósitos fibrosos exibem coesões e ângulos de atrito maiores do que os do solo, Tabela 14. Dentre as misturas de solo-pneu, a mistura S80/P20 apresenta parâmetros de resistência menores do que os da mistura S90/P10, propondo que a maior presença do resíduo dificulta a distribuição de esforços dentro da matriz.

Para efeitos práticos, a inserção de agregado reciclado na matriz do solo argiloso, praticamente, não altera o valor de intercepto coesivo e há um pequeno acréscimo do ângulo de atrito, Tabela 15, tanto na condição de ruptura quanto nos diferentes níveis de deslocamento horizontal.

No que tange a qualidade de ajuste dos pontos dos gráficos (Figura 56a) em torno das respectivas linhas de tendência do solo e do agregado reciclado de RCD, foram calculados os coeficientes de determinação (R^2) dos materiais em questão e expostos na Tabela 14. Os valores de R^2 para as envoltórias Morh-Coulomb do solo e do agregado de RCD estão situados próximo de 1, o que denota um bom ajuste linear.

Quanto a esta análise para as misturas solo-pneu e solo-RCD, verifica-se que os coeficientes de determinação apresentam uma relação muito forte, pois seus valores são iguais ou encontram-se próximos de 1, Tabelas 14 e 15, indicando um ajuste adequado das retas de regressão apresentadas nas Figuras 55 e 56.

A variação dos parâmetros de resistência do solo à medida que o teor de resíduos de pneus e agregado reciclado de RCD aumenta é ilustrada graficamente nas Figuras 57 e 58. São comparadas as curvas na condição de ruptura/critério De Campos e Carrillo (1995) com as referentes aos deslocamentos horizontais de 5 e 10 mm.

Figura 57 – Relação entre o teor de resíduos de pneus e a coesão (a) e o ângulo de atrito (b) do solo, na condição de ruptura e nos deslocamentos de 5 e 10 mm.

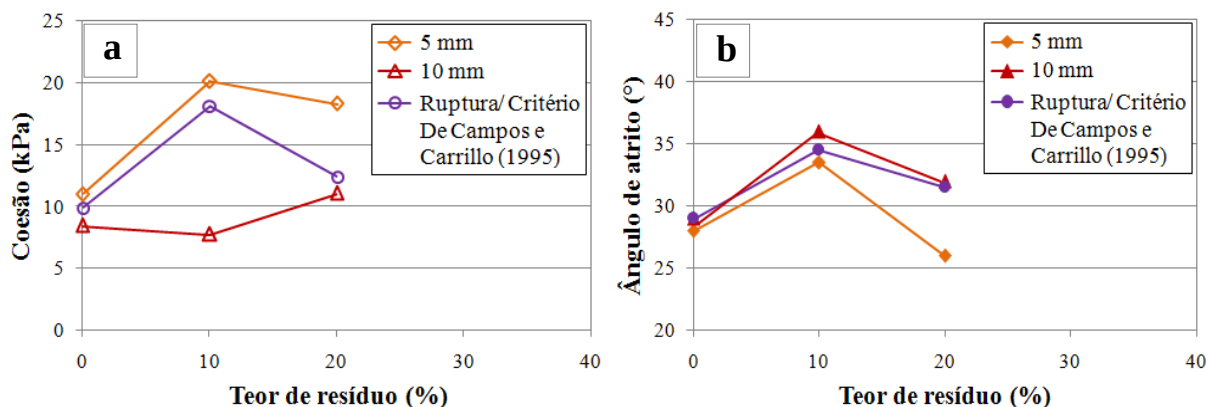
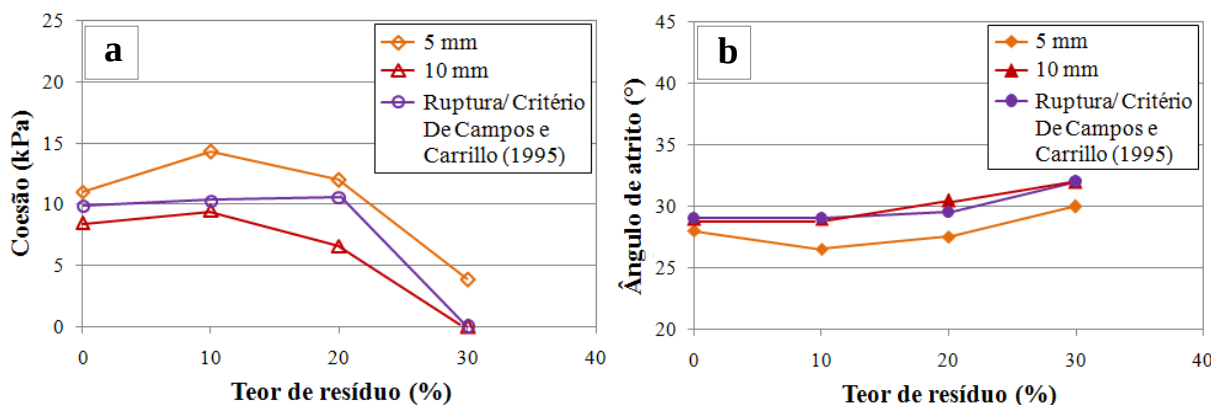


Figura 58 – Relação entre o teor de agregado reciclado de RCD e a coesão (a) e ângulo de atrito (b) do solo, na condição de ruptura e nos deslocamentos de 5 e 10 mm.



Verifica-se que os resíduos de pneus interferem no plano teórico de ruptura do solo, contudo não há uma relação clara para a variação da coesão e do ângulo de atrito das misturas solo-pneu, tanto na condição de ruptura quanto nos deslocamentos de 5 e 10 mm, Figura 57, podendo isto ser justificado devido à aleatoriedade na posição das partículas de pneus dentro da estrutura de cada amostra. O mesmo comportamento foi observado por Edinçliler e Ayhan (2010), Franco (2012) e Sellaf *et al.* (2014) ao utilizarem desbastes de pneus em seus estudos, já Macedo (2016) relata comportamento inverso ao desta pesquisa.

As misturas solo-RCD exprimem, de forma geral, uma variação não linear de seus parâmetros, em todos os níveis de deslocamento. Os valores de ângulo de atrito das amostras na ruptura, Figura 58b, são considerados semelhantes até a adição de 20% de agregado reciclado, sendo constatado a partir deste teor um pequeno aumento do ângulo de atrito, assim como nos resultados de Macedo (2016). Para a coesão se observa que, até a mistura com 20%

de agregado de RCD, os valores praticamente não se alteram, Figura 58a, ao contrário de Macedo (2016), que indica em seu estudo uma redução constante deste parâmetro até a proporção de 30% de inserção de agregado reciclado de RCD ao solo.

4.4.2 Ensaios saturados

As curvas de $\tau \times d_h$, bem como as de $d_v \times d_h$ das amostras saturadas de solo, mistura de solo com 20% de resíduos de pneus e com 30% de agregado reciclado de RCD, são apresentadas nas Figuras 59 e 60.

Figura 59 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (a) e de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal do solo saturado (b).

