

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

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DAS
MISTURAS DE AREIA COM PEDAÇOS DE
BORRACHA**

PAULO HENRIQUE FERNANDES CAVALCANTE

ORIENTADOR: GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, DSc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.MD -301/18

BRASÍLIA / DF: 03 / 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DAS
MISTURAS DE AREIA COM PEDAÇOS DE
BORRACHA

PAULO HENRIQUE FERNANDES CAVALCANTE

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

APROVADA POR:

GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, DSC (UNB)
(ORIENTADOR)

ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph. D (UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)

MÁRCIA M. A. MASCARENHA, DSC (UFG)
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 21 de março de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

CAVALCANTE, PAULO HENRIQUE FERNANDES.

Análise da resistência das misturas de areia e pedaços de borracha.

[Distrito Federal] 2018

xx, 152 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. Pedaços de borracha de pneu | 2. Resistência ao cisalhamento |
| 3. Solo tropical | 4. Melhoria de solos |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAVALCANTE, P.H.F. (2018). Análise da resistência das misturas de areia e pedaços de borracha. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Paulo Henrique Fernandes Cavalcante

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise da resistência das misturas de areia e pedaços de borracha.

GRAU / ANO: Mestre /2018

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

Paulo Henrique Fernandes Cavalcante

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12, Universidade de Brasília. CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

paulohmi@yahoo.com.br

(61) 99973.7190

DEDICATÓRIA

É indiscutível a importância da pesquisa para o avanço do conhecimento em qualquer área de atuação. Como nada é por acaso, dedico este trabalho a todos os pesquisadores que estão se empenhando para melhor realizar projetos de pesquisa, para contribuir no avanço da ciência, de maneira que os resultados possam ser implementados para que cidadãos comuns sejam beneficiados. E, em especial, àqueles que têm conseguido chegar a resultados satisfatórios nas pesquisas para minimizar, de fato, os impactos ambientais que os resíduos sólidos têm causado ao planeta.

AGRADECIMENTOS

Oportunidades fazem você ver que limites não existem. Pesquisar, além de ser um processo de crescimento acadêmico, requer tempo, paciência e dedicação. É também uma experiência de vida que contribui para que você se torne uma pessoa melhor, preocupada com o outro. Essa experiência também ensina que os seus sucessos são resultados de muito trabalho.

Meus agradecimentos a todos que de, alguma forma, ajudaram e contribuíram, possibilitando a oportunidade de continuar meus estudos e para a realização deste velho sonho.

Agradeço, em especial, a Gregório Luís Silva Araújo, professor orientador dessa pesquisa, pela oportunidade de trabalhar com sua ajuda, paciência e preciosas orientações, durante o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

O aumento da produção de veículos automotores acarreta a produção de seus acessórios, como os pneus. Muitos destes acessórios degradam o meio ambiente. Entre esses, encontram-se os insumos provenientes de pneus inservíveis devido ao tempo que levam para se decompor na natureza, podendo chegar a mais de 100 anos. O descarte irregular em locais irregulares gera grandes problemas ambientais. O desafio é dar um reuso a estes resíduos inservíveis é uma alternativa, o que necessita de mais pesquisas visando ao seu aproveitamento em obras de engenharia de geotecnia. No Distrito Federal predomina o solo laterítico altamente intemperizado, cujas jazidas estão em processo de esgotamento devido ao uso intensivo. Diante deste contexto, esta pesquisa propõe misturar a areia média lavada proveniente do Distrito Federal e pedaços de borracha, como é o caso de insumos provenientes de processos de trituração de pneus inservíveis com diâmetro médio de 15 mm.

Para a realização dessa pesquisa, foram realizados ensaios de caracterização e compactação (energia Proctor normal). Nesse processo foi empregado equipamento de cisalhamento direto em média escala, em amostras de 300 mm x 300 mm x 175 mm, com a finalidade de estudar e avaliar os parâmetros de resistência das misturas solo-borracha, em teores de M0% (areia), M10% a M50% e M100% (borracha), com relação ao peso do solo seco, submetidas a tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 80 kPa e 100 kPa.

Os resultados obtidos nos ensaios de compactação mostraram que houve diminuição do peso específico aparente seco das misturas com o aumento do teor de borracha, sem afetar a umidade ótima dos teores das misturas, mantendo-se um corpo de prova bem estruturado, quando confinado. As amostras desconfiadas, após exame visual, apresentaram trincas visíveis a partir da mistura M20% de teor de borracha. Foi possível observar (nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto em média escala) que, à medida que se aumentou o teor de borracha, ocorreu redução na coesão da estrutura, aumento da tensão ao cisalhamento máxima aplicada e aumento do ângulo de atrito efetivo. Os valores de mistura analisados (de M10% a M50%) apresentam menores que o da areia pura (M0%) e o da borracha pura (M100%). Esse resultado é compatível com os resultados vistos nos autores analisados, e que estão citados na referência bibliográfica.

ABSTRACT

The increase of the automotive vehicles production leads to the fabrication of their accessories, such as tires. Many of these accessories will degrade the environment if disposed inadequately. Among these there are the tires which with the time can contaminate the nature. The presence irregular sites for this type of waste in some countries is a major environmental problems. In this context, the reuse of these materials is an alternative, which needs further research aiming at its use in the geotechnical engineering works. In the Federal District of Brazil predominates the laterite soil highly weathered, whose deposits sometimes provide a low quality material. In this context, this study proposes the study of the use of an low cost alternative material mixed with medium sand.

As a first stage, characterization and compaction tests were performed. After optimum moisture content and maximum dry unit weight were obtained, direct shear tests were carried out by means of an medium-scale apparatus with a 300 mm x 300 mm x 175 mm box. The essays had the purpose of studying and evaluating the resistance parameters of soil-rubber mixtures, at contents of M0% (pure sand), M10 to M50 and M100% (pure rubber), with relation to the weight of the dry soil, with applied normal stresses of 25 kPa, 50 kPa, 80 kPa and 100 kPa.

Compaction tests showed that there was a decrease of the dry unit weight with the increase of the rubber content, without affecting the optimum moisture content of the mixtures, maintaining a well-structured material when confined. Unconfined samples showed cracks for mixtures starting 20% of rubber content. It was observed a reduction of the cohesion of the structure with the increase of the rubber. It was also noticed an increase of the maximum shear stress applied and increasing the effective friction angle. An assessment was made based on the results presented for the tests with rubber content of the mixtures (M10 to M50%) to check the variation of the friction angle. The values analyzed (M10 to M50%) are smaller than the pure sand and pure rubber. This result is consistent with the results mentioned in the literature.

BEYWORDS: Waste tires. Embankment. Shear strength. Permeability. Confined compression.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	MOTIVAÇÃO	1
1.2.	OBJETIVO	2
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	HISTÓRICO E RECICLAGEM	4
2.2.	DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS INSERVÍVEIS DE PNEUS	6
2.3.	PNEU INSERVÍVEL: CARACTERÍSTICAS E USO	6
2.4.	PESQUISAS REALIZADAS COM FRAGMENTOS DE BORRACHA	11
3.	METODOLOGIA DA PESQUISA	31
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	31
3.1.1.	LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DO SOLO ESTUDADO	31
3.1.2.	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PNEUS	32
3.2.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PESQUISA	34
3.2.1.	EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL	34
3.2.2.	EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO EM ESCALA MÉDIA	35
3.3.	PREPARO DAS AMOSTRAS	38
3.3.1.	PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS	38
3.4.	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	41
3.4.1.	MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	41
3.4.2.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	42
3.4.3.	CLASSIFICAÇÃO DOS INSUMOS	43
3.4.4.	COMPACIDADE DA AREIA	43
3.4.5.	ABSORÇÃO DE ÁGUA E PESO ESPECÍFICO DA BORRACHA	44
3.5.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	45
3.6.	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM MÉDIA ESCALA	48
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	52
4.1.	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	52

4.1.1. MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	52
4.1.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	54
4.1.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS	59
4.1.4. COMPACIDADE DA AREIA	60
4.1.5. ABSORÇÃO DOS PEDAÇOS DE BORRACHA	61
4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	62
4.2.1. AREIA.....	66
4.2.2. PEDAÇOS DE BORRACHA	67
4.2.3. MISTURAS DE SOLO-BORRACHA.....	69
4.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	81
4.3.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL	82
4.3.2. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DE MÉDIA ESCALA	87
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	120
5.1. CONCLUSÕES	120
5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	122
REFERÊNCIAS	123
APÊNDICES	128
APÊNDICE A – Relação dos componentes do equipamento.	
APÊNDICE B - Porcentagens calculadas para realização dos ensaios de compactação.	
APÊNDICE C - Dados para preparação do material para o ensaio de cisalhamento.	

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolução anual das vendas totais de pneus no Brasil (ANIP, 2016).	05
Figura 2.2 - Processamento de pneus inservíveis em diferentes tipos, fora de escala (Edinçliler et al., 2010).	07
Figura 2.3 - Dados para projeto (Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires, 2008, p.147).	12
Figura 2.4 - Curvas de compactação para todos os teores (Suárez (2016) e Chruciak (2013)).	16
Figura 2.5. - Curvas de tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (Ghazavi et al., 2011).	19
Figura 2.6. - Curvas de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (Ghazavi et al., 2011).	20
Figura 2.7. - Variação do teor de lascas de pneus <i>versus</i> ângulo de atrito (Ghazavi et al.,2011).	20
Figura 2.8 - Efeito das lascas de borracha no ângulo de atrito para areias (Cabalar, 2011).	23
Figura 2.9 - Relação do teor de resíduo de pneus <i>versus</i> ângulo de atrito interno (Franco, 2012).	24
Figura 2.10 - Análise granulométrica de desbastes de pneus e areia (Mashiri et al., 2015).	25
Figura 2.11 - Análise da variação dos índices de vazios máximo e mínimo das misturas areia-desbastes de pneus (Mashiri et al., 2015).	25
Figura 2.12 - Variação da deformação desviadora <i>versus</i> deformação volumétrica dos teores de borracha (Mashiri et al., 2015).	26
Figura 2.13 - Comportamento da tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para diferentes teores de mistura areia e borracha (GRC) com tensão normal de 34,5 kPa e $D_r=90\%$ (Akbar Anvari et al., 2017).	28
Figura 2.14 - Comportamento da tensão cisalhante <i>versus</i> o deslocamento horizontal para diferentes teores de mistura areia e borracha (GRC) com tensão normal de 34,5 kPa e $D_r=50\%$ (Akbar Anvari et al., 2017).	29
Figura 2.15 - Variação do ângulo de atrito interno <i>versus</i> a tensão cisalhante para diferentes densidades relativas. (Akbar Anvari et al., 2017).	30
Figura 2.16 - Variação do ângulo de atrito interno <i>versus</i> a tensão cisalhante para diferentes teores de borracha. (Akbar Anvari et al., 2017).	30

Figura 3.1 Local da coleta da amostra da areia.	32
Figura 3.2 Amostra natural dos pedaços de borracha com malhas de aço.	33
Figura 3.3 Vista geral do equipamento.	35
Figura 3.4 Vista geral do equipamento de cisalhamento direto em média escala.	36
Figura 3.5 Componentes do equipamento do Laboratório de Geotecnia da UnB. (a) conjunto tensão horizontal; (b) conjunto tensão vertical; (c) conjunto Prensa; (d) conjunto tensão normal; (e) conjunto bomba; (f) conjunto carga horizontal; (g) conjunto carga vertical; (h) conjunto tensão normal.	37
Figura 3.6 Amostras utilizadas após adição de água: (a) areia, (b) borracha e (c) mistura.	49
Figura 3.7 Etapas de execução do ensaio de cisalhamento direto em média escala para pedaços de borracha (M10% a M50%): (a) Vazio, (b) 1ª camada, (c) 2ª camada e (d) 3ª camada.	50
Figura 4.1 Relação dos teores de borracha <i>versus</i> massa específica dos sólidos.	54
Figura 4.2 Curva granulométrica da areia.	55
Figura 4.3 Curva granulométrica dos pedaços de borracha.	57
Figura 4.4 Curva granulométrica das misturas estudadas.	58
Figura 4.5 Imagens de pedaços de borracha nos itens a) Retido # 19,1mm; b) Retido # 9,5mm; c) Retido # 4,76 mm e, d) Passa # 4,76mm após o peneiramento.	58
Figura 4.6 Análise dos índices de vazios máximos e mínimos <i>versus</i> teor de borracha	60
Figura 4.7 Curva de absorção de água por pedaços de borracha.	62
Figura 4.8 Geração de trincas nos corpos de prova.	63
Figura 4.9 Corpos de Prova: (a) areia (solo puro) M0%; (b) borracha (pura) M100%; (c) mistura M10%; (d) mistura M20%; (e) mistura M30%; (f) mistura M40% e (g) mistura M50%.	63/65
Figura 4.10 Curva de compactação da areia (M0%).	66
Figura 4.11 Curva de variação do índice de vazios da areia (M0%).	67
Figura 4.12 Curva de compactação dos pedaços de borracha M100%.	68
Figura 4.13 Curva de variação do índice de vazios dos pedaços de borracha (M100%).	68
Figura 4.14 Curva de compactação da mistura (M10%).	69

Figura 4.15 Curva de variação do índice de vazios mistura (M10%).	70
Figura 4.16 Curva de compactação da mistura (M20%).	71
Figura 4.17 Curva de variação do índice de vazios mistura (M20%).	71
Figura 4.18 Curva de compactação da mistura (M30%).	72
Figura 4.19 Curva de variação do índice de vazios mistura (M30%).	72
Figura 4.20 Curva de compactação da mistura (M40%).	73
Figura 4.21 Curva de variação do índice de vazios mistura (M40%).	73
Figura 4.22 Curva de compactação da mistura (M50%).	74
Figura 4.23 Curva de variação do índice de vazios com mistura (M50%).	75
Figura 4.24 Relação entre teor de borracha <i>versus</i> massa específica aparente seca de diversos autores.	76
Figura 4.25 Resumo das curvas de compactação para todas as misturas solo-borracha.	77
Figura 4.26 Resumo das Curvas do índice de vazios <i>versus</i> umidade para todas as misturas solo-borracha.	77
Figura 4.27 Teor de borracha <i>versus</i> variação do peso específico aparente seco máximo.	80
Figura 4.28 Teor de borracha <i>versus</i> variação da umidade ótima.	80
Figura 4.29 Teor de borracha <i>versus</i> variação da massa específica seca máxima.	81
Figura 4.30 Curva de resultados do deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante (M0%).	83
Figura 4.31 Envoltória de Mohr-Coulomb (M0%).	84
Figura 4.32 Curvas de deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical (M0%).	85
Figura 4.33 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical (M0%).	86
Figura 4.34 Curva deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante para a areia pura.	88
Figura 4.35 Envoltória de Mohr-Coulomb para a areia pura.	89
Figura 4.36 Curvas de deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical para a areia pura.	90

Figura 4.37 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical para a areia pura.	91
Figura 4.38 Curva deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante para a borracha pura.	92
Figura 4.39 Envoltória de Mohr-Coulomb para a borracha pura.	93
Figura 4.40 Curvas de deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical para a borracha pura.	94
Figura 4.41 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical para a amostra com 100% borracha. Figura	94
Figura 4.42 Curva deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante para a mistura com 10% de borracha.	95
Figura 4.43 Envoltória de Mohr-Coulomb (M10%).	96
Figura 4.44 Curvas de deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical M10% de borracha.	97
Figura 4.45 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical (M10%).	98
Figura 4.46 Curva de deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante (M20%).	99
Figura 4.47 Envoltória de Mohr-Coulomb (M20%).	100
Figura 4.48 Curvas de deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical (M20%).	101
Figura 4.49 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical (M20%).	102
Figura 4.50 Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal (M30%).	103
Figura 4.51 Envoltória de Mohr-Coulomb (M30%).	104
Figura 4.52 Relação deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical (M30%).	105
Figura 4.53 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical (M30%).	105
Figura 4.54 Curva de deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante (M40%).	106
Figura 4.55 Envoltória de Mohr-Coulomb (M40%).	107
Figura 4.56 Relação deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical (M40%).	108
Figura 4.57 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical (M40%).	109
Figura 4.58 Curva de deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante (M50%).	110

Figura 4.59 Envoltória de Mohr-Coulomb (M50%).	111
Figura 4.60 Relação deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical (M50%).	112
Figura 4.61 Raiz (t) <i>versus</i> deslocamento vertical (M50%).	112
Figura 4.62 Teor de borracha <i>versus</i> variação do ângulo de atrito efetivo.	117

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 2.1 Evolução anual da produção de pneus no Brasil (ANIP, 2016).	05
Tabela 2.2 Diferentes classes de resíduos de pneus misturados com areia (Modificado de Franco, 2012).	08
Tabela 2.3 Dados para projeto (Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires, (2008, p.115).	11
Tabela 2.4 Propriedades gerais para diferentes tamanhos de desbastes de pneus (Relatório Final, 2013, p.21).	13
Tabela 2.5 Resultados para diferentes tamanhos de desbastes de pneus (Relatório Final, 2013, p.23).	14
Tabela 2.6 Parâmetros de resistência das misturas de areia e pedaços de pneus (Zornberg et al., 2004).	17
Tabela 2.7 Parâmetros de resistência das misturas de areia e lascas de pneus e das interfaces com geogrelha (Ghazavi et al., 2011).	20
Tabela 2.8 Programa de ensaios de compressão triaxial (Balachowski & Gotteland, 2007).	21
Tabela 2.9 Parâmetros de dilatância e resultados (Mashiri et al., 2015).	27
Tabela 3.1 Peneiras utilizadas para separação do insumo.	33
Tabela 3.2 Propriedades do solo arenoso.	34
Tabela 3.3 Teores de borracha pesquisados.	38
Tabela 3.4 Relação dos ensaios nessa pesquisa.	39
Tabela 3.5 Sequência metodológica do programa de preparo das amostras (M0%, M10% a M50%).	40
Tabela 3.6 Sequência metodológica do programa de preparo das amostras (M100%).	40
Tabela 3.7 Sequência metodológica do programa de execução do ensaio de cisalhamento direto em média escala para todas as misturas.	41
Tabela 3.8 Classificação da compactidade da areia.	44
Tabela 3.9 Sequência metodológica do programa de ensaio de absorção da borracha.	45
Tabela 3.10 Sequência metodológica do programa de ensaio de compactação.	46

Tabela 3.11 Sequência metodológica do ensaio de cisalhamento direto escala média.	51
Tabela 4.1 – Massa específica dos sólidos (G_s).	53
Tabela 4.2 - Propriedades do solo arenoso (M0%).	54
Tabela 4.3 - Coeficientes CNU e Cc.	56
Tabela 4.4 - Classificação geotécnica dos materiais estudados.	59
Tabela 4.5 - Dados obtidos no ensaio de massa específica.	61
Tabela 4.6 Resumo dos resultados dos ensaios de compactação para os teores de borracha.	65
Tabela 4.7 Resumo dos resultados do ensaio de compactação.	78
Tabela 4.8 Parâmetros de resistência da areia estudada (M0%).	84
Tabela 4.9 Propriedades das areias empregadas em outras pesquisas.	86
Tabela 4.10 Parâmetros de resistência da areia pura.	89
Tabela 4.11 Parâmetros de resistência para a borracha pura.	92
Tabela 4.12 Parâmetros de resistência para a mistura com 10% de borracha.	96
Tabela 4.13 Parâmetros de resistência (M20%).	100
Tabela 4.14 Parâmetros de resistência (M30%).	104
Tabela 4.15 Parâmetros de resistência da mistura (M40%).	107
Tabela 4.16 Parâmetros de resistência mistura (M50%).	111
Tabela 4.17 Resumo dos ensaios de cisalhamento direto.	114
Tabela 4.18 Diferentes classes de resíduos de borracha de pneus dos autores destacados na Referência Bibliográfica.	115/116
Tabela 4.19 - Resumo dos resultados dos ensaios das misturas pesquisadas (CD em média escala).	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIP	Associação Brasileira da Indústria de Pneus Remoldados
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
ADP	Agregado Derivado de Pneus
ANIP	Associação nacional da indústria de pneumáticos
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
HRB	Método de Classificação de solos segundo o Manual do DNER
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de solos

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de atuação da força normal
AL	Área lateral de atuação da carga
c	Coesão
c'	Coesão efetiva
CD	Ensaio triaxiais adensados e drenados
CID	Ensaio triaxiais isotropicamente adensados e drenados
cm	Centímetro
CWA	CEN Workshop Agreement
CU	Ensaio triaxiais adensados e não drenados
D ₁₀	Diâmetro à 10%
D ₃₀	Diâmetro à 30%
D ₅₀	Diâmetro médio à 50%
D ₆₀	Diâmetro à 60%
e	Índice de vazios
g	Gramas
G _{solo}	Massa específica dos sólidos da areia
G _{sbor}	Massa específica dos sólidos dos pedaços de borracha
G _{seq}	Massa específica dos sólidos da mistura
H	Orientação horizontal
K ₀	Coefficiente de empuxo
kg	Quilogramas
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
M0	Mistura com teor 0% de lascas de pneu e 100% de solo
M10	Mistura com teor 10% de lascas de pneu e 90% de solo
M20	Mistura com teor 20% de lascas de pneu e 80% de solo
M30	Mistura com teor 30% de lascas de pneu e 70% de solo
M40	Mistura com teor 40% de lascas de pneu e 60% de solo

M50	Mistura com teor 50% de lascas de pneu e 50% de solo
Ms	Massa específica do solo em gramas
n	Relação entre as laterais das lascas de pneu
NA	Não aplicável
NO	Não orientados
Pa	Pascal
Q	Máxima força de cisalhamento
R ²	Coefficiente de determinação
S	Saturação
SP	Areia mal graduada
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de solos
t	Tempo
t	Toneladas
X _{bor}	Teor de borracha da mistura
X _{solo}	Teor de solo da mistura
w	Umidade
w _D	Umidade de água desejada
w _h	Umidade higroscópica
w _{ot}	Umidade ótima de compactação
w _s	Força peso da parte superior ao plano de ruptura
w _{bor} / w _{solo}	Relação mistura por peso
V _{bor} / V _{solo}	Relação mistura por volume
V _w	Volume de água a adicionar
°	Graus
° ' ''	Graus, minutos e segundos
“	Polegadas
R	Registrado
φ'	Ângulo de atrito efetivo
φ' _{eq}	Ângulo de atrito efetivo equivalente
δ _{eq}	Deslocamento equivalente
ρ	Massa específica úmida da mistura (kg/cm ³)
γ	Peso específico (kN/m ³)
γ _d	Peso específico seco (kN/ m ³)

$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo (kN/ m ³)
$\gamma_{mistsura}$	Peso específico da mistura sem compactar (kN/ m ³)
γ_w	Peso específico da água (kN/ m ³)
Σ	Tensão
σ_N	Tensão normal
σ_{np}	Tensão normal no plano de ruptura
τ	Tensão de cisalhamento
τ_{max}	Tensão de cisalhamento máxima
%	Porcentagem
>	Sinal de maior
<	Sinal de menor

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Atualmente, um dos grandes desafios da sociedade é criar e manter alternativas para destino dos materiais inservíveis dos pneus e seus derivados, devido ao acelerado crescimento anual da população mundial e do conseqüente aumento da produção de veículos automotores. Diante deste crescimento, ao final da vida útil do pneu, o mesmo é considerado lixo com grandes dificuldades de descarte final, o que vem ocasionando graves problemas ambientais nas últimas décadas.

Na publicação “The Future of Tire Manufacturing to 2022, out 2017”: “O futuro da fabricação de pneus para 2022”, foram estudadas e analisadas as tendências globais do mercado na fabricação de pneus, segmentadas por processos de fabricação e uso final até 2022. A produção mundial de fabricação de pneus é estimada em mais de 17 milhões de toneladas em 2016, e está crescendo quase 4% ao ano, impulsionado pelo aumento da demanda, pela inovações de pneus e pelos gastos contínuos de capital e expansão de capacidade por parte dos fornecedores de pneus (Smithers Rpra, 2017). As melhorias nos processos de fabricação se aceleraram na última década, estimuladas pelo aumento do foco em questões ambientais, juntamente com a construção de novas fábricas para atender à crescente demanda e buscar a capacidade de lidar com novos equipamentos com mais facilidade. Os avanços na automação também ajudaram.

No Brasil, ainda não existe a mesma efetividade que há nos EUA no reprocessamento. Dados divulgados pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2015) destacam que a indústria brasileira produziu 68,8 milhões de pneus no ano 2013, um aumento de 9,8% em relação a 2012, um recorde para a indústria brasileira.

Diante destes fatos, torna-se necessário o estudo de alternativas para descarte final dos resíduos de pneus inservíveis ao final de sua vida útil, considerando os seguintes aspectos: tratamento e armazenamento, além da definição dos danos causados ao meio ambiente, resultantes do manejo inadequado dos mesmos.

Existem inúmeras pesquisas que buscam metodologias para reciclagem e/ou reprocessamento de produtos utilizados pelo homem em seu cotidiano, inclusive de

resíduos de pneus inservíveis. Na América Latina não existem, ainda, políticas e ações efetivas implementadas que apoiem os fabricantes e os usuários em todas as etapas de coleta, recuperação do material e/ou eliminação de forma limpa e ambientalmente correta destes resíduos. A incineração dos resíduos de pneus em fornos das fábricas de cimento, em grande escala, poderia ser uma solução para reduzir as emissões de gases tóxicos, por exemplo.

A borracha proveniente de resíduos de pneus inservíveis vem sendo estudada em diversas metodologias no processamento dos insumos, eliminando os componentes perigosos, quando triturados mecanicamente para reutilização. A geotecnia também vem pesquisando a possibilidade de aplicação de resíduos de pneus inservíveis em obras de pavimentação, aterros, taludes, enchimentos e outros em meios de utilização.

Essa pesquisa tem como finalidade dar continuidade a outras pesquisas realizadas com misturas solo (areia) e borracha (pedaços). Algumas pesquisas podem ser encontradas na literatura. Por exemplo, Franco (2012) pesquisou mistura de fragmentos de pneus com areia e realizou ensaios de pequena escala. Por sua vez, Chrusciak (2013) analisou a mistura de fragmentos de borracha com argila e realizou ensaios de média escala. Suárez (2016) realizou pesquisas acerca da mistura de pedaços de borracha com argila siltosa e utilizou ensaios de média escala em equipamento de cisalhamento direto com dimensões maiores que as convencionais, visando à redução do efeito de escala relativo ao tamanho dos fragmentos de borracha para diferentes teores de mistura solo-borracha. As pesquisas de Chrusciak (2013) e Suárez (2016) utilizaram solo predominante do Distrito Federal, assim como a areia aplicada nesta pesquisa.

1.2. OBJETIVO

Essa pesquisa teve como objetivo geral verificar a influência da adição de pedaços de borracha provenientes de pneus inservíveis, em processo de descarte, após trituração mecânica em usinas apropriadas, na resistência de solo arenoso proveniente do Distrito Federal.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos foram definidos:

- Estudar as características granulométricas do solo e os fragmentos de pneus utilizados, para estudar quais os teores de mistura de fragmentos de borracha que melhor se aplicam ao solo estudado por intermédio de ensaios de compactação;
- Avaliar a influência dos teores de misturas de pedaços de borracha com solo arenoso do Distrito Federal para determinar os parâmetros dos ensaios de compactação de peso específico máximo e de teor de umidade ótimo;
- Estudar as características de resistência das misturas solo-borracha a partir de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de média escala, a partir dos valores de pesos específicos seco máximo encontrados nos resultados das curvas de compactação;
- Estudar as características das misturas solo-borracha por meio de ensaios de cisalhamento direto de média escala para amostras compactadas de misturas solo-borracha, para avaliar a influência dos teores das misturas nos parâmetros de resistência;
- Analisar e comparar os resultados obtidos nessa pesquisa com os encontrados por outros autores, para avaliar a influência dos teores de mistura solo-borracha nos parâmetros medidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica de pesquisas de misturas solo-borracha, que serão utilizadas comparativamente com os estudos realizados nessa pesquisa, referentes à viabilidade do aproveitamento de resíduos de borracha.

Os autores pesquisados utilizaram diferentes tamanhos de resíduos de pneus, triturados mecanicamente, tendo como base a classificação da norma D6270 (ASTM, 1998). É importante destacar que esta pesquisa empregou como base os resultados dos trabalhos de Chrusciak (2013) e Suárez (2016), do Programa de Geotecnia da Universidade de Brasília – UnB, que realizaram investigações com os mesmos insumos de borracha usados por esta pesquisa nas misturas solo-borracha, mas utilizando solos argilosos também do Distrito Federal.

2.1. HISTÓRICO E RECICLAGEM

O pneu, componente imprescindível ao funcionamento de veículos passou por muitas etapas de evolução desde sua origem, no século XIX, mesmo com tecnologia pouco desenvolvida, teve início a produção de pneus de borracha. Somente com a descoberta de Charles Goodyear, em 1839, com aplicação de tratamentos térmicos na borracha, melhorando o desempenho dos pneus, foi que ocorreu a disseminação do uso de pneus em todo o mundo (ANIP, 2013). No Brasil, a produção de pneus começou com a implantação do Plano Geral de Viação Nacional (PNV), em 1934, com o uso intensivo dos veículos automotores. A partir de então, o Brasil se tornou um grande produtor de pneus e os investimentos em infraestrutura rodoviária foram intensificados.

Um pneu é composto pelas seguintes matérias-primas: borracha natural, borracha sintética, aço, negro de fumo, óxido de zinco e ácido esteárico, enxofre (agente vulcanizador), antidegradantes, aceleradores e retardadores, além dos auxiliares de processo. Atualmente, a maior parte dos pneus é fabricada com 10% de borracha natural (látex), 30% de petróleo (borracha sintética) e 60% de aço e tecidos (tipo lona) para fortalecer ainda mais a estrutura, em peso.

Na Tabela 2.1, é apresentada a evolução da produção de pneus no Brasil. Em 2014, a produção mensal acumulada atingiu 66,7 milhões de unidades de pneus e, em 2015, foram produzidos 68,6 milhões de unidades, ocasionando um acréscimo de 2,8%. A Figura 2.1 apresenta a evolução de vendas de pneus no Brasil, em 2015, de 71,9 milhões de unidades, representando uma queda de 1,2% no consumo interno, em relação a 2014 (ANIP, 2016). Apesar dessa queda, a quantidade de pneus gerados é considerada relevante.

Tabela 2.1 Evolução anual da produção de pneus no Brasil (ANIP, 2016).

Tipos de Veículos	Produção por Categoria (Milhares de unidades)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Carga	6.947,4	7.319,3	7.367,1	6.033,6	7.735,3	7.448,8	7.138,0	8.231,3	7.894,4	6.829,1
Camioneta	5.894,0	6.058,4	5.841,9	5.599,8	7.940,8	8.470,0	8.267,8	9.904,5	8.860,7	8.843,1
Passeio	28.948,7	28.791,4	29.585,9	27.489,3	33.812,0	35.568,2	30.406,4	32.554,3	33.266,7	37.399,9
Moto	11.438,8	13.725,4	15.249,3	13.158,1	15.205,6	16.078,5	14.519,5	15.041,6	15.514,4	14.614,8
Agrícola	559,3	698,2	776,0	593,3	781,4	793,8	807,2	928,5	873,4	719,5
OTR	129,3	131,9	127,2	86,7	136,0	109,7	107,8	103,3	118,4	103,2
Industrial	498,5	462,1	716,4	1.083,3	1.633,2	1.396,9	1.360,3	2.072,8	151,6	120,8
Avião	51,0	60,9	47,6	41,8	60,0	60,1	54,0	52,6	50,5	0,8
Total	56.473,0	59.254,6	61.719,4	56.094,9	69.314,3	71.937,0	64.673,0	70.901,9	68.744,1	70.646,2

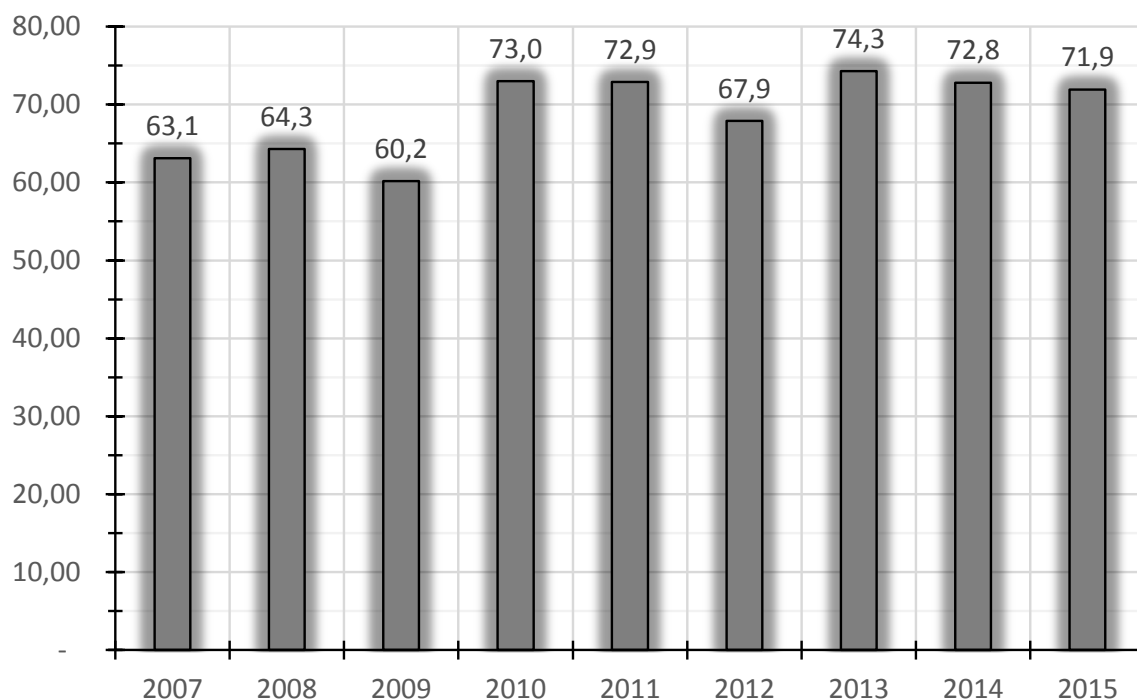


Figura 2.1 Evolução anual das vendas totais de pneus no Brasil (ANIP, 2016).

2.2. DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS INSERVÍVEIS DE PNEUS

Há mais de duas décadas, o Brasil vem se preocupando com a destinação de resíduos inservíveis, provenientes de pneus (ou pneumáticos), aqueles que não servem mais para serem reformados ou para serem reutilizados para rodagem (recapar, remoldar ou recauchutar), conforme Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 258 (1999).

Os pneus usados que se tornaram inservíveis podem ser insumos, por exemplo, na construção de estruturas de contenção em obras geotécnicas que não apresentem carga vertical (Hoppe, 2013). O processo de reutilização começa no processamento para formar fragmentos de pneus, pedaços, lascas, desbastes e migalhas de pneus, considerados como agregado leve. O subproduto em migalhas de pneus está sendo usado pela indústria de pneus reformados na construção de tapetes, pisos de esporte, brinquedos e outros artefatos, diferentemente das lascas e desbastes de pneus. Sua produção não requer energia extra.

A cada ano, pode-se afirmar que vêm aumentando, de forma acentuada, os custos para eliminação dos resíduos de pneus no Brasil. Reciclar e reutilizar esses resíduos, especialmente em obras geotécnicas, podem contribuir para a redução destes custos e fortalecer os programas ambientais autossustentáveis. Diversas áreas da ciência estão pesquisando a utilização dos resíduos de pneus em grande escala.

2.3. PNEU INSERVÍVEL: CARACTERÍSTICAS E USO

Pesquisas geotécnicas têm chamado a atenção para estudos realizados com resíduos de borracha provenientes de pneus inservíveis, destacando algumas características do material como grande durabilidade e baixo peso específico para utilização em obras geotécnicas.

Entretanto, é necessário considerar atenção às características de combustibilidade e compressibilidade dos pneus, que são problemas nessas aplicações. Estes problemas podem ser reduzidos, quando esses materiais são misturados com o solo, tornando possível usar a mistura sem grandes preocupações com estas características (Edinçliler et

al., 2010). Mas, em aplicações onde a borracha é utilizada sem ser misturada com solo, conforme a norma D 6270-08 (ASTM, 2008), são sugeridas algumas recomendações para evitar reações de autoaquecimento das camadas como o tamanho das partículas, devem ser utilizados preferencialmente pedaços maiores de borracha. É preciso que sejam observados alguns detalhes, como: a quantidade de finos na camada, a espessura da camada (limitando camadas de até 3 metros), e o contato da borracha com ar e água, sugerindo camadas de solo e geotêxteis instalados nos limites da camada de borracha.

Além do uso dos resíduos em pedaços menores, proveniente do processamento dos pneus inservíveis, também há a possibilidade de uso de grandes pedaços de pneus. Shalaby e Khan (2005) realizaram pesquisas de camadas de aterro com as partes laterais de pneus apresentando resultados aceitáveis para uso.

Os quatro tipos de resíduos processados de pneus inservíveis estão registrados na Figura 2.2. Nessa é possível perceber pedaços, lascas, desbastes e migalhas (Edinçliler et al., 2010). Inicialmente, esses materiais foram estudados por pesquisadores americanos (Humphrey et al. (1993) e Ahmed & Lovell (1993)), e com isso, muitas vezes são também nomeados pelas suas denominações em inglês: “shred” (pedaço), “chip” (lasca), “buffing” (desbaste), e “crumb” (migalha).



Figura 2.2 Processamento de pneus inservíveis em diferentes tipos, fora de escala (Edinçliler et al., 2010).

É importante destacar que, para uso de pneus inservíveis em obras geotécnicas, faz-se necessária a separação da borracha vulcanizada de outros componentes (como metais e tecidos), por meio de processos de recuperação e regeneração de pneus. Os pneus são cortados em lascas e separados por um sistema de peneiras. As lascas são moídas e depois submetidas à digestão em vapor d'água e em produtos químicos, usando álcalis e óleos minerais para desvulcanizá-las. O produto obtido pode ser então refinado em moinhos, até a obtenção de uma manta uniforme, ou extrudado, para obtenção de grânulos de borracha. A borracha regenerada apresenta duas diferenças básicas do composto original: características físicas inferiores, pois nenhum processo consegue desvulcanizar a borracha totalmente e uma composição indefinida, porque é uma mistura dos componentes do pneu.

As lascas de borracha de pneus inservíveis têm várias utilidades, como cobrir áreas de lazer e quadras de esporte, tapetes para automóveis, passadeiras, saltos e solados de sapatos, colas e adesivos, câmaras de ar, rodos domésticos, tiras para indústrias de estofados, buchas para eixos de caminhões e ônibus, entre outros. A Tabela 2.2 apresenta diferentes classes de resíduos de pneus pesquisados por diversos autores em estudos, em que os restos são misturados com solo arenoso, conforme citado por Franco (2012) e modificado.

Tabela 2.2 Diferentes classes de resíduos de pneus misturados com areia (adaptado de Franco, 2012).

Classificação	Tamanho dos resíduos de pneus utilizados	Referência
Pedaços de pneus	50 mm, 50 - 100 mm, e 100 - 150 mm	Foose et al. (1996)
Pedaços de pneus	50,8 - 152,4 mm	Zornberg al. (2004)
Pedaços de pneus	150 - 300 mm	Shalaby e Khan (2005)
Pedaços de pneus e lascas de pneus	50 - 100 mm, 100 - 200 mm (pedaços de pneus), e 9,5 mm (lascas de pneus)	Balunaini e Prezzi. (2005)
Pedaços de pneus	10 - 15 mm e 50 - 60 mm	Chebet, F.C. et al. (2014)
Pedaços de pneus	10 - 15 mm e 50 - 60 mm	Chrusciak (2013)
Pedaços de pneus	10 - 15 mm e 50 - 60 mm	Suárez (2106)

Tabela 2.2 Diferentes classes de resíduos de pneus misturados com areia (Modificado de Franco, 2012). (continuação)

Lascas de pneus	30 mm	Lee et al. (1999)
Desbastes de pneus	2 - 40 mm	Edinçliler et al. (2004)
Migalhas de pneus	< 0,6 mm	Ghazavi (2004)
Desbastes de pneus	10 a 50 mm	Mashiri et al. (2015)
Pedaços de pneus	1 – 60 mm	Akbar Anvari et al. (2017)

Para produzir pedaços de borracha provenientes de pneus inservíveis, o material passa por triturações primária e secundária (Edinçliler et al., 2010), podendo apresentar formas variadas em tamanhos entre 50 e 100 milímetros, conforme a norma D 6270-08 (ASTM, 2008), de acordo com a máquina de trituração utilizada no processamento.

Dentre as características mais pesquisadas dos pedaços de pneus destacam-se o baixo peso específico e a alta permeabilidade. Segundo Ahmed & Lovell (1993) e Humphrey et al. (1993), o peso específico varia entre 2,4 e 7,0 kN/m³, correspondendo a 0,1 a 0,4 vezes o peso de solos comuns, como o argiloso e o arenoso. Além disso, os pedaços de borracha apresentam os menores pesos específicos alcançados entre os materiais de reuso de pneus, após processos de recuperação e regeneração.

Ahmed & Lovell (1993) concluíram que a permeabilidade dos pedaços de borracha por eles estudados varia entre 0,75 e 2,0 cm/s. O peso específico e a permeabilidade fazem com que os pedaços de borracha se destaquem entre os demais materiais processados de pneus inservíveis, tornando-os mais adequados para construção de aterros leves e sistemas de drenagem. Desta forma, o uso de borracha de pneus inservíveis em obras geotécnicas é diverso.

Características como baixo peso específico, baixa condutividade térmica, propriedades granulométricas e aderência a outros materiais são os responsáveis pela escolha de pedaços de borracha para aplicações em obras geotécnicas. Segundo Young et al. (2003), pesquisas são importantes para confirmar e ampliar a lista de aplicações em aterros comuns e leves para rodovias, encontro de pontes, camada de isolamento térmico e como sistema de drenagem.

O baixo peso específico dos pedaços de borracha torna interessante o seu uso em aterros, onde o seu peso próprio é fator limitante para estabilidade de taludes ou para estruturas em que o aterro gera uma pressão horizontal excessiva. Com o uso dos pedaços de borracha, pode-se diminuir sensivelmente o peso do aterro como um todo, não só pelo baixo peso específico do insumo (em torno de um terço ou até a metade de pesos específicos de solos), mas também pela possibilidade de maior inclinação dos taludes, devido à sua maior resistência ao cisalhamento (Edinçliler et al., 2010). Todas estas características possibilitam o uso em construção de aterros mais leves e com menor volume de solo utilizado.

Características de permeabilidade e granulometria dos pedaços de borracha de pneus inservíveis também os tornam atraentes para uso em estruturas com funções de drenagem (Junqueira, ____). A norma D 6270-08 (ASTM, 2008) apresenta uma lista de possíveis aplicações destes materiais com função drenante, como drenos franceses, camadas drenantes em aterros e em sistemas de disposição de águas coletadas pelo sistema de drenagem. A mesma norma sugere, ainda, que, para tensões verticais menores que 50 kPa, a mistura solo-borracha pode ser adotada com condutividade hidráulica maior que 1,0 cm/s, valor referente a materiais uniformemente graduados. Entretanto, em situações em que para as tensões verticais maiores que 50 kPa devem ser realizados estudos de permeabilidade e de índice de vazios no material para determinação dos parâmetros de projeto.

Outra característica importante desses resíduos é sua aderência com outros materiais utilizados como reforço em obras geotécnicas, como geotêxteis e geogrelhas. Pesquisas de Tatlısoz et al. (1998) e Youwai e Bergado (2004), sobre a aderência e o funcionamento de materiais de borracha em conjunto indicaram bons resultados, até mesmo mais satisfatórios que a interação solo (sem borracha) e geotêxtil/geogrelha. Siddique (2009), também defende o uso de produtos derivados de pneus inservíveis e outros materiais reciclados como agregado para aterros autoadensantes, material cimentício utilizado em aterros especiais, como de encontro de pontes. Outras aplicações em obras geotécnicas incluem uso em camadas de aterros sanitários, isolamento térmico e acústico e como aditivo para asfalto.