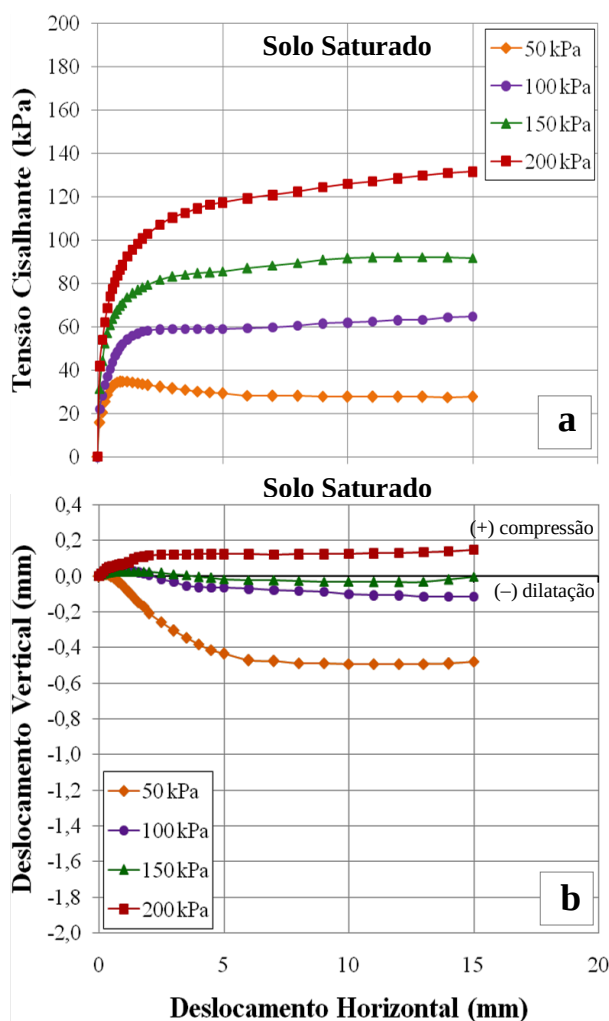
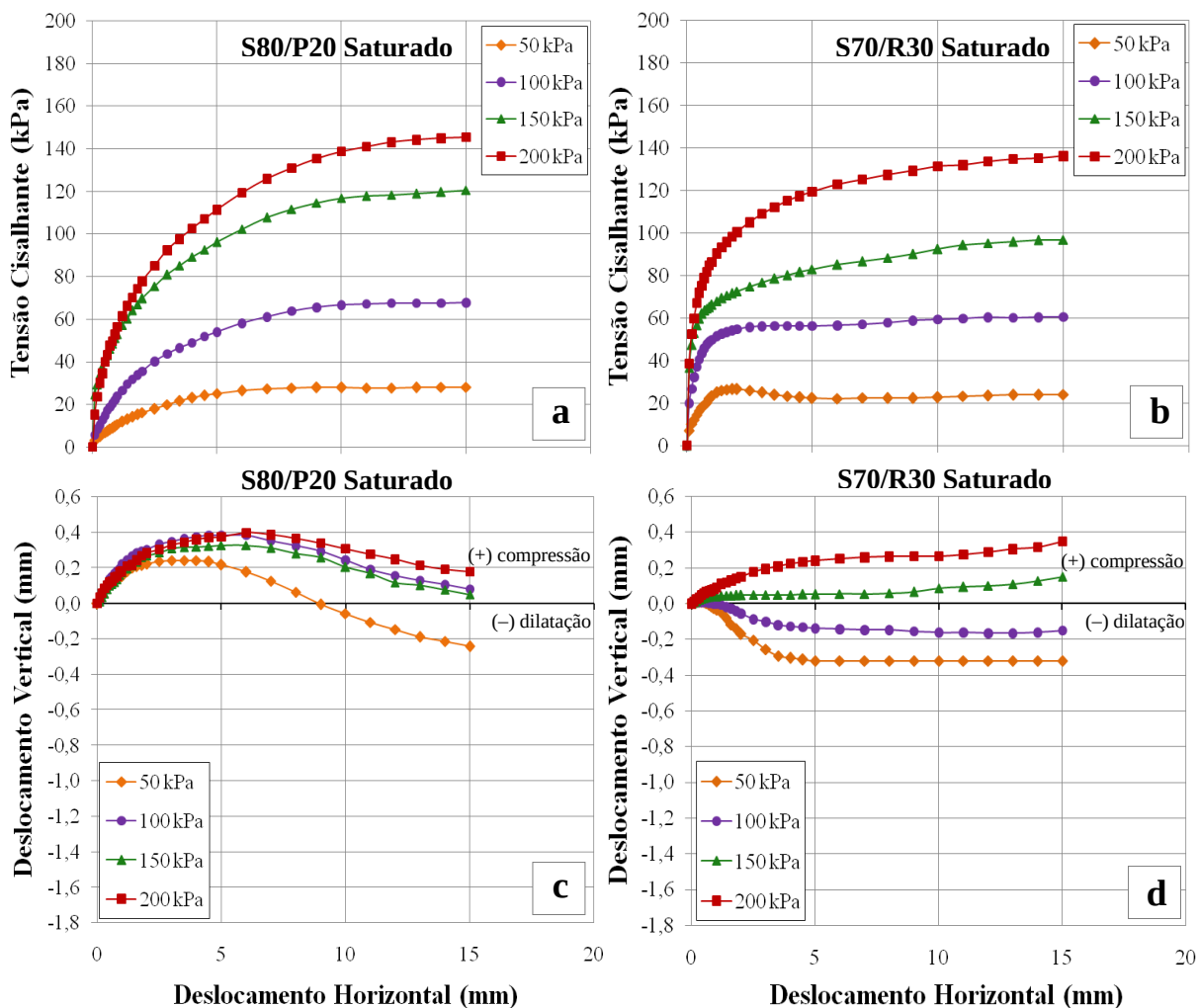


Figura 60 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para a mistura com 20% de resíduos de pneus (a) e 30% de agregado reciclado de RCD (b); e curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal das misturas com 20% de resíduos de pneus (c) e 30% de agregado reciclado de RCD (d), na condição saturada.



As curvas de resistência ao cisalhamento das amostras saturadas não apresentam alterações significativas no tipo de comportamento quando comparadas aos ensaios não inundados, sendo todas de materiais elasto-plásticos com enrijecimento. Porém, as curvas do solo e da mistura S70/R30, na tensão de 50 kPa, mostram um pico de resistência bem definido, caracterizando uma ruptura do tipo elasto-plástica com endurecimento/amolecimento, diferente dos resultados no ensaio de cisalhamento direto não inundado.

As amostras saturadas de solo e mistura S70/R30 apresentam deslocamentos verticais praticamente constantes a partir de 5 mm de deslocamento horizontal, Figuras 59b e 60d, isso mostra a pequena alteração volumétrica dos corpos de prova durante a realização dos ensaios, podendo-se inferir inclusive que a expulsão da água foi mínima. Por outro lado, a mistura

S80/P20 expõe variações do deslocamento vertical, sendo estas menos expressivas se comparadas ao ensaio não inundado, estando as curvas $dv \times dh$ inseridas totalmente na compressão para as tensões ≥ 100 kPa.