2.4. PESQUISAS REALIZADAS COM FRAGMENTOS DE BORRACHA

Os resíduos de borracha de pneus inservíveis podem ser classificados de acordo com os tamanhos, conforme a classificação: migalhas (1 a 10 mm), desbastes (1 a 40 mm), lascas (10 a 50 mm) e pedaços (50 a 300 mm), conforme a norma D 6270-08 (ASTM, 2008).

Os Estados Unidos da América (EUA) vêm realizando pesquisas avançadas do uso de pneus inservíveis com mistura do solo em obras de engenharia desde 2007. Nesta pesquisa são destacados dois manuais de estudos americanos: o “Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires, Maryland Department of the Environment Scrap Tire Program, Geosyntec Project N° ME0012-11 (2008)” e o “Use of Tire Derived Products (TDP) in Roadway Construction, Final Report, (2013)”.

O primeiro é uma apresentação para engenheiros projetistas de informações técnicas e práticas, relacionadas ao benefício do uso de insumos de pneus inservíveis em misturas solo-borracha. O Manual apresenta o uso de agregados derivados de pneus (Tire Derived Aggregate - TDA), especificamente os pedaços de pneus inservíveis, em projetos de engenharia civil na cidade de Maryland, no nordeste dos Estados Unidos. A Tabela 2.3 apresenta informações técnicas para o projeto. A Figura 2.3 apresenta, também, algumas informações técnicas como referência para uso em projetos geotécnicos, utilizando TDA.

Tabela 2.3 Dados para projeto (Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires, (2008, p.115).

Propriedades	TDA	Areia
Massa específica seca (kg/cm ³)	40	100
Densidade máxima (kg/cm ³)	45	120
Umidade ótima (%)	70	13,5
Ângulo de atrito (graus)	27,5	35,0
Coesão (kN/m ³)	3,8	-
Ângulo de atrito de interface do geotêxtil (graus)	34	30
Ângulo de atrito de interface da geomembrana (graus)	34	34
Condutividade hidráulica (cm/s)	1	0,01

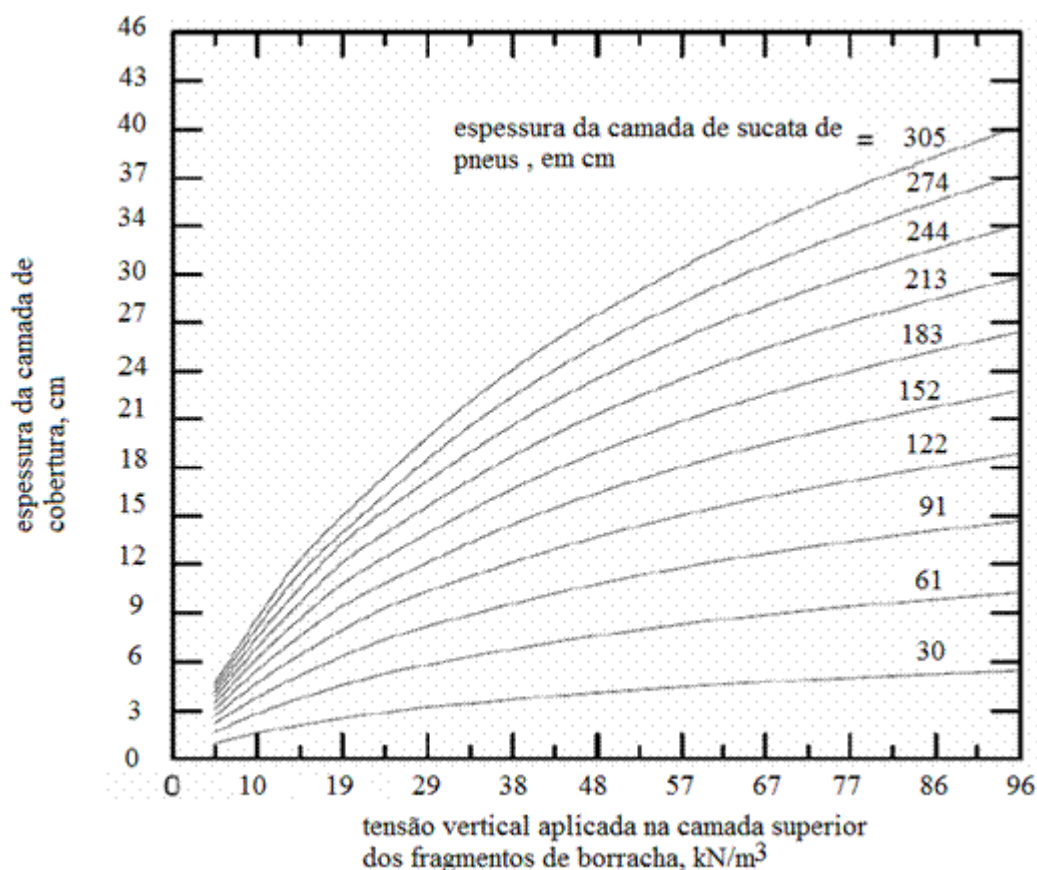


Figura 2.3 Dados para projeto (Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires, 2008, p.147).

O Relatório Final nº MN/RC 2013-20 “Use of Tire Derived Products (TDP) in Roadway Construction” apresenta análises de artigos publicados que incluem o uso de TDP de diversas formas, incluindo pneus inteiros, pedaços irregulares, pedaços, lascas, e misturas solo-borracha. O documento apresenta a consolidação de estudos desde 2005. Neles, o TDA vem sendo regulamentado para aplicação nas obras de engenharia em diversos estados americanos, como Colorado, Iowa, Indiana, Maine, Minnesota, Nova Iorque, Texas, Vermont, Virgínia e Wisconsin, bem como no Canadá e na Europa.

No Relatório Final (2013) a sigla TDP (agregados derivados de pneus) foi utilizada para se referir a pedaços irregulares, pedaços e lascas de pneus de vários tamanhos. O TDP foi utilizado em obras de engenharia de preenchimento leve, mantendo o uso para aterro, parede, camada de isolamento, camada de drenagem, e colchão drenante para a quebra de umidade capilar. Outros usos também estão destacados, inclusive resultados de inúmeras pesquisas sobre preocupações ambientais do uso de pneus inservíveis, tanto acima como

abaixo do nível de águas subterrâneas. O documento apresenta, ainda, observações gerais, tendo como base a revisão dos estudos apresentados e comentários sobre o uso na prática do TDP, notadamente referente às aplicações em rodovias.

A Tabela 2.4 apresenta as propriedades gerais dos insumos utilizados com diversas espessuras de borracha nas pesquisas. A Tabela 2.5 apresenta os resultados para diferentes tamanhos de desbastes de borracha. Ambas estão apresentadas no Relatório Final (2013). As massas específicas aparentes dos desbastes de pneus apresentam variação entre 1,5 e 3 polegadas (3,81 a 7,62 cm), diâmetro D₅₀ de 0,8 a 2,0 polegadas (2,08 a 5,08 cm) e variação da massa específica entre 1,13 a 1,36 *pounds per cubic foot* (18,8 a 22,7 kg/m³), dependendo da espessura de borracha. Foram retirados os metais dos desbastes de pneus e os resultados apresentaram uma faixa muito estreita de massa específica em torno de 1,15 *pcf*.

Tabela 2.4 Propriedades gerais para diferentes tamanhos de desbastes de pneus (Relatório Final, 2013, p.21).

Tamanho máximo (cm)	D ₅₀ (cm)	Massa específica dos grãos (g/m ³)	Massa específica seca mínima (kg/cm ³)	Massa específica seca máximo (kg/cm ³)	Absorção (%)	Fonte
3,8	2,0	1,14	30,9	38,6	3,8	(48)
4,6	2,5	1,24	30,1	40,1	2,0	(48)
5,1	2,2	1,18	25,6	35,3	9,5	(19)
5,1	3,0	1,23	25,5	39,0	4,3	(48)
6,4	5,1	1,19	27,3	31,4	2,8	(19)
7,6	5,1	1,27	21,3	38,7	2,0	(48)

* 60% da energia de Proctor Normal (48). (Table 6. General Properties).

(19) – Bressette, T. (1984)

(48) – Humphrey et al. (1992).

A Tabela 2.5 apresenta os resultados de resistência ao cisalhamento para diferentes tipos de tamanhos de desbastes de pneus usados. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos desbastes de pneus podem ser obtidos, testando amostras em uma grande escala (12 polegadas quadrada ou maior), no aparelho de cisalhamento direto. É apresentado também um resumo dos resultados dos testes de cisalhamento direto, realizados em tensões normais de 250, 500 e 1000 psf (12, 24 e 83,3 kPa).

Tabela 2.5 Resultados para diferentes tamanhos de desbastes de pneus (Relatório Final, 2013, p.23).

Tamanho máximo (cm)	D ₅₀ (cm)	Massa específica seca máximo (kg/cm ³) *	Coesão (kg/cm ³)	Ângulo de Atrito (graus)	Tamanho da caixa de cisalhamento (cm)	Critério de falha do deslocamento horizontal ** (cm)
1,5	2,0	36,0	8,6	25	30,5	2,8
4,6	2,5	37,0	7,7	21	30,5	2,8
4,6	2,5	35,0	4,3	26	40,6	3,8
7,6	5,1	33,0	11,5	19	30,5	2,8

* Unidade de peso de compactação médio da tensão de cisalhamento (48).

** Critério de falha do deslocamento horizontal de 10% da largura da caixa de cisalhamento.

O Relatório Final (2013) apresentou as principais considerações sobre o uso do TDP ou Tire Derived Aggregate -TDA, apresentados a seguir:

- É composto de uma variedade de materiais como pneus inteiros, grandes pedaços, fragmentos, desbastes e migalhas de pneus;
- Seus derivados são utilizados em aplicações rodoviárias e pode ser misturado com vários tipos de solo;
- A norma ASTM D6270 (2008) destaca o êxito de controle de incêndios com o uso em aterros, viabilizando a aplicação em construções;
- Destaque para o desgaste nos equipamentos pelas cintas de aço expostas nas borrachas e pela dificuldade de fornecimento do insumo livre deste componente;
- É um material de preenchimento leve para aplicação em obras rodoviárias proporcionando também a redução das pressões de terra verticais e laterais;
- A permeabilidade o torna um excelente material drenante para uso em sistemas de drenagens, sistemas de coleta, enchimento de parede de contenção e em armazenamento de águas pluviais;
- Os grandes espaços vazios (porosidade) o tornam um excelente insumo para reter umidade. As propriedades isolantes também são uma opção para reduzir a penetração da geada;

- Devido à alta compressibilidade, os projetos geotécnicos de aterros e de drenagens devem considerar a utilização de uma camada adicional, para compensar a redução de permeabilidade no cálculo dos quantitativos; e
- Devido à grande elasticidade é necessário considerar uma camada adicional do insumo para diminuir a desagregação no processo de carga/descarga.

Suárez (2016) apresentou parâmetros de resistência do uso de misturas de solo argiloso do DF com pedaços de borracha reciclável proveniente de processo de trituração de pneus inservíveis como material de enchimento leve em obras de geotecnia. A metodologia usada pelo autor foi baseada nos trabalhos de Chrusciak (2013), Franco (2012) e Szeliga et al. (2014). Em todos os casos foram empregadas misturas de resíduos de pneus com solo tropical em equipamentos de menor escala.

A Figura 2.4 apresenta os resultados dos ensaios de compactação feitos por Suárez (2016) e Chrusciak (2013). Neles, é possível observar que o peso específico aparente seco máximo das misturas apresentou decréscimo em torno de 4,3% do valor, à medida que ocorre acréscimo do teor de borracha, em unidades de peso (de 0% a 10% em peso). Percebe-se, também, a variação da umidade ótima (W_{ot}), ressaltando que a variação não foi teoricamente significativa, em torno de 1,7%, devido ao fato de que a borracha é um material leve de baixa absorção. Foi possível observar, também, que a mudança da energia de compactação de normal para modificada apresentou um decréscimo na umidade ótima em torno de 26%, à medida que ocorreu um acréscimo do peso específico aparente seco máximo em torno de 17% para todos os teores de borracha analisados.

De acordo com os dados apresentados (e com base no que foi visto em Suárez (2016), observou acréscimo no ângulo de atrito efetivo e decréscimo na coesão das misturas, à medida que aumenta o teor de borracha. Isso deve-se aos seguintes fatores: (i) o material não coesivo atuou como material granular e de reforço dentro da mistura; (ii) existência de atrito entre os pedaços de pneus e o solo dentro das misturas; (iii) os pedaços de pneus interferem no plano de ruptura das misturas, aumentando a tensão de cisalhamento máxima, uma vez que este material pode absorver energia aplicada ao solo; e (iv) a mistura solo-borracha é mais deformável, à medida que aumenta o teor de borracha.

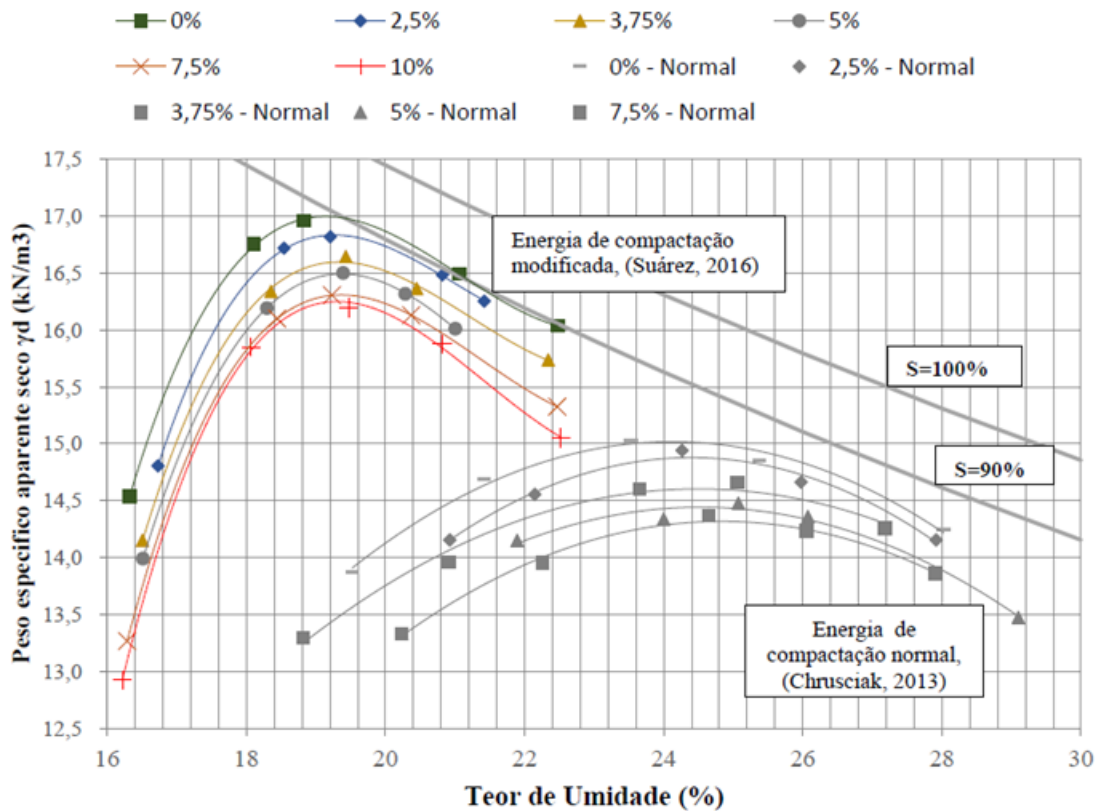


Figura 2.4 Curvas de compactação para todos os teores (Suárez (2016) e Chrusciak (2013)).

Baseando-se nos resultados obtidos, foi possível confirmar que os resultados observados nas misturas de solo-borracha ficaram com características semelhantes aos dos estudos das pesquisas dos autores Benson (1995), Zornberg et al. (2004), Ghazavi et al. (2011) e Szeliga et al. (2014).

Attom (2006) empregou três tipos de solo (SP pelo SUCS) que se diferenciavam em relação ao percentual do teor de finos. A areia tipo A apresentou 92% de areia pura e 8% de finos, a areia tipo B apresentou 95% de areia e 5% de finos, e a areia tipo C apresentou 90% de areia e 10% de finos. Os estudos destes dois autores concluíram que à medida que se aumentou o teor de pedaços de pneus (0%, 5%, 8%, 10% e 100%), ocorre o aumento do ângulo de atrito efetivo interno.

Zornberg et al. (2004) realizaram ensaios triaxiais com misturas de pedaços de pneus puros (diâmetro variando entre 50,8 e 152 mm), para avaliar o comportamento da tensão desviadora *versus* a deformação. Nessa situação, os resultados apresentaram comportamento linear e a deformação foi totalmente de contração volumétrica. O

resultado encontrado foi bem diferente nos ensaios de misturas com areia pura que apresentaram uma estrutura bem definida de resistência ao cisalhamento com pico e comportamento dilatante para as densidades relativas utilizadas. Os pedaços de pneus utilizados nos estudos de Zornberg et al. (2004) variaram em relação à forma (razão entre largura e comprimento) na razão 1, 2, 4 e 8. Os autores apresentaram também que o ângulo de atrito equivalente (ϕ'_{eq}) que corresponde à coesão.

Tabela 2.6 Parâmetros de resistência das misturas de areia e pedaços de pneus (Zornberg et al., 2004).

Densidade relativa da areia (%)	Teor de pedaços de pneus (%)	Relação da largura e comprimento dos pedaços de pneus	Parâmetros de resistência ao cisalhamento		
			ϕ' (graus)	c' (kPa)	ϕ'_{eq} (graus)
55	0	Na	36,8	7,8	37,9
55	5	4	36,1	7,0	37,1
55	10	1	36,5	19,8	39,4
55	10	4	35,7	21,7	38,9
55	30	1	35,1	23,7	38,7
55	30	2	35,6	22,3	38,9
55	30	8	36,1	60,0	44,5
55	38,3	4	36,1	41,2	42,0
55	30	4	35,7	30,4	40,2
55	60	4	34,4	18,2	37,3
Na	100	4	21,4	22,8	26,5
65	15	4	34,8	21,7	38,2
75	0	Na	41,0	3,8	41,4
75	20	4	37,2	22,0	40,3
75	30	4	36,4	30,7	40,8

(*) na – não avaliado

Pela Tabela 2.6, com relação à densidade relativa da areia de 55, é possível observar que houve diminuição do ângulo de atrito entre 0% e 60% de até 2,4° e aumento da coesão, à medida que houve aumento dos teores de borracha de até 15,0 kPa. Adicionalmente, a relação do comprimento *versus* a largura dos pedaços de pneus alterou a resposta da relação tensão-deformação, quando comparadas a altas tensões axiais. A conclusão dos resultados dos estudos de Zornberg et al. (2004) foi que ocorreu melhoria nos parâmetros de resistência a baixas pressões normais.

Os estudos de Tatlisoz et al. (1998) analisam as propriedades geotécnicas de dois tipos de solo: areia e silte arenoso, classificados como SP (areia mal graduada) e ML (silte arenoso), pelo Sistema de Classificação Unificada de solos (SUCS), respectivamente. Na pesquisa, tanto a areia como o silte arenoso foram misturados a lascas de pneus nos teores de 0%, 10%, 12%, 30% e 100%, e aplicados juntamente com geotêxtil e duas geogrelhas. Foram também realizados ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões (amostras com 280 mm de diâmetro e 300 mm de altura) e de arrancamento (amostras com 1630 mm de comprimento, 610 de largura e 410 de altura). Os autores concluíram que a areia e o silte podem ser reforçados usando lascas de pneus.

Os resultados das pesquisas de Ghazavi (2004) e Ghazavi et al. (2011) apresentam avaliação das propriedades de lascas de pneus (diâmetro < 40mm) e de misturas de areia e lascas com geossintéticos utilizando ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto. Estas pesquisas estudaram os parâmetros de resistência ao cisalhamento na interface das lascas de pneus, areia e geogrelha por meio de um equipamento de cisalhamento direto de dimensões de 300 mm x 300 mm. Os estudos utilizaram misturas de 0% (solo puro), 15%, 25%, 30%, 35% e 100% (lasca pura), em relação ao peso.

As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam os resultados obtidos das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento e a variação do deslocamento vertical *versus* o deslocamento horizontal, respectivamente, para misturas de areia com lascas de pneus de tensão normal de 90 kPa. É possível observar também uma proporcionalidade entre o teor das lascas de pneus e a tensão do cisalhamento máxima aplicada. O aumento de um acarreta aumento do outro.

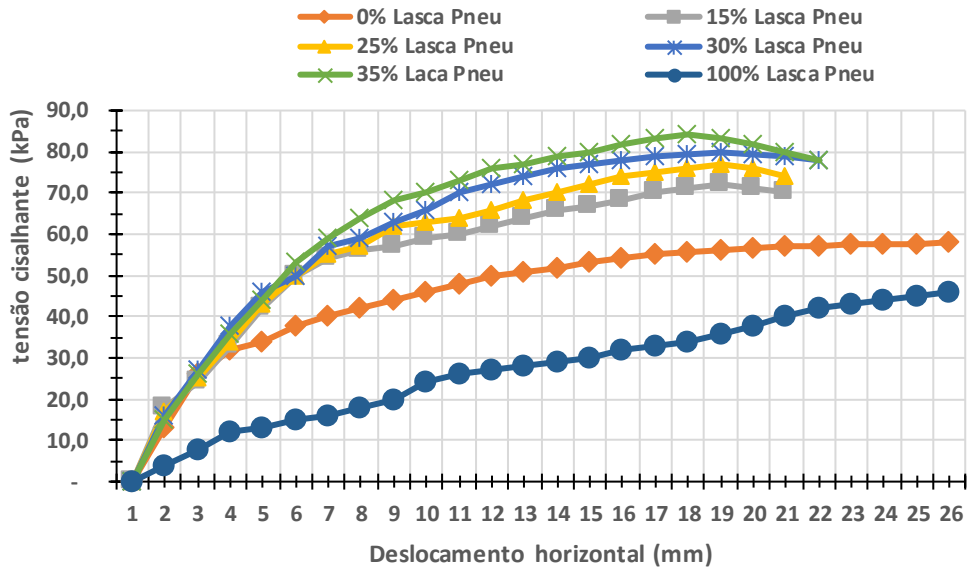


Figura 2.5. Curvas de tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (Ghazavi et al., 2011).

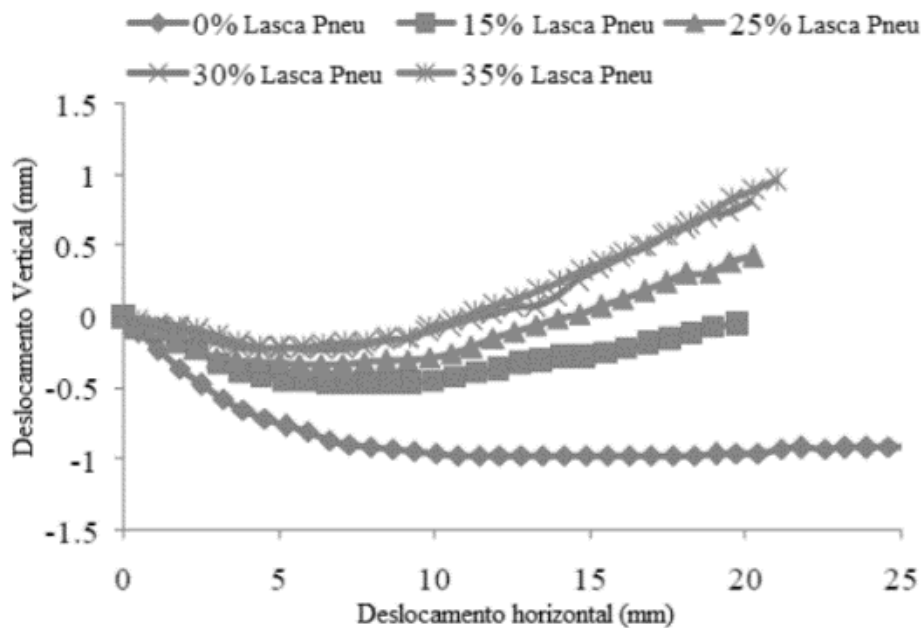


Figura 2.6 Curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para tensão normal de 90 kPa (Ghazavi et al., 2011).

A Figura 2.7 apresenta os resultados do comportamento do ângulo de atrito das misturas com o aumento do teor de lascas de pneus na pesquisa de Ghazavi et al. (2011). Foi possível observar a relação de proporcionalidade que há entre o teor das lascas de pneus (diâmetro < 40 mm) e o ângulo do atrito. À proporção que o primeiro aumentou, houve também aumento do segundo, até atingir valor máximo para os teores até 30%, diminuindo para os teores de 40% a 100%.

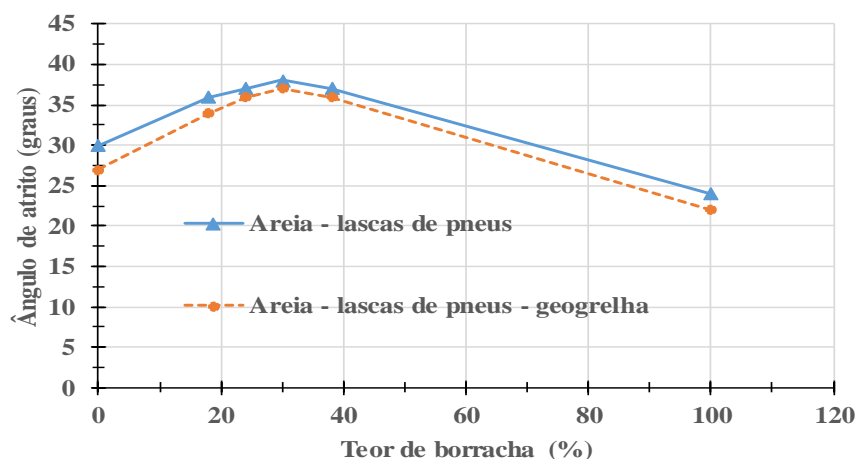


Figura 2.7 Variação do teor de lascas de pneus *versus* ângulo de atrito (Ghazavi et al.,2011).

Ghazavi et al. (2011), determinaram o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e a coesão efetiva (c'). Os autores calcularam também ângulo de atrito equivalente (ϕ'_{eq}), considerando a coesão como sendo zero. A Tabela 2.7 apresenta os resultados do ângulo de atrito interno das misturas de lascas de pneu-areia e da interface lascas de pneu, areia e geogrelha.

Tabela 2.7 - Parâmetros de resistência das misturas de areia e lascas de pneus e das interfaces com geogrelha (Ghazavi et al., 2011).

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

(*1) lascas de pneus-areia. (*2) lascas de pneu, areia e geogrelha.

Os estudos da pesquisa de Ghazavi et al. (2011) apresentaram resultados que apontam para a situação em que, mesmo em condições iguais de tensão normal, a tensão de cisalhamento máxima nos teores das misturas de lascas de pneus e areia é maior do que a de areia pura. Os autores também observaram características de dilatância em misturas de teores de lascas de pneus e areia e misturas de areia, lascas de pneus e geogrelha, especialmente em amostras com maior teor de lascas de pneus.

O estudo apresentou resultados em que a relação do ângulo de atrito de interface com o ângulo de atrito interno equivalente de misturas de areia e lascas de pneus ($\tan \phi' / \tan \phi'_{eq}$) aumentou à medida que houve acréscimo do teor das lascas de pneus. Foi verificado também que a variação da coesão e do ângulo de atrito efetivo com o aumento do teor de borracha. Estes resultados apresentaram comportamento semelhante aos resultados de Chrusciak (2013), pelo fato de ter uma redução da coesão e acréscimo do ângulo de atrito com o aumento do teor de borracha.

A pesquisa de Bałachowski & Gotteland (2007) realizaram uma série de ensaios de compressão triaxial em condições drenadas e adensadas (CD), para teores de misturas de areia pura, pedaços de pneus puro e misturas de areia com pedaços e lascas de pneus. A Tabela 2.8 apresenta os resultados para cada série de ensaios realizados nas tensões confinantes de 100, 200 e 300 kPa. As amostras foram preparadas de acordo com os diferentes teores de pedaços e lascas de pneus de modo orientado (Horizontal) ou não orientado (no). No estudo, foram utilizados pedaços de pneus de 100 mm de diâmetro médio. Os testes foram realizados com controle de deslocamento com taxa de deformação ajustada a partir de 0,04 mm/min para areia e de 0,4 mm/min para pedaços e lascas de pneus.

Tabela 2.8 Programa de ensaios de compressão triaxial (Balachowski & Gotteland, 2007).

Teor de lascas de pneus (%)	Orientação dos pedaços de pneus	γ (kN/m ³)	ϕ' (graus)	c' (kPa)	Observações
0	na	16,21	42,9	0	areia pura
14,2	no	15,50	34,5	37	areia – lascas/ pedaços (50/50)
15,2	no	14,52	35,5	32	areia – pedaços
23	no	13,95	33,9	55	areia – pedaços
30	no	13,30	33,6	60	areia – pedaços
50	no	6,59	12,2	42	lascas/ pedaços (50/50)
100	H	7,72	39,3	34	lascas de pneus

(*) H – orientação horizontal; (na) – não aplicável; (no) – não orientados

Os resultados da pesquisa de Cabalar (2011) apresentou o comportamento de misturas de lascas de pneus com dois tipos de areia: uma fina e angular (Leighton Buzzard (LBS)) e a outra grossa arredondada (Ceyahn (CS)). Os estudos foram realizados com quatro

diferentes misturas de teores de partículas de borracha: 5%, 10%, 20% e 50%, em relação ao peso seco. A pesquisa realizou ensaios de cisalhamento direto com tensões normais de 28, 42 e 68 kPa. Foi proposto ainda um modelo de previsão utilizando o método de regressão stepwise (SR), para calcular a tensão de cisalhamento de areias com teor de borracha crescente. A Figura 2.8 apresenta alguns resultados em que é possível observar a equivalência que há entre o teor de borracha e o ângulo de atrito, destacando o comparativo entre duas areias e suas misturas solo-borracha.

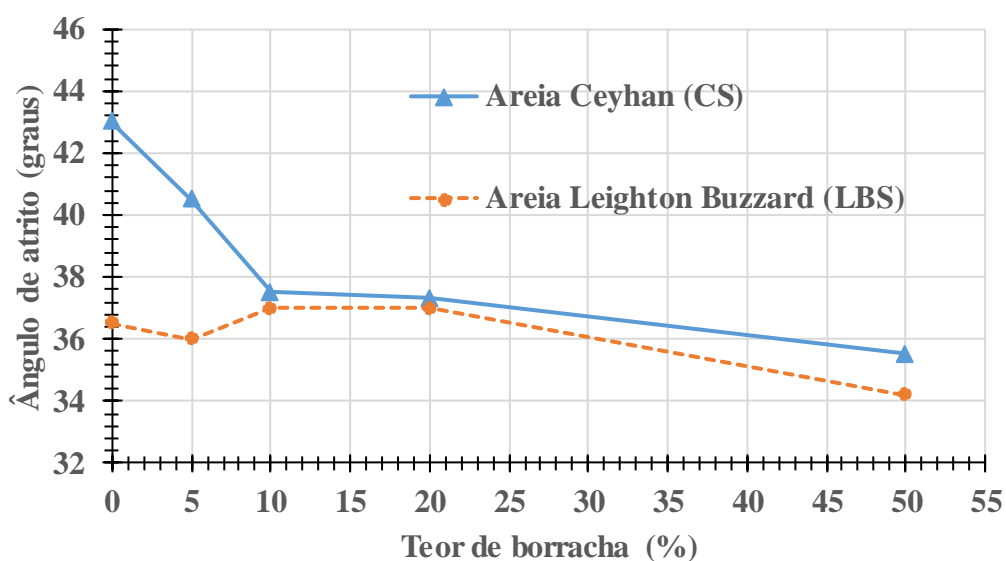


Figura 2.8 Efeito das lascas de borracha no ângulo de atrito para areias (Cabalar, 2011).

Cabalar (2011) concluiu que a resistência das misturas solo-borracha decresceu significativamente para teores inferiores a 10%, mas para os teores maiores que 10% as tensões de cisalhamento máximas foram quase constantes e o ângulo de atrito interno para a areia fina e angular não mudou significativamente. Outra conclusão do estudo foi que a precisão do modelo proposto é aceitável, uma vez que o cálculo da resistência ao cisalhamento apresentou valor de correlação de $R^2 = 0,90$ e $R^2 = 0,88$ para as misturas com borracha e a areia fina e angular e com a areia grossa e arredondada, respectivamente.

Edinçliler (2007) apresentou resultados para as misturas de areia e desbastes de pneus (Diâmetro de 2 a 40 mm), realizando ensaios de cisalhamento de grandes dimensões (300 x 300 x 300 mm) em amostras com teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 100% para desbastes seco, em peso. Foi empregada areia uniformemente graduada, densidade média e com um

peso específico seco de $15,3 \text{ kN/m}^3$, e os desbastes com comprimento máximo de 40 mm, com peso específico de $5,1 \text{ kN/m}^3$.

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto para as tensões de 20, 40 e 80 kPa. O autor concluiu que houve um aumento da resistência ao cisalhamento das misturas de desbastes de pneus e areia à medida que se aumentou o teor dos desbastes, sendo possível considerar sua utilização como elementos de reforço. Observou-se que a deformação da mistura foi consideravelmente alterada para os desbastes de pneus, mesmo para os teores com 10%, em peso.

A pesquisa de Franco (2012) apresentou resultados da avaliação do comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo tropical com desbastes de pneus (diâmetro < 70mm) para a construção de aterros. O solo utilizado foi classificado como SC, areia argilosa, segundo o método SUCS. Foram realizados ensaios de compactação, cisalhamento direto, compressão unidimensional e permeabilidade, em tamanho convencional, com o objetivo de avaliar diversos aspectos do comportamento mecânico e hidráulico. A autora realizou estudos para os teores de 0%, 10%, 20%, 40%, 50% e 100% de resíduos de pneus. O ensaio de cisalhamento foi realizado em uma caixa circular com dimensões de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Foram aplicadas tensões normais de 50, 100 e 200 kPa com velocidade de 0,05 mm/min. A Figura 2.9 apresenta os resultados dos ensaios do teor de resíduo de pneus *versus* o ângulo de atrito interno.

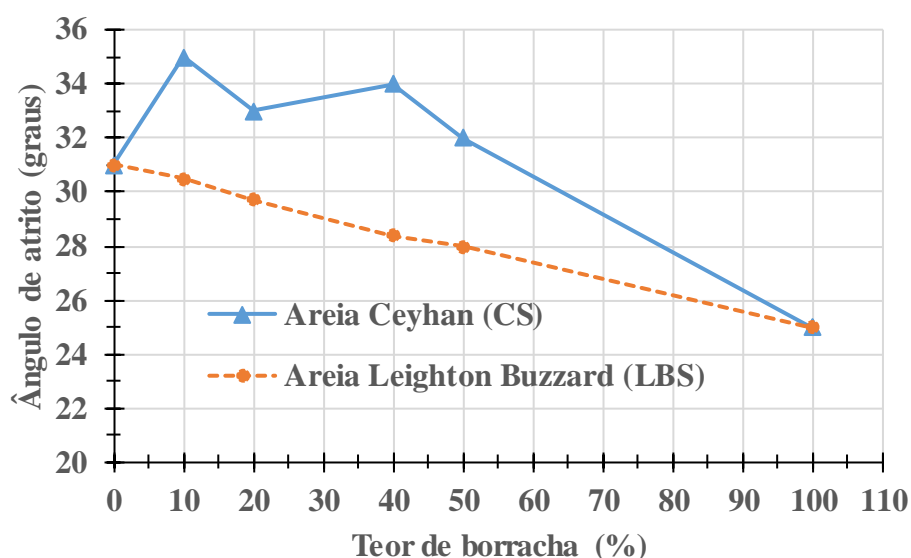


Figura 2.9 Relação do teor de resíduo de pneus *versus* ângulo de atrito interno (Franco, 2012).

Mashiri et al. (2015) apresentaram resultados de misturas de desbastes de pneus e areia nos teores de 0%, 10%, 20%, 30%, 35% e 40%, utilizando uma série de ensaios triaxiais monotônicos visando a avaliar a resistência ao cisalhamento e o comportamento volumétrico nas misturas. A Figura 2.10 apresenta análise granulométrica dos desbastes de borracha e da areia usados na pesquisa.

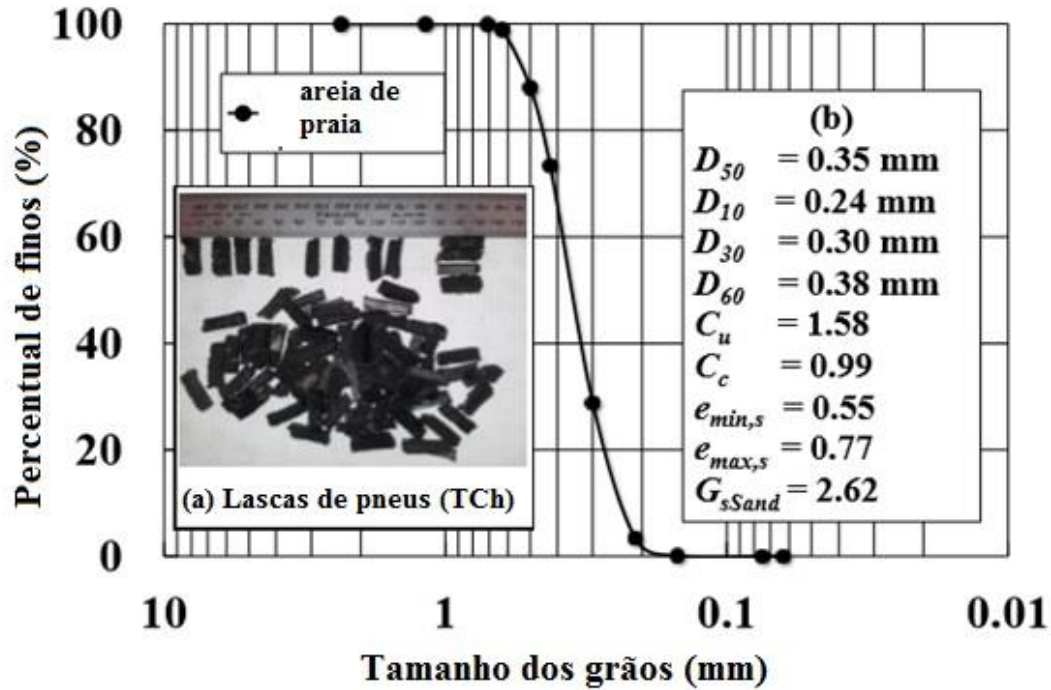


Figura 2.10 Análise granulométrica de desbastes de pneus e areia (Mashiri et al., 2015).

A avaliação dos índices de vazios máximos e mínimos pode ser observado na Figura 2.11, para diferentes teores de misturas areia-desbastes de borracha. Na Figura, é possível observar que, à medida que ocorre acréscimo do teor das misturas até 40%, ocorre, também, decréscimo do índice de vazios e acima de 40%. Nessa situação, os índices de vazios tenderam a aumentar os valores, consideravelmente.

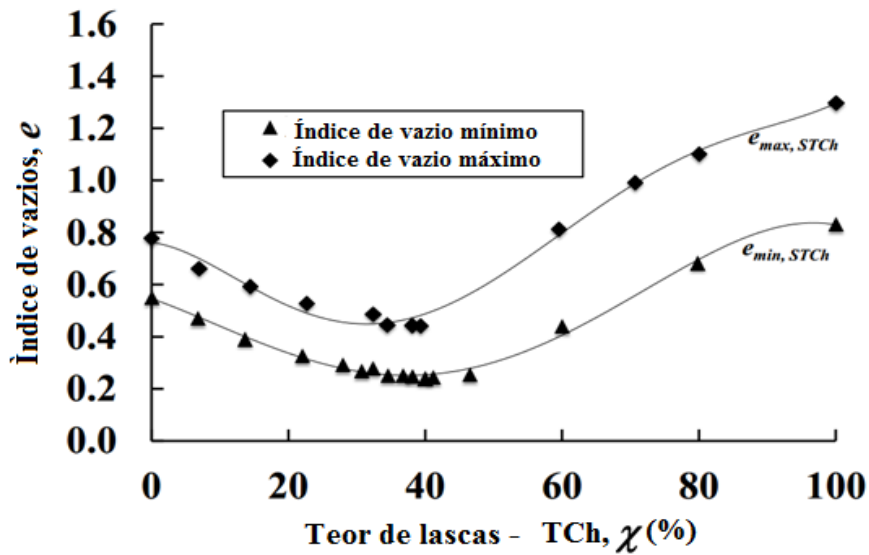


Figura 2.11 Análise da variação dos índices de vazios máximo e mínimo das misturas areia-desbastes de pneus (Mashiri et al., 2015).

A Figura 2.12 apresenta os resultados da variação da deformação desviadora *versus* a deformação volumétrica. Em circunstâncias assim, à medida que se aumenta o teor de mistura de borracha de até 20%, aumenta-se, também, a deformação volumétrica com tendências a um ligeiro decréscimo quando ocorre acréscimo do teor de mistura. É possível observar também que no comportamento da dilatância da areia densa ocorreu um decréscimo, à medida que houve acréscimo do teor de desbastes de pneus acima de 35%. Além disso, o comportamento da dilatância das misturas de areia-desbastes de pneus diminuiu à proporção que ocorreu aumento do teor de borracha nas misturas. Os autores concluem que ocorreu melhora significativa na resistência ao cisalhamento e na redução da dilatação para o teor de borracha de 35%.

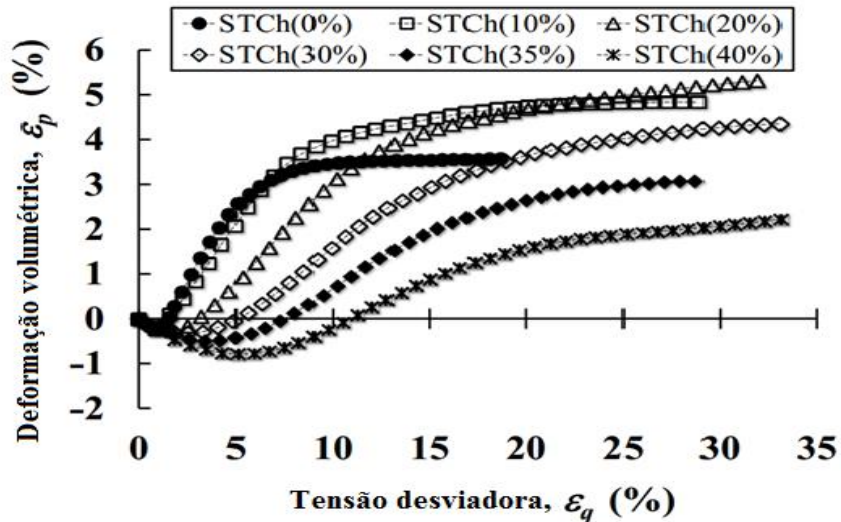


Figura 2.12 Variação da deformação desviadora versus deformação volumétrica dos teores de borracha (Mashiri et al., 2015).

Mashiri et al. (2015) observaram que realizar uma comparação direta com outros resultados publicados pode ser complicado, já que os resultados da investigação experimental dependem de uma série de parâmetros, incluindo a preparação de amostras, o tipo de pneus inservíveis, tamanho e relação ao aspecto dos pneus, pressão de confinamento e o tipo de equipamento utilizado. No entanto, os resultados deste estudo foram comparados com duas investigações anteriores (resultados de testes triaxiais) em misturas de areia-desbastes de pneus com teores de mistura de borracha similares, sob uma pressão efetiva de confinamento similar. A Tabela 2.9 apresenta os resultados dos parâmetros de dilatância, os dados da superfície de contorno e os dados de calibração do modelo adotado.

Tabela 2.9 Parâmetros de dilatância e resultados (Mashiri et al., 2015).