Há uma redução da dilatação com o aumento da tensão normal em todas as amostras saturadas, assim como observado nos ensaios não inundados, sendo ainda verificado que as curvas $dv \times dh$ das amostras ensaiadas não indicam uma tendência de expandir-se em função da movimentação da caixa do equipamento, com exceção da amostra S80/P20.

As envoltórias de resistência das amostras saturadas de solo e misturas S80/P20 e S70/R30, em comparação com os resultados dos ensaios não inundados, na condição de ruptura, são ilustradas na Figura 61, seguidas pela Tabela 16, que apresenta os valores de coesão e ângulo de atrito das amostras não inundadas e saturadas.

Figura 61 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras saturadas e não inundadas de solo (a), mistura com 20% de resíduos de pneus (b) e mistura com 30% de agregado reciclado de RCD (c), na condição de ruptura/critério De Campos e Carrillo (1995).

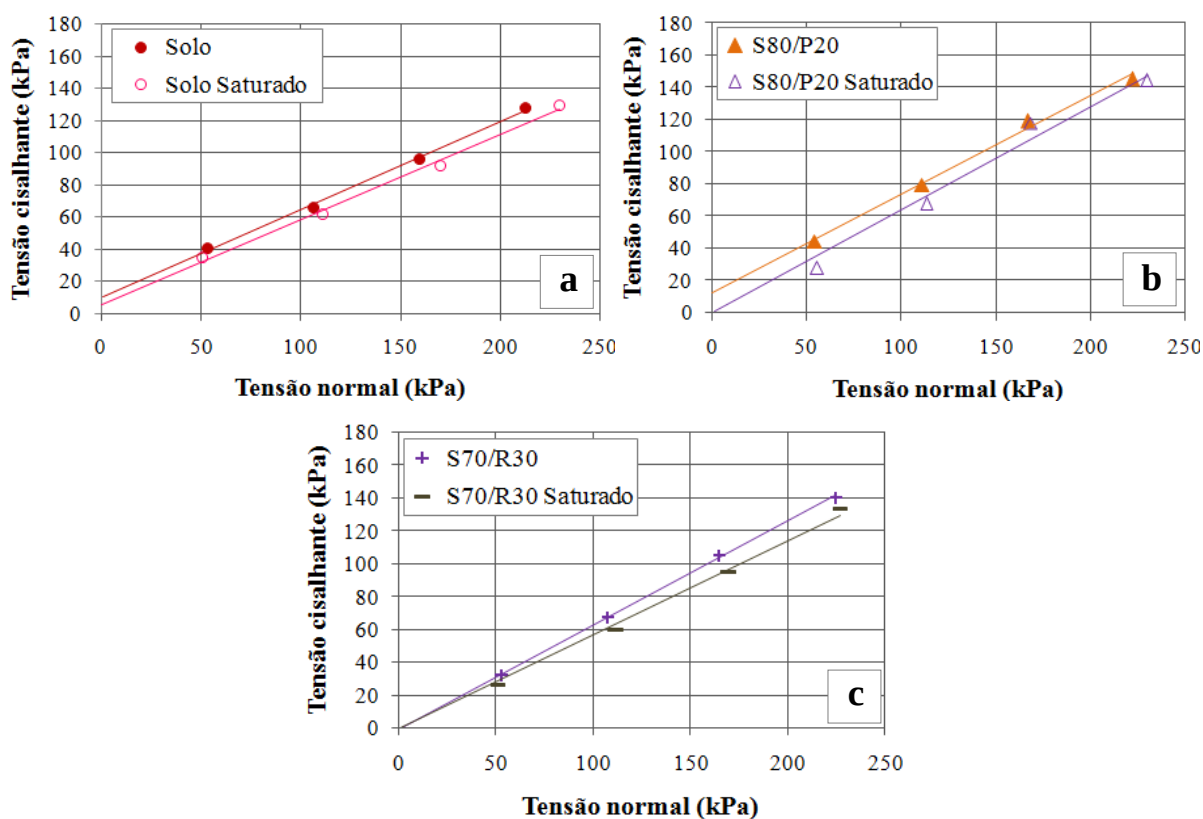


Tabela 16 – Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência na condição de ruptura do solo, das misturas de solo com 20% de resíduos de pneus e 30% de agregado reciclado de RCD.

Amostra	Condição de ruptura/ critério De Campos e Carrillo (1995)		
	c (kPa)	ϕ (°)	R ²
Solo	10	29	0,99
Solo Saturado	5,5	28	0,99
S80/P20	12,4	31,5	0,99
S80/P20 Saturado	0	32,5	0,98
S70/R30	0	32	1,00
S70/R30 Saturado	0	29	0,99

Uma diminuição da resistência ao cisalhamento na ruptura foi verificada em todas as amostras saturadas, se comparadas aos ensaios não inundados, Figura 61. Os ângulos de atrito dos materiais não apresentam uma variação expressiva, enquanto que as coesões sofrem reduções, demonstrando, portanto, resultados inferiores para o ensaio de cisalhamento direto nas amostras quando estão no estado saturado. Isso ocorre devido a redução da sucção mátrica, que proporciona diminuição das superfícies de contato das partículas.

A partir dos coeficientes de determinação, Tabela 16, observa-se uma boa qualidade de ajuste das linhas de tendência das amostras saturadas, pois os valores para as envoltórias Mohr-Coulomb situam-se próximos de 1.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões da pesquisa, a partir dos resultados e análises obtidas sobre os materiais e compósitos analisados, assim como sugestões para futuras pesquisas.

5.1 Principais conclusões

O solo é classificado como areia argilosa (SC), segundo o SUCS, é do tipo A-7-6, de acordo com o TRB, tem alta plasticidade e, conforme a análise microestrutural, apresenta agregados naturais com grãos subarredondados a arredondados inseridos em uma matriz argilosa, com a presença de flóculos formados pelo arranjo de grãos de areia interligados por partículas de silte e argila de forma densa, conferindo ao mesmo baixa permeabilidade.

Os resíduos de pneus têm uma classificação equivalente a areia mal graduada (SP) e a um material granular (A-1-b), segundo o SUCS e o sistema TRB, respectivamente, possui baixa densidade, absorve pouca água e apresenta um comportamento não-plástico.

O agregado reciclado de RCD é composto majoritariamente por grãos equivalentes a areia e 21% de material com tamanho inferior a 0,075 mm, equipara-se, segundo o SUCS, a um solo do grupo SM (areia siltosa), se enquadra na classe A-2-4 pelo sistema TRB, é não plástico, possui uma massa específica real dos grãos próxima a do solo estudado e uma microestrutura granular com pequenos flóculos espaçados.

A incorporação de resíduos de pneus ao solo não alterou significativamente a sua granulometria e não proporcionou mudanças no seu comportamento para aplicação como subleito de pavimentos, porém a utilização desses resíduos trás benefícios ambientais, uma vez que se dá um destino a este tipo de material alternativo. Os resíduos pneumáticos não influenciaram nas propriedades plásticas do solo, entretanto reduziram a sua densidade real dos grãos.