Superfície	Ângulo de atrito (graus)	Constante de atrito Eqs.(5)-(7)	Intercepto de coesão (kPa) resultado teste	Plano do intercepto q-p' (kPa) Eq.(6)	e_r e $p'=1$ (kPa) resultado teste	Declive CSR resultado teste	Parâmetro de estado Eq.(4)	Condições iniciais	Parâmetros de dilatância	
									Eq.(10)	d_b para STCh (35%) Eq.(12)
Dilatância	$\phi_b = 27,6$	$M_d = 1,09$	$c_{od}=13,7$	$q_{od}= 29,06$	0,3865	$\lambda=0,01$	$\Psi_d=-0,0455$	$p_0' = 23$ kPa	$m_{(23kPa)} = 3,37$	$d_1=0,057,$
		$M_d^* = 1,33$ (a)						$e_0=0,3522$		$d_2=0,335$
Limite	$\phi_b = 39,3$	$M_d = 1,60$	$c_{od}=20,9$	$q_{od}= 44,33$	0,4155	-	$\Psi_d=-0,0165$	$p_0' = 69$ kPa	$m_{(69kPa)} = 5,00$	d_b para TCh na Zona 2 com 138 kPa Eq.(13)
		$M_d^* = 1,85$ (a)						$e_0 = 0,3465$		
taxa de tensão constante	$\phi_b = 39,8$	$M_{CSR} = 1,36$	$c_{od}=22,2$	$q_{od}= 47,09$	0,432	-	-	$p_0' = 138$ kPa	$m_{(138kPa)} = 4,98$	$d_3=0,77,$
		$M_{CSR}^* = 1,67$ (a)						$e_0=0,3390$		$d_4=1,44$

^a M_d^* , M_b^* e M_{CSR}^* calculados com $p_0' = 69$ kPa.

c_{od} – coesão;

STCh – sand-tire chip

TCh - Tire Chips ou lascas de borracha.

Akbar Anvari et al. (2017) estudaram mistura de pedaços de pneus e areia com os vários teores de borracha (GRC– granulated rubber content = 0%, 5%, 10%, 20% e 30%), em diferentes densidades relativas (50%, 70% e 90%) e diferentes tensões normais (34,5 kPa, 54,5 kPa, 74,5 kPa e 104,5 kPa). A pesquisa analisou o comportamento de cisalhamento de misturas de areia fina e borracha granulada de 1 a 5 mm. A Figura 2.13 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para a tensão normal de 34,5 kPa e $D_r=90\%$. A Figura 2.14 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para a tensão normal de 34,5 kPa e $D_r=50\%$.

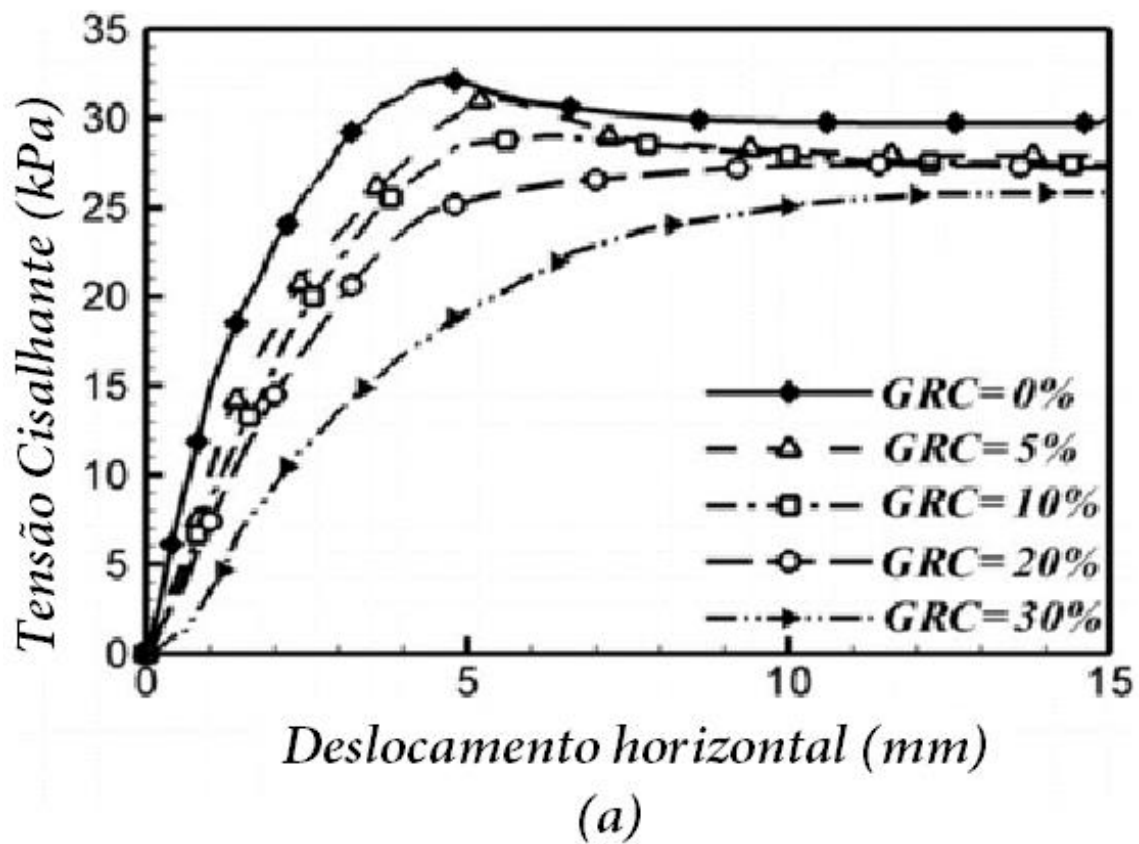


Figura 2.13 Comportamento da tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para diferentes teores de mistura areia e borracha (GRC) com tensão normal de 34,5 kPa e $D_r=90\%$ (Akbar Anvari et al., 2017).

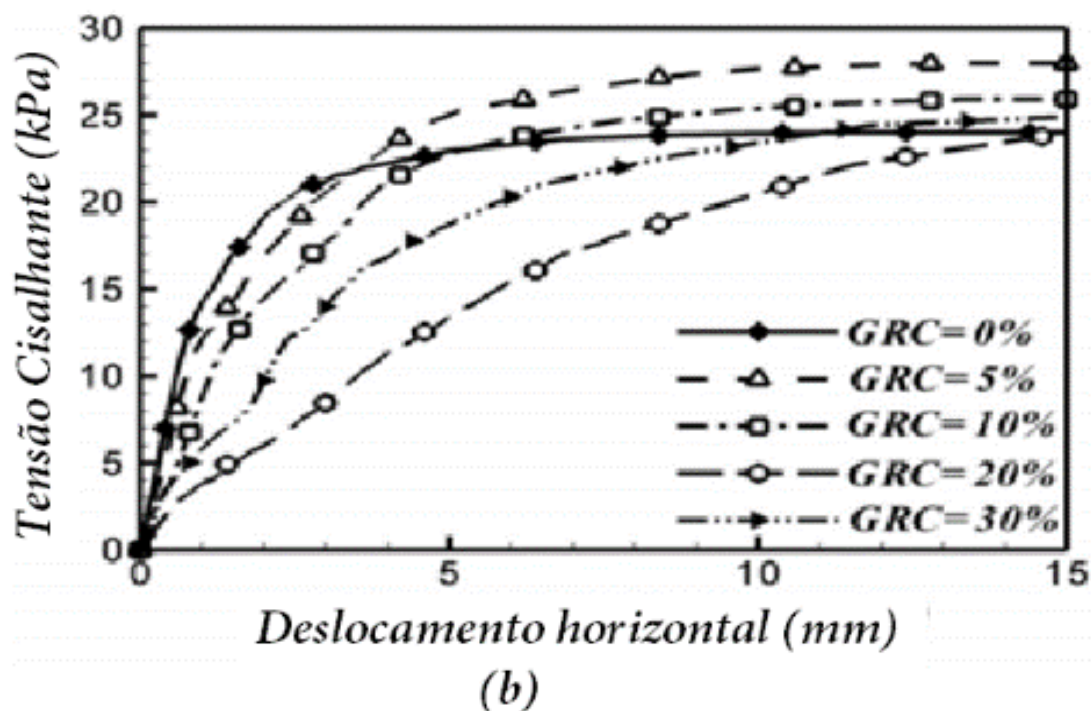


Figura 2.14 Comportamento da tensão cisalhante *versus* o deslocamento horizontal para diferentes teores de mistura areia e borracha (GRC) com tensão normal de 34,5 kPa e $D_r=50\%$ (Akbar Anvari et al., 2017).

Após mais de 60 ensaios de cisalhamento direto, foi possível observar que os resultados obtidos mostraram que a borracha granulada melhorou a resistência ao cisalhamento da areia fina para densidade relativa média e baixa tensão normal. Destaca-se que o grau de melhora na resistência ao cisalhamento é uma função do teor de borracha, densidade relativa e tensão normal. A Figura 2.15 apresenta a variação do teor de borracha *versus* o ângulo de atrito efetivo para diferentes densidades relativas ($D_r=90\%$, 70% e 50%). A Figura 2.16 apresenta a variação da tensão normal *versus* a resistência ao cisalhamento para diferentes teores de borracha (0%, 5%, 10%, 20% e 30%).

A partir das Figura 2.15 e 2.16, é possível notar que os resultados mostram também que, com uma densidade relativa de 50%, adicionando 5% de borracha granulada, o ângulo de atrito interno da areia aumenta de $35,1^\circ$ para $39,2^\circ$. No entanto, para densidades relativas de 70% e 90%, a adição de borracha granulada a areia diminui o seu ângulo de atrito interno. Foi possível observar, também, que os resultados indicaram que o comportamento da areia se torna mais dúctil com o aumento do teor de borracha granulada. A adição de borracha granulada conduz a uma maior

tensão de confinamento e a uma menor rigidez da areia. O ângulo máximo de dilatância diminui com a redução do teor de borracha granulada.

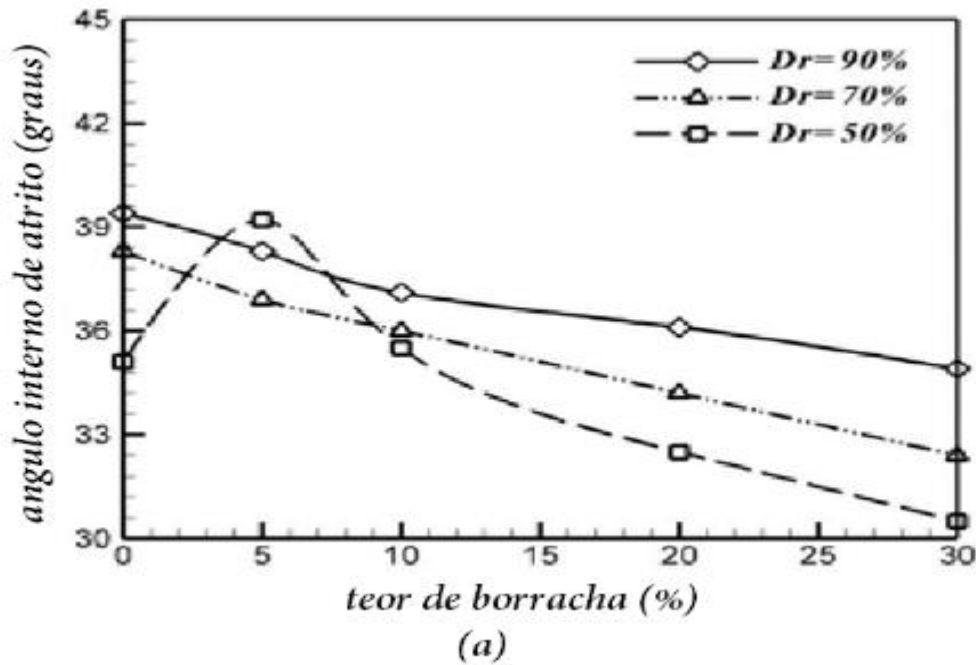


Figura 2.15 Variação do ângulo de atrito interno *versus* a tensão cisalhante para diferentes densidades relativas. (Akbar Anvari et al., 2017).

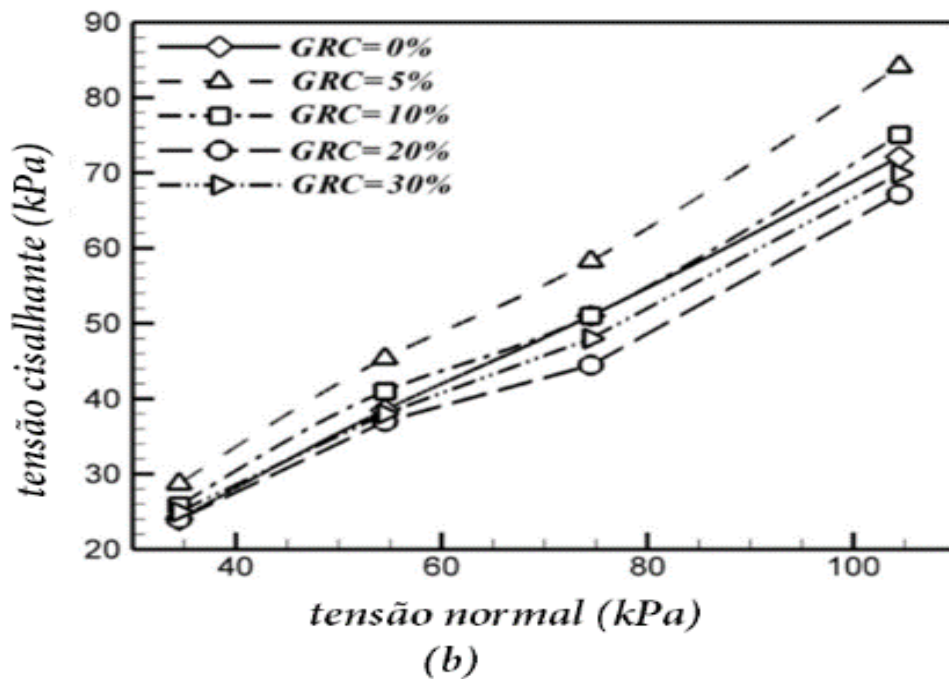


Figura 2.16 Variação do ângulo de atrito interno *versus* a tensão cisalhante para diferentes teores de borracha. (Akbar Anvari et al., 2017).

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia utilizada nos ensaios teve o objetivo de estudar o teor ideal de mistura solo-borracha, testando os teores de misturas solo-borracha de M10%, M20%, M30%, M40% e M50%, para uso em obras geotécnicas (Hoppe, 2013). É importante destacar que foram realizados ensaios de areia pura (M0%) e de pedaços de borracha sem solo (M100%), para fins comparativos.

A metodologia adotada foi baseada nos trabalhos apresentados por Geosyntec Consultants (2008), Hoppe & Oman (2013), Suárez (2016), Chrusciak (2013), Franco (2012) e Szeliga et al. (2014), que empregaram misturas de resíduos de pneus inservíveis com solos e avaliados em ensaios de cisalhamento direto, utilizando equipamento em escala média e convencional.

Nesse trabalho, são apresentadas aplicações de melhorias de solo com reforços de pneus adicionados à areia que tem uso potencial em aterros, taludes, dentre outros, desenvolvidas na Universidade de Brasília. Foram realizados ensaios laboratoriais com o objetivo de obter as características físicas e mecânicas da areia (M0%), pedaços de borracha (M100%) e das misturas de diferentes teores de solo-borracha (M10%, M20%, M30%, M40% e M50%).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A areia empregada nos ensaios realizados nessa pesquisa é conhecida no meio técnico como areia média lavada. Os pedaços de borracha foram obtidos junto à empresa privada que trabalha com coprocessamento de pneus inservíveis, sendo o mesmo insumo empregado na pesquisa de Suárez (2016).

3.1.1. LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DO SOLO ESTUDADO

As amostras de areia média foram coletadas junto à empresa Areia Bela Vista – ABV, situada no Grande Colorado, Sobradinho/DF. A areia foi homogeneizada conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016), para obtenção de resultados coerentes. A Figura 3.1 apresenta o local da coleta da areia.



Figura 3.1 Local da coleta da amostra da areia.

Após a coleta e homogeneização da areia, foram realizados ensaios de caracterização de massa específica dos grãos e granulometria, conforme as normas NBR 6457 (ABNT, 2016), NBR 7180 (ABNT, 2016), NBR 6508 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016).

3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PNEUS

Os pedaços de borracha utilizados nos ensaios dessa pesquisa foram resultantes da trituração de pneus inservíveis coletados junto à empresa JLS Transportes e Serviços, distribuidora situada em Abadia de Goiás/GO. O material foi fornecido em sacos contendo pedaços de pneus misturados às malhas de aço e tecidos, sem separação prévia. Para a utilização desse material nessa pesquisa, foi necessário realizar a homogeneização do material, retirando manualmente toda a malha de aço que estava solta com ímã e os tecidos soltos manualmente. É importante destacar que a empresa é a mesma fornecedora do insumo para as pesquisas de Chrusciak (2013) e Suárez (2016). A Figura 3.2 apresenta a amostra na condição natural recebida.



Figura 3.2 Amostra natural dos pedaços de borracha com malhas de aço.

Conforme a norma D 6270 (ASTM, 1998), esse material é classificado como pedaços de pneus (*tire shred*), devido ao tamanho do insumo (diâmetro médio de 20 mm). Os pedaços selecionados apresentaram um valor de massa específica dos grãos de 1,14 g/cm³, valor próximo ao obtido por Chrusciak (2013) e Suárez (2016), que foi de 1,19 g/cm³.

A Tabela 3.1 apresenta as peneiras usadas para realizar a análise granulométrica da borracha, com o objetivo de excluir o material passante pela peneira de 9,5 mm.

Tabela 3.1 Peneiras utilizadas para separação do insumo.

Tampa	
3/8 pol	9,5 mm
Nº 4	4,80
Nº 10	2,00
Final peneiramento grosso	
Nº 16	1,20
Nº 30	0,60
Nº 40	0,42
Nº 60	0,25
Nº 100	0,60
Nº 200	0,60
Final peneiramento fino	

Para efeito comparativo, essa pesquisa utilizou a norma NBR 7180 (ABNT, 2016), que descreve os procedimentos de ensaio de granulometria da areia e dos pedaços de borracha de pneus inservíveis. A partir dos ensaios de análise granulométrica dos pedaços de borracha, foi possível observar que os fragmentos apresentaram tamanho nominal entre 19,1 mm e 2,0 mm. O tamanho médio (D₅₀) das partículas de fragmentos de borracha foi de 15,1 mm, ou seja, 10 vezes menor que a altura da parede lateral interna da caixa de cisalhamento utilizada (300 x 300 x 150 mm). A Tabela 3.2 apresenta as propriedades da areia média lavada usada nessa pesquisa.

Tabela 3.2 Propriedades do solo arenoso.

Índices Físicos	Pedaços de borracha
Densidade real dos grãos (G_s)	1,14
Coefficiente de não uniformidade (CNU)	2,07
Coefficiente de curvatura (C_c)	1,09
Diâmetro efetivo (D_{10})	8,1 mm
Diâmetro médio (D_{50})	15,1 mm

3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.2.1. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL

Nesta pesquisa foi empregada areia média lavada com o objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento, realizando ensaios de cisalhamento direto convencional, baseado diretamente no Critério de Mohr-Coulomb. Os ensaios foram realizados em equipamento composto de caixa de aço rígida bipartida com dimensões 100 mm (comprimento) x 100 mm (altura) x 50 mm (largura). A caixa tem como função a transmissão de carga, utilizando transdutores elétricos de deslocamento e célula de carga elétrica. Este ensaio segue recomendações da norma ASTM D3080 (1998) – Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

A Figura 3.3 apresenta o equipamento utilizado para realizar o ensaio de cisalhamento direto convencional do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. Com esse equipamento convencional, foi possível a realização de ensaios de amostras com peso estimado de até 40 gramas. O equipamento tem uma prensa com motor e sistema de transmissão de carga (pendural), extensômetros ou transdutores elétricos de deslocamento e anel de carga ou célula de carga elétrica.



Figura 3.3 Vista geral do equipamento.

Os ensaios foram conduzidos com velocidade constante de 0,5 mm/min, (com base ASTM D3080:2011, item 9.10.3) para provocar o deslocamento relativo entre as partes inferior e superior da caixa.

3.2.2. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO EM ESCALA MÉDIA

Esta pesquisa utilizou também um equipamento de cisalhamento direto em média escala dos insumos pesquisados: areia (M0%), pedaços de borracha (M100%) e das misturas solo-borracha (M10%, M20%, M30%, M40% e M50%).

O equipamento foi montado no Laboratório de Geotecnia do Programa de Pós-graduação de Geotecnia, da Faculdade de Tecnologia, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade de Brasília – UnB, montado originalmente por Palmeira (1988) e adaptado por Souza (2011), conforme a norma D3080 (ASTM, 2008). Na Figura 3.4 é apresentada a imagem desse equipamento e a Figura 3.5 detalha seus componentes.



Figura 3.4 Vista geral do equipamento de cisalhamento direto em média escala.



Figura 3.5 Componentes do equipamento do Laboratório de Geotecnia da UnB. (a) conjunto tensão horizontal; (b) conjunto tensão vertical; (c) conjunto Prensa; (d) conjunto tensão normal; (e) conjunto bomba; (f) conjunto carga horizontal; (g) conjunto carga vertical; (h) conjunto tensão normal.

No Apêndice A é apresentada a relação dos 22 componentes utilizados pelo equipamento, destacando suas principais características e o conjunto de equipamentos, identificados por letras, utilizados nos ensaios, conforme destacado na Figura 3.5.

3.3. PREPARO DAS AMOSTRAS

Para a realização dos ensaios, foram seguidos procedimentos conforme as normas NBR 6502 (ABNT, 1995) e NBR 6491 (ABNT, 1985) para todos os insumos e misturas.

As porcentagens dos teores de misturas solo-borracha utilizados nesta pesquisa foram estabelecidas a partir de pesquisas que usaram areia como insumo de estudo. Tiveram por base pesquisas semelhantes, realizadas por Balachoswki. & Gotteland (2007); Attom (2006) e Chebet et al. (2014). Na Tabela 3.3 são apresentados os teores de pedaços de borracha estudados nessa pesquisa, em massa.

Tabela 3.3 Teores de borracha pesquisados.

Mistura	Teor de borracha (%)	Descrição
M0	0%	areia pura
M10	10%	90% areia + 10% borracha
M20	20%	80% areia + 20% borracha
M30	30%	70% areia + 30% borracha
M40	40%	60% areia + 40% borracha
M50	50%	50% areia + 50% borracha
M100	100%	borracha pura

3.3.1. PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS

A Tabela 3.4 apresenta a relação dos ensaios realizados para a areia (M0%), para as misturas solo-borracha (M10% a M50%) e para os pedaços de borracha (M100%), correspondendo os ensaios de caracterização física e mecânica dos insumos estudados nessa pesquisa. Destaco que não foram feitos ensaio de adensamento para esta pesquisa.

Tabela 3.4 Relação dos ensaios nessa pesquisa.

Item	Ensaio	Resultado e Índice
1	Propriedades físicas e de classificação dos materiais	
1.1	Densidade real dos grãos	G_s
1.2	Análise granulométrica	curva granulométrica, CNU, Cc, D ₁₀ , D ₅₀ e D ₆₀
1.3	Absorção da borracha	curva de absorção, A e γ_{bor}
1.4	Índice de vazios	curva e x w (%), e_{nat} , e_{max} e e_{min}
2	Propriedades mecânicas	
2.1	Compactação	curva $\gamma_d \times w$ (%), γ_s , $\gamma_{dmáx}$, w_{ot} e e_{nat}
2.2	Cisalhamento direto convencional	gráficos correlacionando os parâmetros: δ_h , δ_v , τ , σ e ϕ'
2.3	Cisalhamento direto de média escala	gráficos correlacionando os parâmetros: δ_h , δ_v , τ , σ e ϕ'

O peso da borracha utilizado em cada teor de mistura solo-borracha foi calculado com base na metodologia estudada por Zornberg et al. (2004a), conforme Equação 3.1:

$$W_{ts} = W_s \left(\frac{X_{bor}}{100 - X_{bor}} \right) \quad \text{Equação 3.1.}$$

Nessa equação, W_{ts} é o peso seco dos pedaços de borracha, W_s é o peso do solo seco e X_{bor} é a porcentagem de borracha.

A Tabela 3.5 apresenta a sequência metodológica do programa de necessidades para a realização dos ensaios das amostras de areia (M0%) e misturas M0% a M50%. Mostra, também, as normas seguidas nessa pesquisa. Por sua vez, a Tabela 3.6 apresenta a sequência metodológica do programa de necessidades para a realização dos ensaios das amostras de pedaços de borracha (M100%) e as normas empregadas. Por fim, a Tabela 3.7 apresenta a sequência metodológica do programa para a realização dos ensaios de cisalhamento direto em média escala de cada mistura solo-borracha (M0%, M10%, M20%, M30%, M40%, M50% e M100%) e as normas adotadas para tais ensaios. Todas as amostras foram separadas e pesados em sacos plásticos e em bandeja para a sua utilização nos ensaios. Lembramos que só foi feito ensaio de cisalhamento direto convencional para a areia pura (M0%).

Tabela 3.5 Sequência metodológica do programa de preparo das amostras (M0% e M10% a M50%).

Início do Ensaio		
1	Obtenção dos insumos	NBR 6502 (ABNT,1995)
2	Homogeneização	NBR 6491 (ABNT,1985)
3	Ensaio de Massa Específica	NBR 6458 (ABNT, 2016) (Equação 3.2)
4	Ensaio de Densidade Real dos Grãos)	NBR 6458 (ABNT, 2016)
5	Ensaio de Granulometria	NBR 7180 (ABNT, 2016) (equações 3.3 e 3.4)
6	Ensaio de Umidade Higroscópica	NBR 6457 (ABNT, 2016)
7	Classificação do solo SUCS e HRB	ASTM, 1990 e Manual do DNER, 1996
8	Ensaio de Índice de Vazios	D3080 (ASTM, 1998) (equações 3.5 e 3.6)

Tabela 3.6 Sequência metodológica do programa de preparo das amostras (M100%).

Início do Ensaio		
1	Obtenção dos insumos	NBR 6502 (ABNT,1995)
2	Homogeneização	NBR 6491 (ABNT,1985)
3	Ensaio de Massa Específica	NBR 6458 (ABNT, 2016) (Equação 3.2)
4	Ensaio de Granulometria	NBR 7180 (ABNT, 2016) (equações 3.3 e 3.4)
5	Ensaio de Umidade Higroscópica	NBR 6457 (ABNT, 2016)
6	Classificação do solo SUCS e HRB	ASTM, 1990 e Manual do DNER, 1996
7	Densidade real dos grãos e absorção	NBR 10.838 (ABNT, 1988)
8	Ensaio de Índice de Vazios	D3080 (ASTM, 1998) (equações 3.5 e 3.6)

Tabela 3.7 Sequência metodológica do programa de execução do ensaio de cisalhamento direto em média escala para todas as misturas.

Início do Ensaio		
1	Preparação das Amostras	NBR 6457 (ABNT, 2016)
2	Ensaio de Compactação	NBR 7182 (ABNT 2016)
3	Ensaio de Umidade após o ensaio de compactação	NBR 6457 (ABNT, 2016)
4	Ensaio de Umidade antes do ensaio de cisalhamento	NBR6457 (ABNT, 2016)
5	Ensaio de cisalhamento direto em média escala	D6080 (ASTM, 1998) e NBR 6457 (ABNT, 2016)
6	Ensaio de Umidade após o ensaio	NBR6457 (ABNT, 2016)
7	Ensaio de Umidade antes do ensaio de cisalhamento	NBR6457 (ABNT, 2016)
Dados para análise		

3.4. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Neste item estão apresentados os cálculos realizados com base na metodologia adotada nos ensaios de massa específica real dos grãos, de análise granulométrica, de compacidade, de compactação, de cisalhamento direto com equipamento convencional e de cisalhamento direto com equipamento de média escala empregados nessa pesquisa.

3.4.1. MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

Para determinar a massa específica real dos grãos, foram adotados os procedimentos da norma NBR 6458 (ABNT, 2016). Para determinar a densidade real dos grãos da areia e dos pedaços de borracha foram adotados os procedimentos das normas NBR 6458 (ABNT, 2016) e NBR 6502 (ABNT, 1995).

A partir dos resultados obtidos, foi possível determinar a massa específica dos grãos das misturas, conforme Equações 3.2 e 3.3:

$$G_s = \frac{\delta \times D_i}{(\delta \times M_2 + D_i \times M_1)} \quad \text{Equação 3.2.}$$

Nessa equação, G_s - massa específica dos grãos do solo, contendo frações passadas e retidas na peneira 4,8 mm, em g/cm^3 ; δ - massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm, determinada de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 2016), em g/cm^3 ; D_i - massa específica dos grãos de areia retida na peneira de 4,8 mm, g/cm^3 ; M_1 - porcentagem em massa, da fração da amostra que passa na peneira de 4,8 mm; M_2 - porcentagem em massa, da fração da amostra retida na peneira de 4,8 mm.

$$D_i = \frac{M_s}{(M_s - M_i)} - \delta t \quad \text{Equação 3.3.}$$

Nessa equação, M_s - massa da amostra seca; M_i - massa da amostra totalmente imersa em água destilada; δt - massa específica da água à temperatura T do ensaio, obtida na Tabela 2, em anexo, a norma 658.

3.4.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Para determinar a granulometria dos insumos (areia, pedaços de borracha e misturas), foram seguidos os procedimentos da norma NBR 7180 (ABNT, 2016). O peneiramento dos materiais utilizou peneiras com malhas de diferentes diâmetros para obter a granulometria grossa e fina da areia, dos pedaços de borracha e das misturas.

Os pedaços de borracha foram fornecidos com variação de tamanho entre 12 mm e 50 mm, contendo fios de aço e tecidos que foram retirados no laboratório, por processo manual, utilizando ímã e análise visual e tátil. Outros formatos de borracha (migalhas, D_{50} até 0,60 mm ou menos) e desbastes (D_{50} = 1,4 mm), adicionados ao material e depois descartados por processo de peneiramento. Após análise visual e tátil da areia utilizada, foi possível verificar a ausência de silte ou argila e definir o critério de granulometria apenas por peneiramento.

O coeficiente de não uniformidade (CNU) do insumo foi obtido a partir do resultado do cálculo do diâmetro de 60% de solo que passa pela peneira da amostra total, dividido pelo diâmetro de 10% de solo que passa pela peneira da amostra total, conforme Equação 3.4.

$$CNU = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}} \quad \text{Equação 3.4.}$$

Por sua vez, o coeficiente de curvatura (C_c) dos insumos foi obtido partir do resultado do cálculo do diâmetro de 30% de solo que passa pela peneira da amostra total, ao quadrado, dividido pela diferença entre o diâmetro de 10% de solo que passa pela peneira da amostra total e do diâmetro de 60% de solo que passa pela peneira da amostra total, conforme Equação 3.5.

$$C_c = \frac{(D_{30\%})^2}{(D_{10\%} * D_{60\%})} \quad \text{Equação 3.5.}$$

3.4.3. CLASSIFICAÇÃO DOS INSUMOS

Para determinar a classificação dos insumos (areia, pedaços de borracha e misturas), foi utilizada a norma NBR 6502 (ABNT, 1995). Nesse caso, a areia apresentou diâmetros variando entre 0,06 mm até 2,0 mm e os pedaços de borracha apresentaram dimensões variando entre 0,6 mm até 30 mm. As misturas apresentaram dimensões variando entre 0,06 mm até 30 mm.

A classificação dos insumos foi realizada com base nos critérios do Sistema Unificado – USCS (ASTM, 1990) e do Sistema Rodoviário – HRB (Manual do DNER, 1996). Os pedaços de borracha e as misturas foram classificados também de acordo com normas da ABNT para material graúdo.

3.4.4. COMPACIDADE DA AREIA

Para determinar a compactidade da areia, foram utilizadas as normas NBR 12004 (ABNT, 1990) e NBR 12051 (ABNT, 1990). A partir dos resultados dos ensaios de índice de vazios da areia, da borracha e das misturas (M10% a M50%), realizados nessa pesquisa, foi possível calcular os índices de vazios máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}) das amostras, para estabelecer os limites de estado mais fofo e mais compacto, respectivamente com base nas Equações 3.6 e 3.7. Utilizando a G_{seq} foi possível calcular a massa específica dos grãos e com base na equação 3.9, foi possível obter o índice de vazios de cada mistura.

$$e_{max} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d,min}} - 1 \quad \text{Equação 3.6.}$$

Nessa equação, γ_s - massa específica dos sólidos e $\gamma_{d,\min}$ - massa específica aparente seca mínima.

$$e_{\min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d,\max}} - 1 \quad \text{Equação 3.7.}$$

No caso, γ_s - massa específica dos sólidos e $\gamma_{d,\max}$ - massa específica aparente seca máxima.

Os índices de vazios máximo e mínimo são propriedades do solo e o índice de vazios natural (e_{nat}) da amostra do estudo está correlacionada ao índice de compactação relativa (CR), conforme Equação 3.8.

$$CR = \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}} \quad \text{Equação 3.8.}$$

A Tabela 3.8 apresenta a classificação de areias segundo Souza Pinto (2006). De acordo com esse estudo, quanto maior for o CR, mais compacta é a areia. Seguiu-se aqui a mesma terminologia utilizada por Terzaghi, que será empregada posteriormente para classificação das misturas obtidas.

Tabela 3.8 Classificação da compactação da areia.

Classificação	CR
areia fofa	abaixo de 0,33
areia de compactação média	entre 0,33 e 0,66
areia compacta	acima de 0,66

3.4.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA E PESO ESPECÍFICO DA BORRACHA

Para determinar a absorção e o peso específico dos pedaços de borracha, foi empregada a norma NBR 10.838 (ABNT, 1998). É importante destacar que a borracha é um material de baixo peso específico, variando entre 2,4 e 7,0 kN/m³, segundo Forsyth & Egan (1976). Os ensaios realizados nesta pesquisa pelo processo da massa específica com o método de balança hidrostática obteve os resultados para peso específico aparente natural igual a 4,19 kN/m³ e, para a absorção, igual a 3,51%. A Tabela 3.9 ilustra a sequência metodológica do programa utilizada para a realização dos ensaios das amostras de borracha (M100%) e as normas utilizadas. Suárez

(2016) foi base para o ensaio de peso específico e absorção do material grosso (pedaços de borracha). No ensaio, avaliou-se um peso específico de $5,1 \text{ kN/m}^3$ e uma absorção de 2,6%.

Tabela 3.9 Sequência metodológica do programa de ensaio de absorção da borracha.

Início do Ensaio		
1	Preparação das amostras Cálculo do peso <i>in natura</i>	NBR 6502 (ABNT,1995)
2	Homogeneização	NBR 6491 (ABNT,1985)
3	Densidade real dos grãos e absorção	NBR 10.838 (ABNT, 1988)
4	Colocar a cesta metálica Ajustar e corrigir a balança Leituras de 1,2, 4, 8, 16, 24, 48 e 60 minutos Leituras de 1 em 1 horas até 24 horas Planilha de resultados	
5	Ensaio de Umidade antes e após o do ensaio de absorção	NBR6457 (ABNT, 2016)
6	Desmoldar o corpo de prova	
7	Fotografar	
Dados para análise		

3.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação das amostras de cada mistura solo-borracha (M10% a M50%), da areia (M0%) e dos pedaços de borracha (M100%), realizados nesta pesquisa, seguiram a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Todas as amostras dos ensaios foram preparadas conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016) e, então, realizada uma das formas de secagem.

Na primeira opção, as amostras dos insumos foram colocadas dentro de bandejas de ferro para secar ao ar livre, dentro do laboratório, até atingir a umidade higroscópica. Quando usadas a partir deste método, deve-se separar as amostras para obter as umidades.

A segunda opção foi colocar as amostras dos insumos nas bandejas e levar para secar dentro de estufas a 160°C , para obter amostra seca. Quando o método usado for esse, não precisar separar amostras para obter as umidades. A mudança foi necessária devido à quebra da estufa, quando 80% dos ensaios haviam sido realizados.

A Tabela 3.10 apresenta a sequência metodológica do programa dos ensaios de compactação realizados nessa pesquisa.

Tabela 3.10 Sequência metodológica do programa de ensaio de compactação.

Início do Ensaio		
1	Preparação das amostras Cálculo do peso <i>in natura</i> de cada insumo para cada teor Colocar em sacos plásticos e peso de cada mistura	NBR 6502 (ABNT,1995)
2	Homogeneização	NBR 6491 (ABNT,1985)
3	Ensaio de Umidade antes e após o do ensaio de absorção	NBR6457 (ABNT, 2016)
4	Ensaio de Compactação Energia do Proctor Normal 5 camadas e 11 golpes por camada	NBR 7.182 (ABNT< 1986). (Equação 3.10)
5	Ensaio de Umidade antes e após o do ensaio de absorção	NBR6457 (ABNT, 2016)
6	Desmoldar o corpo de prova	
7	Fotografar	
Dados para análise		

As amostras seguiram os procedimentos de preparação de acordo com as pesquisas realizadas por Chrusciak (2013) e Suárez (2016). Após a secagem, os insumos foram separados em sacos de 5 kg para cada ponto da curva de compactação, adicionando água até atingir a umidade estimada.

A Figura 3.6 apresenta amostras após adição de água. Primeiramente, a areia seca foi molhada com água, com a quantidade de água para cada teor de umidade estudado. Em seguida, foram adicionados pedaços de borracha conforme o teor específico de mistura solo-borracha para cada ensaio.



Figura 3.6 - Amostras utilizadas após adição de água: (a) areia, (b) borracha e (c) mistura.

O Apêndice B apresenta as porcentagens de água estimada e medida para cada amostra de ensaio de compactação realizado, conforme o teor da mistura (M0%, M10% a M50% e M100%). Inicialmente foi estimado o teor de umidade para cada mistura da amostra e, após realizada a mistura, foi calculado o teor de umidade para cada amostra. O cálculo do volume de água para cada mistura solo-borracha que foi adicionado nos insumos foi realizado conforme Equação 3.9.

$$V_w = (W_D - W_h) * M_s \quad \text{Equação 3.9.}$$

Na equação em análise, V_w - volume de água a adicionar (igual ao valor em massa); W_D - é a umidade desejada, em porcentagem (%); W_h - é a umidade higroscópica, em porcentagem (%) e M_s - é a massa da mistura solo-borracha em gramas (g).

A obtenção do teor de umidade dos insumos de cada amostra do ensaio foi calculada antes e depois da homogeneização, conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Após o processo de preparação e homogeneização de cada amostra das misturas, foram realizados ensaios de compactação utilizando os equipamentos: cilindro de compactação grande, soquete grande, papel filtro e disco espaçador. Em seguida, foi empregada a energia de compactação normal, cujo o cilindro foi dividido em 5 camadas e realizados 12 golpes com o soquete em cada camada.

Após a realização dos ensaios, foi possível estabelecer a curva de compactação. A massa específica aparente seca foi calculada conforme Equação 3.2 para cada amostra. A partir da massa específica dos sólidos da areia e da borracha, foi calculada a massa específica dos sólidos equivalentes dos diferentes teores empregados (M10% a M50%) das misturas (G_{seq}), conforme Equação 3.10. Este cálculo foi realizado com base na média ponderada dos teores da areia (X_{solo}) e da borracha (X_b) e os valores da massa específica dos sólidos da areia ($G_{s_{solo}}$) e da borracha (G_{s_b}).

$$G_{seq} = (G_{sb} * X_b + G_{solo} * X_{solo}) / 100 \quad \text{Equação 3.10.}$$

Para a equação em análise, tem-se G_{seq} - massa específica dos sólidos da mistura; G_{sb} - massa específica dos sólidos dos pedaços de borracha; G_{solo} - massa específica dos sólidos da areia; X_{solo} - teor de solo da mistura; e X_b - teor de borracha da mistura.

Os índices de vazios máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}) de cada amostra (M0%, M10% a M50% e M100%) foram calculados conforme Equações 3.6 e 3.7, para cada teor de mistura solo-borracha pesquisado. Os resultados da massa específica aparente seca mínima e máxima foram obtidos nos ensaios de índice de vazios respectivos, que serão apresentados no Capítulo 4.

A partir da curva de compactação, foi calculada a massa específica aparente seca máxima para a umidade ótima de compactação indicando as coordenadas do maior ponto da curva para cada teor de mistura das amostras. Com base nestes resultados, foi possível fazer análise da influência do teor de borracha nas misturas solo-borracha e avaliar a variação e as tendências de comportamento do teor da mistura de M0%, M100% e M10% a M50%.

Faz-se aqui um destaque para os repiques do cilindro compactador durante o ensaio de compactação. Nos casos da borracha pura, ocorreram de forma mais acentuada e nos casos das misturas M10% a M50% ocorreram de forma diferenciada, conforme o teor. Este fato foi observado no processo de compactação, devido à presença da borracha, ou seja, quanto mais borracha presente, mais repiques aconteceram. Nos cálculos, foram considerados apenas a força absorvida pela própria borracha, excluindo-se qualquer acréscimo diferencial.

3.6. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM MÉDIA ESCALA

Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto em média escala, as amostras de cada mistura solo-borracha (M10% a M50%), da areia pura (M0%) e dos pedaços de borracha pura (M100%), realizados nessa pesquisa, seguiram as normas 3080 (ASTM, 1998) e a NBR 6457 (ABNT, 2016), foi utilizado o mesmo procedimento adotado por Chrusciak (2013) e Suárez (2016). A preparação inicial das amostras seguiu o mesmo método de secagem já detalhado anteriormente e aplicado para todas as amostras antes e depois de cada ensaio.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em equipamento de média escala e utilizaram caixa metálica com volume máximo de 305 mm x 305 mm x 175 mm (altura), submetidas a tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 80 kPa e 100 kPa. Os ensaios foram esse tamanho por permitir o uso de partículas maiores como os pedaços de borracha. Esse material possuía um diâmetro médio de 15,1 mm, tamanho muito grande para empregar o equipamento de cisalhamento direto convencional.

A Tabela 3.11 apresenta a sequência metodológica dos ensaios de cisalhamento direto em média escala realizados nessa pesquisa. Os resultados obtidos nos ensaios de compactação, mais precisamente os valores de massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima, para cada amostra de teor de mistura, serviram de base para iniciar o cálculo das amostras dos ensaios de cisalhamento direto.

Para realização dos ensaios, todos os insumos foram separados em sacos plásticos referentes a três camadas, conforme descrito na Tabela 3.7. Em seguida, foi adicionada água até atingir-se a umidade estimada, deixando-o fechado por 24 horas na câmara úmida para estabilizar a absorção da água pelos insumos.

A preparação das misturas seguiu a metodologia apresentada na Tabela 3.11, após secagem prévia do material até a umidade higroscópica. Foram separados cerca de 80 kg de areia e 15 kg de pedaços de borracha, admitindo reaproveitamento dos insumos. Primeiramente foram realizados os ensaios da areia (M0%), depois com os pedaços de borracha (M100%) e então os ensaios com as misturas (M10% a M50%).

Foi definido que a altura máxima da amostra era de 160 mm, admitindo-se assim uma folga de 15 mm. Dessa forma, o volume da amostra do ensaio nessa pesquisa passou a ter dimensões de 305 mm x 305 mm x 160 mm.

O processo de compactação das amostras do ensaio foi feito em três camadas (1ª camada = 50 mm, 2ª camada = 50 mm e 3ª camada = 60 mm), previamente marcadas no interior das quatro laterais da caixa metálica com fita crepe, cujo o controle de parada da compactação foram as alturas especificadas para cada camada. A primeira camada foi colocada na caixa metálica do equipamento, ajustada manualmente com espátula. A compactação começou com a aplicação da carga mecânica até atingir a altura da marca da primeira camada. Após o ajuste e a escarificação

da primeira camada, foi colocada a segunda camada acima e fez-se o ajuste manualmente com espátula. Em seguida, aplicou-se carga mecânica até atingir a altura da marca da segunda camada. O mesmo processo ocorreu até o atingimento da altura da marca da terceira camada, sendo necessário aguardar em média 130 segundos para retirar a carga e ocorrer o adensamento primário de todo o solo.

A Figura 3.7 apresenta o processo de compactação das três camadas, antes do início do ensaio de cisalhamento direto para as misturas solo-borracha. Informo que entre as duas caixas existiam esferas de aço devidamente lubrificadas para evitar o atrito entre as mesmas.