O peso específico seco máximo e a umidade ótima do solo diminuem com a adição de resíduos de pneus, reafirmando, de acordo com a literatura, a aplicabilidade dos compósitos

fibrosos em aterros leves relacionados, por exemplo, a obras rodoviárias e estruturas de contenção. Este tipo de resíduo conduz do ponto de vista mecânico um aumento da capacidade de absorver a energia de deformação aplicada ao solo.

A estrutura superficial da amostra de solo sofre mudanças com a inserção dos resíduos pneumáticos, porém há uma boa interação entre as partículas de pneus e a matriz de solo, sendo esta interação considerada suficiente para melhorar as características resistentes dos compósitos.

Os resíduos de pneus favoreceram as propriedades hidráulicas do solo, visto que os ensaios de permeabilidade revelaram um crescimento representativo da condutividade hidráulica à medida que o teor de resíduos aumentava. Contudo, há uma redução no índice de vazios, diferente do que ocorre nos solos.

As misturas solo-pneu possuem curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal do tipo elasto-plástica com enrijecimento, assim como o solo. O reforço causado ao solo pela adição dos resíduos de pneus foi comprovado com aumento da resistência ao cisalhamento das misturas, cujos valores alcançados foram superiores aos obtidos para o solo isoladamente. A coesão e o ângulo de atrito do solo, na condição de ruptura, aumentam com a inserção de resíduos de pneus, atingindo um pico para a proporção de 10%.

A inserção de agregado reciclado de RCD provocou mudanças no solo referente às características físicas, tais como: aumento da fração de areia, redução da porosidade, da plasticidade e da umidade ótima, aumento do peso específico seco máximo e melhoria das características para aplicação como subleito de pavimentos, chegando admitir um comportamento de excelente a bom, conforme o TRB, à medida que o teor de agregado de RCD dentro das matriz do solo aumenta.

Com relação aos aspectos microestruturais, a adição do agregado de RCD acentuou as reentrâncias e saliências na superfície do solo, implicando inclusive em agregações de partículas finas do solo com as partículas do RCD, formando flóculos e grumos de maiores dimensões.

A inserção de agregado reciclado de RCD foi satisfatória do ponto de vista hidráulico, pois promoveu a elevação do coeficiente hidráulico do solo em mais de 13 vezes. Os compósitos particulados apresentam características hidráulicas semelhantes.

O agregado reciclado de RCD apresenta tensões cisalhantes superiores as do solo e das misturas solo-RCD, além de indicar um ângulo de atrito mais elevado. O ângulo de atrito do solo sofre um pequeno aumento com a adição de agregado reciclado em sua estrutura, já a parcela de coesão praticamente não é influenciada.

Dentre os compósitos fibrosos investigados, a mistura S90/P10 pode ser empregada em sistemas de cobertura de aterros de RSU. Os coeficientes hidráulicos do agregado reciclado de RCD e dos compósitos particulados demonstram a possibilidade desses materiais também comporem camadas de cobertura de aterros para resíduos não perigosos, como os resíduos sólidos municipais. Entretanto, para aplicação em camadas de base em aterros de RSU, apenas a mistura S90/R10 atende as prescrições normativas.

As misturas solo-pneu podem ser empregadas em obras que exijam grandes deformações, visto que as principais alterações provocadas por esses resíduos sobre o solo relacionam-se a deformabilidade e comportamento resistente. Já a resistência na ruptura e as deformações elasto-plásticas do solo não foram influenciadas significativamente pelo agregado de RCD.

O teor ótimo de desbastes, isto é, o que indica mais benefícios às propriedades resistentes do solo, é o que inclui 10% de resíduos de pneus em peso, enquanto que as misturas solo-RCD nas proporções de 10, 20 e 30% são consideradas aceitáveis, uma vez que mativeram as características mecânicas do solo.

A condição de saturação não indicou mudanças expressivas nos parâmetros de resistência das amostras, porém reduziu a sucção mátrica nos materiais. Este resultado é importante para se conhecer o comportamento resistente e a variação volumétrica dos mesmos em diferentes níveis de umidade, permitindo assim propor soluções mais adequadas no que tange o uso e ocupação do solo.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

Com base nos resultados obtidos e nos questionamentos surgidos ao longo desta pesquisa, para a ampliação do conhecimento e prosseguimento dos estudos relativos ao melhoramento e reforço de solos com resíduos de pneus inservíveis e agregados reciclados de RCD, cita-se a seguir algumas propostas para pesquisas futuras:

- Realizar ensaios com desbastes de pneus em maiores dimensões, assim como outros tipos de resíduos de pneus inservíveis;
- Utilizar agregados reciclados de RCD com menor teor de finos;
- Nos ensaios de permeabilidade utilizar outros tipos de permeante para verificar a influência destes na durabilidade dos materiais em estudo;
- Construir um aterro compactado com as misturas e condições investigadas nesta pesquisa para analisar, em escala real, o seu comportamento.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016b.

_____. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d.

_____. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e.

_____. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.

_____. **NBR 9935**: Agregados: terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 14545**: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos: áreas de transbordo e triagem: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: aterros: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil: áreas de reciclagem: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos. Rio de Janeiro, 2004e.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004f.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo, 2017. 64 p.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Introdução. In: VERTEMATTI, J. C (Coord.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Blucher, 2004. p. 1-12.

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

AKBULUT, S.; ARASAN, S.; KALKAN, E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. **Applied Clay Science**, v. 38, n. 1-2, p. 23-32, Feb. 2007.

ANIP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Resultados dos fabricantes nacionais de pneus 4º trimestre de 2016**. 2017a. Disponível em: <<http://www.anip.com.br>>. Acesso em: 22 abr. 2017.

ANIP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Resultados dos fabricantes nacionais de pneus 3º trimestre de 2017**. 2017b. Disponível em: <<http://www.anip.com.br>>. Acesso em: 5 mar. 2018.

APA – AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. **Resíduos de Construção e Demolição**. 2016. Disponível em: <<https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>>. Acesso em: 15 out. 2016.

ARAÚJO, N. N. **Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da grande Natal-RN**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio grande do Norte, Natal, 2014.

ARAÚJO JUNIOR, E. L. **Uso de resíduos da construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos**. 2010. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2010.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 422-63**: Standard test method for particle-size analysis of soils. West Conshohocken, 2007.

_____. **D 2487**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, 2011.

_____. **D 3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, 2004.

_____. **D 6270**: Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications. West Conshohocken, 2008.

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

AUSTIN, T. Landfill-cover conflit. **Civil Engineering**, v. 62, n. 12, p. 70-71, Dec. 1992.

BALUNAINI, U.; PREZZI, M. Interaction of ribbed-metal-strip reinforcement with tire shred-sand mixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 28, n. 2, p. 147-163, Mar. 2010.

BAPTISTA, C. F. N. **Ensaio fundamentais para a pavimentação e dimensionamentos dos pavimentos flexíveis**. v. 1, 2. ed. Porto Alegre: Globo. 1976.

BARBOSA, K. R. M. **Degradação de geogrelha em estradas não pavimentadas executadas com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

BLEISCHWITZ, R.; BAHN-WALKOWIAK, B. 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.

BOSSCHER, P. J.; EDIL, T. B.; KURAOKA, S. Design of highway embankments using tire chips. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 4, p. 295-304, Apr. 1997.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1988.