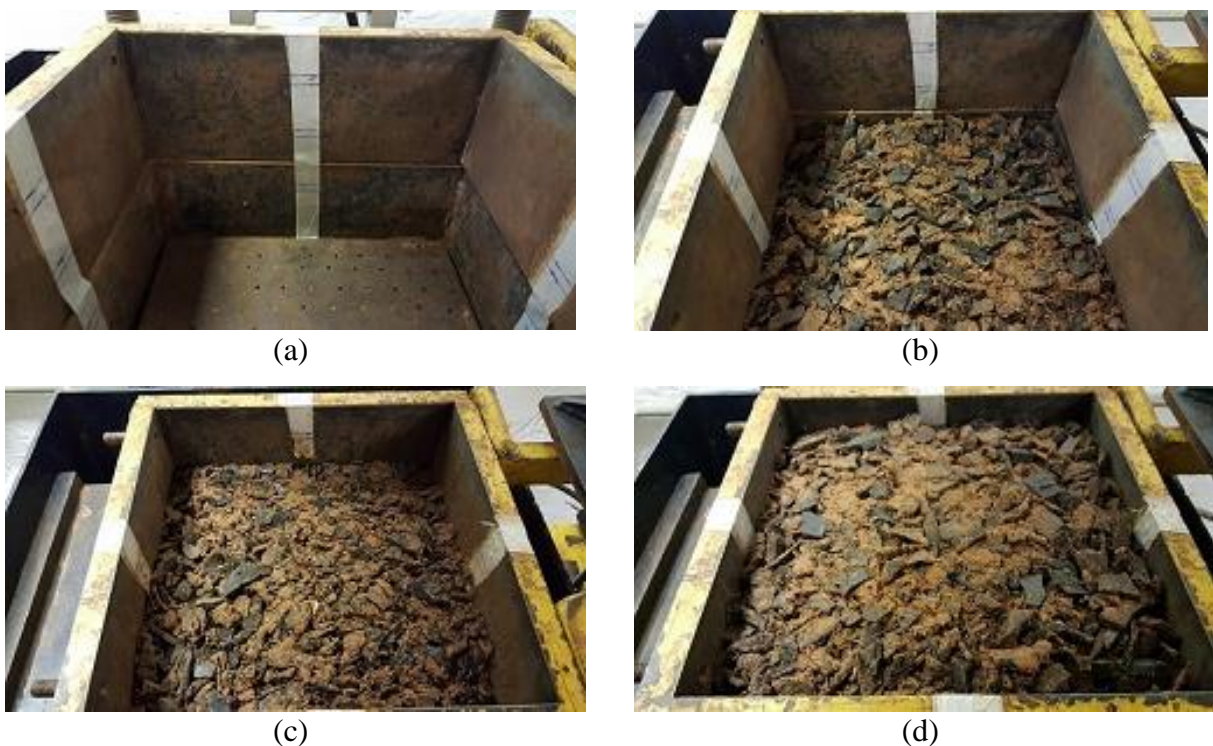


Figura 3.7 - Etapas de execução do ensaio de cisalhamento direto em média escala para pedaços de borracha (M10% a M50%): (a) Vazio, (b) 1ª camada, (c) 2ª camada e (d) 3ª camada.

Após a compactação das três camadas, a amostra estava pronta para iniciar o ensaio de resistência ao cisalhamento direto em média escala. Primeiramente, foi aplicada tensão normal (σ) mecânica (25 kPa, 50 kPa, 80 kPa ou 100 kPa) para cada amostra de teor de mistura (M0%, M10% a M50% e M100%), esperando-se o adensamento das amostras, seguindo-se da aplicação de tensão cisalhante (τ) de forma mecânica constante, por tempo até atingir o deslocamento horizontal máximo de 55 mm.

Foram utilizados, neste caso, aquisitores de dados, ligando os transdutores de deslocamento linear com base magnética ao microcomputador. O software Catman 4.5 ® realizava a captura e leitura dos dados em cada segundo, gerando a base de dados. A partir dos resultados, foi possível gerar tabelas e gráficos de análise, apresentados no Capítulo 4.

A Tabela 3.11 apresenta a sequência metodológica do programa de ensaio de cisalhamento direto em escala média, apresentando cada etapa. Por sua vez, o Apêndice C apresenta as propriedades (G_s , γ_{dmax} , w e ρ_s) para cada teor de mistura e os pesos e os volumes de cada camada das amostras para iniciar a preparação do material para a realização do ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 3.11 Sequência metodológica do programa de ensaio de cisalhamento direto escala média.

Início do Ensaio		
1	Preparo das amostras 24 horas antes	NBR 6502 (ABNT,1995)
2	Homogeneização	NBR 6491 (ABNT,1985)
3	Calcular o peso de cada insumo para cada teor (M10% a M50%)	
4	Dividir a mistura em três camadas Colocar em sacos plásticos	
5	Ensaio de Umidade antes do Adensamento (no dia)	NBR 6457 (ABNT, 2016)
6	Adensamento Unidimensional 1ª Camada + carga normal durante 10 min 2ª Camada + carga normal durante 10 min 3ª Camada + carga normal durante 1 hora	Foi repetido para as seguintes tensões confinantes de 25, 50, 80 e 100 kPa. Salvar resultado no micro.
7	Iniciar após o adensamento da 3ª camada (todo o solo) Velocidade constante de 0,5 mm/s (ASTM D3080:2011) *Critério de parada: deslocamento vertical no máximo 55 mm.	Ensaio de cisalhamento direto em média escala D6080 (ASTM, 1998) Salvar resultado no micro
8	Ensaio de Umidade após o ensaio	NBR6457 (ABNT, 2016)
Dados para análise		

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, compactação e cisalhamento direto convencional e com equipamento de média escala para o solo puro e a borracha pura e para cada uma das misturas solo-borracha (M10%, M20%, M30%, M40% e M50%), em peso, estabelecidos anteriormente.

Os ensaios de caracterização geotécnica seguiram a mesma metodologia de análise adotada para a areia (M0%) e para a borracha (M100%), separadamente, e depois, para as misturas de solo-borracha, aplicadas em diferentes teores (M10%, M20%, M30%, M40% e M50%).

Por sua vez, os ensaios de compactação das misturas solo-borracha foram realizados, a fim de se determinar a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) associado ao teor de umidade ótica ($W_{ót}$), parâmetros estes necessários para a compactação estática do material no interior do equipamento de cisalhamento direto.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com a finalidade de determinar a influência da inclusão de pedaços e lascas (fragmentos) de borracha na tensão cisalhante (τ), no ângulo de atrito efetivo do solo (ϕ') e seu intercepto de coesão efetiva (c') das misturas solo-borracha estudadas nesta pesquisa.

4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

4.1.1. MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

No caso das misturas de solo-borracha contendo teores de borracha iguais a M10%, M20%, M30%, M40% e M50%, as massas específicas reais dos grãos foram calculadas usando a metodologia de equivalência, ajustando a proporcionalidade de acordo com o teor de mistura, conforme descrito no Capítulo 3. A Tabela 4.1 apresenta a relação das massas específicas dos sólidos da areia, da borracha e das misturas. A Figura 4.1 apresenta a relação do teor de borracha (χ) *versus* massa específica dos sólidos (G_s) das misturas estudadas.

O principal objetivo da Figura 4.1 é demonstrar o comportamento do gradiente de variação da massa específica referente às misturas solo-borracha, à medida que se aumenta o teor de porcentagem da borracha.

A massa específica dos grãos de areia obtida por meio do ensaio de picnômetro foi igual a 2,65 g/cm³, valor semelhante às areias compostas por quartzo que apresentam valor de 2,65, segundo Lambe & Whitman (1979).

Ao comparar com o solo do Distrito Federal, Guimarães (2002) e Oliveira (2000) encontraram massa específicas dos sólidos da areia variando entre 2,68 e 2,61 kN/m³ para areias coletadas entre 1 e 3 m de profundidade, oriundas da mesma jazida. Portanto, considera-se satisfatória a massa específica das areias igual a 2,65 kN/m³, encontrado na presente pesquisa, para uso em enchimento de solos para contenção.

Tabela 4.1 Massa específica dos sólidos (G_s).

Materiais Geotécnicos		Massa Específica dos Sólidos G _s /Gseq		
		Areia	Borracha	Mistura
Areia da pesquisa		2,650	-	-
Pedacos (D ₅₀ = 20 mm) e Lascas (D ₅₀ = 10 mm) de borracha		-	1,140	-
Mistura	90% areia + 10% borracha	-	-	2,499
	80% areia + 20% borracha	-	-	2,348
	70% areia + 30% borracha	-	-	2,197
	60% areia + 40% borracha	-	-	2,046
	50% areia + 50% borracha	-	-	1,895
Areia (Oliveira, 2000)		2,700	-	-

A massa específica dos pedacos (D₅₀= 20 mm) e lascas (D₅₀ = 10 mm) de borracha varia entre 1,02 e 1,27 kN/m³, com valores maiores para borrachas, provenientes de pneus contendo malha de aço no seu interior, segundo Bressette (1984), Humphrey et al. (1992), Humphrey e Manion (1992) e Ahmed (1993). Assim, os resultados obtidos apresentam coerência com os estudos de diversos autores citados na Referência Bibliográfica.

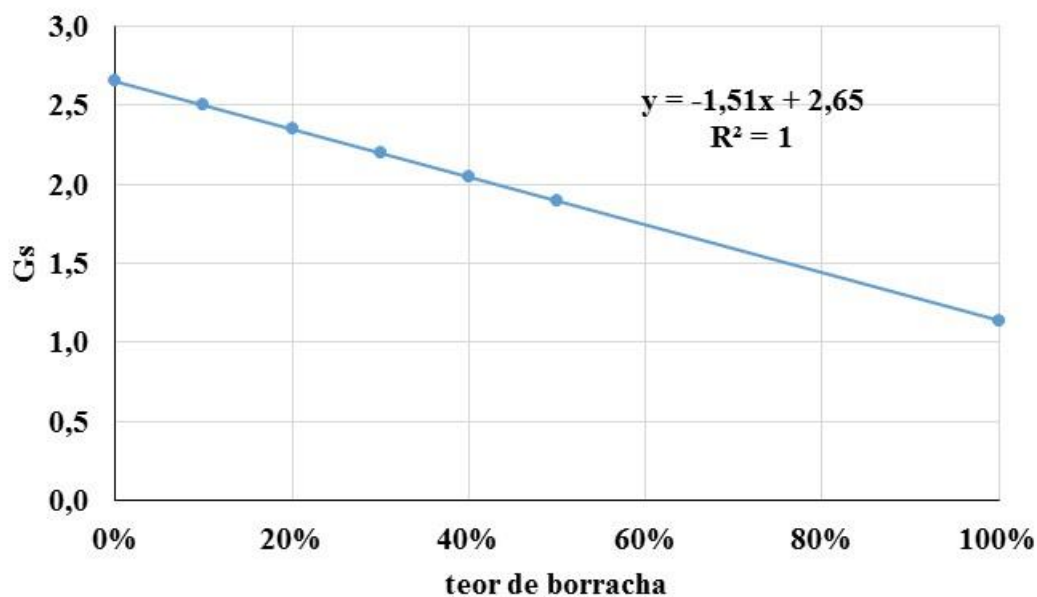


Figura 4.1 Relação dos teores de borracha *versus* massa específica dos sólidos.

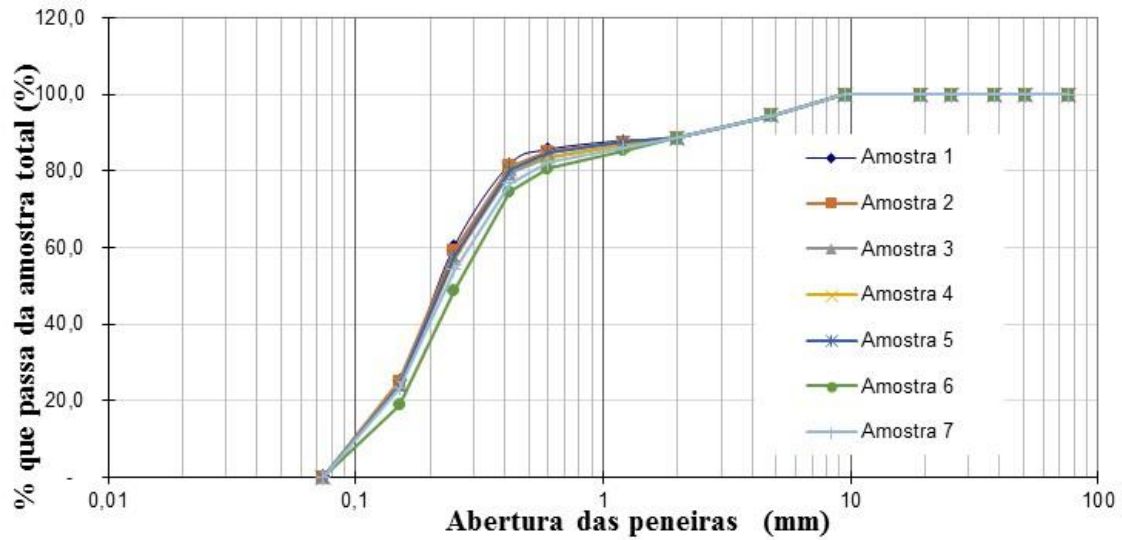
4.1.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Para a realização do ensaio de análise granulométrica dos insumos (areia, borracha e misturas), optou-se por fazer granulometria somente por peneiramento. Para a determinação da curva granulométrica, foram seguidas as normas NBR 7180 (ABNT, 2016). Na realização da análise granulométrica, as normas NBR 6457 (ABNT, 2016), para obter a umidade higroscópica e NBR 6502 (ABNT, 1995) para definição das rochas e solos usados.

Foram usadas as escalas Internacional (AASHO) e da ABNT, para medir os tamanhos dos grãos dos insumos. Para a classificação dos solos estudados, foram usados os sistemas de classificação HRB (AASHTO, 1973) e o sistema Unificado de classificação de Solo (SUCS, ASTM-1983). A obtenção das curvas granulométricas da areia, da borracha e das misturas estão apresentadas nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

Para o caso das setes amostras de areias estudadas, as análises granulométricas apresentaram um coeficiente de não uniformidade (CNU) médio de 2,66 e um coeficiente de curvatura (Cc) médio de 1,12. Portanto, considera-se que a areia utilizada nesta pesquisa apresenta características de uniformidade e má graduação, conforme classificação de Souza Pinto (2006).

Segundo Oliveira (2000), as areias do Distrito Federal apresentam valores de $CNU = 2,42$ e $Cc = 1,07$. Comparando com os valores obtidos nesta pesquisa, pode-se registrar que estão próximos dos valores encontrados. A Figura 4.2 apresenta a curva granulométrica de sete amostras de areia utilizadas nesta pesquisa. Destaque que foram usadas 7 amostras para melhor análise estatística.



argila	silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	2 < Pedregulho < 60
<0,002	>0,002	0,06 < areia < 2			

Figura 4.2 Curva granulométrica da areia.

A Tabela 4.2 apresenta propriedades do solo arenoso comparativamente com os dados de Casagrande (2005), proveniente do campo experimental da PUC-Rio, que estudou a mistura da borracha moída com a areia e a argila, podendo verificar que os valores estão bem próximos.

Tabela 4.2 Propriedades do solo arenoso (M0%).

Índices físicos	Solo arenoso pesquisado	Solo arenoso de Casagrande (2005)
Densidade real dos grãos (G_s)	2,65	2,63
Coefficiente de uniformidade (C_u)	2,66	2,10
Coefficiente de curvatura (C_c)	1,12	1,00
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,10mm	0,09mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,22mm	0,16mm
Índice de vazios (e_{min})	0,68	0,6
Índice de vazios (e_{max})	1,12	0,9

A Tabela 4.3 apresenta os resultados de CNU e C_c de todas as misturas solo-borracha utilizadas nesta pesquisa, com o objetivo de se comparar com resultados e outros autores. A partir da Tabela 4.3, observa-se uma tendência de decréscimo do CNU e um acréscimo do C_c devido às dimensões dos pedaços de borracha utilizados nesta pesquisa. Todos os valores apresentam índices de CNU < 5 , o que caracteriza um solo muito uniforme. Os valores estão dentro da faixa de $1 < C_c < 3$, o que caracteriza um solo mal graduado, conforme Souza Pinto (2006).

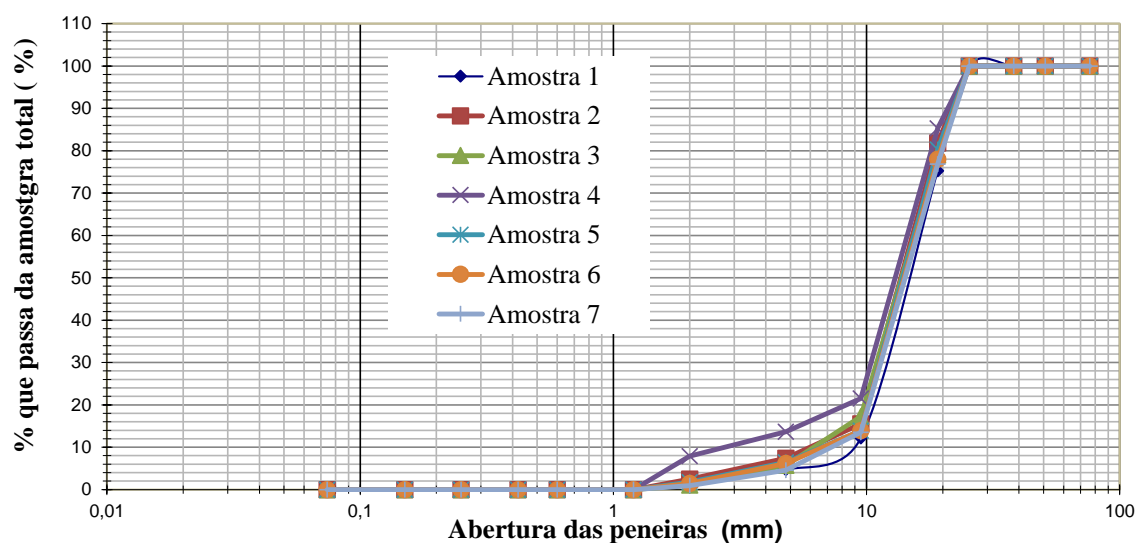
Tabela 4.3 Coeficientes CNU e C_c .

Materiais geotécnicos		Análise	
		CNU	C_c
Areia		2,66	1,12
Pedaços de borracha		2,49	1,30
Mistura	90% areia + 10% borracha	2,69	1,06
	80% areia + 20% borracha	2,28	1,35
	70% areia + 30% borracha	2,24	1,44
	60% areia + 40% borracha	2,10	1,58
	50% areia + 50% borracha	2,03	1,92

Tabela 4.3 Coeficientes CNU e Cc. continuação

Materiais geotécnicos	Análise	
	CNU	Cc
Areia segundo Oliveira (2000)	2,42	1,07
Areia segundo Benda et al.(1997) e Humphrey (1992)	2,08 a 1,70	-

Os pedaços de borracha (M100%) estudados estão apresentados na Figura 4.3, separadamente, para melhor visualização. As setes amostras de pedaços de borracha analisadas apresentaram coeficiente de não uniformidade (CNU) médio de 2,49 e um coeficiente de curvatura (Cc) médio de 1,30. Portanto, considera-se que as amostras de pedaços de borracha estão uniformes e de má graduação. E a Figura 4.4 apresenta imagens dos pedaços de borracha nas quatro peneiras estudadas. Destaque que foram usadas 7 amostras para melhor análise estatística.



Classificação ABNT 6502/1995	Argila	silte	areia fina	areia média	areia grossa	2 < Pedregulho < 60
	< 0,002	> 0,002	0,06 < areia < 2			

Figura 4.3 Curva granulométrica dos pedaços de borracha.

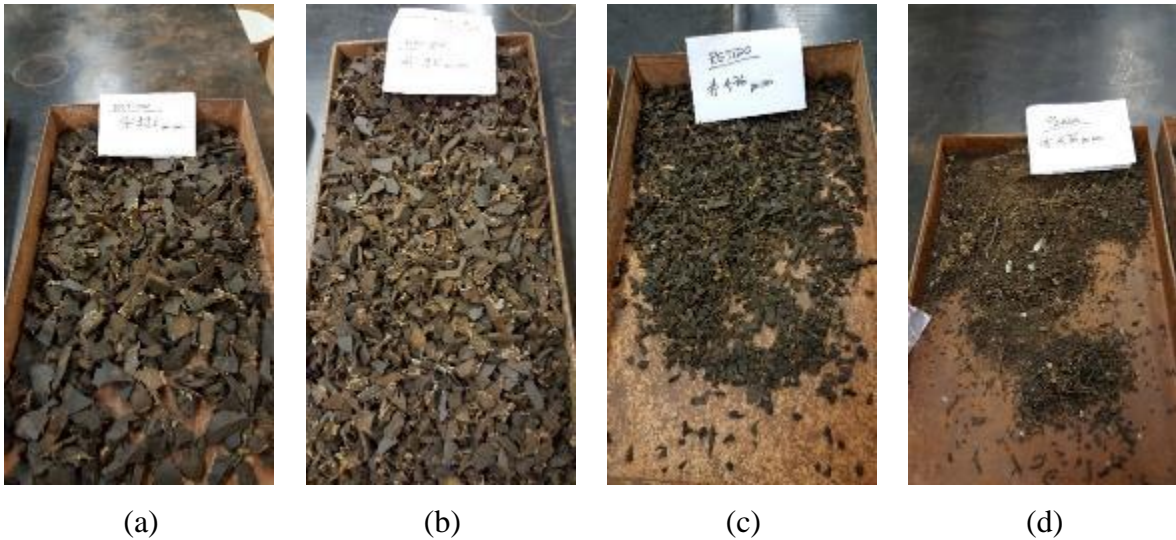
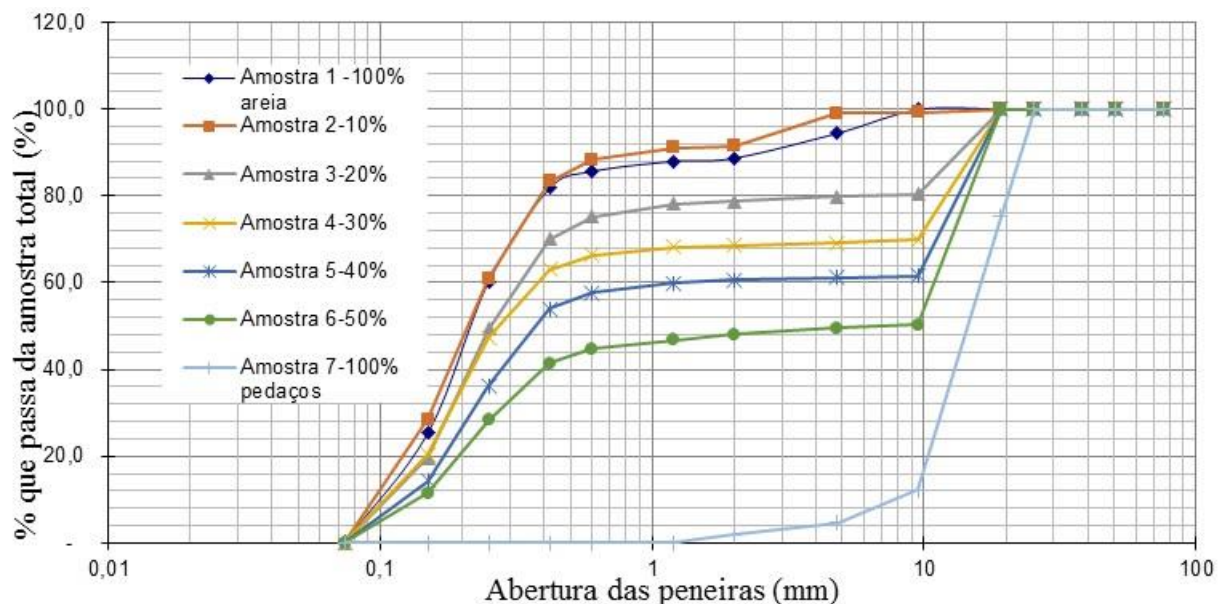


Figura 4.4 Imagens de pedaços de borracha nos itens a) Retido # 19,1mm; b) Retido # 9,5mm; c) Retido # 4,76 mm e, d) Passa # 4,76mm após o peneiramento.

A Figura 4.5 apresenta os resultados para as misturas estudadas após o peneiramento grosso com material retido em 3 peneiras (19.1; 9.5 e 4.76 mm). O peso do material que passa na # 4,76 mm apresentou uma média de 2,56g. Portanto, considera-se que as amostras de areia estão uniformes e de má graduação, conforme os parâmetros estudados.



argila	silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	2 < Pedregulho < 60
<0,002	>0,002	0,06 < areia < 2			

Figura 4.5 Curva granulométrica das misturas estudadas.

Conforme os autores Benda et al. (1995) e Humphrey et al., (1992), cujas pesquisas estão publicadas no Guidance Manual (2008), os valores de CNU tiveram uma variação entre 2,08 e 1,70, correspondendo a uma diferença entre 22% e 36%, a menor dos valores encontrados nesta pesquisa. Já na comparação com a areia, segundo Oliveira (2000) a variação foi de 9,0% a menor dos valores desta pesquisa.

4.1.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

A classificação dos materiais geotécnicos estudados (areia, borracha e as misturas) foram feitas segundo o Sistema Unificado – USCS (ASTM, 1990) e segundo o Sistema Rodoviário – HRB (Manual do DNER, 1996), e os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Classificação geotécnica dos materiais estudados.

Materiais Geotécnicos		Classificação	
		SUCS	HRB
Areia		SP	A-2-7
Borracha		SP	A-2-7
Mistura	90% areia + 10% de borracha	SP	A-2-7
	80% areia + 20% de borracha	SP	A-2-7
	70% areia + 30% de borracha	SP	A-2-7
	60% areia + 40% de borracha	SP	A-2-7
	50% areia + 50% de borracha	SP	A-2-7
Areia segundo Oliveira (2000)		SP	A-2-7

Nota-se a partir da Tabela 4.4 que a areia, os pedaços de borracha e as misturas foram classificadas como mal graduadas e uniformes (SP), devido à condição de $CNU < 5$. A areia do Distrito Federal foi classificada também como uniforme e mal graduada (SP), conforme os estudos de Souza Pinto (2006) e Oliveira (2000). Quanto à classificação pelo Sistema Rodoviário, observa-se que os materiais foram classificados como mal graduados e uniformes (A-2-7), o que caracteriza que estão coerentes, conforme os autores citados, e que a variação da mistura devido à presença de borracha não gera mudança na classificação do solo.

4.1.4. COMPACIDADE DA AREIA

Para a obtenção dos índices de vazios desta pesquisa, foram seguidas as normas NBR 12.004 (ABNT, 1990) para Índice de vazios máximo e a NBR 12.051 (ABNT, 1991), para Índice de vazios mínimos. A Figura 4.6 apresenta os resultados dos índices de vazios máximos e mínimos da areia, pedaços de borracha e das misturas solo-borracha, obtidos a partir dos ensaios citados.

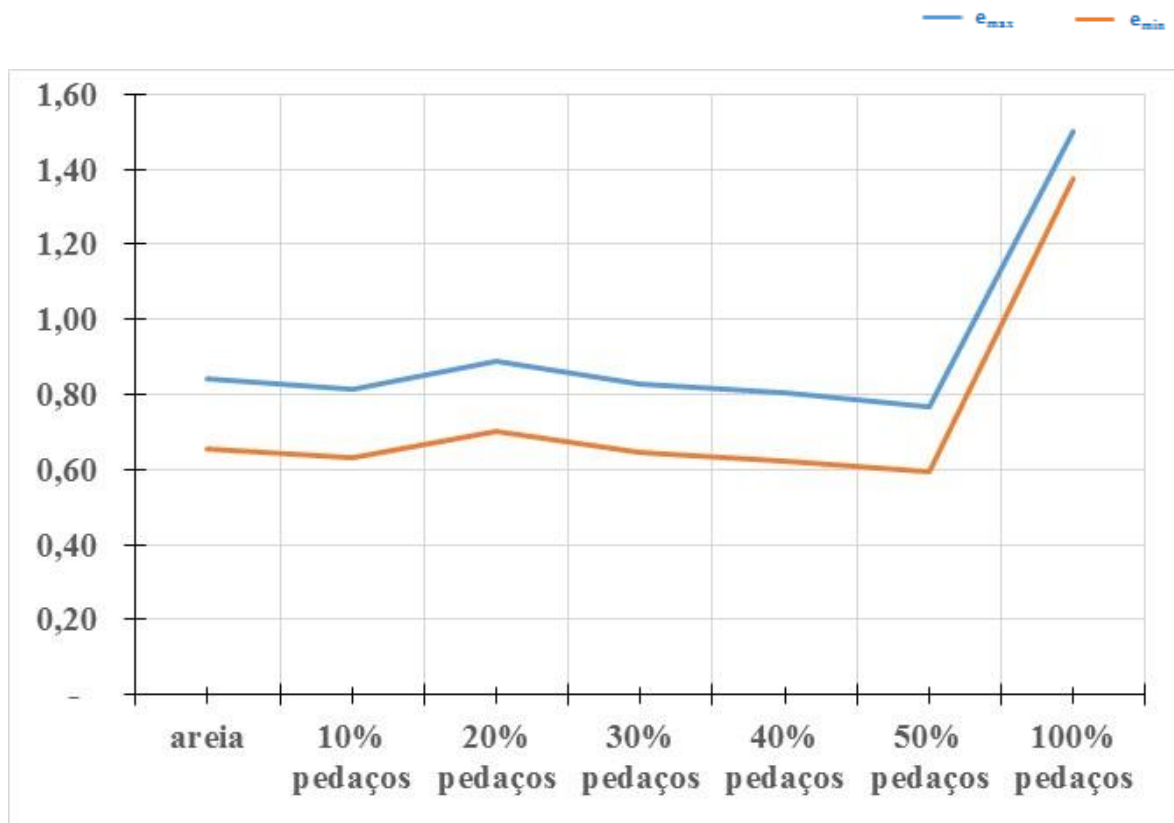


Figura 4.6 Análise dos índices de vazios máximo e mínimo *versus* teor de borracha.

Observa-se que, à medida que se aumenta o teor de borracha da mistura, os índices de vazios (máximo e mínimo) apresentam uma pequena variação e diminuição, e a massa específica aparente seca (mínima e máxima) diminuem também. Destaque que ao final, na mistura M100% pedaços de borracha os índices de vazios aumentam consideravelmente. Isso confirma que os pedaços de borracha estão preenchendo os vazios do solo granular de forma irregular tornando a mistura menos densa. Os valores apresentados mostram que o Índice de vazios máximo nesta pesquisa reduziu cerca de 12,3% entre M10% e M50%, e que a massa específica aparente seca máxima reduziu cerca de 58,6% entre M10% e M50%. Conforme resultados de Lawrence et al.,

(1998) e de Humphrey et al., (1992), apresentados no Guidance Manual (2008), na mistura Tire Derived Aggregate – TDA, os índices de Vazios mínimos e máximos das misturas não compactada variaram entre 1,5 até 2,5, e das misturas compactadas variaram entre 0,9 até 1,2.

Em relação à mistura Tire Derived Aggregate-TDA compactada, ao comparar os Índices de vazios máximos dos teores de M10% a M50%, pode-se observar que a maior redução ocorreu em M50%, que atingiu 46% em comparação com 1,2 e 10% em comparação com 0,9.

4.1.5. ABSORÇÃO DOS PEDAÇOS DE BORRACHA

Para esta pesquisa foram realizados os ensaios de massa específica de diversas amostras, para analisar os pedaços de borracha usando o processo de balança hidrostática (Tabela 4.5), conforme metodologia definida na norma NBR 10.838 (ABNT, 1988). Destaca-se que a média de massa específica dos sólidos é de 1,13 g/cm³, pois caracterizam bem a borracha estudada, conforme comparado com outros autores, tais como Suárez (2016) e Chrusciak (2011). Esses valores foram calculados apenas com umidade baseada na absorção.

Tabela 4.5 Dados obtidos no ensaio de massa específica.

Dia do ensaio	Absorção %	Massa específica aparente natural (g/cm³)	Massa específica aparente seca (g/cm³)
23/01/2017	3,56	1,084	1,127
24/01/2017	3,25	1,088	1,128
25/01/2017	3,74	1,079	1,124
26/01/2017	3,47	1,082	1,124

A Figura 4.7 apresenta a variação de absorção de água pelas borrachas utilizadas nesta pesquisa, no período de 24 horas, correlacionando o tempo (em segundos) *versus* o percentual de variação da massa imersa inicial (em %). Observa-se que há um acréscimo médio de absorção de água ao final de 24 horas pelos pedaços de borracha, até atingir o valor de absorção de 3,56%. Conforme o Guidance Manual (2008), que tratou de mistura de TDA compactada e não compactada, os valores de absorção da borracha apresentaram variação entre 2,0 e 4,0%, respectivamente.

Portanto, o valor encontrado nesta pesquisa apresenta características semelhantes aos de outros autores pesquisados e está dentro da variação obtida. Desta forma, sua aplicação se torna possível em enchimento de aterros, devendo observar as características de cada aplicação escolhida.

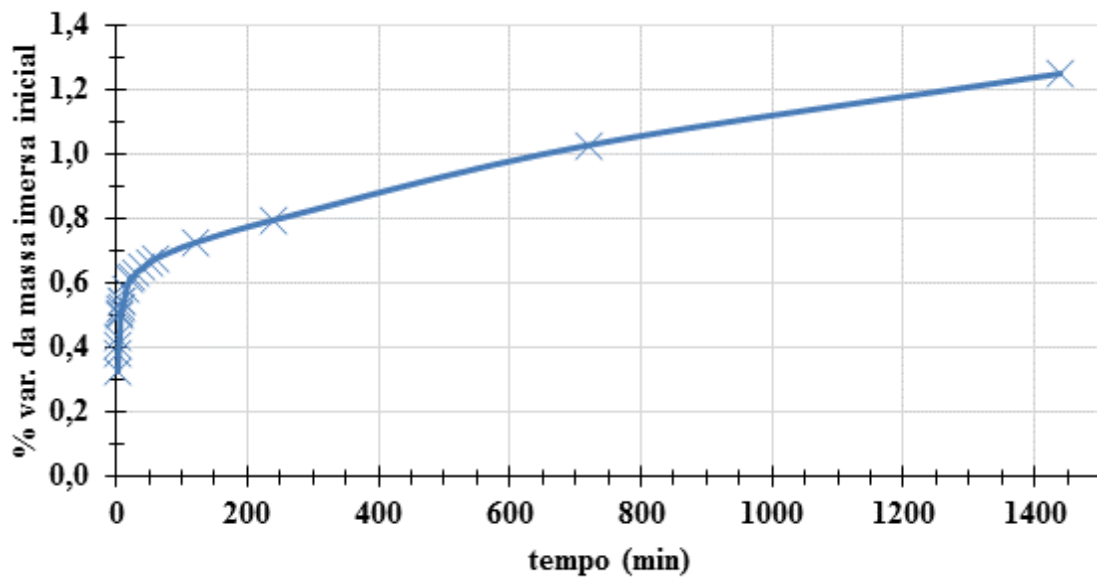


Figura 4.7 Curva de absorção de água por pedaços de borracha.

4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Para as misturas solo-borracha utilizadas nesta pesquisa, foram separadas amostras e realizados ensaios de compactação conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Nos procedimentos para a realização dos ensaios de areia (M0%), de pedaços de borrachas (M100%) e das misturas em diferentes teores de borracha (M10%, M20%, M30%, M40% e M50%), foi aplicada a mesma energia normal de compactação e usado o cilindro metálico grande, devido ao tamanho dos grãos do solo e dos pedaços de borracha.

Os resultados de todos os ensaios de compactação das misturas desta pesquisa estão apresentados nas Figuras de 4.8 a 4.62. De acordo com os resultados nelas registrados, a partir das curvas de compactação, obteve-se para cada teor de mistura solo-borracha os valores da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima ($W_{\acute{o}t}$).

A Figura 4.8 apresenta os moldes dos corpos de prova dos ensaios de compactação desta pesquisa, após o desconfinamento, de acordo com o teor de mistura solo-borracha de M10% a M50%. Pode-se observar que há predominância de trincas nos corpos de provas com teores de

M30%, M40% e M50%. Nos corpos de prova com teores de M10% e M20% as trincas existentes são menos visíveis.

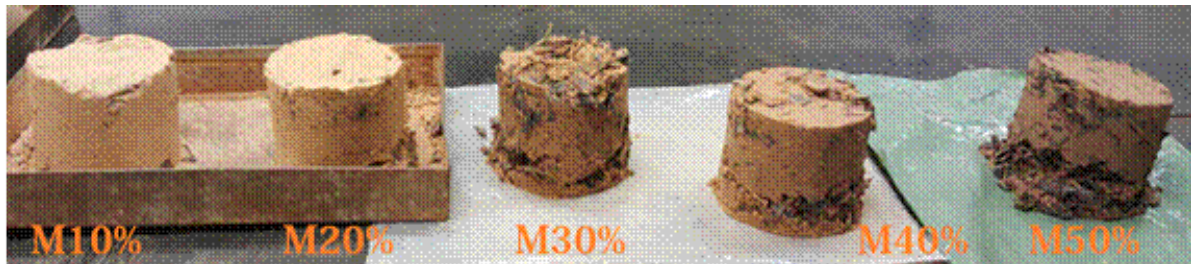


Figura 4.8 Geração de trincas nos corpos de prova.

As Figuras 4.9a a 4.9g têm como finalidade apresentar os corpos de prova em mais de um ângulo de visão para auxiliar na verificação de existência de variação da matriz estrutural, quando atingiram sua umidade ótima de compactação. Destaca-se que, a partir da mistura solo-borracha M20%, apresentado na Figura 4.9d, a coesão entre a borracha e a areia não acontece de forma visível como as demais, pois acima da mistura M30% ocorreu uma desagregação acentuada na desforma. Este fato ocorreu devido à presença acentuada de pedaços de borracha e, conseqüentemente, houve um relaxamento na mistura, conforme pode ser visto nas Figuras 4.9e, 4.9f e 4.9g. Por sua vez, para a amostra de borracha pura (M100%) não foi possível formar molde de corpo de prova porque a borracha não tem coesão, e apresentou, com isso, uma completa desagregação, conforme pode ser visto na Figura 4.9b.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

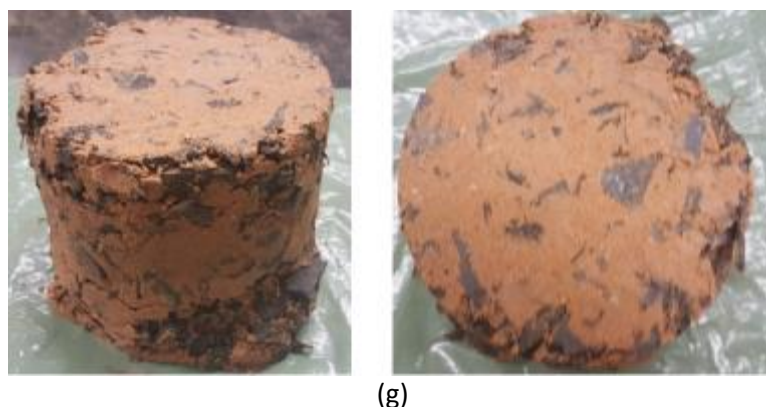


Figura 4.9 Corpos de Prova: (a) areia (solo puro) M0%; (b) borracha (pura) M100%; (c) mistura M10%; (d) mistura M20%; (e) mistura M30%; (f) mistura M40% e (g) mistura M50%.

Como é possível observar, as amostras apresentaram inúmeras trincas de diversos tamanhos e em diferentes direções. De forma mais acentuada, inúmeros fragmentos de pedaços de borracha de diversos tamanhos estão em evidência entre os teores de mistura M30% a M50%. Este fato deve-se à presença da borracha como um material não coesivo.

Na Tabela 4.6 está apresentado o resumo dos resultados dos ensaios de compactação das misturas desta pesquisa contendo: o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), a umidade ótima ($W_{\acute{o}t}$) e o peso específico dos sólidos (G_s). Destaca-se que a massa específica dos sólidos equivalente (G_{seq}) foi calculada para as misturas de M10% a M50%, a partir de uma relação proporcional entre os valores da massa específica dos sólidos da areia M0% e da borracha M100%, com os teores das misturas solo-borracha, conforme Equação 3.10.

Tabela 4.6 Resumo dos resultados dos ensaios de compactação para os teores de borracha.

Amostra	Teor de borracha (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	$W_{\acute{o}t}$ (%)	$G_s / G_{seq}^{(1)}$
M0%	0	16,50	12,5	2,65
M10%	10	15,00	13,5	2,50
M20%	20	13,80	12,5	2,35
M30%	30	13,40	11,4	2,20
M40%	40	12,60	11,2	2,05
M50%	50	11,80	10,8	1,90
M100%	100	4,70	7,5	1,13

⁽¹⁾ – Calculando G_{seq} quando for mistura, conforme Equação 3.10.

Observando a Tabela 4.6, pode-se constatar que há uma tendência de decréscimo do peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), um decréscimo da umidade ótima (W_{ot}) e um decréscimo da massa específica equivalente dos sólidos (G_{seq}), à medida que se aumenta o teor de borracha. Isto se deve ao aumento da presença de pedaços de borracha na mistura, proporcionando uma redução do peso específico.

4.2.1. AREIA

A Figura 4.10 apresenta a curva de compactação da areia utilizada nesta pesquisa, representada pela relação da umidade (w) *versus* a massa específica aparente seca (ρ_d). E a Figura 4.11 apresenta a relação da umidade (w) *versus* índice de vazios da areia (e).

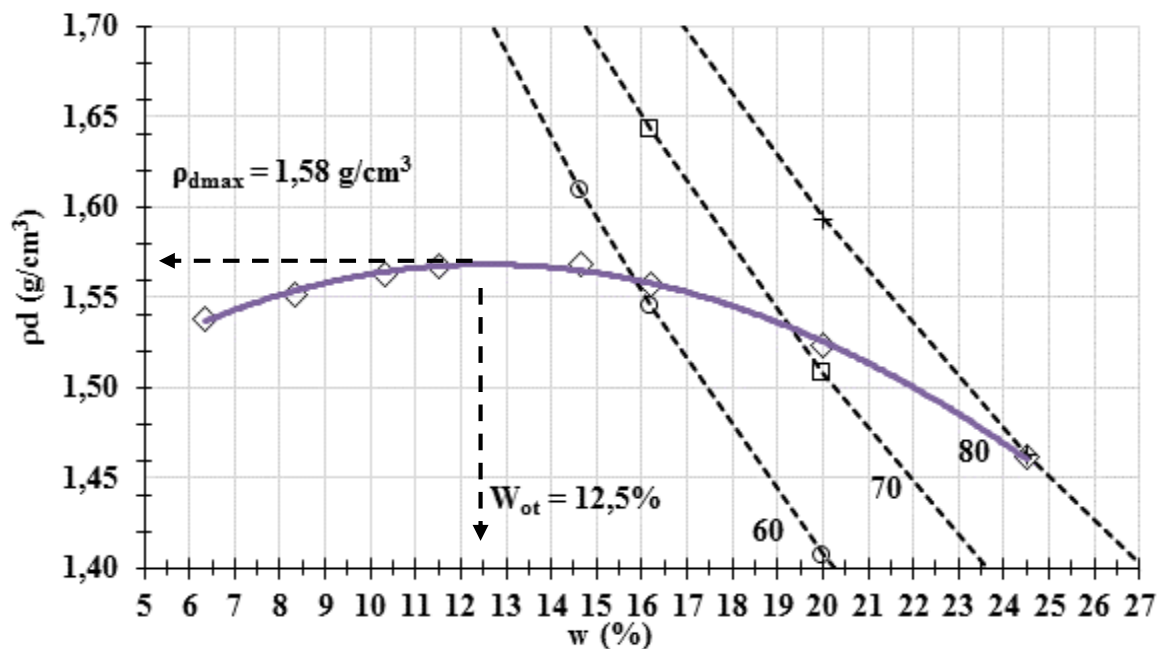


Figura 4.10 Curva de compactação da areia (M0%).