_____. Lei nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Acesso em: 11 out. 2016.

_____. Lei nº 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de consultas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 11 out. 2016.

_____. Lei nº 10.165, de 27 de Dezembro de 2000. Altera a lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 dez. 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L10165.htm>. Acesso em: 11 out. 2016.

_____. Lei nº 12.305, de 2 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 República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 ago. 2010a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 11 out. 2016.

BRASIL. Decreto-lei nº 7.404, de 23 de Dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 dez. 2010b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 11 out. 2016.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 258, de 26 de Agosto de 1999. Determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 dez. 1999. 1999. Seção 1, p. 39.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 301, de 21 de Março de 2002. Altera dispositivos da Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999, que dispõe sobre pneumáticos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 ago. 2003. 2002a. Seção 1, p. 120-121.

_____. 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 República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 Jul. 2002. 2002b. p. 95-96.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 348, de 16 de Agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 ago. 2004. 2004. Seção 1, p. 70.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 416, de 30 de Setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 1 out. 2009. 2009. p. 64-65.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 431, de 24 de Maio de 2011. Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 25 maio 2011. 2011. p. 123.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 448, de 18 de Janeiro de 2012. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10º e 11º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 jan. 2012. 2012. p. 76.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 469, de 29 de Julho de 2015. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 jul. 2015. 2015. Seção 1, p. 109-110.

BUDINSKI, K. G. **Engineering materials: properties and selection**. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall International, 1996. 653 p.

BUENO, B. S. **Aspectos de estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias**. 1996. 99 f. Texto Sistematizado (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

CAMBUIM, K. B. **Estudo sistemático da utilização de borracha e de seus resíduos para modificação de asfaltos oriundos de petróleo brasileiros**. 2004. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

CAPUTO, H. P; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. v. 1, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 252 p.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 219 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T. Solo: do comportamento a aplicações. **Fundações e Obras geotécnicas**, ano 3, n. 31, p. 80-91, abr. 2013.

CASTILHO, T. Resíduos da construção e demolição: reciclar mais para gerar menos. **Visão Ambiental**, ano 1, n. 3, p. 40-44, nov./dez. 2009.

CAVALCANTI, N. L. Q. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduos da construção civil**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2014.

CBIC – CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **PIB Brasil e construção civil**. 2017. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br>>. Acesso em: 02 jun. 2017.

CETIN, H.; FENER, M.; GUNAYDIN, O. Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material. **Engineering Geology**, v. 88, n. 1-2, p. 110-120, Nov. 2006.

CHRUSCIAK, M. R. **Análise da melhoria de solos utilizando fragmentos de borracha**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

COUTO, D. M.; SANTOS, E. C. G. Permeabilidade de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R): efeito da presença de material concretício e do grau de compactação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS, 2016. 6 p.

DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. Cover Systems. In: DANIEL, D. E. (Ed.). **Geotechnical Practice Waste Disposal**. 1 ed. London: Chapman & Hall, 1993. p. 455-496.

DANIEL, D. E.; TRAUTWEIN, S. J. **Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil**. v. 1142, Philadelphia: ASTM, 1994. 611 p.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford University Press, 1994. 395 p.

DE CAMPOS, T. M. P.; CARRILLO, C. W. Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro. In: International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT'95), 1., 1995, Paris, France. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, v. 1, 1995. p. 31-38.

DIAS, M. C. C. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário**. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Management of construction and demolition waste**. 2000. Disponível em: <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment>>. Acesso em: 11 out. 2016.

EDIL, T. B.; BOSSCHER, P. J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures. **Geotechnical Testing Journal**, v. 17, n. 4, p. 453-464, Dec. 1994.

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

EDINÇLILER, A.; BAYKAL, G.; DENGILI, K. Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 42, n. 3, p. 223-237, Oct. 2004.

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, June 2010.

ELDIN, N. N.; SENOUCI, A. B. Rubber-tire particles as concrete aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 5, n. 4, p. 478-496, Nov. 1993.

ERPEN, M. L. **Resíduos sólidos de construção e demolição – Estudo de Caso: Gurupi - TO**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ÊXODO. Português. In: **Bíblia sagrada**: edição pastoral. Tradução, introdução e notas: Ivo Stomilolo e Euclides Martins Balanci. São Paulo: Paulus, 1990. p. 71-72.

FALCÃO, R. Construção civil também faz reciclagem. **Diário de Pernambuco**, Recife, 12 ago. 2014. Disponível em: <http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/economia/2014/08/10/internas_economia,521514/construcao-civil-tambem-faz-reciclagem.shtml>. Acesso em: 06 jan. 2017.

FANG, H. Y. **Foundation Engineering Handbook**. 2. ed. [New York]: Van Nostrand Reinhold, 1991. 923 p.

FARIAS, A. B. **Análise técnica e econômica de resíduos de construção e demolição aplicados em pavimentação**. 2013. 183 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 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. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 18, p. 1-12, nov. 2011.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 43-54, out./dez. 2007.

FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 268 f. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

FONSECA, E. C. A. **Análise numérica do comportamento de muros reforçados com geossintéticos construídos com material de aterro não convencional**. 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

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

FRANCO, K. L. B. **Caracterização do comportamento geotécnico de misturas de resíduos de pneus e solo laterítico**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto: uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2004.

FREITAS, W. C. **Análise da geração de resíduos da construção civil no município de Batatais-SP para implantação de gerenciamento integrado**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2009.

GACKE, S.; LEE, M.; BOYD, N. Field Performance and Mitigation of Shredded Tire Embankment. **Transportation Research Record**, v. 1577, n. 1, p. 81-89, Jan. 1997.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J.; VALLE, F. A. F. Mecanismo de ruptura de reforço de solos com pneus. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABMS, 2006. 6 p.

GHAZAVI, M. Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 22, n. 3, p. 401-416, Sept. 2004.

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

GOODYEAR. **Entenda um pneu:** partes de um pneu. 2017. Disponível em: <<http://www.goodyear.com.br/automoveis/duvidas/partes-de-um-pneu/>>. Acesso em: 04 jul. 2017.

GOLDEMBERG, J. (Coord). **O desafio da sustentabilidade na construção civil.** 1 ed. São Paulo: Blucher, 2011. 144 p.

GUEDES, S. B. **Estudo do desempenho mecânico de um solo-cimento microreforçado com fibras sintéticas para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas.** 2013. 426 f. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

GUERRA, G. J. Z.; BORGES, B. S.; CASTRO, B. C.; CARVALHO, J. C. Uso de resíduos do processo de recapagem de pneus no concreto portland para calçadas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15., 2010, Gramado. **Anais...** Gramado: ABMS, 2010. 8 p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal:** Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002. 341 p.

GUSMÃO, A. D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil.** 1. ed. Camaragibe: CCS Gráfica Editora, 2008. 140 p.

GUSMÃO FILHO, J. A.; FERREIRA, S. R. M.; AMORIM JÚNIOR, W. M. Escorregamentos em morros urbanos do Recife: o caso do boleiro. In: Panamerican Symposium on Landslides, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1997. p. 985-994.

HAZARIKA, H.; YASUHARA, K.; KIKUCHI, Y.; KARMOKAR, A. K.; MITARAI, Y. Multifaceted potentials of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical applications and their evaluation. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 3, p. 303-315, June 2010.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis.** 2002. 251 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HERNANDEZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n.1, p. 109-117, Jan. 2004.

HIGGINS, R. A. **The properties of engineering materials.** 2. ed. New York: Industrial Press, 1994. 506 p.

HUDSON, A. P.; BEAVEN, R. P.; POWRIE, W.; PARKES, D. Hydraulic conductivity of tyres in landfill drainage systems. **Waste and Resource Management**, v. 160, n. 2, p. 63-70, May 2007.

IRSG – INTERNATIONAL RUBBER STUDY GROUP. **Tyre Production Worldwide.** 2017. Disponível em: <<http://www.rubberstudy.com>>. Acesso em: 5 Mar. 2018.

IRSG – INTERNATIONAL RUBBER STUDY GROUP. **Rubber Statistical Bulletin**. January-March 2018 edition. 2018. Disponível em: <<http://www.rubberstudy.com>>. Acesso em: 5 Mar. 2018.

JARAMILLO, N. A. D.; CASAGRANDE, M. D. T. Influência da inserção de fibras de borracha de pneu no comportamento mecânico de um solo arenoso. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS, 2016. 6 p.

JATMA – JAPAN AUTOMOBILE TYRE MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Tyre Industry of Japan**. Tokyo, 2017. 32 p.

LAFAYETTE, K. P. V. **Comportamento geomecânico de solos de uma topossequência na formação barreiras em uma encosta na área urbana do Recife-PE**. 2000. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000.

LEE, P. Y.; SUEDEKAMP, R. J. Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. **Highway Research Record**, v. 381, p.1-9, 1972.

LEROUEIL, S. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. **Geotechnique**, v. 51, n. 3, p. 197-243, Apr. 2001.

LIMA, A. F. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da formação barreiras na área urbana da cidade do Recife**. 2002. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

LIMA, C. S. T. **Caracterização tecnológica de resíduos de escavação de estaca tipo hélice contínua para uso em pavimentação**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

LIMA, V. M. E. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de uma indústria de pré-fabricados de concreto**. 2017. 216 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B. Influence of CDW recycled aggregate on drying shrinkage of mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2, p. 53-57, June 2012.

KAUSHIK, M. K.; KUMAR, A.; BANSAL, A. Geo-environmental perspectives and development plans for a new MSW landfill site using tirechips as leachate drainage material. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, n. 6, p. 17495-17514, 2014.

MACCARINI, M.; TEIXEIRA, V. H.; SANTOS, G. T.; FERREIRA, R. S. Sedimentos quaternários do litoral de Santa Catarina: características geológicas e geotécnicas. In: Simp. depósitos quaternários das baixadas brasileiras – SIDEQUA, 2., 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1988. p. 362-393.

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

MACEDO, M. C. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

MAHER, M. H.; HO, Y. C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 8, p. 1381-1393, Aug. 1994.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; PINHEIRO, M. D.; BRAVO, M. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management & Research**, v. 31, n. 3, p. 241-255, Jan. 2013.

MEDEIROS JÚNIOR, R. A.; FUCALE, S.; GUSMÃO, A. D. Investigação laboratorial do uso de resíduos da construção civil como agregado graúdo em estacas de compactação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15., 2010, Gramado. **Anais...** Gramado: ABMS, 2010. 8 p.

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu**. 2014. 201 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.

MONTARDO, J. P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. 1999. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F.; BRITO, J. C. X.; ALMEIDA, T. P. F.; MANSUR, G. L. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

MOO-YOUNG, H.; SELLASIE, K.; ZEROKA, D.; SABNIS, G. Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction. **Journal of enviromental engineering**, v. 129, n. 10, p. 921-929, Oct. 2003.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia: subsídios para uma gestão sustentável**. 2006. 201 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

MORALES, G.; MENDES, T.; ANGULO, S. C. Índices de geração de RCD provenientes de obras de construção, reforma e demolição na cidade de Londrina/PR. In: Congresso Internacional na Recuperação, Manutenção e Restauração de Edificações, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2006.

MOREIRA, S. P. L.; BITENCOURT, C. M. G.; MOTTA, M. E. V.; CARMARGO, M. E.; MACIEL, J. M. C. Um estudo exploratório da cadeia produtiva da recapagem de pneus. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, ano 5, n. 4, p. 11-27, dez. 2010.

MORENO, J. A. S. **Avaliação da resistência de material leve utilizando misturas de pedaços de pneus com solo do distrito federal**. 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MOURA, S. F. A; BEZERRA, J. S.; FUCALE, S. P.; FERREIRA, S. R. M. Análise laboratorial da interação entre solo-pneu utilizada em estruturas de contenção de encostas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 16., 2012, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: ABMS, 2012. 8 p.

NASCIMENTO, P. R. F. B. **Capacidade de carga de misturas de solo laterítico e desbastes de pneus**. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

OLANDOSKY NETO, M. **Validação de um permeâmetro de parede flexível**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de tecnologia para o desenvolvimento, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2013.

ORTIZ, O.; 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, Apr. 2010.

OZKUL, Z. H.; BAYKAL, G. Shear strength of clay with rubber fiber inclusions. **Geosynthetics International**, v. 13, n. 5, p. 173-180, Oct. 2006.

PARANÁ. **Desperdício zero**: Programa da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. Governo do Estado do Paraná. 2010, 3. ed. 9 p.

PEDROSO, C. D. V.; BURAS, M.; JOLANDEK, M. A.; SILVEIRA, R. M. Avaliação de provas de carga em escala reduzida para adaptação do método grenoble em fundações reforçadas com cal e com cimento submetidas a esforços de tração. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17., 2014, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2014. 10 p.

PERNAMBUCO. **Lei nº 14.236**, de 13 de Dezembro de 2010. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. 2010. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br>>. Acesso em: 11 out. 2016.

PERNAMBUCO. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos**. Governo do Estado de Pernambuco, Recife, 2012. 304 p.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife**. 2007. 150 f. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PONTES, G. C. **Avaliação do gerenciamento de resíduos de construção e demolição em empresas construtoras do Recife e sua conformidade com a resolução nº 307/CONAMA: Estudo de casos**. 2007. 218 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

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**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2012.

RAMÍREZ, G. G. D. **Estudo experimental de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis**. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

RAMOS FILHO, L. S. N. **A logística reversa de pneus inservíveis: o problema da localização dos pontos de coleta**. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

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. 2005. Disponível em: <<http://www.recife.pe.gov.br/diariooficial>>. Acesso em: 11 out. 2016.

_____. **Decreto nº 27.399**, de 27 de Setembro de 2013. Regulamenta as unidades de recebimento de Resíduos Sólidos oriundos de pequenos geradores, no âmbito do município do Recife. 2013. Disponível em: <<http://leismunicipais.com.br>>. Acesso em: 06 jan. 2017.

REDDY, K. R.; STARK, T. D.; MARELLA, A. Beneficial use of shredded tires as drainage material in cover systems for abandoned landfills. **Parctice periodical of hazardous, toxic and radioactive waste management**, v. 14, n.1, p. 47-60, Jan. 2010.