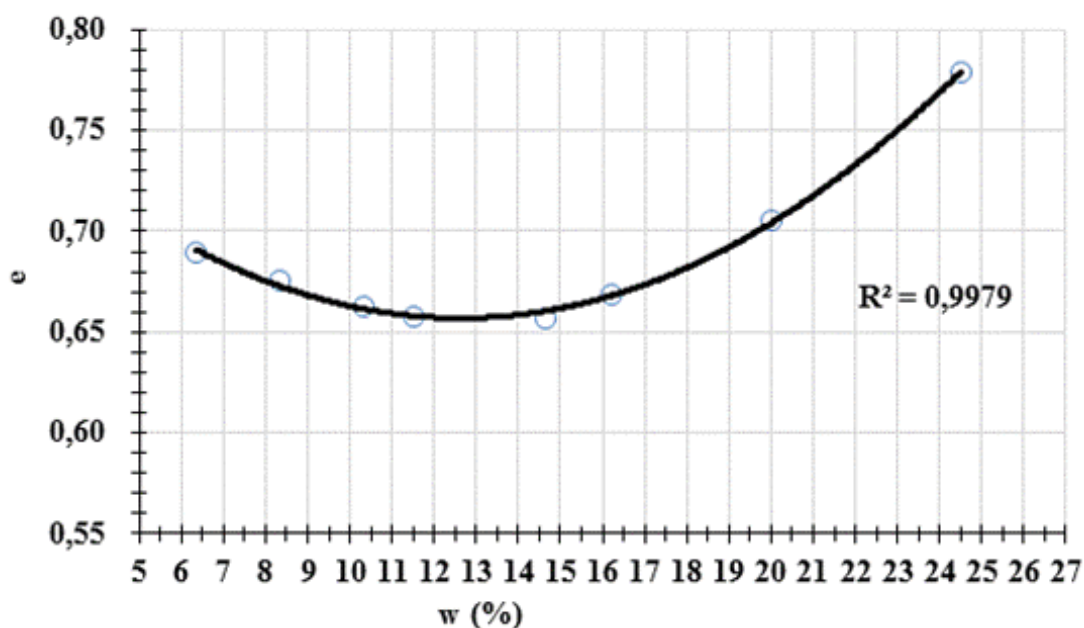


Figura 4.11 Curva de variação do índice de vazios da areia (M0%).

A partir da Figura 4.10, pode-se observar que a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) igual a $1,58 \text{ g/cm}^3$, para uma umidade ótima ($W_{ót}$) igual a 12,5%. Conforme apresentado no item 4.1.1 deste capítulo, a massa específica dos grãos da areia é de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Por sua vez, os índices de vazios mínimo e máximo variaram entre 0,62 e 0,74, conforme a variação da umidade. Para a umidade ótima, o valor do índice de vazios é igual a 0,68. Alguns autores de pesquisas anteriores observaram valores da massa específica aparente seca máxima da ordem de $1,68 \text{ g/cm}^3$, Tatlısoz et al. (1998); $1,55$ a $1,66 \text{ g/cm}^3$, Attom (2006); $1,53 \text{ g/cm}^3$, Edinçliler (2004 e 2007) e, $1,66 \text{ g/cm}^3$, Ghazavi (2004), o que confirma que os resultados obtidos nesta pesquisa estão bem próximos dos resultados obtidos pelos autores, caracterizando-se, possivelmente, como material para aplicação em obras de geotecnia, devendo ser avaliados todos os aspectos técnicos de resistência, disponibilidade, teor de mistura e outros para confirmar o uso.

4.2.2. PEDAÇOS DE BORRACHA

A curva de compactação dos pedaços de borracha, conforme apresentado na Figura 4.12, relaciona a umidade (w) *versus* a massa específica aparente seca (ρ_d). E, a Figura 4.13 apresenta a variação da umidade (w) *versus* o índice de vazios (e) para os pedaços de borracha utilizados nesta pesquisa.

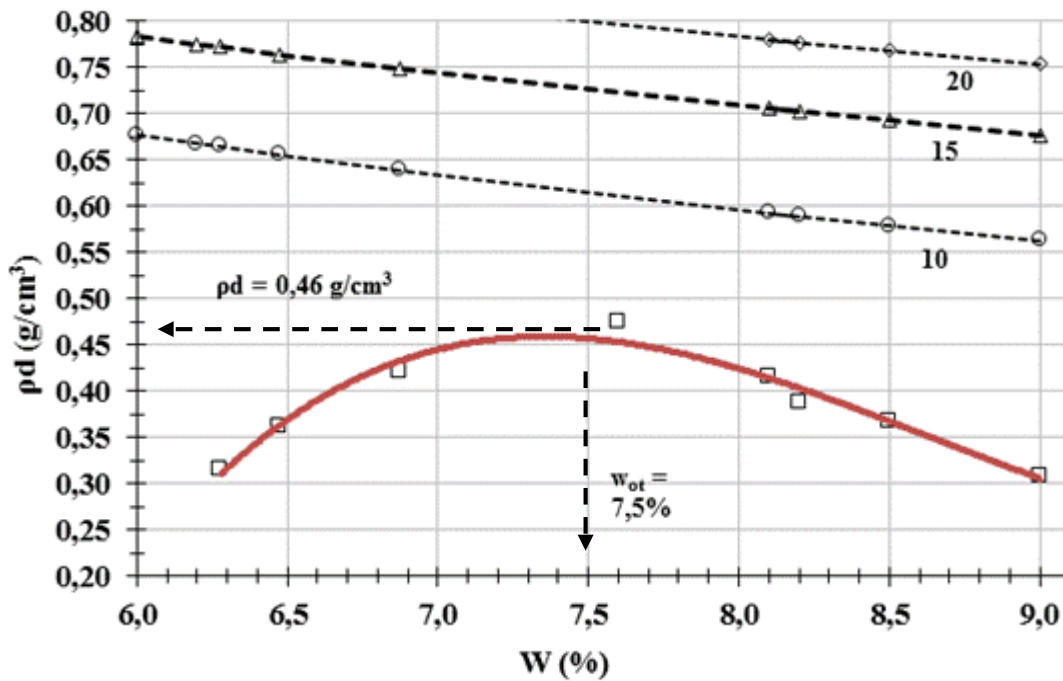


Figura 4.12 Curva de compactação dos pedaços de borracha M100%.

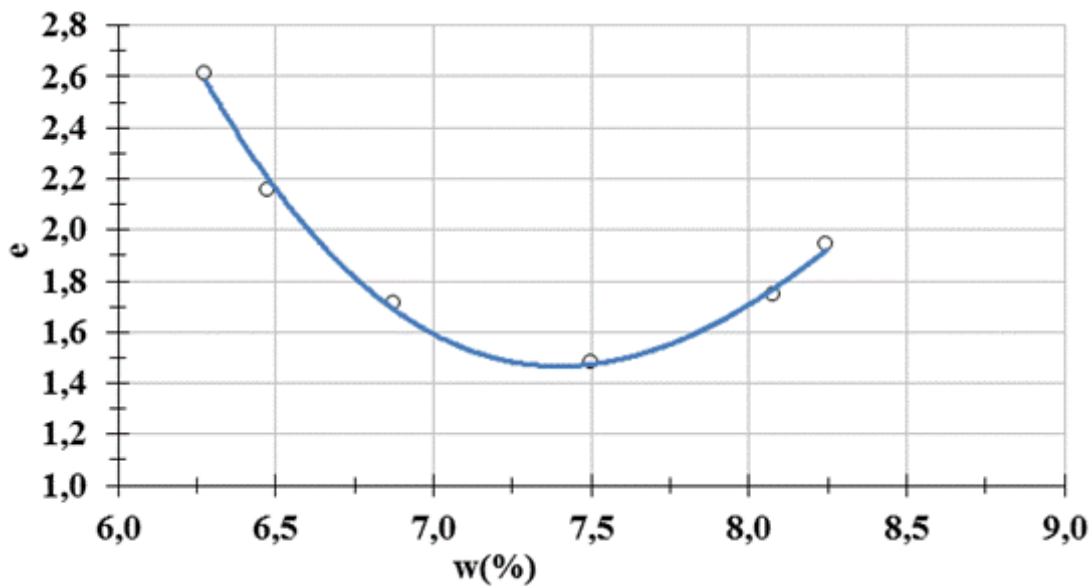


Figura 4.13 Curva de variação do índice de vazios dos pedaços de borracha (M100%).

A partir da curva de compactação apresentado na Figura 4.12, obteve-se a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) da borracha que é $0,46 \text{ g/cm}^3$ (equivale ao peso específico aparente seco máximo de $4,51 \text{ kN/m}^3$) para uma umidade ótima ($W_{\acute{o}t}$) que é $7,5\%$. Conforme apresentado no item 4.1.1, a massa específica dos sólidos dos pedaços de borracha foi de $1,14 \text{ kN/m}^3$, conforme Chrusciak (2013). Na Figura 4.13, é apresentada a curva de variação da umidade ótima *versus* o índice de vazios. De acordo com esta, a partir da umidade ótima, pode-se encontrar o índice de vazios mínimo que é igual a $1,30$. Com base nos seguintes autores, o valor do peso

específico aparente seco máximo dos pedaços de borracha está coerente, conforme pode ser visto, a seguir: 4,70 kN/m³, Suárez (2016); e 6,41 kN/m³, Guidance Manual (2008). É importante destacar que na Figura 4.12 o ramo úmido não está paralelo à curva de saturação dos pedaços de borracha devido à baixa saturação.

4.2.3. MISTURAS DE SOLO-BORRACHA

Os resultados das misturas solo-borracha desta pesquisa estão apresentados nas Figuras de 4.14 a 4.29. A Figura 4.14 apresenta resultados para o teor de mistura de solo-borracha M10%, indicando a curva de compactação correlacionado à umidade (w) *versus* a massa específica aparente seca (γ_d) com destaque aos valores máximos. E a Figura 4.15 apresenta a correlação da umidade (w) *versus* o índice de vazios (e) da mistura M10%.

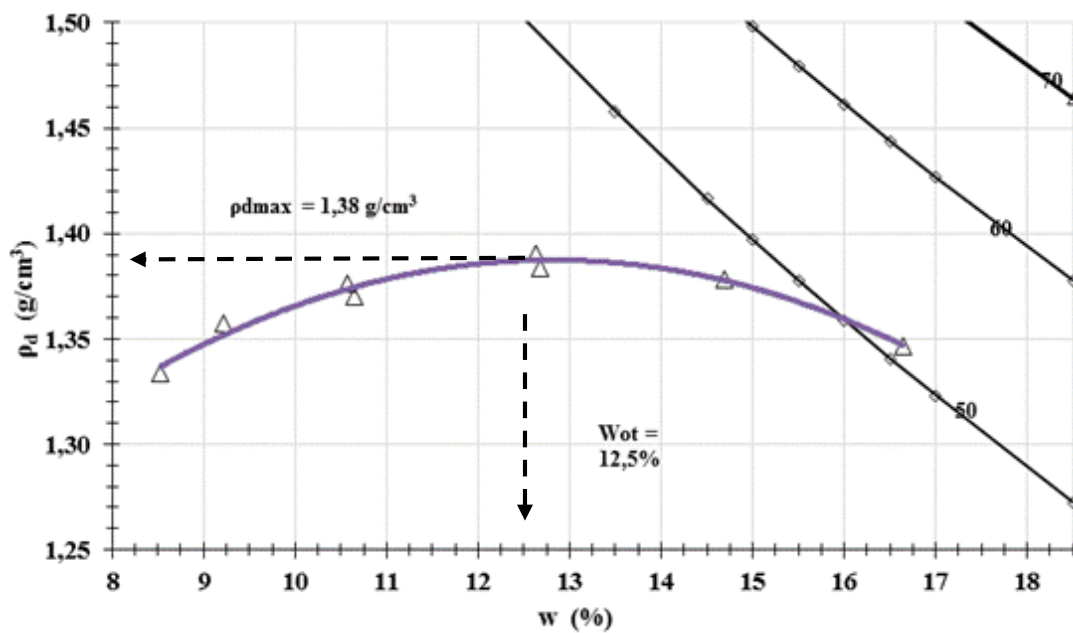


Figura 4.14 Curva de compactação da mistura (M10%).

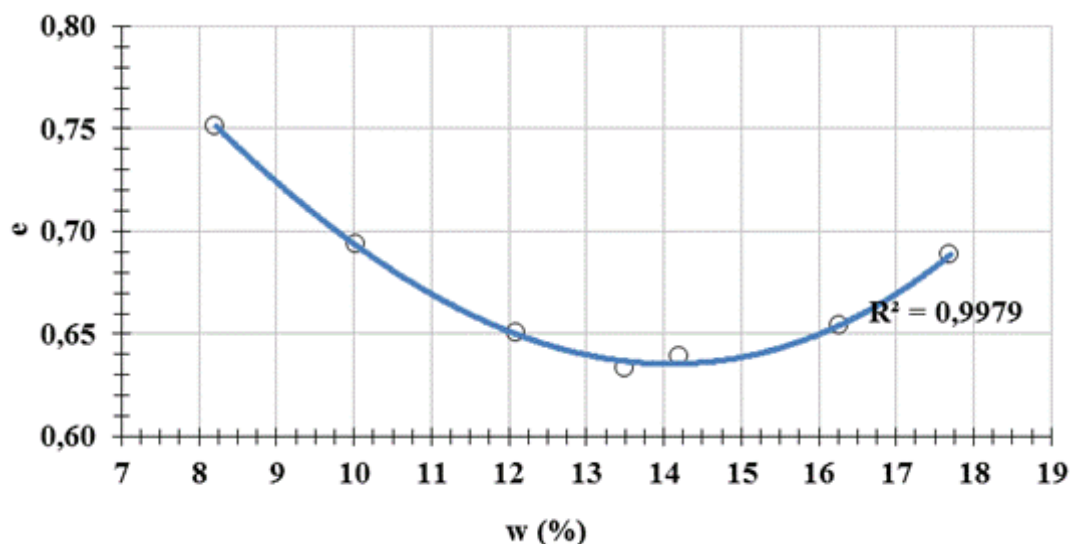


Figura 4.15 - Curva de variação do índice de vazios mistura (M10%).

À medida que foram inseridos os pedaços de borracha, o índice de vazios diminuiu, fato este contrário ao esperado. Acredita-se que estes resultados refletiram a execução do ensaio de compactação, uma vez que a areia é mais pesada que a borracha. Durante a execução, a amostra que foi compactada não ficou homogênea no cilindro metálico durante a sua execução. Portanto, proporcionalmente, utilizou-se mais areia que borracha e, conseqüentemente, o índice de vazios diminuiu, quando comparado ao volume estudado.

Utilizando como base a Figura 4.14, que apresenta os resultados, foi possível calcular graficamente o par de massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) igual a $1,53 \text{ g/cm}^3$ e a umidade ótima ($W_{\acute{o}t}$) igual a 13,5%. Utilizando a Equação 3.10, foi calculada a massa específica dos grãos, equivalente igual a 2,50. E a Figura 4.15 apresenta o valor do índice de vazios para umidade ótima igual a 0,63.

A Figura 4.16 apresenta resultados para o teor de mistura de solo-borracha M20%, indicando a curva de compactação da mistura relacionando à umidade (w) *versus* a massa específica aparente seca (ρ_a), com destaque para os valores máximos. E a Figura 4.17 apresenta a relação entre a umidade (w) *versus* o índice de vazios (e) da mistura M20%.

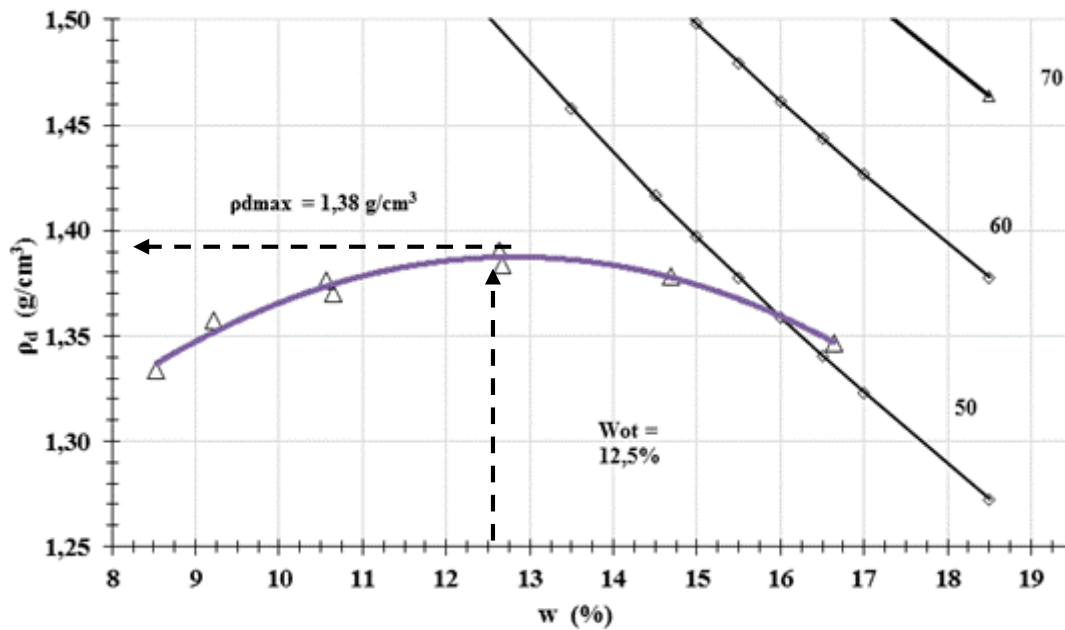


Figura 4.16 Curva de compactação da mistura (M20%).

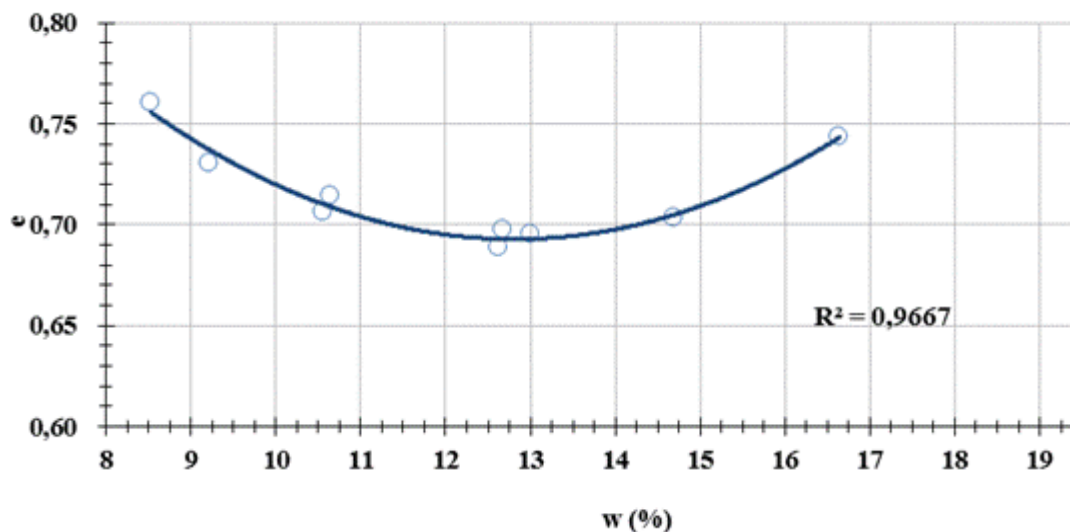


Figura 4.17 Curva de variação do índice de vazios mistura (M20%).

Da análise da Figura 4.16, é possível calcular graficamente o par de massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) igual a $1,38 \text{ g/cm}^3$ e a umidade ótima (W_{ot}) igual a $12,5\%$. Conforme Equação 3.10, foi calculada a massa específica dos grãos, equivalente igual a $2,348$. E a Figura 4.17 apresenta o valor do índice de vazios para umidade ótima igual a $0,69$.

Na Figura 4.18, pode-se observar os resultados obtidos pela mistura solo-borracha M30%. Tal mistura indica a curva de compactação da mistura, relacionando a umidade (w) à massa específica aparente seca (ρ_d), mistura que destaca os valores máximos. Já a Figura 4.19 apresenta a relação entre umidade (w) e índice de vazios (e) da mistura M30%.

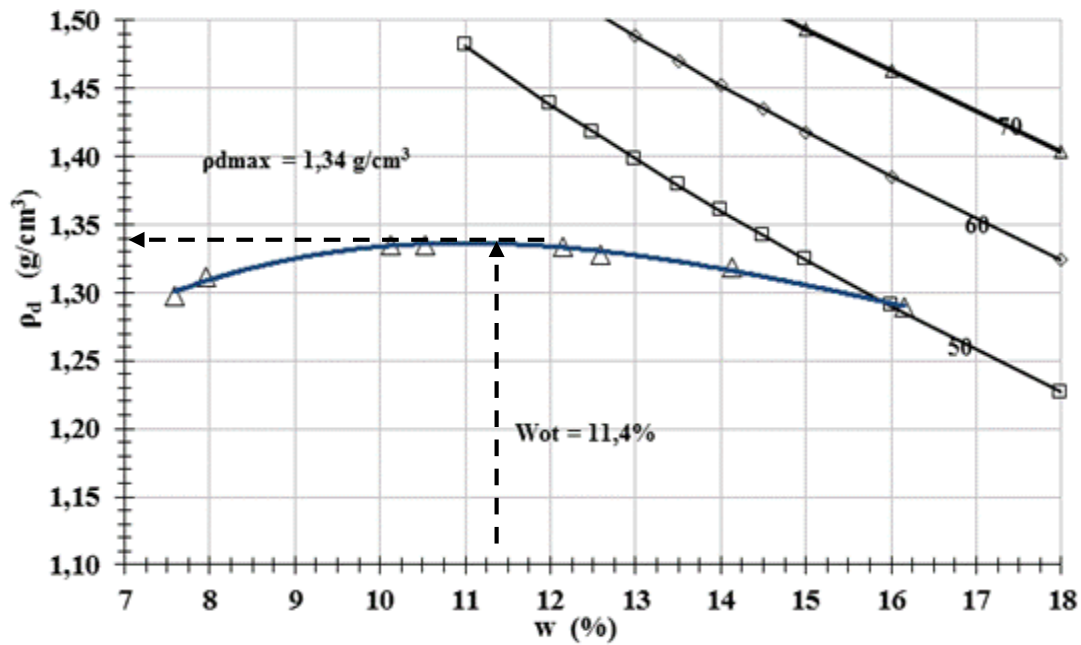


Figura 4.18 Curva de compactação da mistura (M30%).

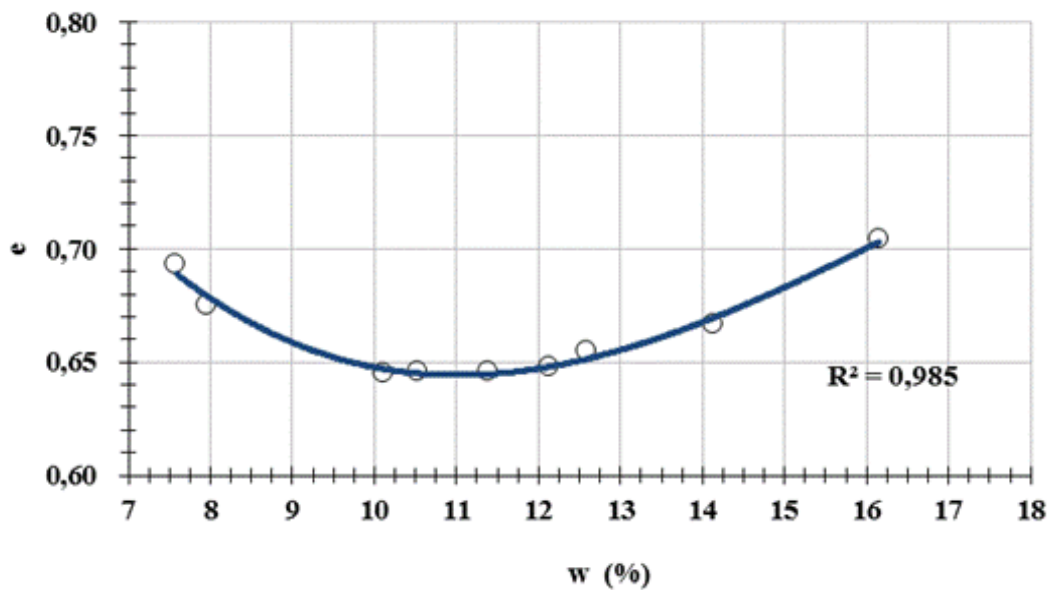


Figura 4.19 Curva de variação do índice de vazios mistura (M30%).

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.18, foi possível calcular graficamente o par de massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d\text{máx}}$) igual a $1,32 \text{ g/cm}^3$ e a umidade ótima ($W_{\text{ót}}$) igual a $11,4\%$. Conforme Equação 3.10, foi calculada a massa específica dos grãos equivalente, igual a $2,197$. E a Figura 4.19 apresenta o valor do índice de vazios para umidade ótima igual a $0,64$.

A Figura 4.20 relaciona a umidade à massa. Apresenta resultados para o teor de mistura solo-massa M40%, em que indica a curva de compactação da mistura e relaciona a umidade (w) à massa específica aparente seca (ρ_d) com destaque aos valores máximos. A Figura 4.21 relaciona a umidade (w) ao índice de vazios (e) da mistura M40%

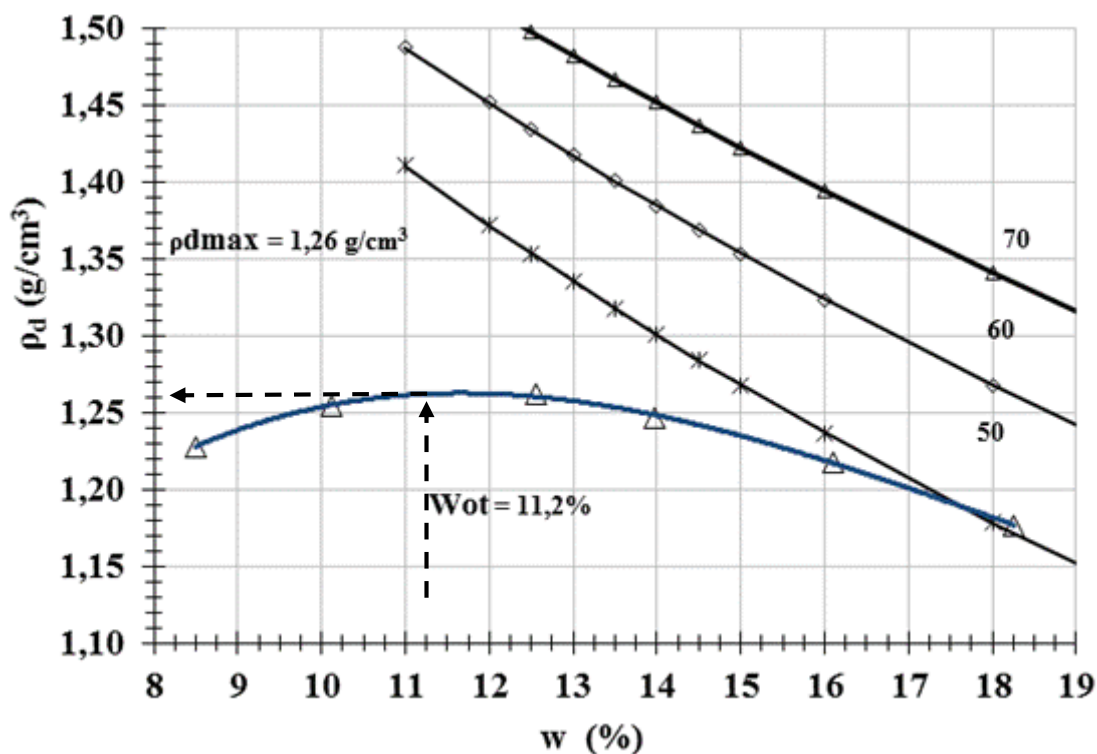


Figura 4.20 Curva de compactação da mistura (M40%).

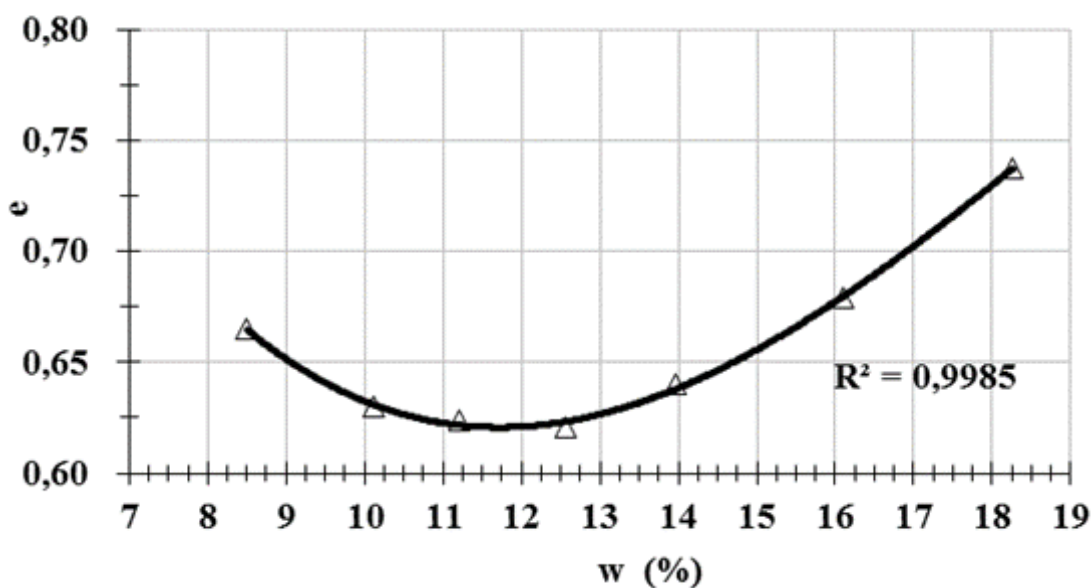


Figura 4.21 Curva de variação do índice de vazios mistura (M40%).

Tendo como base os resultados apresentados na Figura 4.20, foi possível calcular graficamente o par de massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d\text{máx}}$) igual a 1,26 g/cm³ e a umidade ótima ($W_{\text{ót}}$) igual a 11,2%. Conforme Equação 3.10 foi calculada a massa específica dos grãos equivalente igual a 2,046. E a Figura 4.21 apresenta o valor do índice de vazios para umidade ótima igual a 0,62.

O teor de mistura solo-borracha M50% está representado na Figura 4.22. O gráfico indica a curva de compactação da mistura e relaciona a umidade (w) à massa específica aparente seca (ρ_d), com destaque para os valores máximos. A Figura 4.23 relaciona a umidade (w) ao índice de vazios (e) da mistura M50%.

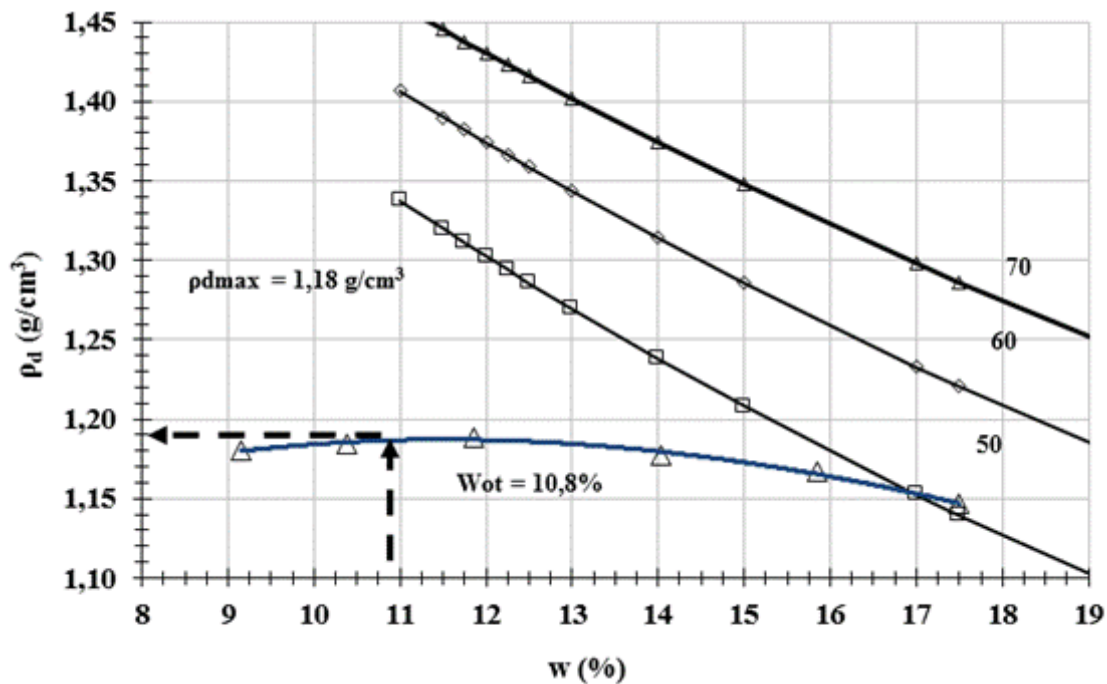


Figura 4.22 Curva de compactação da mistura (M50%).

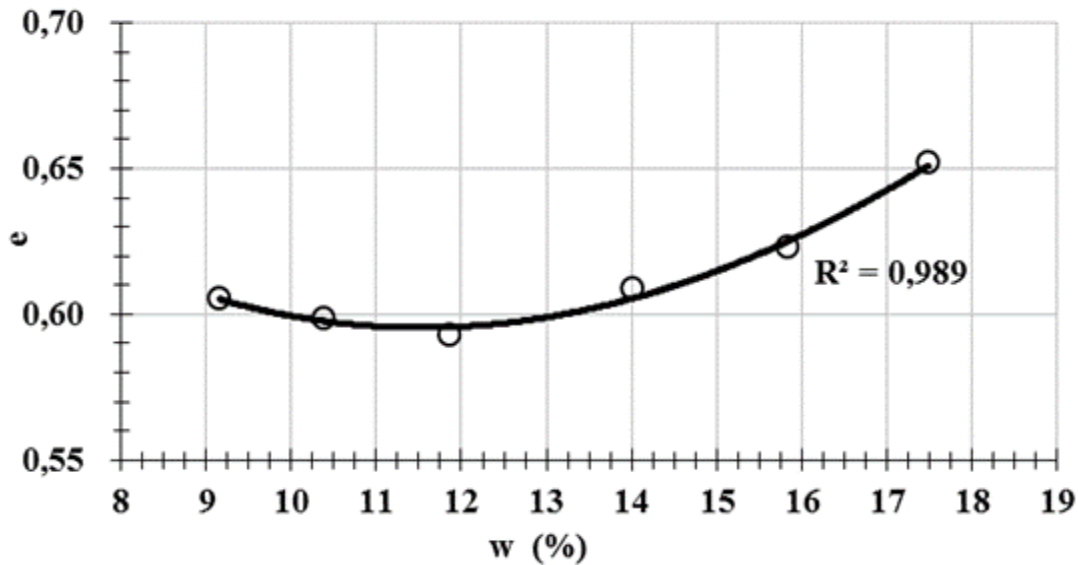


Figura 4.23 Curva de variação do índice de vazios com mistura (M50%).

De acordo com a Figura 4.22, pode-se perceber os resultados apresentados, os quais permitem confirmar graficamente o cálculo da massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), que é igual a 1,18 g/cm³, bem como a umidade ótima ($W_{\acute{o}t}$), que é igual a 10,8%. Percebe-se, na equação 3.10, o cálculo da massa específica dos grãos equivalente a 1,90. A Figura 4.23 apresenta o valor do índice de vazios para umidade ótima igual a 0,59.

Os resultados dos ensaios do teor de borracha (%) *versus* massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) são apresentados na Figura 4.24 (Este autor, 2018), em linha tracejada para visualização comparativa com outras pesquisas. É possível observar que, de uma maneira geral, os valores encontrados estão bem coerentes com os resultados dos autores destacados na referência bibliográfica na Figura abaixo, confirmando que a mistura pode ser empregada em obras de geotecnia, possivelmente, devendo ser avaliados outros parâmetros tais como: resistência, disponibilidade de quantidade de insumos e outros.

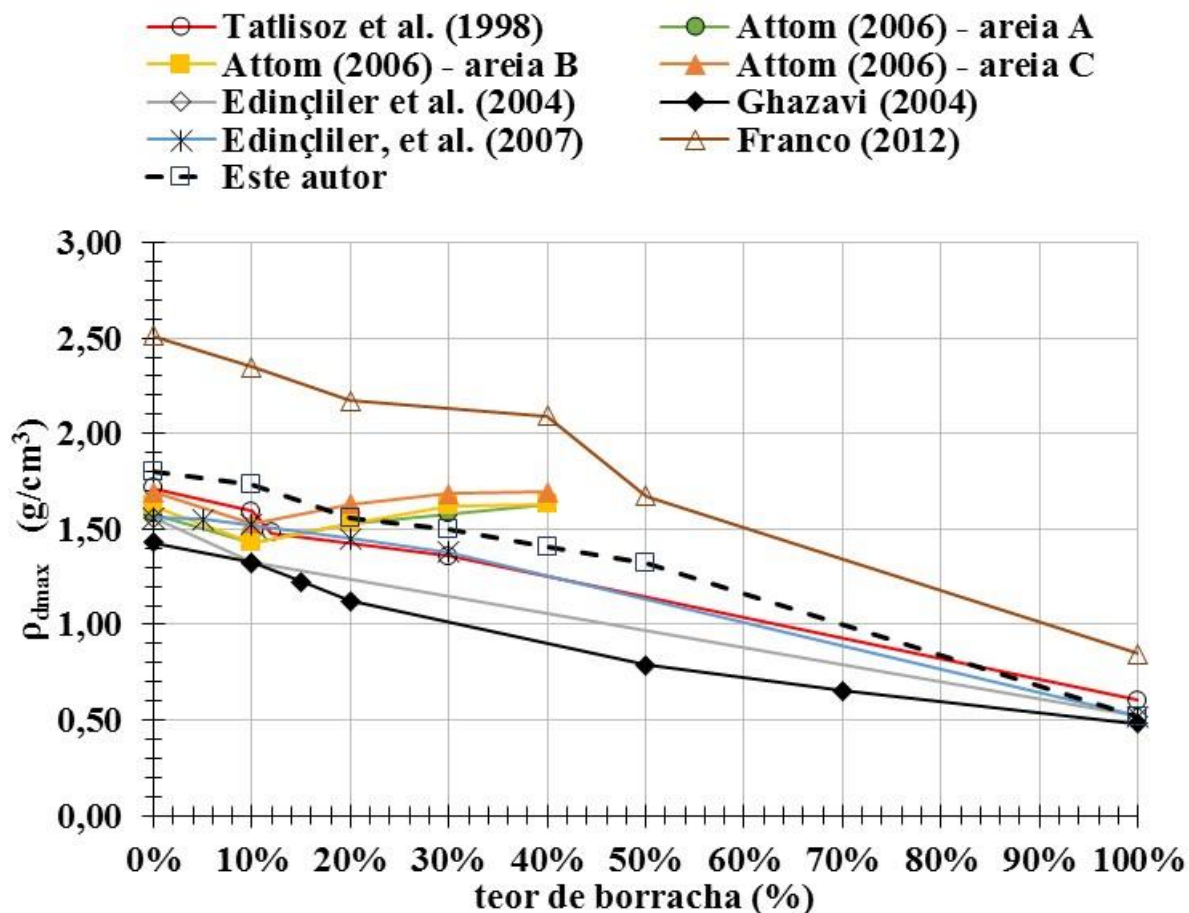


Figura 4.24 Relação entre teor de borracha *versus* massa específica aparente seca de diversos autores.

A Figura 4.25 apresenta, de forma comparativa, os resultados das misturas solo-borracha, relacionando a umidade (w) *versus* massa específica aparente seca (ρ_d) das amostras estudadas nesta pesquisa. A Figura 4.25 apresenta as curvas de umidade (w) *versus* índice de vazios (e) destas misturas.

Observou-se na Figura 4.25 que a medida que aumenta o teor de borracha menor é o peso específico e, o comportamento de cada teor se apresenta como uma parábola com concavidade voltada para baixo. Então, de uma maneira geral, os valores apresentam uma variação similar.

A Figura 4.26 apresenta a variação da umidade em relação aos índices de vazios para cada teor de mistura. O comportamento está em forma de parábola com a concavidade voltada para cima, e a medida que aumenta o teor de pedaços de borracha menor será o índice de vazios.

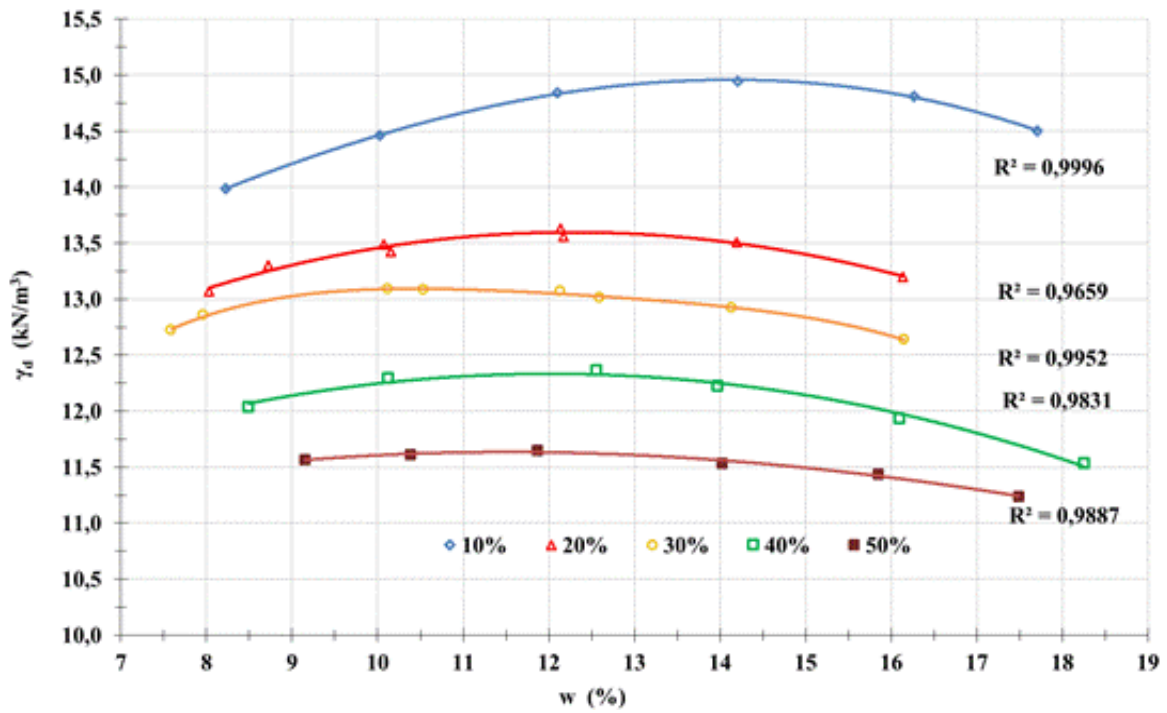


Figura 4.25 Resumo das curvas de compactação para todas as misturas solo-borracha.

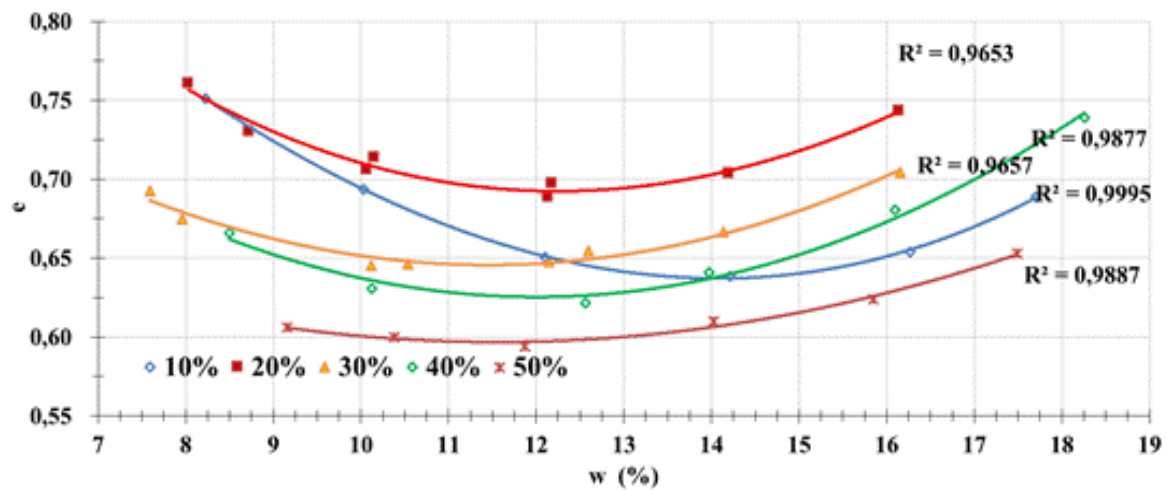


Figura 4.26 Resumo das Curvas do índice de vazios *versus* umidade para todas as misturas solo-borracha.