RISSOLI, A. L. C.; ARAÚJO, G. L. S. Utilização de Resíduos de Pneus em Obras Geotécnicas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17., 2014, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2014. 8 p.

RMA – RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. **2013 U.S. Scrap Tire Management**. Washington, 2014. 18 p.

RODRIGUES, C. R. S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 2014.

RODRIGUES, C. B. **Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados mistos: avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

RODRIGUEZ-ALOOZA, A. M.; GALLEGU, J.; PÉREZ, I.; BONATI, A.; GIULIANI, F. High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 460-466, Feb. 2014.

ROSA, A. P. G.; SANTOS, R. A.; CRISPIM, F. A.; RIVA, R. D. D. Análise comparativa entre asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e asfalto modificado com polímeros. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 12, n. 20, p. 31-38, Nov. 2012.

SÁ, W. B. **Estudo da interação solo-muro em concreto convencional, com resíduo de construção e demolição (RCD) e alvenaria de pedra**. 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.

SÁEZ, P. V.; MERINO, M. R.; PORRAS-AMORES, C. Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 2, p. 137-146, Feb. 2011.

SAMPAIO, L. L. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto e estabilização de solos**. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2013.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTOS NETO, F. C. **Uso de Resíduos da construção civil para melhoramento de solos colapsáveis**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

SAYÃO, A.; SIERIA, A. C.; SANTOS, P. **Reforço de solos**: manual técnico. Jundiaí, 2009. 168 p.

SELLAF, H.; TROUZINE, H.; HAMHAMI, M.; ASROUN, A. Geotechnical properties of rubber tires and sediments mixtures. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 4, n. 2, p. 618-624, Apr. 2014.

SEST SENAT – SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE/SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DO TRANSPORTE. Cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartados por ano no Brasil. **Notícias SEST SENAT**, 08 fev. 2017. Disponível em: <<http://www.sestsenat.org.br/imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-des-cartados-por-ano-no-brasil>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

SHALABY, A.; KHAN, R. A. Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 44, n. 4, p. 318-332, July 2005.

SILVA, F. M.; VAZ, V. V.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 11 p., abr. 2017.

SILVA, T. D.; PAULA, H. M.; SILVA, D.; CARVALHO, I. M.; FONTE, J. T.; PEREIRA, R. R. Uso de granulado de borracha em substituição parcial ao agregado miúdo na produção de tijolos ecológicos. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, 12 p., abr. 2017.

SILVA, A. C.; SANTOS NETO, F. C.; FUCALÉ, S. P.; FERREIRA, S. R. M. Avaliação da adição de Resíduos de Construção Civil (RCC) para estabilização de solos colapsíveis. In: Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens, 7., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS, 2016. 8 p.

SKEMPTON, A. W. The colloidal activity of clays. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3., 1953, Zurich, Switzerland. **Proceedings...** Zurich, 1953. p. 57-61.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, M. A. A.; SANTOS, M.; SCARLATO, F. C.; ARROYO, M. **O novo mapa do mundo: natureza e sociedade de hoje: uma leitura geográfica**. 4. ed. São Paulo: Hucitec/Anpur, 1993. 244 p.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 4, p. 33-46, out./dez. 2004.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 279 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TAIPALE, K. De construções quase verdes para construções sustentáveis. In: WORLDWATCH INSTITUTE. **Estado do mundo 2012: rumo à prosperidade sustentável RIO+20**. Tradução: Claudia Strauch. Salvador: Universidade Livre da Mata Atlântica (UMA), 2012. p. 143-151.

TAM, V. W.; LI, J.; CAI, H. System dynamic modeling on construction waste management in Shenzhen, China. **Waste Management & Research**, v. 32, n. 5, p. 441-453, May 2014.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. 2. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994. 284 p.

THAKUR, D.; KAUSHIK, M. K. Assessment of drainage properties of tires derived aggregates to be used as drainage layer material in leachate collection system of MSW landfill. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 5, n. 2, p. 2219-2230, Feb. 2016.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solid waste disposal facility criteria: technical manual**. 40 CFR Part 258, Washington, D. C., 1993. 12 p.

VERAS, L. M. **Estudo das propriedades do concreto com diferentes proporções de agregados de resíduos de construção civil com e sem saturação prévia**. 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **End-of-life tires**: a framework for effective management systems. Switzerland, 2010. 20 p.

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

APÊNDICE A – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de permeabilidade

Solo ($\gamma_{d \text{ máx}} = 17,60 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 17,49\%$; $w_{\text{sat}} = 19,25\%$; $G_s = 2,66$)

Amostra	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)	GC (%)	w (%)	S _r (%)
CP1	17,35	17,49	0,52	88,67	99,39	18,80	99,49
CP2	17,18	17,57	0,51	88,97	99,85	18,87	99,83
CP3	17,51	17,46	0,52	89,05	99,23	18,83	99,43

Onde: (*) – índices físicos na etapa de moldagem dos corpos de prova; (**) – índices físicos após a execução do ensaio; CP – corpo de prova.

S90/P10 ($\gamma_{d \text{ máx}} = 16,11 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 16,45\%$; $w_{\text{sat}} = 18,49\%$; $G_s = 2,29$)

Amostra	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)	GC (%)	w (%)	S _r (%)
CP1	16,65	15,96	0,43	87,75	99,10	18,75	100
CP2	16,77	15,95	0,44	88,12	99,00	18,94	100
CP3	16,53	15,97	0,43	87,16	99,11	18,61	100

S80/P20 ($\gamma_{d \text{ máx}} = 14,77 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 16,14\%$; $w_{\text{sat}} = 18,14\%$; $G_s = 1,98$)

Amostra	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)	GC (%)	w (%)	S _r (%)
CP1	16,46	14,62	0,35	92,05	99,00	18,32	100
CP2	16,42	14,62	0,35	91,83	99,01	18,36	100
CP3	16,19	14,64	0,35	90,88	99,10	18,14	100

RCD ($\gamma_{d \text{ máx}} = 18,72 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 13,52\%$; $w_{\text{sat}} = 15,50\%$; $G_s = 2,64$)

Amostra	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)	GC (%)	w (%)	S _r (%)
CP1	14,50	18,54	0,42	90,25	99,02	15,49	99,93
CP2	14,42	18,65	0,42	91,68	99,65	15,56	100
CP3	14,51	18,53	0,42	90,25	99,00	15,52	100

S90/R10 ($\gamma_d \text{ máx} = 17,63 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 16,22\%$; $w_{\text{sat}} = 19,15\%$; $G_s = 2,66$)

Amostra	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)	GC (%)	w (%)	S _r (%)
CP1	16,94	17,52	0,52	86,95	99,37	19,03	99,80
CP2	16,51	17,58	0,51	85,68	99,74	18,74	99,52
CP3	16,63	17,61	0,51	86,65	99,88	19,38	100

S80/R20 ($\gamma_d \text{ máx} = 17,87 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 15,42\%$; $w_{\text{sat}} = 18,18\%$; $G_s = 2,65$)

Amostra	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)	GC (%)	w (%)	S _r (%)
CP1	15,20	17,69	0,50	89,20	99,00	17,98	99,21
CP2	15,40	17,69	0,50	89,94	99,00	18,08	99,89
CP3	15,29	17,69	0,50	89,34	99,00	17,95	99,17

S90/R30 ($\gamma_d \text{ máx} = 17,97 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 15,39\%$; $w_{\text{sat}} = 17,77\%$; $G_s = 2,64$)

Amostra	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S _r (%)	GC (%)	w (%)	S _r (%)
CP1	15,97	17,95	0,47	89,61	99,91	17,87	100
CP2	15,70	17,98	0,47	88,58	100	17,94	100
CP3	15,80	17,99	0,47	89,17	100	17,89	100

APÊNDICE B – Índices físicos dos corpos de prova nos ensaios não inundados de cisalhamento direto

Solo ($\gamma_{d \text{ máx}} = 17,60 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 17,49\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)
50	18,14	17,73	0,50	96,53	100	17,95
100	18,14	17,74	0,50	96,59	100	17,99
150	18,01	17,65	0,51	94,53	100	17,92
200	17,90	17,62	0,51	93,33	100	17,83

Onde: (*) – índices físicos na etapa de moldagem dos corpos de prova; (**) – índices físicos após a execução do ensaio; w – teor de umidade; e – índice de vazios; S_r – grau de saturação.

S90/P10 ($\gamma_{d \text{ máx}} = 16,11 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 16,45\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)
50	16,48	16,14	0,42	90,05	100	15,79
100	16,54	15,95	0,43	86,97	99,03	15,65
150	16,53	16,15	0,42	90,54	100	15,24
200	16,78	15,95	0,43	88,26	99,03	15,62

S80/P20 ($\gamma_{d \text{ máx}} = 14,77 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 16,14\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)
50	15,89	14,63	0,35	88,95	99,02	15,03
100	15,73	14,63	0,35	88,08	99,04	14,78
150	16,04	14,64	0,35	90,12	99,13	14,71
200	15,95	14,64	0,35	89,53	99,10	14,83

RCD ($\gamma_{d \text{ máx}} = 18,72 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 13,52\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)
50	14,10	18,68	0,41	90,02	99,78	13,90
100	14,03	18,79	0,40	91,39	100	13,87
150	14,01	18,62	0,42	88,49	99,45	13,91
200	14,00	18,61	0,42	88,26	99,41	13,92

S90/R10 ($\gamma_d \text{ máx} = 17,63 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 16,22\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**
	w (%)	γ_d (kN/m³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)
50	17,20	17,59	0,51	89,37	99,79	16,81
100	17,20	17,65	0,51	90,22	100	16,79
150	16,91	17,68	0,50	89,20	100	16,70
200	16,69	17,69	0,50	88,17	100	16,56

S80/R20 ($\gamma_d \text{ máx} = 17,87 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 15,42\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**
	w (%)	γ_d (kN/m³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)
50	16,30	17,94	0,48	90,55	100	16,16
100	16,26	17,93	0,48	90,18	100	16,25
150	16,40	17,91	0,48	90,70	100	16,39
200	16,40	17,85	0,48	89,74	99,90	16,35

S70/R30 ($\gamma_d \text{ máx} = 17,97 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 15,39\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**
	w (%)	γ_d (kN/m³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)
50	16,02	17,92	0,47	89,38	99,73	15,98
100	16,01	17,93	0,47	89,44	99,76	15,97
150	16,04	17,93	0,47	89,68	99,79	15,98
200	15,99	17,90	0,47	88,82	99,59	15,97

APÊNDICE C – Índices físicos dos corpos de prova nos ensaios saturados de cisalhamento direto

Solo ($\gamma_{d \text{ máx}} = 17,60 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 17,49\%$; $w_{\text{sat}} = 19,20\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)	S_r (%)
50	16,92	17,61	0,51	88,11	100	19,32	100
100	16,92	17,61	0,51	88,10	100	19,36	100
150	17,18	17,59	0,51	89,18	99,94	19,21	100
200	17,12	17,58	0,51	88,70	99,87	19,17	100

Onde: (*) – índices físicos na etapa de moldagem dos corpos de prova; (**) – índices físicos após a execução do ensaio; w – teor de umidade; e – índice de vazios; S_r – grau de saturação.

S80/P20 ($\gamma_{d \text{ máx}} = 14,77 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 16,14\%$; $w_{\text{sat}} = 17,70\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)	S_r (%)
50	15,55	14,67	0,35	88,08	99,34	17,65	100
100	15,43	14,75	0,34	89,23	99,87	17,68	100
150	15,36	14,76	0,34	89,05	99,92	17,66	100
200	15,54	14,74	0,34	89,52	99,77	17,72	100

S90/R30 ($\gamma_{d \text{ máx}} = 17,97 \text{ kN/m}^3$; $w_{\text{ótima}} = 15,39\%$; $w_{\text{sat}} = 17,80\%$)

Tensão normal (kPa)	Inicial*					Final**	
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)	GC (%)	w (%)	S_r (%)
50	15,68	17,81	0,48	85,89	99,13	17,85	100
100	15,54	17,80	0,48	84,95	99,07	17,74	99,93
150	15,38	17,88	0,48	85,22	99,49	17,89	100
200	15,76	17,87	0,48	87,17	99,45	17,78	100

APÊNDICE D – Parâmetros de resistência, obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto não inundado, das amostras estudadas na condição de ruptura

Amostra	σ_n (kPa)	σ_n corrigida (kPa)	τ_{rup} (kPa)	r_{xy}	d_{rup} (mm)	c (kPa)	ϕ (°)	R^2
Solo	50	53,14	40,95	1,00	7,0	9,9	29	0,99
	100	106,28	66,02		6,0			
	150	159,41	95,75		6,0			
	200	212,55	128,18		6,0			
S90/P10	50	52,05	49,04	0,98	4,0	18,1	34,5	0,97
	100	107,40	94,34		7,0			
	150	162,82	140,79		8,0			
	200	217,09	159,94		8,0			
S80/P20	50	54,27	44,57	0,99	8,0	12,4	31,5	0,99
	100	110,92	79,53		10,0			
	150	166,38	119,00		10,0			
	200	221,83	145,24		10,0			
RCD	50	50,60	46,68	0,99	1,2	4,3	42	0,99
	100	101,60	98,88		1,6			
	150	152,71	146,93		1,8			
	200	203,61	184,35		1,8			
S90/R10	50	53,70	39,02	1,00	7,0	10,3	29	0,99
	100	107,40	71,05		7,0			
	150	164,58	98,05		9,0			
	200	219,44	131,13		9,0			
S80/R20	50	51,52	38,67	1,00	3,0	10,6	29,5	1,00
	100	110,92	73,65		10,0			
	150	162,82	104,68		8,0			
	200	224,28	135,64		11,0			
S70/R30	50	53,14	32,80	1,00	6,0	0	32	1,00
	100	107,40	67,75		7,0			
	150	164,58	105,52		9,0			
	200	224,28	140,56		11,0			

Onde: σ_n – tensão normal; σ_n corrigida – tensão normal corrigida; τ_{rup} – tensão cisalhante na ruptura; r_{xy} – coeficiente de correlação entre σ_n corrigida e τ_{rup} ; d_{rup} – deslocamento horizontal na ruptura; R^2 – coeficiente de determinação.