A Tabela 4.7 apresenta resumidamente todos os resultados dos ensaios de misturas solo-borracha estudados nesta pesquisa, com o objetivo de comparar os resultados.

Tabela 4.8 Resumo dos resultados do ensaio de compactação.

Amostra	Teor de borracha (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W _{ót} (%)	G _s / G _{seq}	e
M0%	0	1,614	8,35	2,65	0,675
	0	1,626	10,32		0,834
	0	1,631	11,50		0,848
	0	1,632	16,21		0,900
	0	1,620	20,01		0,939
M10%	10	1,427	8,22	2,50	0,751
	10	1,475	10,03		0,694
	10	1,514	12,10		0,650
	10	1,525	14,21		0,639
	10	1,511	16,27		0,654
M20%	20	1,334	8,03	2,35	0,760
	20	1,370	10,07		0,706
	20	1,391	12,14		0,689
	20	1,378	14,20		0,703
	20	1,347	16,14		0,743
M30%	30	1,298	7,59	2,20	0,693
	30	1,335	10,53		0,646
	30	1,328	12,60		0,655
	30	1,319	14,14		0,666
	30	1,289	16,15		0,704
M40%	40	1,228	8,49	2,05	0,665
	40	1,255	10,12		0,630
	40	1,262	12,56		0,621
	40	1,247	13,97		0,640
	40	1,218	16,10		0,679
M50%	50	1,180	9,15	1,90	0,605
	50	1,185	10,38		0,599
	50	1,189	11,87		0,593
	50	1,177	14,02		0,609
	50	1,167	15,85		0,623
M100%	100	0,471	7,60	1,14	1,354
	100	0,419	8,08		1,689
	100	0,391	8,25		1,884
	100	0,423	6,88		1,659
	100	0,364	6,48		2,091

A partir das Figuras 4.25 e 4.26, foi realizada análise do comportamento da borracha em unidades de peso das misturas M0% a M50%. Segundo a análise, foi possível verificar que a medida que se aumenta o teor de mistura solo-borracha, ocorre uma diminuição da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) em média de até 30,9% pelo fato de os pedaços de borracha apresentarem

comportamento similar mesmo com densidade bem menor que a da areia. Além disso, observa-se uma diminuição da umidade ótima ($W_{ót}$) em média de até 7,6% entre as misturas M10% a M30% devido ao fato de a borracha ser um material leve e de baixa absorção.

A partir dos teores de mistura de M30% a M50%, ocorreu um aumento médio de até 0,43%, além de uma variação dos índices de vazios médio entre as amostras das misturas que aumentaram em até 29,8%, devido à presença dos pedaços de borracha. É importante destacar que a curva de índice de vazios da mistura M10% sofreu uma variação, no ramo úmido maior, comparando com as curvas das misturas M20%, M30% e M40%, bem como e uma variação da massa específica dos sólidos equivalentes das misturas com redução de até 32,4%, pela redução do peso da mistura à medida que foram inseridos mais pedaços de borracha. Destaque a curva M10% pois, o ensaio foi repetido e o comportamento se manteve o mesmo.

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam as tendências por meio de regressão linear como forma de obter o coeficiente de ajuste da curva R^2 . A Figura 4.27 apresenta a relação do teor de borracha (%) *versus* a massa específica aparente seca máxima (γ_{dmax}) das misturas M0% a M50% e M100% desta pesquisa. Observa-se que o coeficiente R^2 é igual a 0,98, valor aceitável para a regressão linear.

A Figura 4.28 apresenta a relação do teor de borracha (χ , %) *versus* a umidade ótima ($w_{ót}$) das misturas estudadas nesta pesquisa. Os resultados das misturas apresentaram um contínuo decréscimo, à medida em que ocorreu aumento do teor de borracha e, conseqüentemente, deixou todos os pontos muito fora da reta, o que resultou em um coeficiente R^2 igual a 0,93, pelo fato de se estar comparando a areia pura com as misturas. Com base nos estudos de Suárez (2017) e Chrusciak (2016), os resultados apresentaram comportamento similar, ou seja, com tendência a decréscimo à medida que ocorreu o aumento do teor de borracha.

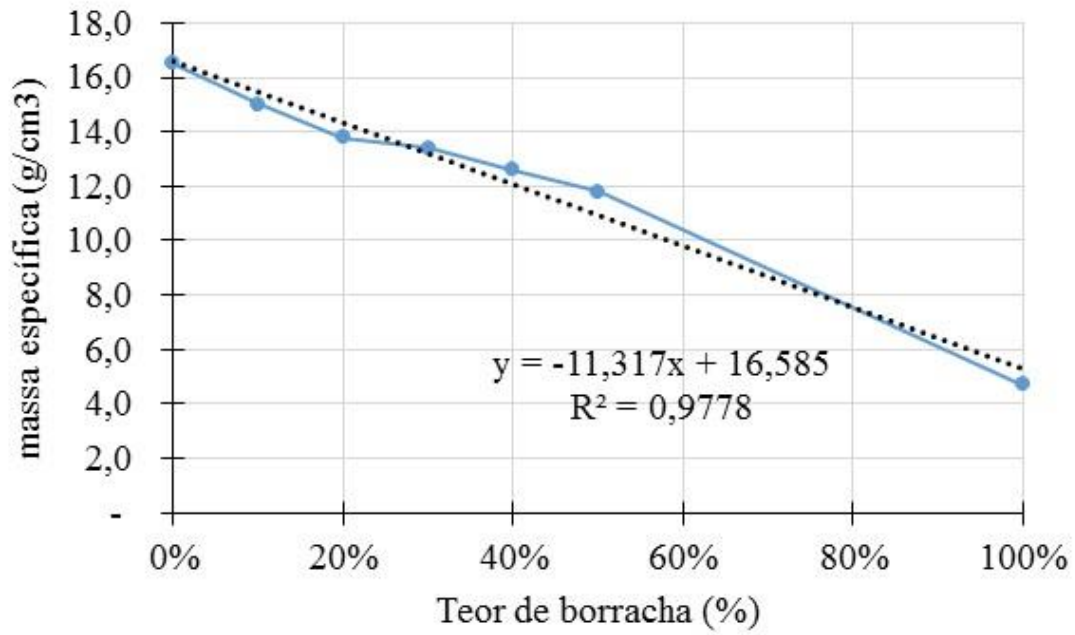


Figura 4.27 Teor de borracha *versus* massa específica aparente seca máximo.

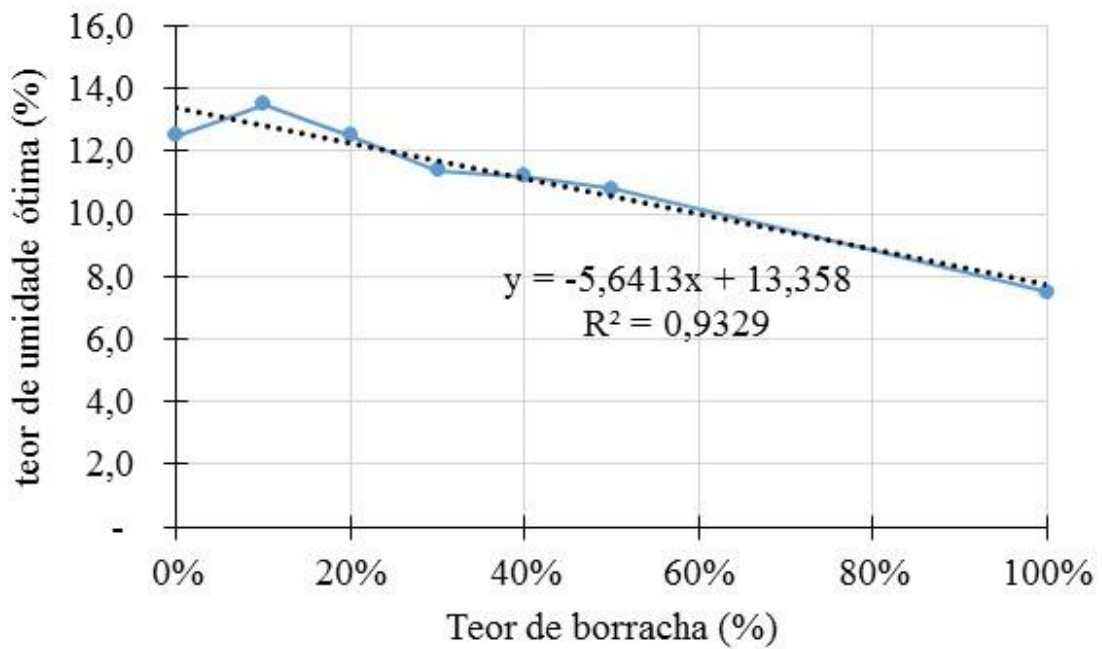


Figura 4.28 Teor de borracha *versus* variação da umidade ótima.

A Figura 4.29 apresenta os resultados dos ensaios de teor de borracha (%) *versus* a variação do peso específico aparente seco máximo ($\Delta\gamma_{dmax}$), em linha tracejada para visualização comparativa desta pesquisa com as de outros autores.

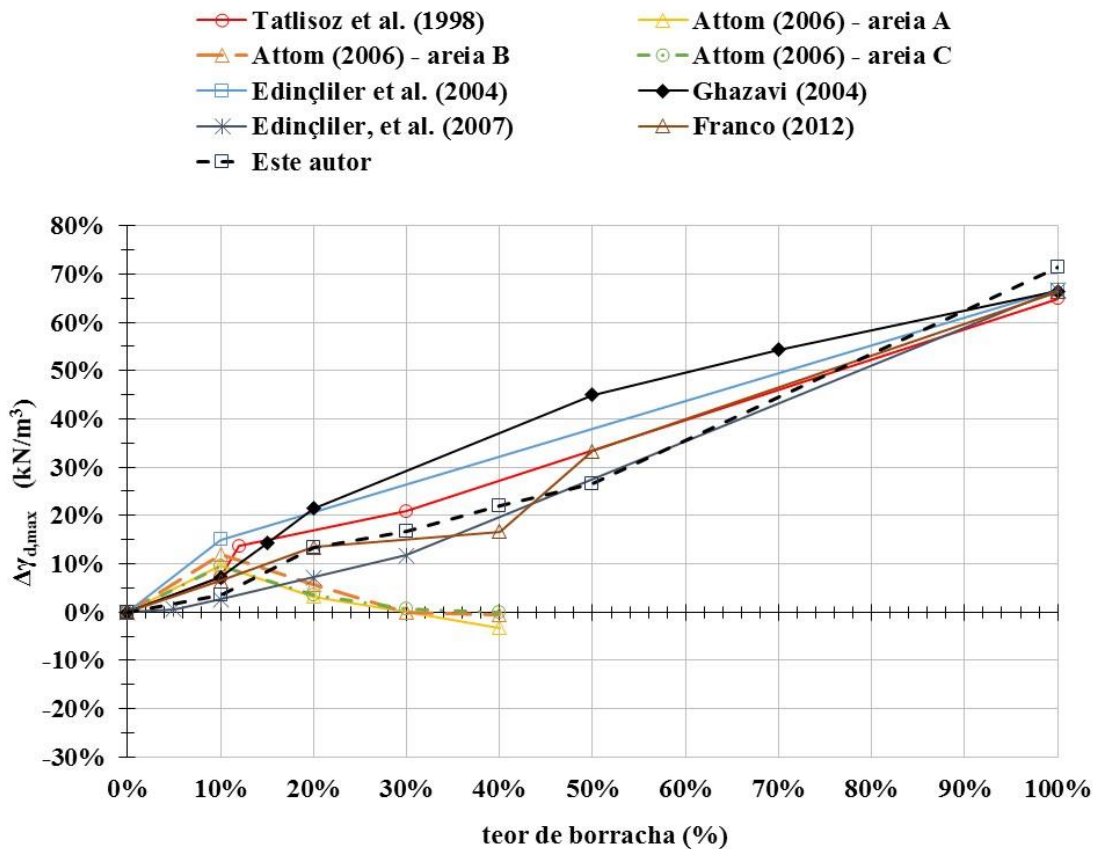


Figura 4.29 Teor de borracha *versus* variação da massa específica seca máxima.

4.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Para realizar os ensaios de cisalhamento direto, foram realizados ensaios em amostras apenas de solo (M0%), em solo-borracha (M10% a M50%) e apenas em borracha (M100%), seguindo os procedimentos estabelecidos na norma D3080 (ASTM, 2011) e nas pesquisas de Chrusciak (2013) e Suárez (2016).

Nesta pesquisa, os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em equipamento de média escala, conforme descrito no Capítulo 3, utilizando areia (M0%), pedaços de borracha (M100%) e todos os teores de misturas de solo-borracha (M10% a M50%). É importante destacar que somente os ensaios com areia (M0%) foram realizados com equipamento em escala convencional, pelo fato de os pedaços de borracha apresentarem tamanhos médios de $D_{50} = 15$ mm, superior à altura da caixa de execução do ensaio, que é igual a 10 mm, não permitindo a moldagem no equipamento.

Foi descrita no Capítulo 3 e apresentada na Tabela 3.10 a metodologia utilizada para a compactação das misturas solo-borracha na caixa do ensaio de cisalhamento direto em média escala. Essa compactação foi realizada de forma mecânica e uniforme.

As Figuras de 4.30 a 4.33 apresentam os resultados do ensaio de cisalhamento direto convencional e as Figuras de 4.35 a 4.61 apresentam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto em média escala. Foram utilizadas as tensões normais (τ_n) de 25 kPa, 50 kPa, 80 kPa e 100 kPa para todas as misturas utilizadas nos ensaios realizados nesta pesquisa.

Para todos os ensaios de cisalhamento direto realizados nesta pesquisa, foram apresentados os seguintes resultados: (i) curvas de deslocamento horizontal (δ_h) *versus* tensão de cisalhamento (τ), para avaliar a resistência do solo, quando submetido a diferentes tensões normais (τ_n); (ii) envoltórias de Mohr-Coulomb (σ_n *versus* τ_n), que representam a relação direta entre os valores da tensão normal (σ_n) *versus* tensão cisalhante a volume constante (τ_n), para calcular o ângulo de atrito efetivo e a coesão; (iii) curvas de deslocamento horizontal (δ_h) *versus* deslocamento vertical (δ_v), para correlacionar o comportamento destes deslocamentos; (iv) e curvas de adensamento relacionando a raiz (t) *versus* deslocamento vertical (δ_v) sob diferentes níveis de tensões normais para apresentar o tempo do adensamento.

Buscando correlacionar os resultados desta pesquisa na aplicação prática em obras de geotecnia, os resultados das curvas de deslocamento horizontal (δ_h) *versus* tensão de cisalhamento (τ) poderão ser usados por um projetista para estabelecer o deslocamento máximo de até 43 mm, para evitar rompimentos futuros. Com esse resultado é possível obter a tensão de cisalhamento máximo (τ_{max}) para uma obra real com estas mesmas condições. É importante destacar que o valor de 43 mm adotado nesta pesquisa é menor que o valor total do deslocamento horizontal aceitável que é de 50 mm, obtido do ensaio de cisalhamento direto em média escala.

4.3.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL

Para realizar os ensaios de cisalhamento direto convencional desta pesquisa, as amostras foram compactadas dentro do equipamento com base nos parâmetros físicos da areia pura M0% ($\gamma_{dm\acute{a}x}=15,0 \text{ kN/m}^3$ e $w_{ot}=12,5\%$). As Figuras de 4.30 a 4.33 apresentam os resultados dos ensaios para quatro tensões normais, com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao

cisalhamento (coesão e ângulo de atrito efetivo). A Figura 4.30 apresenta a curva de resultados da relação do deslocamento horizontal (δ_x) *versus* tensão cisalhante (τ) para a areia utilizada.

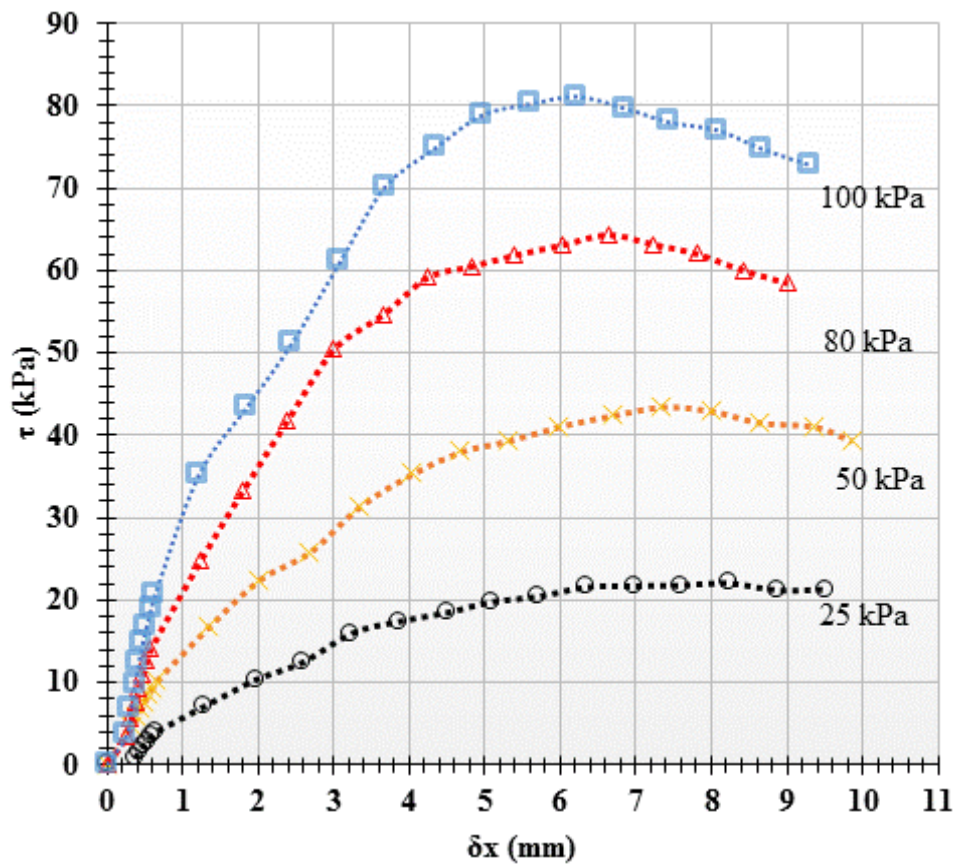


Figura 4.30 Curva de resultados do deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante (M0%).

É possível verificar que, à medida que a tensão confinante aumenta em função do deslocamento, que também aumenta, é gerada uma curva crescente até o deslocamento horizontal de 6,0 mm. Para a tensão normal de 100 kPa, após atingir o pico da tensão cisalhante igual a 80kPa, a curva apresenta uma diminuição nos valores de tensão cisalhante com o aumento do deslocamento vertical.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados dos parâmetros de resistência da areia estudada nesta pesquisa. Também foi apresentada a envoltória, representando a de pico que representa a tendência decrescente da resistência. A Figura 4.31 apresenta a curva da Envoltória de Mohr-Coulomb da areia (M0%), que é a relação entre a tensão normal (σ_n) *versus* a tensão cisalhante do solo estudado (τ). A partir do coeficiente angular da Equação da reta é possível calcular o ângulo de atrito efetivo igual a 39°, a coesão igual a zero e o coeficiente $R^2=0,99$.

Tabela 4.8 Parâmetros de resistência da areia estudada (M0%).

Tensão cisalhante pico (kPa)	Tensão normal (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R ²
22	25	0	39	0,99
44	50			
65	80			
80	100			

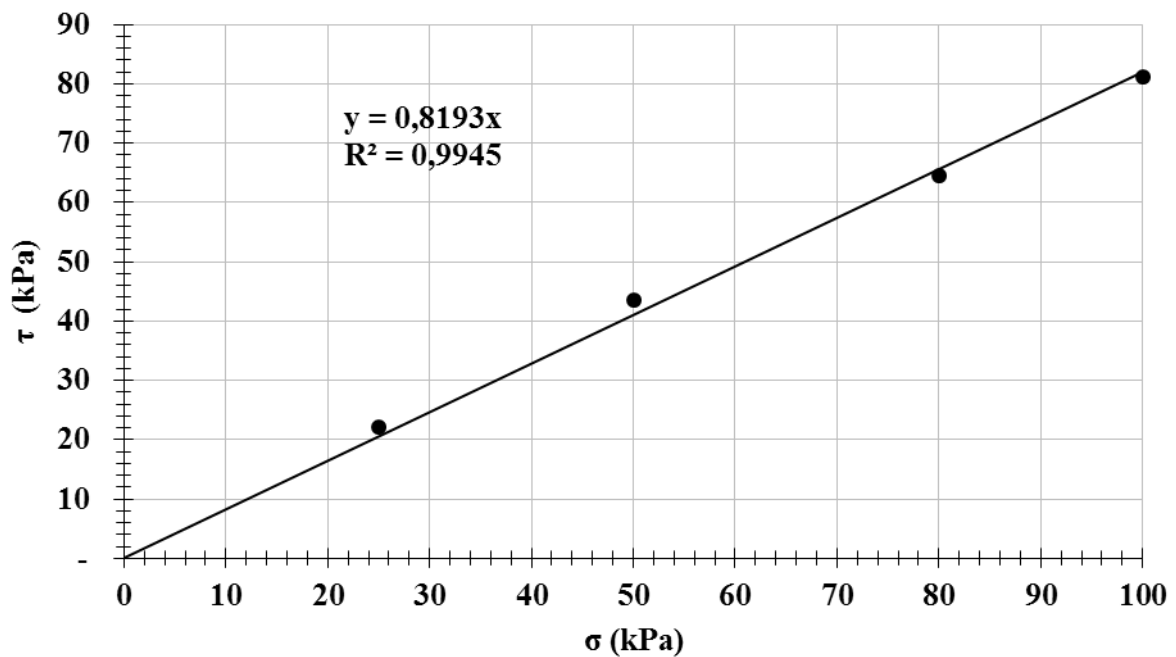


Figura 4.31 Envoltória de Mohr-Coulomb (M0%).

A Figura 4.32 exibe o resultado da variação do comportamento entre o deslocamento horizontal (δ_x) e o deslocamento vertical (δ_y). É possível verificar que, à medida que aumenta a tensão normal, ocorre maior expansão e menor contração. Para a tensão normal de 100 kPa, em aproximadamente, 7 mm de deslocamento horizontal, o valor do deslocamento vertical estabiliza em 0,48 mm.

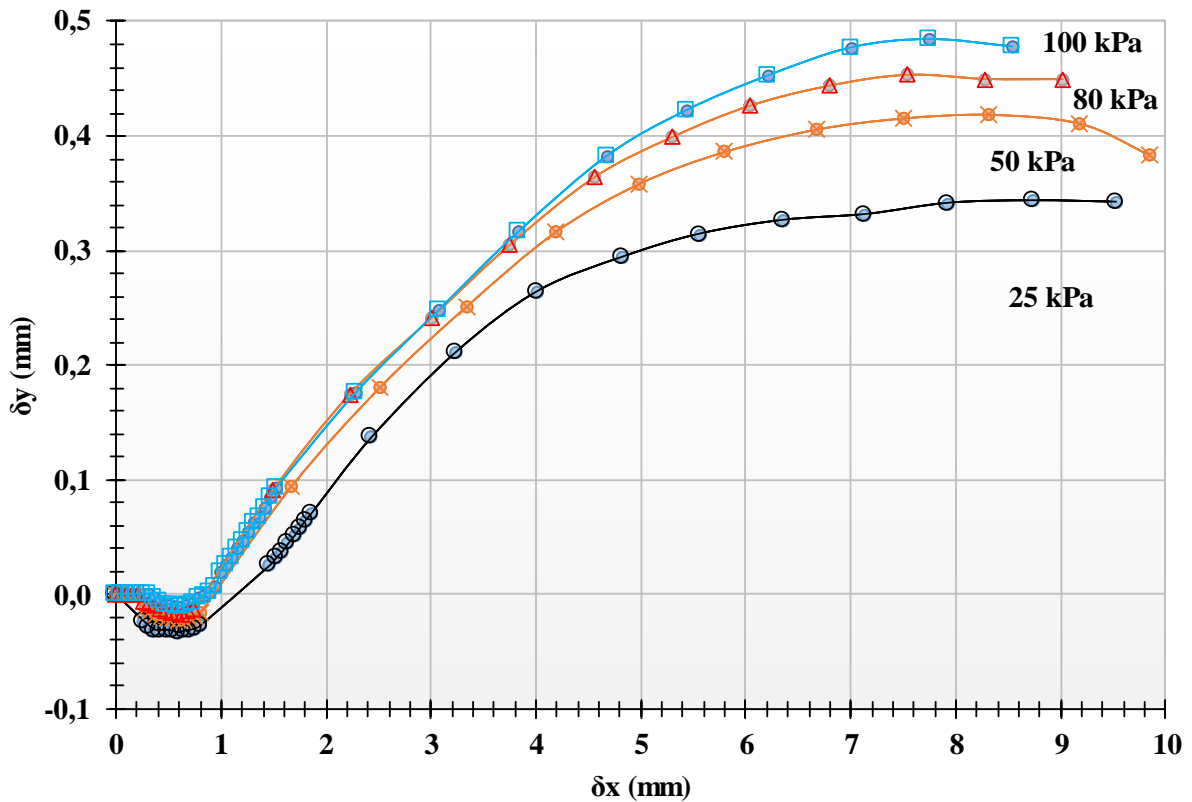


Figura 4.32 Curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical (M0%).

Verifica-se que as curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical demonstram um comportamento de compressão até 4 mm e em seguida crescente, caracterizando expansão, uma vez que ocorreu tendência de estabilização para todas as tensões normais, exceto para 80 kPa, pelo fato de o material estudado não ter coesão. O deslocamento vertical máximo atingiu 0,48 mm para a tensão normal de 100 kPa.

A Figura 4.33 apresenta a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio raiz (t) *versus* o deslocamento vertical (δ_v), que caracteriza um adensamento médio de 4,3 mm para valores a partir de 3 segundos, com uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Com isso, observa-se que os deslocamentos verticais estavam estáveis para o início do cisalhamento. Conforme a Figura 4.33, é possível calcular o tempo menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}). O valor máximo do deslocamento vertical é igual a 4,3 mm para 100 kPa de tensão normal.

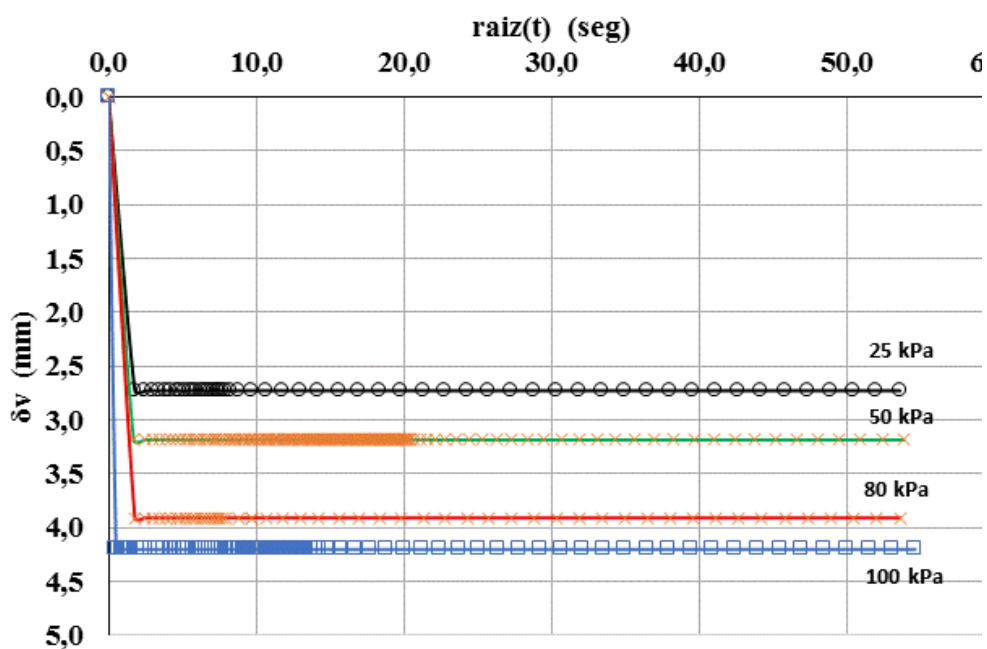


Figura 4.33 Raiz (t) versus deslocamento vertical (M0%).

A Tabela 4.9 apresenta as propriedades das areias empregadas nas pesquisas destacadas na Referencia Bibliográfica como valores comparativos. É importante destacar que os resultados encontrados nesta pesquisa estão bem próximos dos resultados pesquisados.

Tabela 4.9 Propriedades das areias empregadas em outras pesquisas.

Referência	γ (kN/m ³)	ρ (g/cm ³)	Parâmetros de resistência	
			c' (KPa)	ϕ (graus)
Tatlısoz et al. (1998)	16,8	1,713	2	34
Attom (2006)	15,5	1,581	-	25
	15,9	1,621	-	28
	16,6	1,693	-	36
Edinçliler et al. (2004)	15,3	1,560	7	33
Edinçliler et al. (2007)	15,3	1,560	7	33
Ghazavi (2004)	14-14,5	1,427 - 1,478	31	37
Franco (2012)	24,6	2,508	8	31
Ghazavi et al. (2011)	-	-	1	30
Zornberg et al., 2004)	-	-	8	37
Cabalar (2011a)	-	-	-	44
Cabalar (2011b)	-	-	-	37

Tabela 4.19 Propriedades das areias empregadas em outras pesquisas. (continuação).

Chebet et al. (2014)		23,5	2,400	13	22
Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires (2008)	(3) Bernal (1995)	-	-	-	45
		-	-	-	24
	(4) Humphrey (1992)	-	-	9	25
		-	-	11	19
		-	-	8	21
	-	-	4	26	
Balachowski & Gotteland (2007)		-	-	32 - 60	32 - 42
Este autor (2018)		15,0	1,530	5	35

4.3.2. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DE MÉDIA ESCALA

Para realizar os ensaios de cisalhamento direto em média escala em misturas compostas (de areia pura M0% e de pedaços de borracha puro M100%), procedeu-se a preparação das mesmas a partir dos parâmetros físicos de compactação: peso específico máximo e umidade ótima para as duas misturas ($\gamma_{dm\acute{a}x}=15,0$ kN/m³ e $w_{ot}=12,5\%$ para areia e ($\gamma_{dm\acute{a}x}= 4,70$ kN/m³ e $w_{ot}=7,5\%$ para a borracha).

A Figura 4.34 apresenta a curva dos resultados da relação do deslocamento horizontal (δ_x) *versus* a tensão cisalhante (τ) para a areia utilizada. Constata-se que, à medida que aumenta a tensão cisalhante, ocorre também um aumento do deslocamento horizontal, gerando uma curva crescente até o deslocamento horizontal de aproximadamente 30,0 mm. A partir deste ponto atingiu a tensão cisalhante máxima igual a 58 kPa para a tensão normal de 100 kPa. Esse comportamento de variação com a tensão confinante se repetiu em cada uma das quatro tensões normais.

É possível destacar que não foi encontrado valor de tensão cisalhante de pico nas misturas M10% a M50%, porque os resultados apresentaram uma tendência de aumento da tensão confinante, à medida que aumentou o deslocamento horizontal. Os resultados obtidos para as misturas M10% a M50% foram possíveis devido ao fato de que as amostras atingirem compacidade média, pois o processo de compactação das amostras não foi suficiente para atingir a compactação desejada.

Assim, esta pesquisa apresentou grau de compactidade (D_R) entre 0,60 e 0,70 de todas as amostras de misturas utilizadas.

Quando se compara os resultados desta pesquisa, em que foram utilizados areia e pedaços de borracha, com os estudos realizados por Suárez (2016) e Chrusciak (2013), em que foram utilizados solo argiloso do DF e pedaços de borracha, pode-se destacar que ambos usaram mistura com percentual de borracha inferior ao utilizado nesta pesquisa, ou seja, de até 10%. Um dos diferenciais entre a areia e a argila é que segundo o autor Souza Pinto (2006) descreve a definição de areia como um solo em que a fração é superior a 50% de grossos. E somente areias com 20%, 30% ou 40% de finos têm comportamento muito influenciado pela fração de argila. Seu modelo de comportamento é mais semelhante ao das argilas.

A resistência da areia é medida por meio dos resultados do ângulo de atrito efetivo. É possível observar, na Tabela 13.1, constante do livro de Souza Pinto (2006), que as areias malgraduadas e com grãos arredondados apresentam compactidade de 35°, quando estão compactos, e de 28° quando estão fofas. Os resultados desta pesquisa apresentaram valores em torno de 33°. Destacamos que as misturas M40%, M50% e M100% apresentaram valores de 30°, o que nos garante afirmar que a compactidade é média.

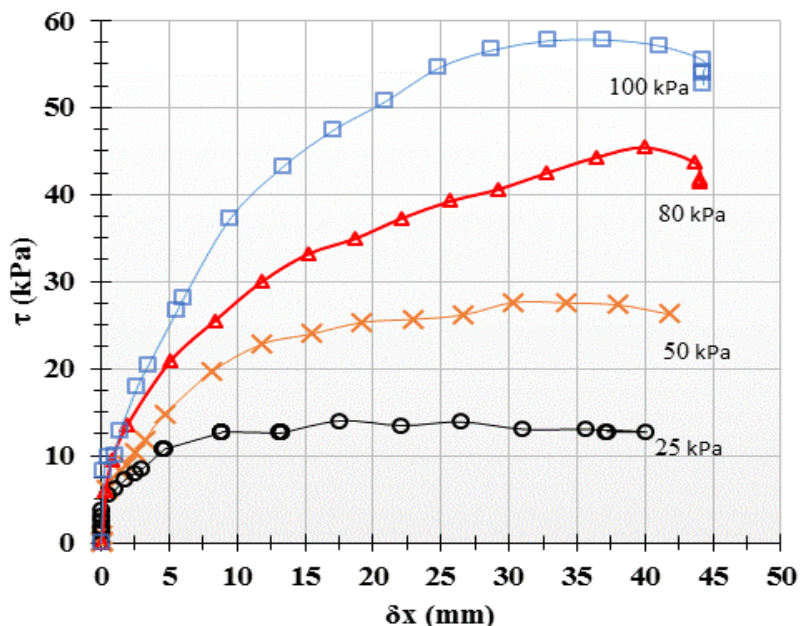


Figura 4.34 Curva deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante para a areia pura.

Na Tabela 4.10, é possível observar os resultados dos parâmetros de resistência da areia (M0%), resultado registrado nesta pesquisa a partir da envoltória devido ao maior ponto apresentando tendência de diminuição.

Por sua vez, a Figura 4.35 apresenta a Envoltória de Mohr-Coulomb desta areia, que é a relação entre a tensão normal (σ_n) *versus* a tensão cisalhante do solo estudado (τ) e os resultados das tensões a volume constante da areia (M0%). A partir do coeficiente angular da Equação da reta foi possível calcular o ângulo de atrito efetivo igual a 30°, a coesão igual a zero e o coeficiente $R^2=0,99$.

Tabela 4.10 Parâmetros de resistência da areia pura.

Tensão cisalhante pico (kPa)	Tensão normal (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R ²
13	25	0	30	0,99
26	50			
47	80			
60	100			

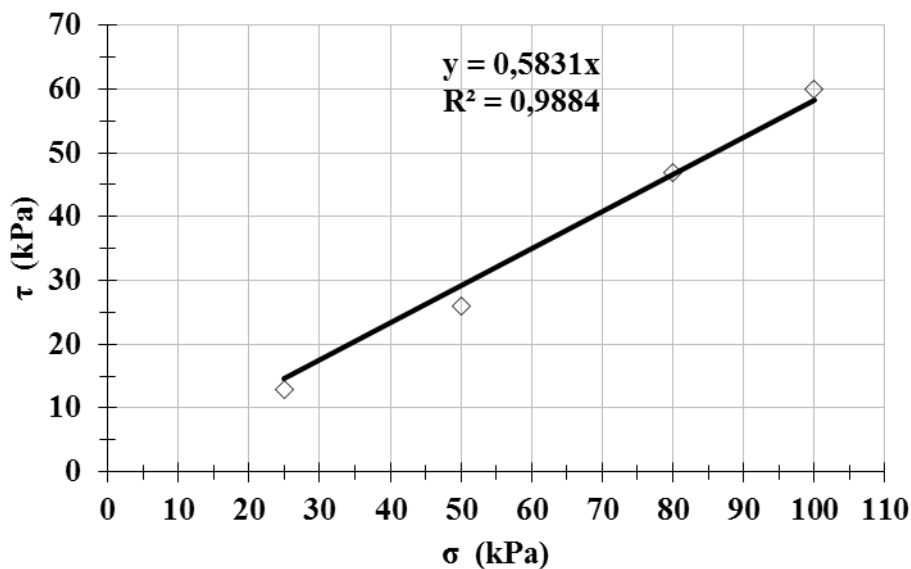


Figura 4.35 Envoltória de Mohr-Coulomb para a areia pura.

A Figura 4.36 apresenta o resultado da variação do comportamento entre o deslocamento horizontal (δ_x) *versus* o deslocamento vertical (δ_y) de areia (M0%). Com esses resultados foi possível verificar uma relação de proporcionalidade entre aumento da tensão normal deslocamento horizontal e vertical. Acontece que o deslocamento vertical tende a estabilizar a

sua variação máxima em 4,8 mm a partir 42,0 mm de deslocamento horizontal. Comparando com o ensaio convencional, foi possível observar comportamentos semelhantes.

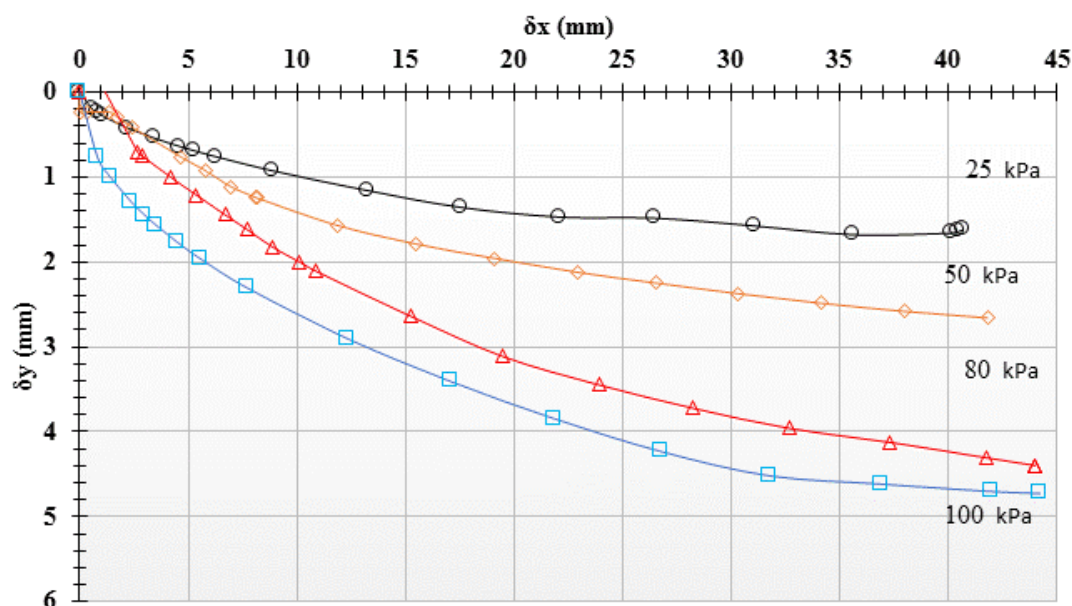


Figura 4.36 Curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical para a areia pura.

A partir dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa e apresentados na Figura 4.36 foi analisado o comportamento da areia (M0%), foi possível constatar que as curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical demonstram um comportamento de compressão para tensões maiores que 25 kPa e não ocorreu expansão pelo fato da compactação ter atingido uma compacidade média devido à presença da borracha ao processo. É possível observar que, para a tensão normal de 25 kPa, há uma tendência de compressão e em seguida uma leve tendência à expansão na curva de 25kPa. O deslocamento vertical máximo atingiu 5,0 mm para a tensão normal de 100 kPa.

É possível perceber na Figura 4.37 a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio raiz (t) *versus* o deslocamento vertical (δ_v), que caracteriza um adensamento médio máximo de 33,0 mm para valores a partir de 5 segundos. As curvas de adensamento das quatro tensões normais apresentaram uma estabilidade de adensamento com menos de 5 segundos de ensaio. Conforme Figura 4.37, é possível calcular valor menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}). Por fim, o valor máximo do deslocamento vertical é igual a

33,0 mm para 100 kPa de tensão normal. É possível calcular valor menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}).

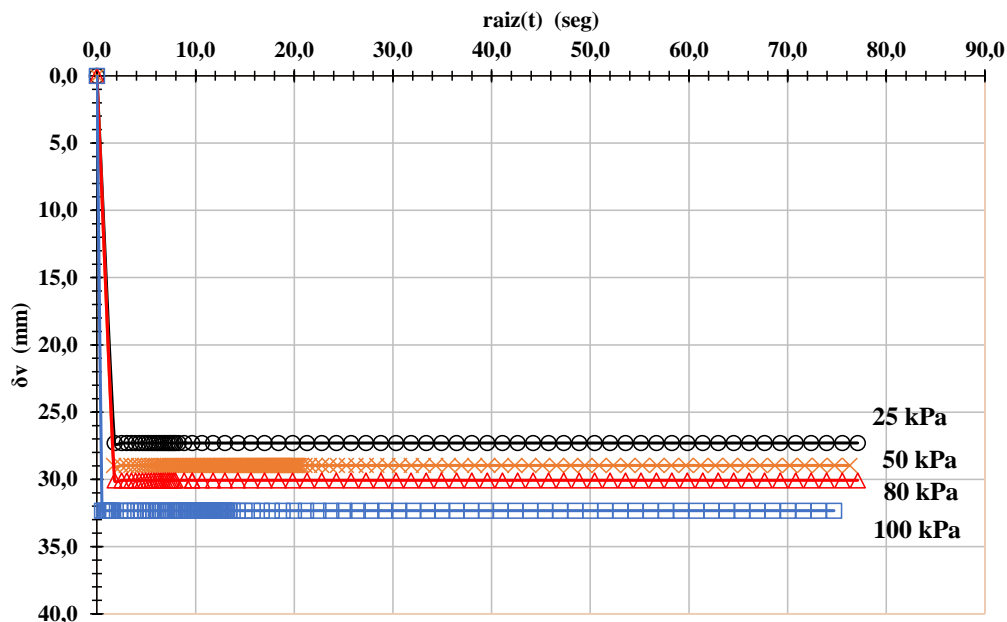


Figura 4.37 Raiz (t) *versus* deslocamento vertical para a areia pura.

A partir dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa e apresentados na Figura 4.38, foi analisado o comportamento da borracha (M100%) e foi possível constatar que, à medida que se aumenta a tensão cisalhante, ocorre também um incremento do deslocamento horizontal, gerando uma curva crescente até o deslocamento horizontal de 40,0 mm. A partir deste ponto, atingiu-se a tensão cisalhante máxima igual a 48 kPa. Esta apresenta uma tendência de se manter constante para a tensão normal de 100 kPa. Esse comportamento de variação com a tensão confinante se repetiu para cada uma das quatro tensões normais. Estes resultados caracterizam o comportamento da borracha estudada sob o efeito de carregamento normal. Não foi encontrado valor de tensão cisalhante de ruptura, de pico, uma vez que as amostras não apresentaram tendência a romper devido à característica elástica da borracha que tende a suportar e absorver tensões.

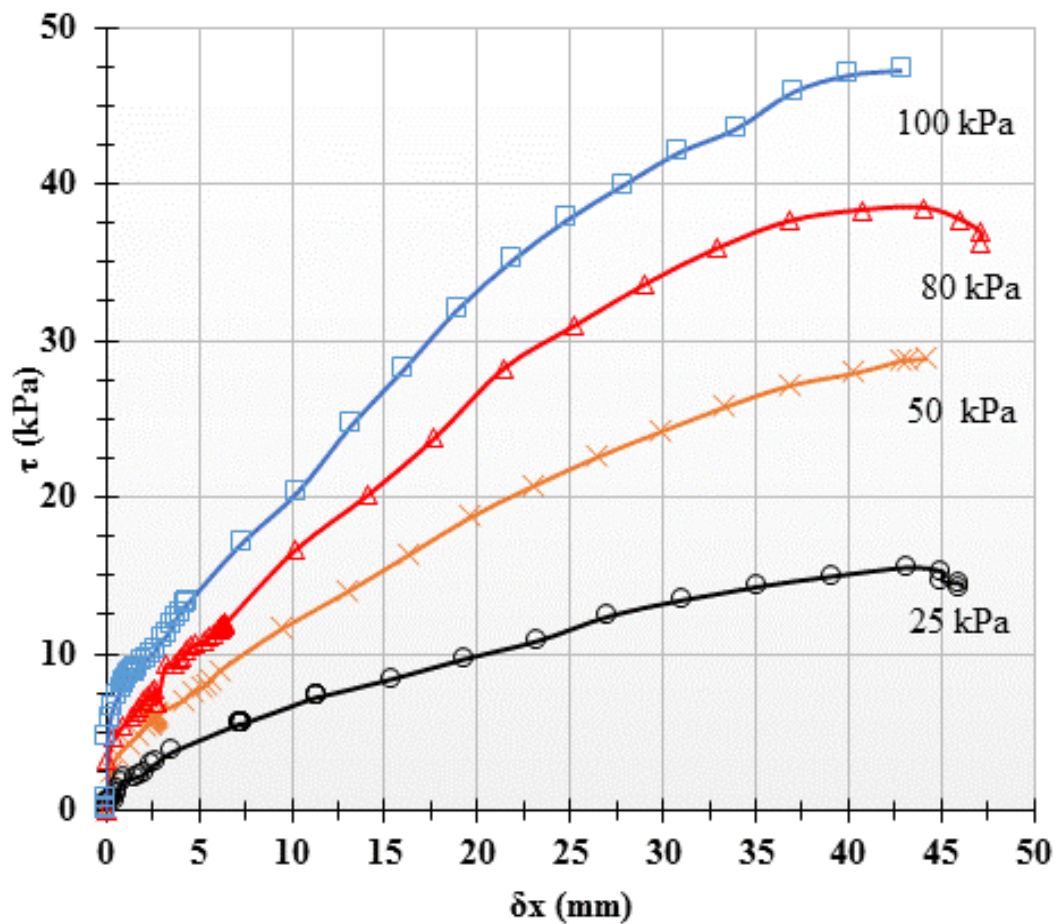


Figura 4.38 Curva deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante para a borracha pura.

Os resultados dos parâmetros de resistência da borracha (M100%) estão presentes na Figura 4.39 e na Tabela 4.11. A curva da Envoltória de Mohr-Coulomb da borracha (que é a relação entre a tensão normal (σ_n) *versus* a tensão cisalhante (τ) do solo estudado) encontra-se registrada na Figura 4.39.

Tabela 4.11 Parâmetros de resistência para a borracha pura.

Tensão cisalhante pico (kPa)	Tensão normal (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R ²
17	25	8	21	0,99
29	50			
38	80			
47	100			

É possível verificar o coeficiente angular da Equação da reta e calcular o ângulo de atrito efetivo igual a 21°, bem como a coesão igual a 8 kPa e o coeficiente $R^2=0,99$. Isso pode ser verificado na Figura 4.39.

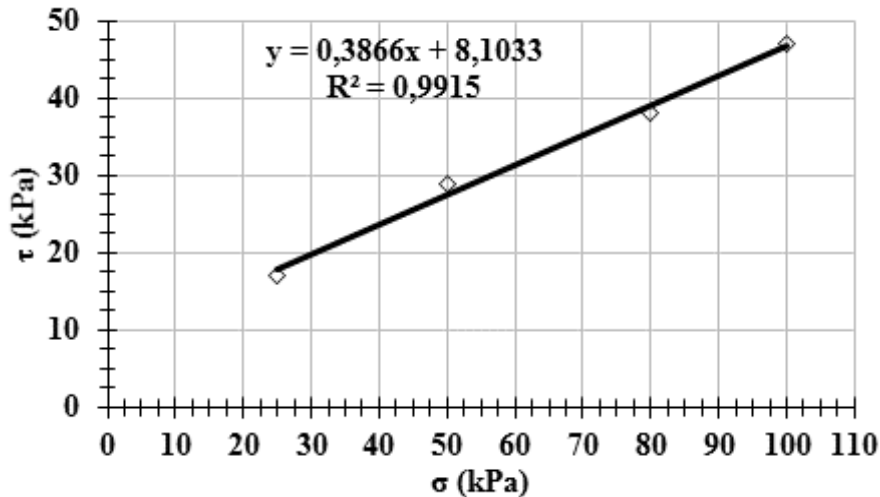


Figura 4.39 Envoltória de Mohr-Coulomb para a borracha pura.

O resultado da variação do comportamento entre o deslocamento horizontal (δ_x) versus o deslocamento vertical (δ_y) para a mistura (M100%) é apresentado na Figura 4.40. Com os resultados, foi possível verificar que, à medida em que se aumenta a tensão normal, aumenta, também, o deslocamento. Ressalta-se que o deslocamento vertical e de compressão e apresenta tendência de diminuição, com a sua variação máxima em 25,0 mm. Observa-se, ainda na Figura 4.40, que, a partir 40,0 mm de deslocamento horizontal o deslocamento vertical tende a se estabilizar e a se manter.

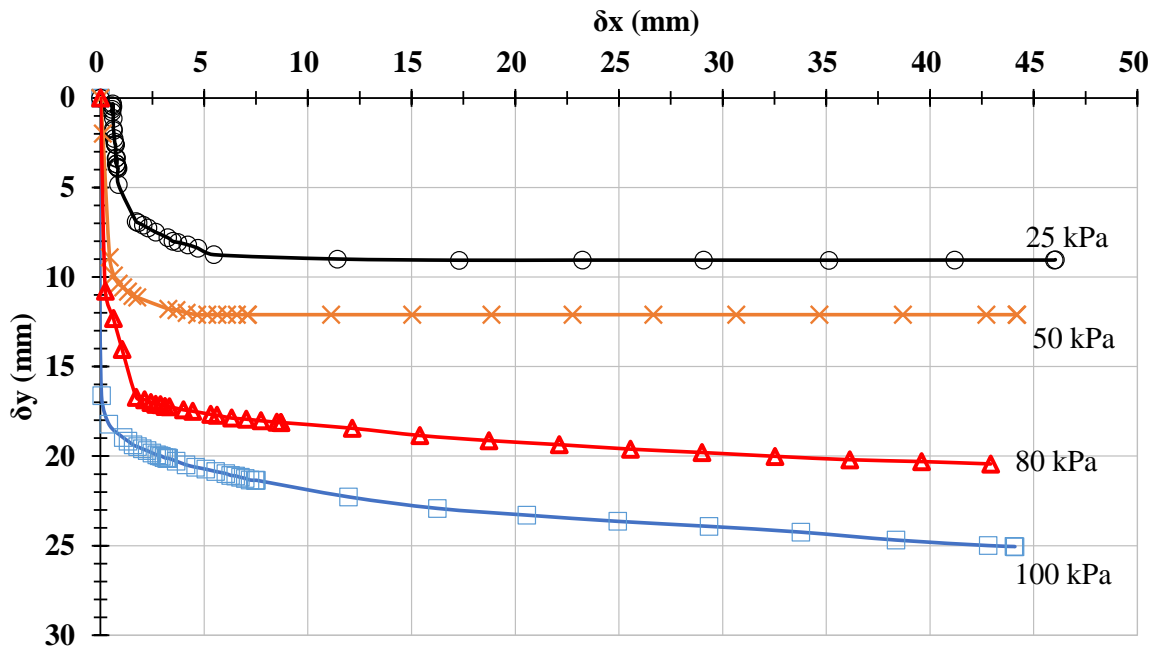


Figura 4.40 Curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical para a borracha pura.

A Figura 4.41 apresenta a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio raiz(t) ao deslocamento vertical (δ_v), que caracteriza um adensamento médio máximo de 42,0 mm para valores a partir de 5 segundos na tensão normal de 100 kPa.

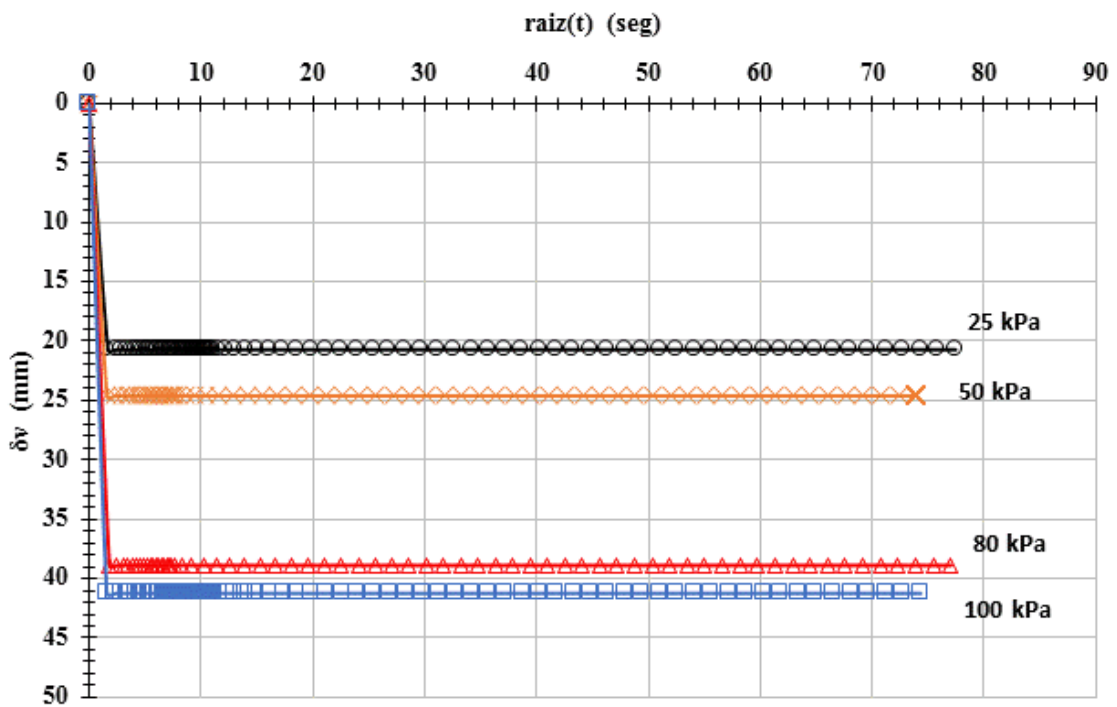


Figura 4.41 Raiz (t) *versus* deslocamento vertical para a amostra com 100% borracha.

A Figura 4.41 demonstra o comportamento da borracha (M100%) após a compactação. A partir desses resultados, foi possível constatar três comportamentos: (i) as curvas de adensamento das quatro tensões normais apresentam uma estabilidade de adensamento com menos de 5 segundos de ensaio; (ii) conforme Figura 4.41, é possível calcular valor menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}) e (iii) o valor máximo do deslocamento vertical é igual a 42,0 mm para 100kPa de tensão normal.

A Figura 4.42 apresenta a curva dos resultados da relação do deslocamento horizontal (δ_x) *versus* tensão cisalhante (τ) para a mistura com 10% de borracha utilizada nesta pesquisa. Assim como em outros casos, como esperado, à medida que se aumenta a tensão cisalhante, ocorre também um aumento do deslocamento horizontal, gerando uma curva crescente até o deslocamento horizontal de 43,0 mm, aproximadamente.

A partir desse ponto, atingiu-se a tensão cisalhante máxima igual a 58 kPa e se manteve constante para a tensão normal de 100 kPa. Esse comportamento de variação com a tensão confinante se repetiu em cada uma das quatro tensões normais. Novamente, não foi observado valor de tensão cisalhante de ruptura de pico, uma vez que as amostras não rompem devido a característica elástica dos pedaços de borracha (M10%) que tende a absorver a tensão.

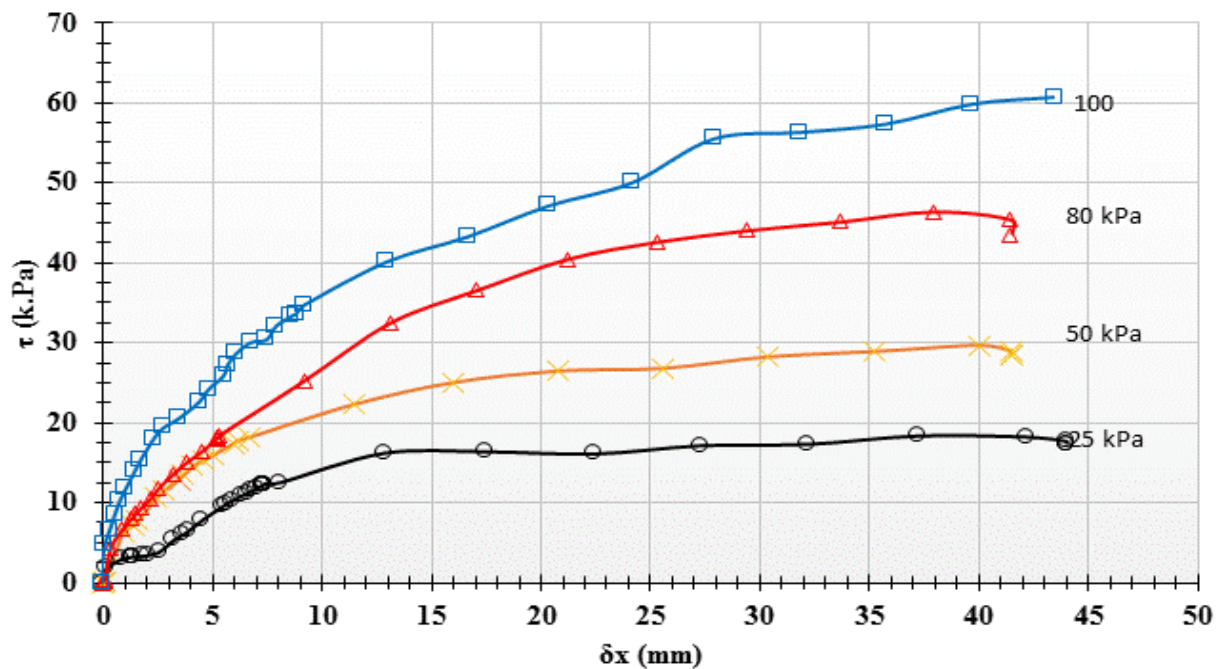


Figura 4.42 Curva deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante para a mistura com 10% de borracha.

A Tabela 4.12 apresenta os resultados dos parâmetros de resistência da mistura com 10% de borracha na mistura. A Figura 4.43 apresenta a curva da Envoltória de Mohr-Coulomb desta mistura. A partir dos resultados apresentados na Figura 4.43 foi possível verificar o coeficiente angular da Equação da reta e calcular o ângulo de atrito efetivo igual a 32°, a coesão igual a 13 kPa e o coeficiente $R^2=0,99$.

Tabela 4.12 Parâmetros de resistência para a mistura com 10% de borracha.

Tensão cisalhante pico (kPa)	Tensão normal (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R^2
18	25	1	31	0,99
28	50			
48	80			
61	100			

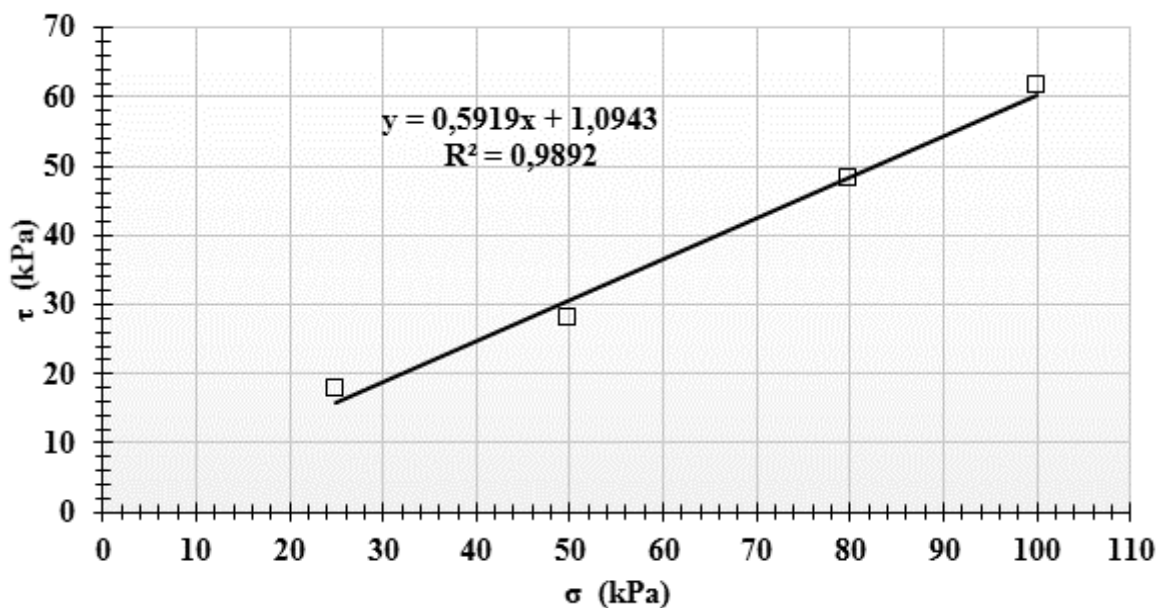


Figura 4.43 Envoltória de Mohr-Coulomb (M10%).

A Figura 4.44 apresenta o resultado da variação do comportamento entre o deslocamento horizontal (δ_x) versus o deslocamento vertical (δ_y) para a mistura com 10% de borracha.

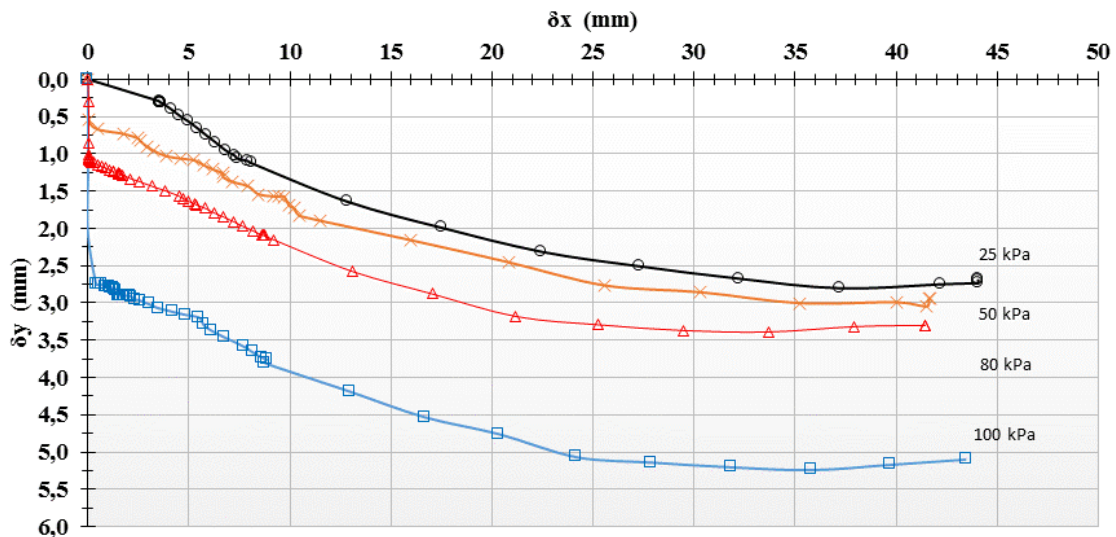


Figura 4.44 Curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical M10% de borracha.

Da análise do comportamento da mistura com 10% de borracha, demonstrado na Figura 4.44, é possível verificar que as curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical demonstram um comportamento crescente de contração, com expectativa de estabilização nas tensões acima de 25 kPa. Já a tensão de 25 kPa apresenta uma tendência à expansão com pequena diminuição do deslocamento vertical. O deslocamento vertical máximo atingiu 5,3mm para a tensão normal de 100 kPa.

A Figura 4.45 apresenta a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio raiz (t) ao deslocamento vertical (δ_v) que caracteriza um adensamento médio máximo de 33,0 mm para valores a partir de 5 segundos na tensão normal de 100 kPa.

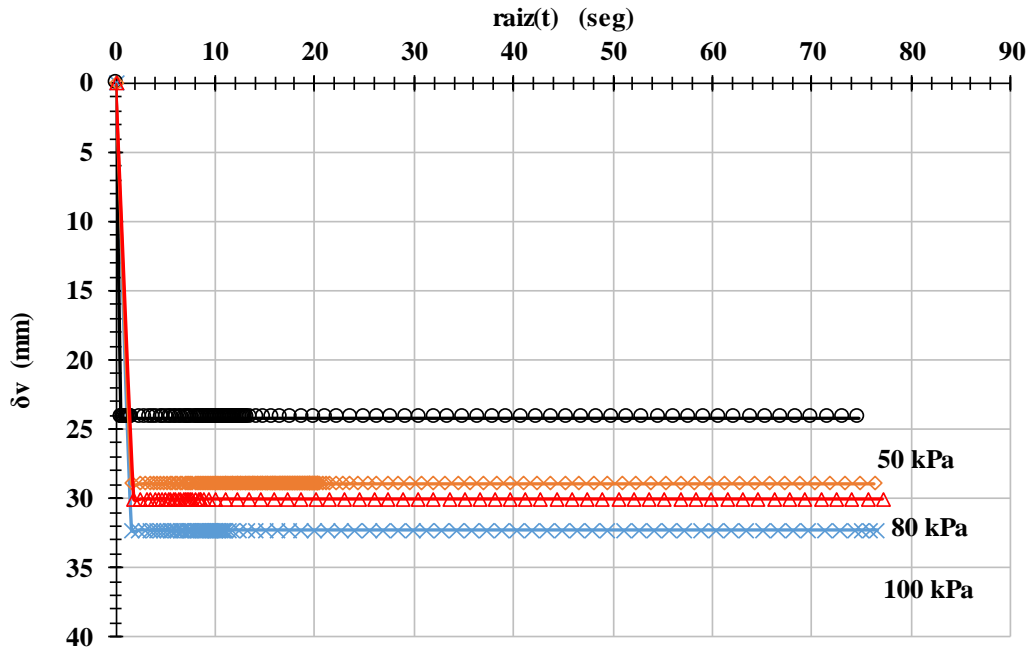


Figura 4.45 Raiz (t) versus deslocamento vertical (M10%).

Conforme observado na Figura 4.45 que demonstra o comportamento da mistura com 10% de borracha, é possível constatar que as amostras após a compactação, apresentaram trincas, o que influenciou nos resultados obtidos. A curva de adensamento das quatro tensões normais apresentou uma estabilidade de adensamento com menos de 5 segundos de ensaio. Conforme Figura 4.45, é possível calcular valor menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}).

As Figuras de 4.46 a 4.49 apresentam os resultados dos ensaios para quatro tensões normais, com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito efetivo). A Figura 4.46 apresenta a curva dos resultados da relação do deslocamento horizontal (δx) com tensão cisalhante (τ) para a mistura M20% utilizada nesta pesquisa.

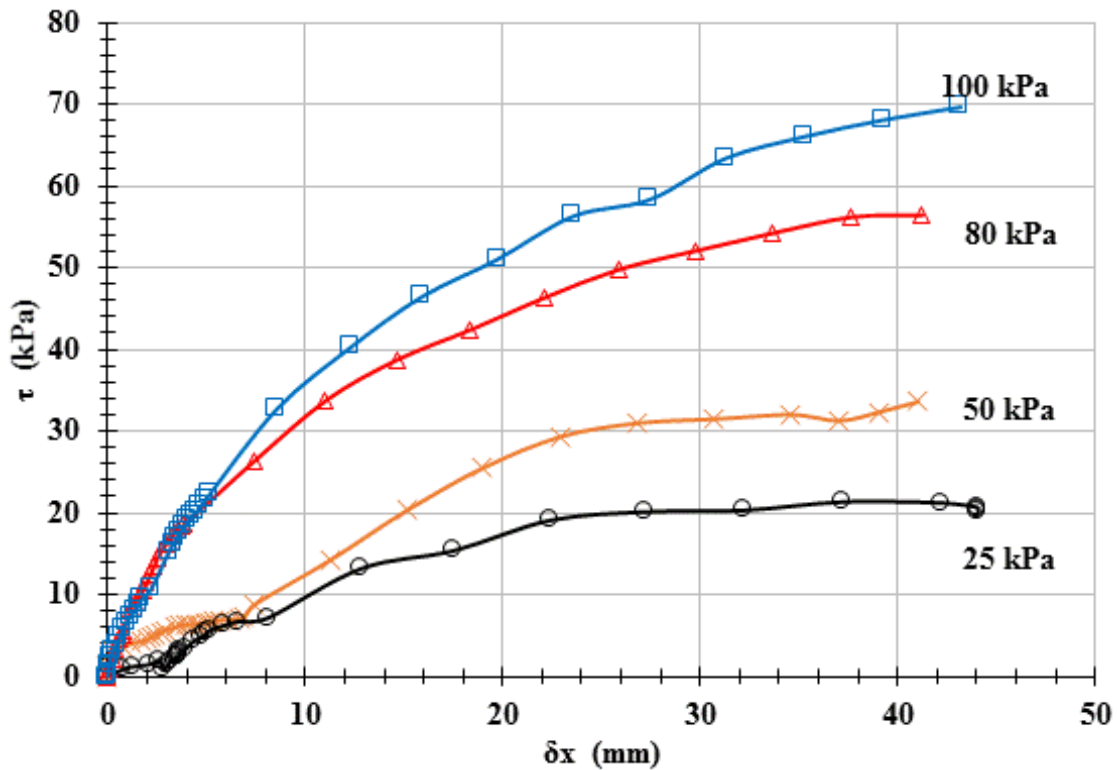


Figura 4.46 Curva de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante (M20%).

Na Figura 4.46, percebe-se que foi analisado o comportamento da mistura M20%. Nesta mistura, foi possível constatar que, à medida que se aumenta a tensão cisalhante, ocorre também um aumento do deslocamento horizontal, gerando uma curva crescente, até o deslocamento horizontal de 43,0 mm. A partir desse ponto, a tensão cisalhante máxima atingiu 70 kPa e tende a se manter constante para a tensão normal de 100 kPa. Esse comportamento de variação do valor conforme a tensão confinante se repetiu para cada uma das quatro tensões normais. Estes resultados caracterizam o comportamento da mistura estudada sob o efeito de carregamento normal. Não foi encontrado valor de tensão cisalhante de ruptura, de pico, uma vez que as amostras não rompem devido à condição elástica do material.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados dos parâmetros de resistência da mistura M20% estudada nesta pesquisa. E a Figura 4.47 apresenta a curva da Envoltória de Mohr-Coulomb da mistura, que é a relação entre a tensão normal (σ_n) e a tensão cisalhante (τ) do solo estudado.

Tabela 4.13 Parâmetros de resistência (M20%).

Tensão cisalhante pico (kPa)	Tensão normal (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R ²
21	25	3	33	0,99
34	50			
57	80			
70	100			

Os resultados do coeficiente angular da Equação da reta estão presentes na Figura 4.47. Nela está também o cálculo do ângulo de atrito efetivo (igual a 33°), além da coesão (igual a 3 kPa e do coeficiente R²=0,99). É importante destacar que o ângulo de atrito apresentou um aumento de 30° (M10%) para 33° (M20%), devido ao fato de o aumento do teor de borracha quebrar a agregação da areia com a presença de pedaços de borracha.

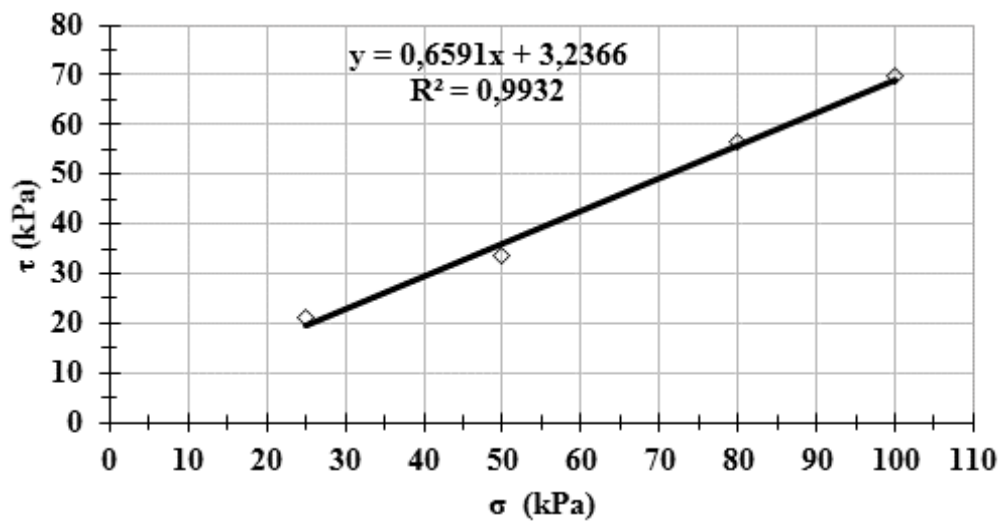


Figura 4.47 Envoltória de Mohr-Coulomb (M20%).

O resultado da variação do comportamento entre o deslocamento horizontal (δx) versus o deslocamento vertical (δy) para a mistura M20%, está apresentado na Figura 4.48.

Com os resultados, foi possível verificar que, à medida que se aumenta a tensão normal, aumenta-se, também, será o deslocamento horizontal e vertical, mas o deslocamento vertical tende a estabilizar a sua variação máxima em 6,9 mm a partir 44,0 mm de deslocamento horizontal, conforme o esperado.

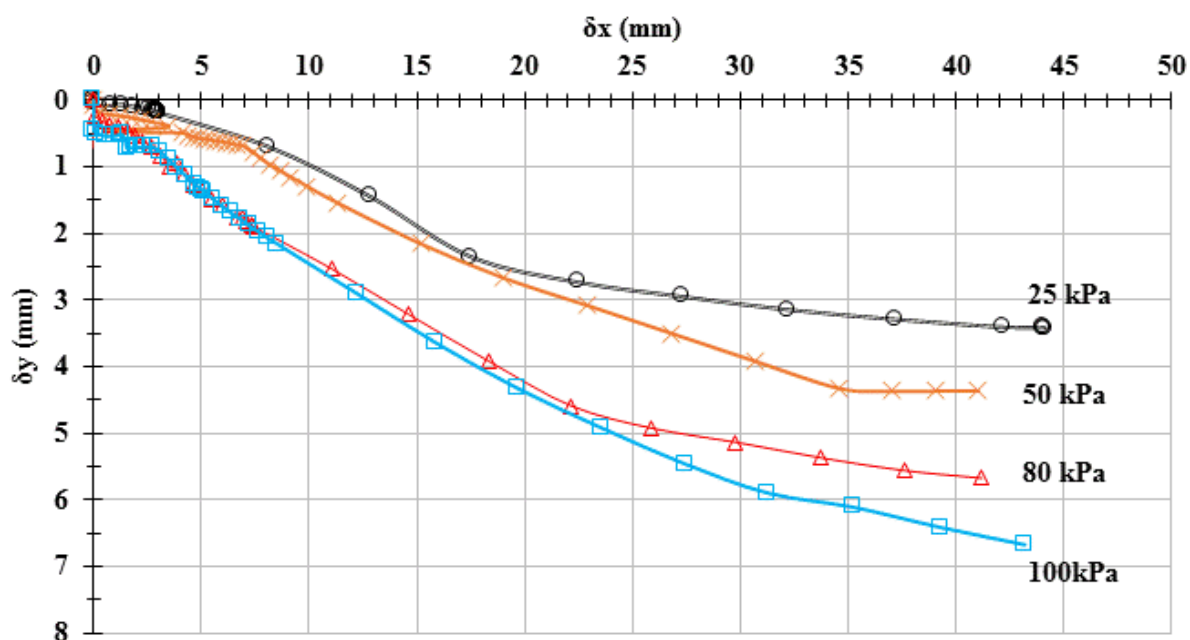


Figura 4.48 Curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical (M20%).

Na Figura 4.48 estão registrados os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa. Nela é possível analisar o comportamento da mistura M20% e constatar que as curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical demonstram um comportamento crescente, com expectativa de estabilização pelo fato de o material estudado ter 20% de borracha.

A Figura 4.49 apresenta a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio raiz (t) *versus* o deslocamento vertical (δ_v), que caracteriza um adensamento médio máximo de 28,0 mm para valores a partir de 5 segundos na tensão normal de 100 kPa. Observa-se que para as tensões normais de 80 e 100 kPa ocorreu pouca diferença nos deslocamentos verticais e isto se deve a operação do equipamento.

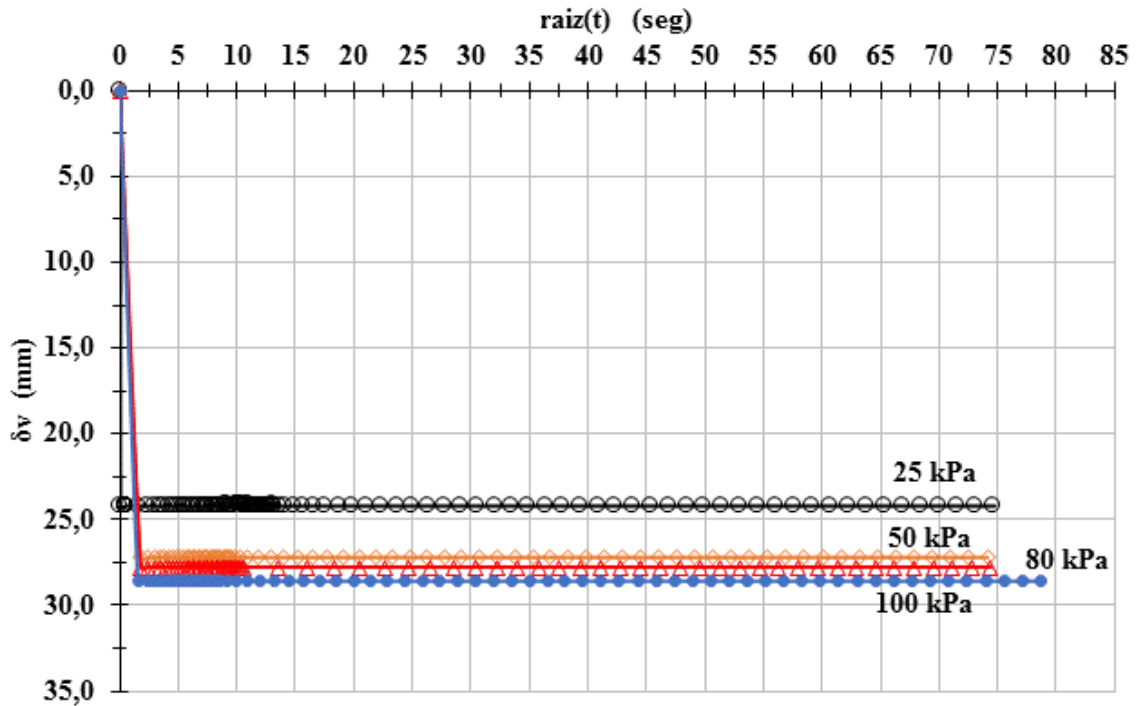


Figura 4.49 Raiz (t) versus deslocamento vertical (M20%).

O comportamento da mistura M20% está presente na Figura 4.49. É possível constatar, após a compactação, apresentaram muitas trincas, fato este que influenciou nos resultados obtidos. As curvas de adensamento das quatro tensões normais apresentaram uma estabilidade de adensamento com menos de 5 segundos de ensaio. Conforme Figura 4.49, é possível calcular valor menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}).

As Figuras de 4.50 a 4.53 apresentam os resultados dos ensaios para quatro tensões normais, com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito efetivo). A Figura 4.50 apresenta a curva dos resultados da relação do deslocamento horizontal (δx) versus tensão cisalhante (τ) para a mistura M30% utilizada nesta pesquisa.

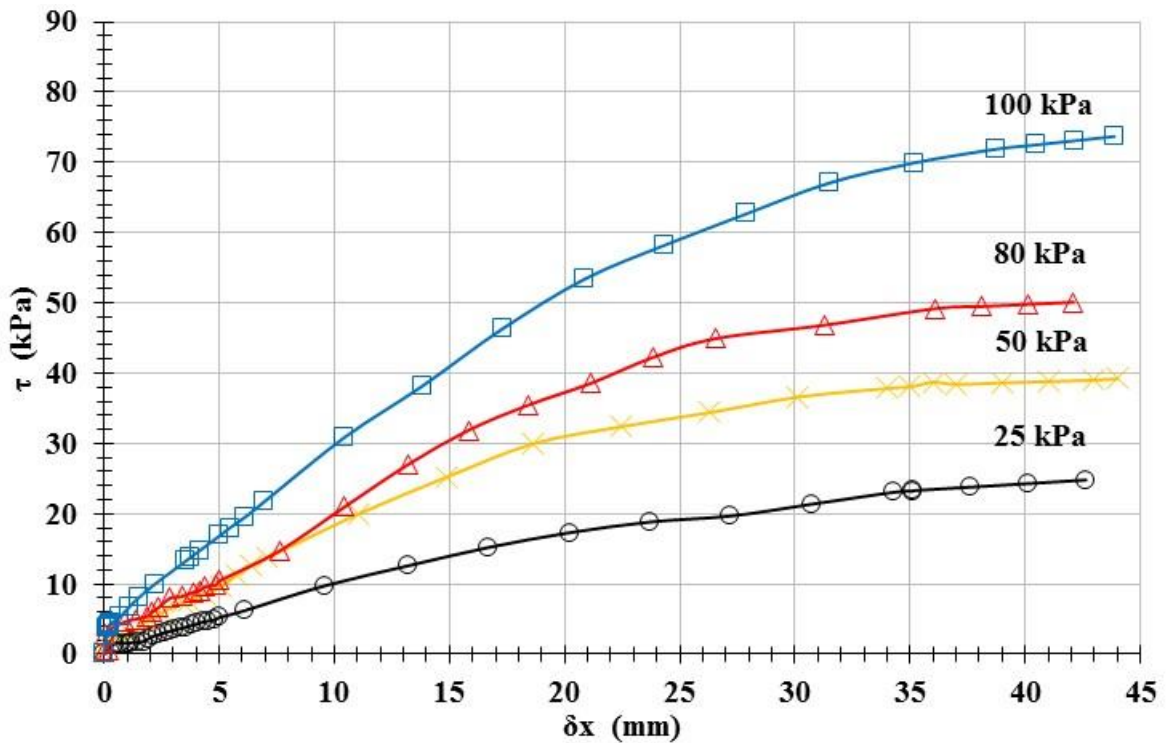


Figura 4.50 Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (M30%).

A Figura 4.50 demonstra os resultados dos ensaios realizados. De acordo com estes ensaios, é possível analisar o comportamento da mistura M30% e é possível constatar que, à medida que se aumenta a tensão cisalhante, ocorre, também, um aumento do deslocamento horizontal, gerando uma curva crescente até o deslocamento horizontal de 43,0 mm. A partir desse ponto, atingiu-se a tensão cisalhante máxima igual a 74 kPa e tende a se manter constante para a tensão normal de 100 kPa. Esse comportamento de variação do valor conforme a tensão confinante se repetiu em cada uma das quatro tensões normais. Estes resultados caracterizam o comportamento da mistura estudada sob o efeito de carregamento normal. Não foi encontrado valor de tensão cisalhante de ruptura de pico, uma vez que as amostras não rompem devido à limitação do material.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados dos parâmetros de resistência da mistura estudada nesta pesquisa. A Figura 4.51 apresenta a curva da Envoltória de Mohr-Coulomb da mistura M30%, que é a relação entre a tensão normal (σ_n) *versus* a tensão cisalhante (τ) do solo estudado.

Tabela 4.14 Parâmetros de resistência (M30%).

Tensão cisalhante pico (kPa)	Tensão normal (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R ²
23	25	8	31°	0,95
39	50			
49	80			
71	100			

Está presente, na Figura 4.51, o coeficiente angular da Equação da reta. Nela, é possível verificar o coeficiente angular da Equação da reta e foi possível calcular o ângulo de atrito efetivo igual a 31°, a coesão igual a 8 kPa e o coeficiente R²=0,95.

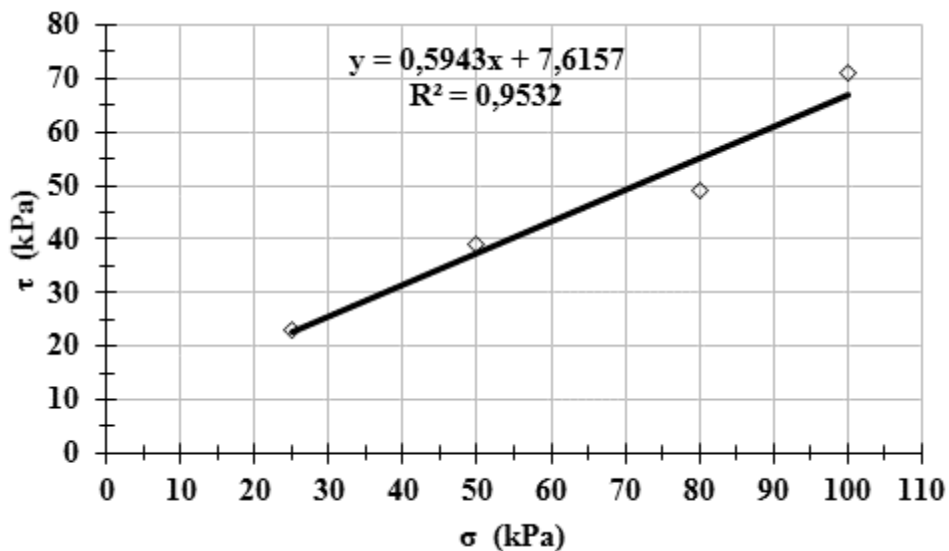


Figura 4.51 Envoltória de Mohr-Coulomb (M30%).

A Figura 4.52 apresenta o resultado da variação do comportamento entre o deslocamento horizontal (δ_x) versus o deslocamento vertical (δ_y) para a mistura M30%. Com os resultados, foi possível verificar uma proporcionalidade entre aumento da tensão normal e deslocamento horizontal e vertical. Porém, o deslocamento vertical tende a estabilizar a sua variação máxima em 4,1 mm, a partir de 21,0 mm de deslocamento horizontal, conforme o esperado. Este fato deve-se à presença da borracha na mistura, uma vez que apresenta comportamento elástico.

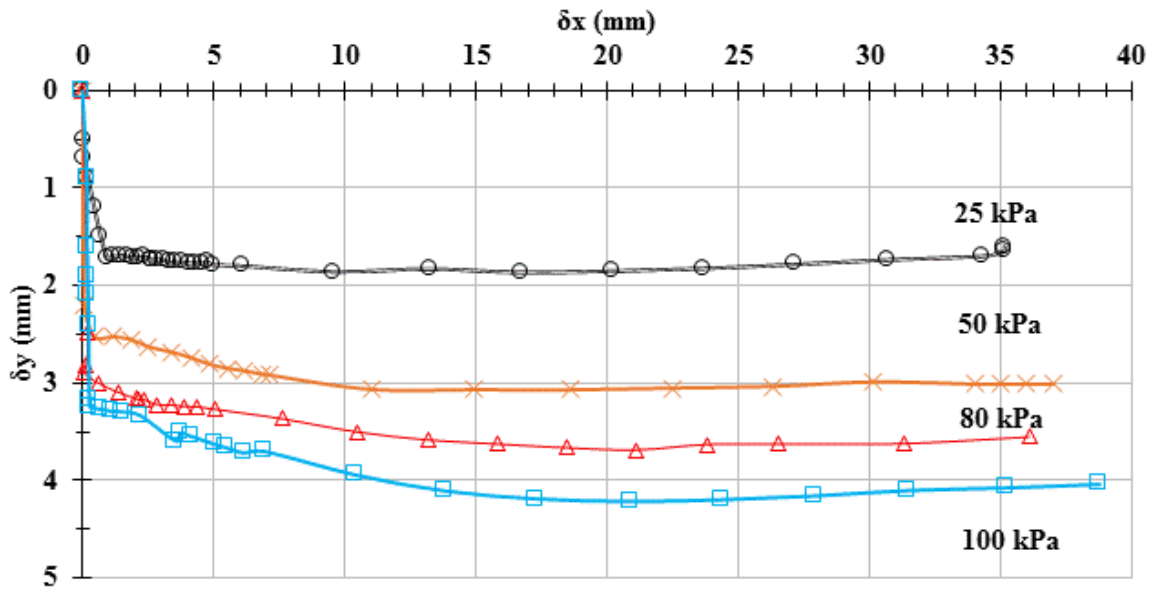


Figura 4.52 Relação deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical (M30%).

A Figura 4.53 apresenta a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio \sqrt{t} (seg) *versus* o deslocamento vertical (δ_v) que caracteriza um adensamento médio máximo de 28,0 mm para valores a partir de 5 segundos na tensão normal de 100 kPa.

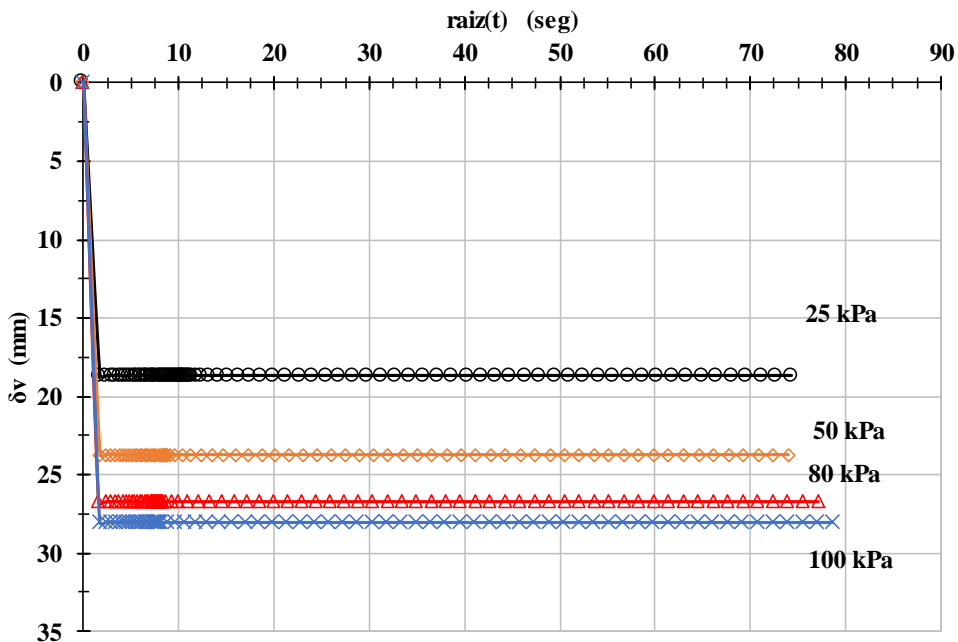


Figura 4.53 Raiz (t) *versus* deslocamento vertical (M30%).

Dos resultados apresentados na Figura 4.53, é possível analisar o comportamento da mistura M30%, em que foi possível constatar que as amostras, após a compactação, apresentaram muitas

trincas e este fato com certeza influenciou nos resultados obtidos. As curvas de adensamento das quatro tensões normais apresentaram uma estabilidade de adensamento com menos de 5 segundos de ensaio. Conforme Figura 4.53, é possível calcular valor menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}).

As Figuras de 4.54 a 4.57 apresentam os resultados dos ensaios para quatro tensões normais com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito efetivo). A Figura 4.54 apresenta a curva dos resultados da relação do deslocamento horizontal (δx) *versus* a tensão cisalhante (τ) para a mistura M40% utilizada nesta pesquisa.

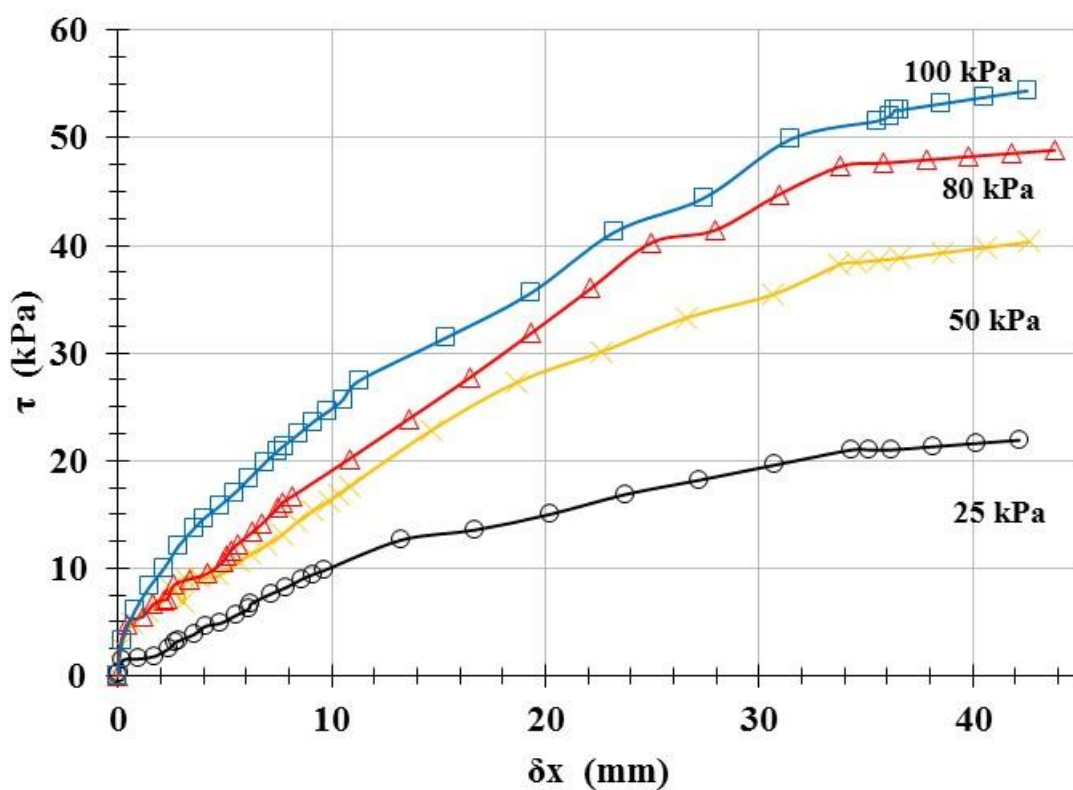


Figura 4.54 Curva de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante (M40%).

Enfatiza-se a importância de se registrar aqui a análise do comportamento da mistura M40%. Esta análise está registrada na Figura 4.54. De acordo com essa análise, é possível constatar que, à medida que aumenta a tensão cisalhante, aumenta, também, o deslocamento horizontal, gerando uma curva crescente até o deslocamento horizontal de 43,0 mm. A partir deste ponto, atingiu-se a tensão cisalhante máxima igual a 54 kPa. Nesse sentido, podemos afirmar que há uma tendência a se manter constante a tensão normal de 100 kPa. Esse comportamento de variação do valor conforme a tensão confinante se repetiu em cada uma das quatro tensões normais. Estes

resultados caracterizam o comportamento da mistura estudada sob o efeito de carregamento normal. Não foi encontrado valor de tensão cisalhante de ruptura, de pico, uma vez que as amostras não rompem devido a limitação do material.

A Tabela 4.15 apresenta os resultados dos parâmetros de resistência da mistura M40% estudada nesta pesquisa. A Figura 4.55 apresenta a curva da Envoltória de Mohr-Coulomb da mistura, que é a relação entre a tensão normal (σ_n) *versus* a tensão cisalhante (τ) do solo estudado.

Tabela 4.15 Parâmetros de resistência da mistura (M40%).

Tensão cisalhante de pico (kPa)	Tensão normal	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R ²
20	25	9	27	0,98
37	50			
52	80			
58	100			

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.55, foi possível verificar o coeficiente angular da Equação da reta e foi possível calcular o ângulo de atrito efetivo igual a 27°, a coesão igual a 9 kPa e o coeficiente R²=0,98.

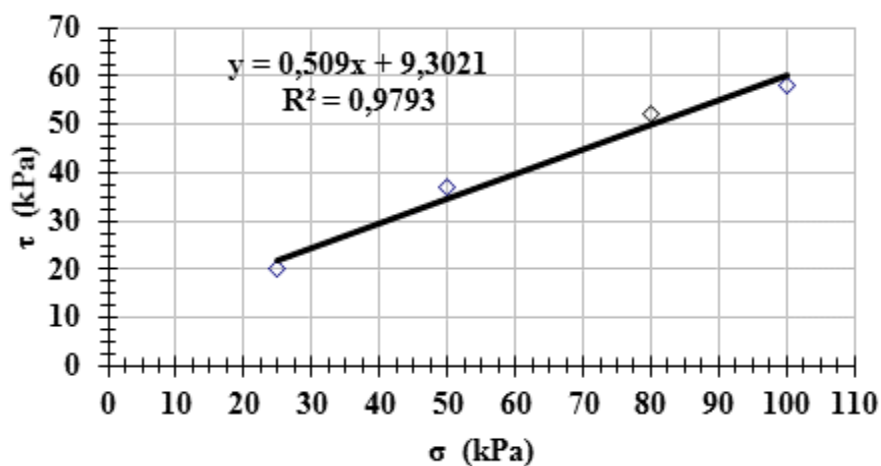


Figura 4.55 Envoltória de Mohr-Coulomb (M40%).

A Figura 4.56 apresenta o resultado da variação do comportamento entre o deslocamento horizontal (δ_x) *versus* o deslocamento vertical (δ_y) para a mistura M40%. Com os resultados, foi possível verificar que, à medida que se aumenta a tensão normal, aumenta, também, o

deslocamento horizontal e vertical. Acontece que o deslocamento vertical tende a estabilizar a sua variação máxima em 9,7 mm a partir 30,0 mm de deslocamento horizontal, conforme o esperado.

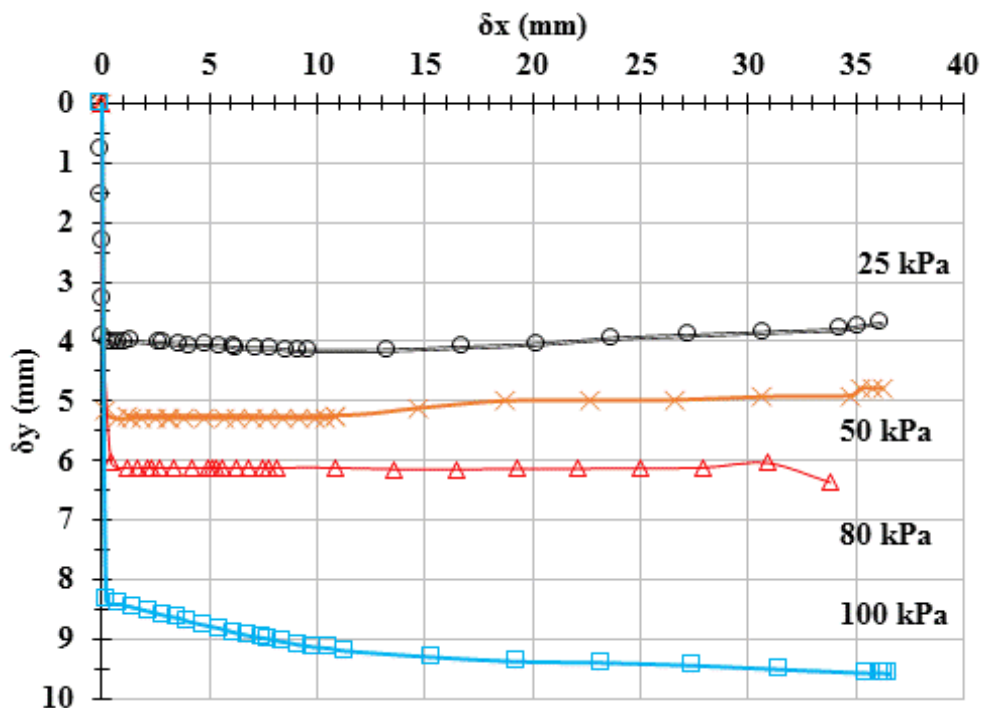


Figura 4.56 Relação deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical (M40%).

A Figura 4.56 traz mais resultados dos ensaios realizados. Percebe-se que foi analisado o comportamento da mistura M40%. Além disso, foi possível constatar que as curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical demonstram um comportamento crescente, com expectativa de estabilização pelo fato de o material estudado ter 40% de borracha.

A Figura 4.57 apresenta a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio raiz (t) *versus* deslocamento vertical (δ_v) que caracteriza um adensamento médio máximo de 28,0 mm para valores a partir de 5 segundos na tensão normal de 100 kPa.

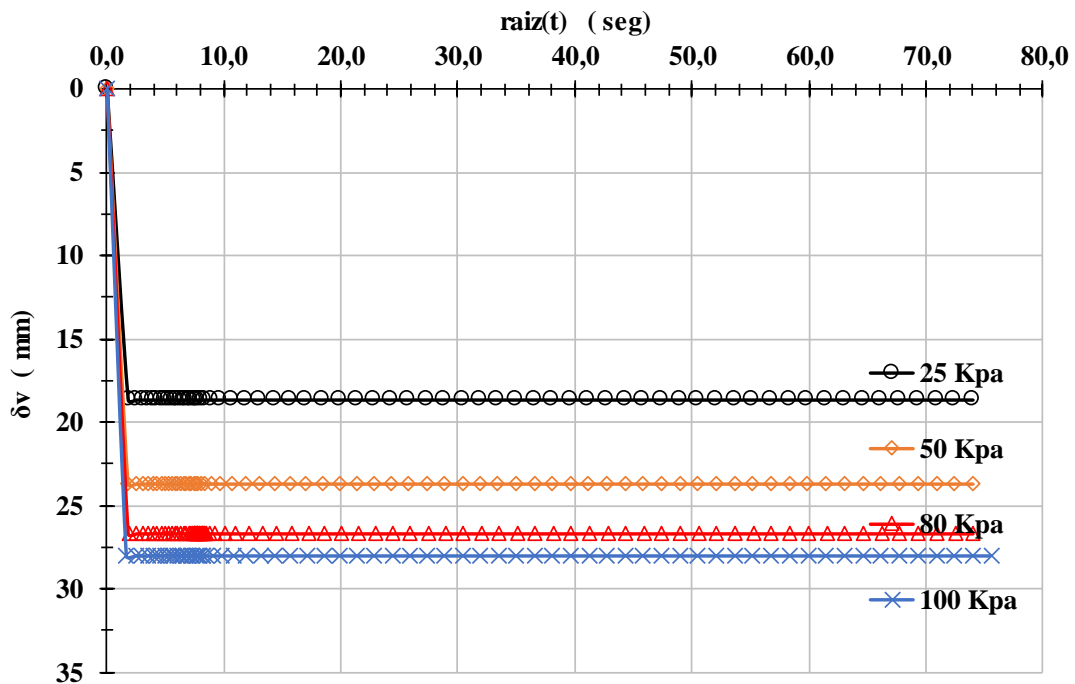


Figura 4.57 Raiz (t) versus deslocamento vertical (M40%).

O comportamento da mistura M40% está registrado nas Figura 4.54 a 4.57. Ela mostra os resultados dos ensaios, em que é possível analisar o comportamento da mistura M40%. Esta mistura indica que as amostras, após a compactação, apresentaram muitas trincas. Este fato influenciou nos resultados obtidos. As curvas de adensamento das quatro tensões normais apresentaram uma estabilidade de adensamento com menos de 5 segundos de ensaio. Conforme Figura 4.57, é possível calcular valor menor que 5 segundos para se atingir 90% do adensamento (t_{90}).

As Figuras de 4.58 a 4.61 apresentam os resultados dos ensaios para quatro tensões normais, com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito efetivo). A Figura 4.58 apresenta a curva dos resultados da relação do deslocamento horizontal (δx) versus tensão cisalhante (τ) para a mistura M50% utilizada nesta pesquisa.

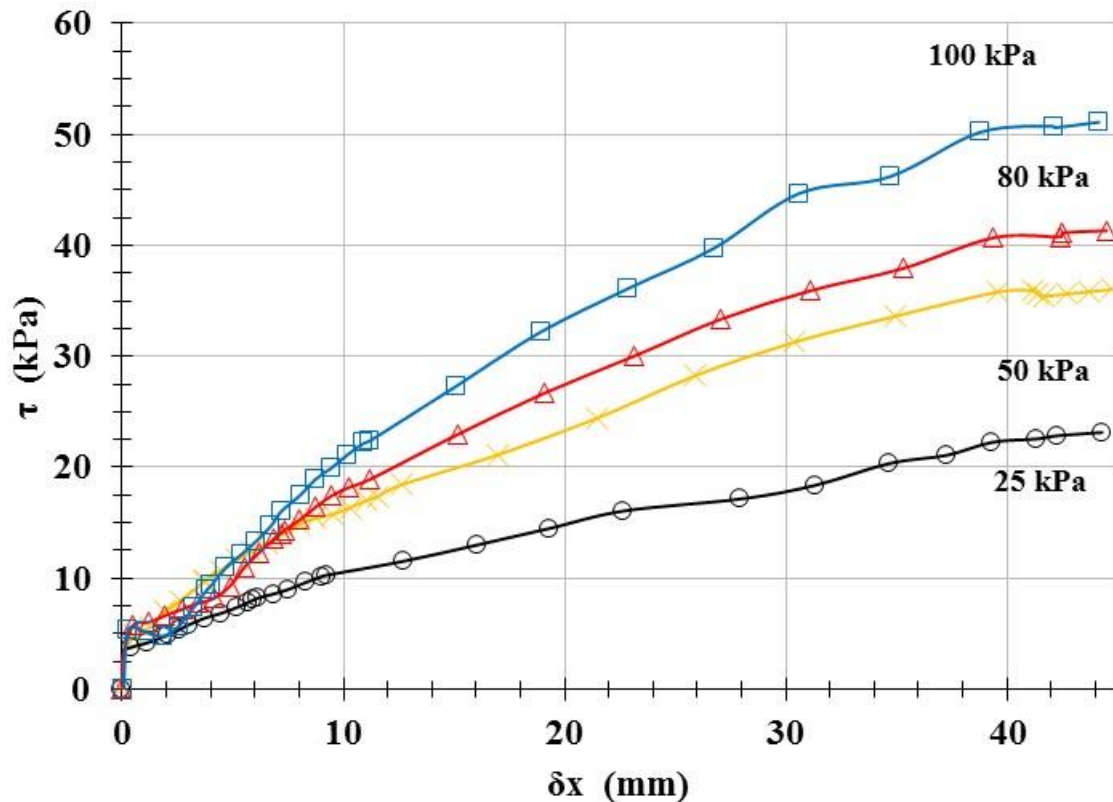


Figura 4.58 Curva de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante (M50%).

Mais resultados podem ser observados e analisados na Figura 4.58. Nela é possível analisar o comportamento da mistura M50%. Nessa mistura, constata-se que há uma relação de proporcionalidade entre o aumento da tensão cisalhante e aumento de deslocamento horizontal. Nesse caso, é gerada uma curva crescente até o deslocamento horizontal de 43,0 mm. A partir deste ponto, atingiu-se a tensão cisalhante máxima igual a 51 kPa. Esta tende a se manter constante para a tensão normal de 100 kPa. Esse comportamento de variação do valor conforme a tensão confinante se repetiu em cada uma das quatro tensões normais. Estes resultados caracterizam o comportamento da mistura estudada sob o efeito de carregamento normal. Não foi encontrado valor de tensão cisalhante de ruptura, de pico, uma vez que as amostras não rompem devido à limitação do material.

Os resultados dos parâmetros de resistência da mistura (M50%) estão demonstrados, de forma clara, na Tabela 4.16. A Figura 4.59 apresenta a curva da Envoltória de Mohr-Coulomb da mistura, que é a relação entre a tensão normal (σ_n) *versus* a tensão cisalhante (τ) do solo estudado.

Tabela 4.16 Parâmetros de resistência mistura (M50%).

Tensão cisalhante pico (kPa)	Tensão normal (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)	R ²
20	25	14	22	0,97
34	50			
41	80			
52	100			

A Figura 4.59 apresenta resultados em que é possível verificar o coeficiente angular da Equação da reta e calcular o ângulo de atrito efetivo igual a 30°, a coesão igual a 12 kPa e o coeficiente R²=0,97.

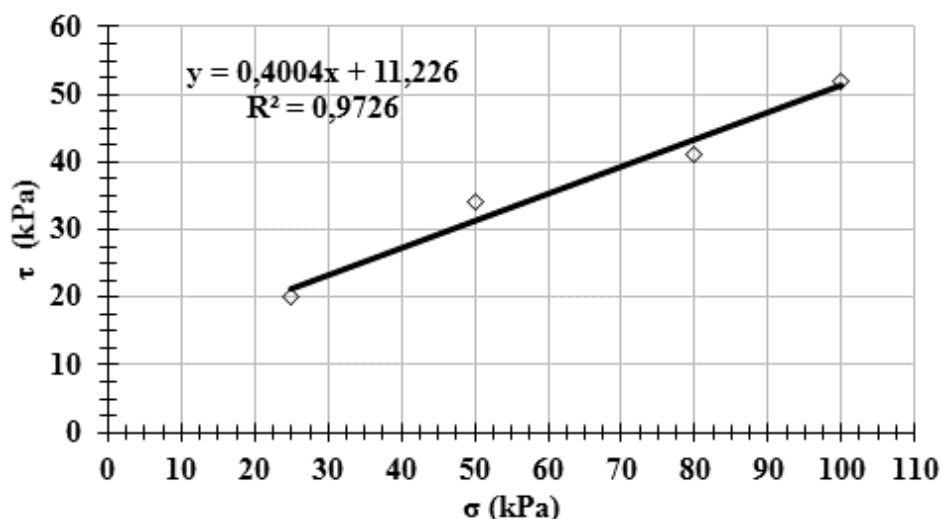


Figura 4.59 Envoltória de Mohr-Coulomb (M50%).

O resultado da variação do comportamento entre deslocamento horizontal (δ_x) e deslocamento vertical (δ_y) para a mistura M50% está registrado na Figura 4.60. A partir dos resultados, é possível verificar, também, uma relação de proporcionalidade entre aumento de tensão normal e aumento de deslocamento horizontal e vertical. À medida que aumenta o primeiro, aumenta, também, o segundo. Entretanto, o deslocamento vertical tende a estabilizar a sua variação máxima em 13,8 mm a partir 23,0 mm de deslocamento horizontal, conforme o esperado.

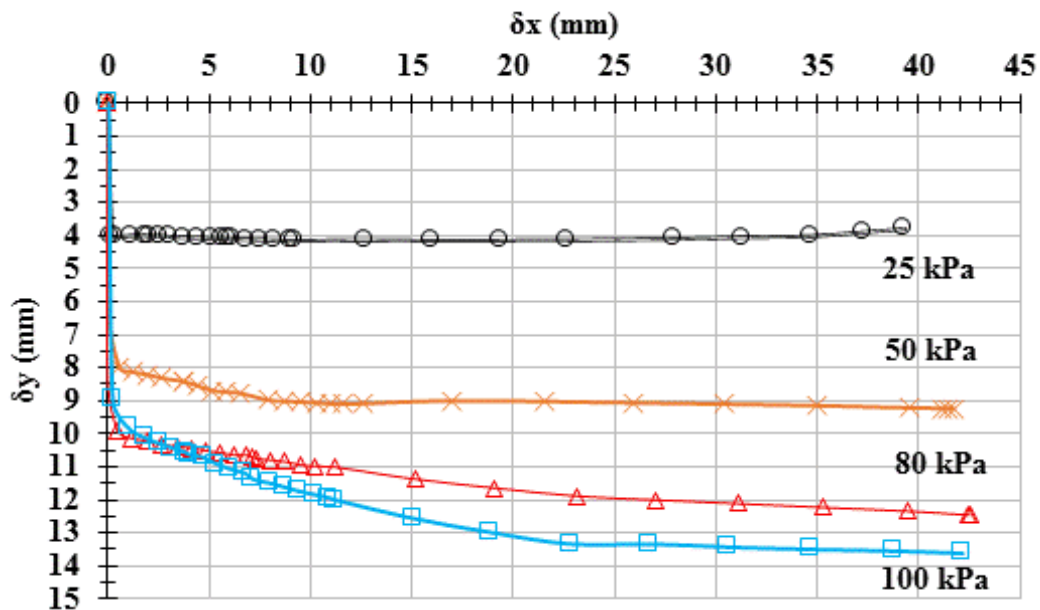


Figura 4.60 Relação deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical (M50%).

A Figura 4.60 apresenta mais resultados da mistura M50%. Além disso, permite constatar que as curvas de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical demonstram um comportamento crescente com expectativa de estabilização, pelo fato de o material estudado ter 50% de borracha. O deslocamento vertical máximo atingiu 13,8 mm para a tensão normal de 100 kPa.

A Figura 4.61 apresenta a curva de adensamento que relaciona a raiz quadrada do tempo do ensaio raiz (t) *versus* o deslocamento vertical (δ_v) que caracteriza um adensamento médio máximo de 28,0 mm para valores a partir de 5 segundos na tensão normal de 100 kPa.

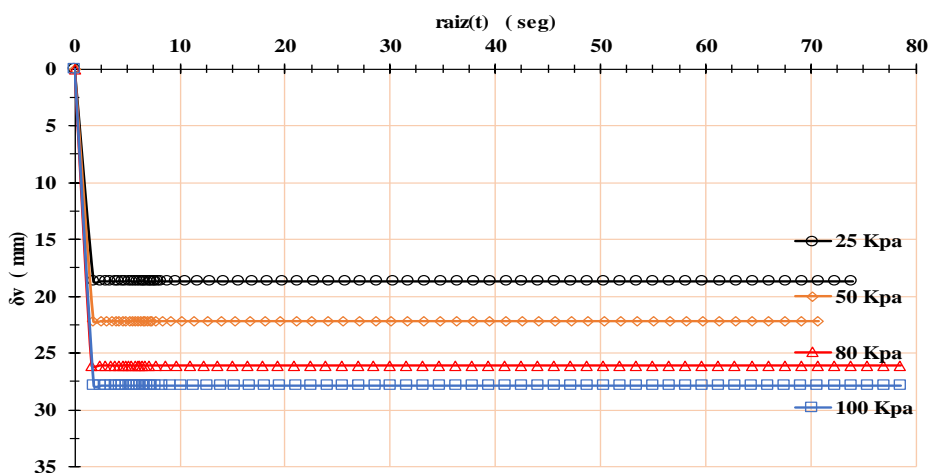


Figura 4.61 Raiz (t) *versus* deslocamento vertical (M50%).

Os resultados apresentados na Figuras 4.61 demonstram o comportamento da mistura M50% em que foi possível constatar que as amostras, após a compactação, apresentaram muitas trincas, o que influenciou nos resultados obtidos. E, que as curvas de adensamento das quatro tensões normais apresentaram uma estabilidade de adensamento com menos de 5 segundos de ensaio.

Foi feito um resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto em média escala, realizados para todas as misturas solo-borracha. O resumo está registrado na Tabela 4.17. A tabela registra os valores da tensão cisalhante máxima, as quatro tensões normais, os parâmetros de resistência (Intercepto de coesão e ângulo de atrito efetivo) e o coeficiente de ajuste das curvas. Na referida tabela, é possível também observar a comparação das misturas solo-borracha de M10% a M50% e também a M100%. Foi, para isso, adotada, como base de comparação, a tensão normal de 100 kPa. Constatou-se que ocorreu uma diminuição acumulada da tensão de cisalhamento máxima de aproximadamente de 29,4%, de forma linear e constante. Esta diminuição foi o resultado do aumento do teor de borracha na mistura de M0% a M50%, pois a borracha absorveu a maior parte da tensão.

O aumento da coesão das misturas foi induzido pela borracha e pelo manuseio da operação do ensaio de cisalhamento direto, uma vez que as misturas não ficaram homogeneizadas o suficiente devido à grande diferença de peso específico dos insumos utilizados (areia e pedaços de borracha. É possível observar um decréscimo acumulado do ângulo de atrito efetivo de aproximadamente de 10° de forma linear e constante. Este decréscimo foi resultado do aumento do teor de borracha na mistura, fato observado devido à presença da borracha que apresenta características de compressibilidade bem diferente da areia.

O aumento acumulado da coesão deveu-se à menor presença de areia na mistura. Deveu-se, também, ao cisalhamento direto. Só não ficou totalmente homogeneizada por causa de grande diferença de peso específico dos insumos (areia e pedaços de borracha).

Tabela 4.17 Resumo dos ensaios de cisalhamento direto.

Teor de Borracha (%)	τ_{max} (kPa)	σ_n (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	R^2
M0%	13	25	0	32	0,99
	26	50			
	47	80			
	60	100			
M10%	18	25	1	31	0,99
	28	50			
	48	80			
	61	100			
M20%	21	25	3	33	0,99
	34	50			
	57	80			
	70	100			
M30%	23	25	8	31	0,95
	39	50			
	49	80			
	71	100			
M40%	20	25	9	27	0,98
	37	50			
	52	80			
	58	100			
M50%	20	25	14	22	0,97
	34	50			
	41	80			
	52	100			
M100%	17	25	8	21	0,99
	29	50			
	38	80			
	47	100			

A Tabela 4.18 apresenta detalhes de autores citados na Referencia Bibliográfica em pesquisas publicadas com características diversas, baseado nos tamanhos estabelecidos na norma D6270 (ASTM. 1998). Destaca-se que, a partir das pesquisas citadas, foi possível ampliar o conhecimento do comportamento de misturas solo-borracha. Destaque a transição entre as misturas M20% e M30%, aproximadamente M27%, onde observou-se que a borracha passou a preencher os vazios da areia. Já para a mistura M40% observou-se que o comportamento da mistura passou a ser dos pedaços de borracha.

Tabela 4.18 Diferentes classes de resíduos de borracha de pneus dos autores destacados na Referência Bibliográfica.

Classificação	Tamanho dos resíduos de borracha	Aplicação	Solo	Teor de borracha (%)	Referência
Pedaços de pneus	50 mm, 50 -100 mm, 100 - 150 mm	Aditivos para asfalto	areia, SP (SUCS)	0% - 15 - 25 - 30 - 35 - 100%	Foose et al. (1996)
Desbastes de pneus	2 - 40 mm	Aterro, enchimento de drenagem	Areia	0% - 10% - 100%	Edinçliler et al (2004)
Desbastes de pneus	2 - 40 mm	Aterro, enchimento de drenagem	Areia	0% - 5 - 10 - 20 - 30 - 100%	Edinçliler et al (2007)
Desbastes de pneus	2 - 40 mm	Aterro, enchimento de drenagem	Areia	0% - 5 - 20 - 30 - 100%	Edinçliler et al (2010)
Migalhas de pneus	< 0,6 mm	Aterro, reforço	Areia	0% - 10 - 15 - 20 - 50 - 70 - 100%	Ghazavi (2004)
Lascas de pneus	< 40 mm	Aterro, reforço	Areia	0% - 15 - 25 - 30 - 35 - 100%	Ghazavi et al. (2011)
Pedaços de pneus	< 76 mm	Limitação de profundidades de congelamento	Areia	20% - 30 - 40 - 50 - 60%	Humphrey et al. (1999)
Lascas de pneus	13 a 25 mm	Suplemento de combustível de caldeiras de carvão	areia de Ottawa	0% - 15 - 25 - 30 - 35 - 100%	Ahmed & Lovell (1993)
Lascas de pneus	< 40 mm	Obras rodoviárias	areia e silte arenoso, SP (SUCS)	0% - 15 - 25 - 30 - 35 - 100%	Tatlisoç et al. (1998)
Pedaços de pneus	50,8 a 152 mm	aterros e enchimento de contenções	areia, SP (SUCS)	0% - 5 - 10 - 15 - 30 - 38 - 60 - 100%	Zornberg et al. (2004)

Tabela 4.18 Diferentes classes de resíduos de borracha de pneus dos autores destacados na Referência Bibliográfica (continuação).

Classificação	Tamanho dos resíduos de borracha	Aplicação	Solo	Teor de borracha (%)	Referência
Pedaços de pneus	passados na peneira n° 4 < 38 mm	Obras rodoviárias, aterros e enchimento de contenções	areia tipo A (92% areia e 8% finos), B(95% e 5% finos) e C(90% e 10% finos)	0% - 5 - 8 - 10 - 100%	Attom (2006)
Lascas de pneus	20 - 100 mm	aterros e enchimento de contenções	areia pura	0% - 14,2 - 15,2 - 23 - 30 - 50 - 100%	Balachoswsky & Gotteland (2007)
Pedaços de pneus	até 30 mm	Material de enchimento de peso leve	argiloso	0% - 2,5 - 3,75 - 5 - 7,5 - 100%	Chrusciak (2013)
Pedaços de pneus	50 - 300 mm	Material de enchimento de peso leve	argiloso	0% - 2,5 - 3,75 - 5 - 7,5 - 100%	Suárez (2016)
Pedaços de pneus	< 70 mm	Enchimento de drenagem	areia argilosa SC (SUCS)	0% - 10 - 20 - 40 - 50 - 100%	Franco (2012)
Lascas de pneus grossas e finas	< 50 mm	Obras rodoviárias, aterro	solo argiloso	0% - 5 - 10 - 20 - 50 - 100%	Cabalar (2011)
Desbastes de pneus	< 5 mm	Enchimento de drenagem	areia, SP (SUCS)	0% - 10 - 20 - 30 - 35 - 40 - 100%	Mashiri et al. (2015)
Lascas de pneus	1 - 5 mm	Material de enchimento	Areia, SP (SUCS)	0% - 5 - 10 - 20 - 30 - 100%	Akbar Anvari et al. (2017)
Pedaços de pneus	50 - 300 mm	Material de enchimento de peso leve	areia, SP (SUCS)	0% - 10 - 20 - 30 - 40 - 50 - 100%	Este autor (2018)

A Figura 4.62 apresenta uma comparação entre resultados dos ângulos de atrito *versus* teores de misturas solo-borracha com os resultados obtidos de 9 autores citados na Referência Bibliográfica, em pesquisas publicadas, com características semelhantes. Os resultados desta pesquisa estão representados como Este autor (2018), em linha tracejada. Pode-se observar que a variação do ângulo de atrito desta pesquisa ficou muito próximo dos demais autores.

O resultado do ângulo de atrito efetivo médio dos valores apresentados na Figura 4.62 é igual a 34°, e o desvio padrão médio igual a 5°, confirmando que há uma certa discrepância entre os resultados apresentados.

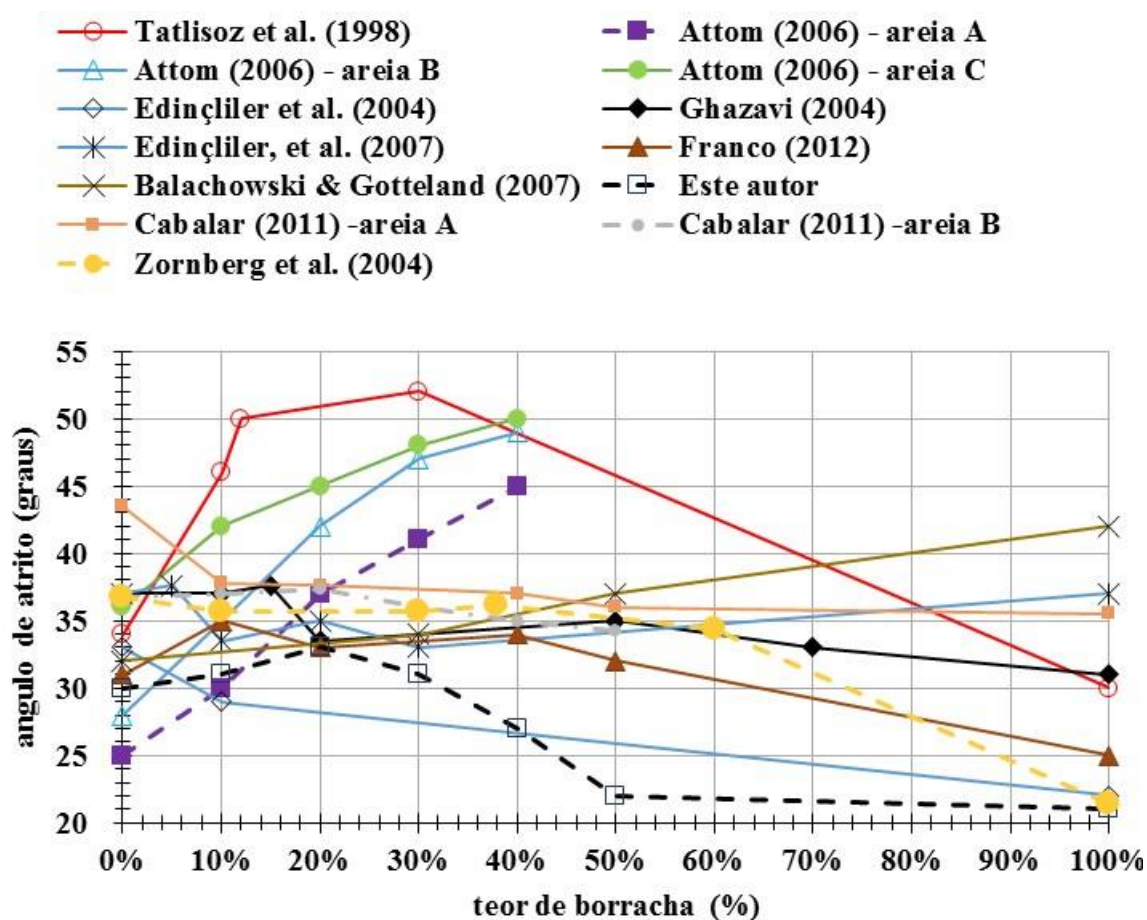


Figura 4.62 Ângulo de atrito efetivo *versus* Teor de borracha.

Com os resultados desta pesquisa foi possível, conforme Tabela 4.19 foi possível observar que o tamanho e o peso específico da borracha nas misturas solo-borracha foram fatores decisivos na redução do contato entre os grãos da areia e a borracha. É importante destacar que, à medida

que se aumentou o teor de borracha, os resultados dos parâmetros de resistência das misturas alteraram consideravelmente.

Tabela 4.19 Resumo dos resultados dos ensaios das misturas pesquisadas (CD em média escala).

Mistura	Figura $\delta_h \times \tau$		Figura $\tau \times \sigma$		Figura $\delta_h \times \delta_v$		Figura raiz (t) $\times \delta_v$	
	δ_h	τ	ϕ	c'	δ_h	δ_v	Raiz (t)	δ_v
	(mm)	(kPa)	(graus)	(kPa)	(mm)	(mm)	(s)	(mm)
M0% ^{c(1)}	6	80	39	0	7,5	0,5	3,0	4,3
M0%	43	58	30	0	42	4,8	5,0	33,0
M10%	43	60	31	1	35	5,3	5,0	33,0
M20%	43	70	33	3	44	6,9	5,0	28,0
M30%	43	74	31	8	21	4,1	5,0	28,0
M40%	43	64	27	9	30	9,7	5,0	28,0
M50%	43	51	22	14	23	13,8	5,0	28,0
M100%	43	48	21	8	40	25,0	5,0	29,0

(1) M0%^c corresponde à areia no ensaio de cisalhamento direto convencional.

(2) De M0% a M100% corresponde aos insumos ensaiados no cisalhamento direto em média escala.

Os resultados encontrados por Tatlısoz et al. (1998), que empregaram lascas de borracha similares ao desta pesquisa, nas misturas de areia e borracha, apresentaram valores coerentes com os resultados encontrados nesta pesquisa. É importante destacar que os resultados de Tatlısoz et al. (1998) para os ensaios das misturas (10% a 30%) apresentaram desvio para maior com variação de 7°, considerado muito acima dos resultados dos outros 9 autores pesquisados e dos resultados demonstrados nesta pesquisa, conforme destacado na Figura 4.62. A Tabela 4.19 apresenta o resumo dos resultados de todos os ensaios realizados nesta pesquisa e apresentados nas Figuras de 4.38 a 4.61. Estas apresentam dados analisados de comportamentos das misturas (M0% a M50% e M100%).

A partir dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa e apresentados na Tabela 4.19, foi possível constatar que:

- a. A máxima tensão cisalhante ocorreu na mistura M30%. Esta apresenta um valor de 74 kPa, representando o maior valor. Esse resultado foi atingido em função de um deslocamento horizontal igual a 43 mm. Todos as demais tensões cisalhantes máximas calculadas das misturas M0%, M10%, M20%, M40% e M50% apresentaram valores

próximos. O valor que mais se aproximou da média foi o da mistura M40%, com valor igual a 64 kPa. A mistura M100% apresentou valor de tensão cisalhante máxima igual a 74 kPa, menor valor apresentado;

b. Comparando-se os teores M0% e M50%, observou-se uma diferença de 30,9%, entre as massas específicas aparente secas máximas devido ao fato de os pedaços de borracha apresentarem uma densidade bem menor que a areia;

c. O maior ângulo de atrito efetivo foi atingido até a mistura M30% com valor igual a 33°. A média dos ângulos de atrito das misturas M0% a M50% apresentou valor igual a 29°. Todos os demais ângulos de atrito calculados das misturas M0%, M10%, M30%, M40% e M50% apresentaram valores próximos. O valor que mais se aproximou da média foi o da mistura M30%. A mistura M100% apresentou valor de ângulo de atrito efetivo igual a 21°;

d. O maior deslocamento vertical ocorreu na mistura M50% com valor igual a 14 mm para um deslocamento vertical igual a 23 mm. A média dos deslocamentos verticais das misturas M0% a M50% apresentou valor igual a 8 mm. Todos os demais deslocamentos verticais calculados das misturas M0%, M10%, M20%, M30% e M40% apresentaram valores próximos. O valor que mais se aproximou da média foi o da mistura M40%. A mistura M100% apresentou valor de deslocamento vertical igual a 25 mm. Esse valor ficou fora dos máximos e mínimos; e

e. O adensamento máximo das misturas M0% e M10% apresentou valor igual a 33 mm. A média dos deslocamentos verticais das misturas de M0% a M50% apresentou valor igual a 29 mm. Todos os demais resultados das misturas M20%, M30%, M40% e M50% ficaram próximos. Os valores que mais se aproximaram da média foram os das misturas M20%, M30%, M40% e M50%. A mistura M100% apresentou deslocamento vertical máximo de compressão igual a 42 mm.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. CONCLUSÕES

Ao finalizar esta pesquisa, e após análise dos resultados dos ensaios, com a finalidade de avaliar o comportamento físico e mecânico das misturas solo-borracha nos teores M0% (areia média lavada), M10% a M50% e M100% (pedaços de borracha), submetidas a tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 80 kPa e 100 kPa, foi possível concluir que:

- com a variação dos teores de borracha, ocorreu uma considerável influência na curva de compactação. Nesse caso, foi possível concluir que, quanto maior o teor de borracha, menor será a massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$);
- ocorreu uma diminuição média da umidade ótima ($W_{\acute{o}t}$) nos teores até M20% devido ao fato de a borracha ser um material de baixa absorção, e a quantidade de areia existente ter absorvida a maior parte da água. Complementarmente, foi observado que, a partir do teor M30%, não foram observadas mudanças significativas de tal valor; e
- ocorreu uma redução da massa específica dos sólidos (ρ_s) nos teores de M0% a M50%, devido à redução do peso da mistura, à medida que foram adicionados mais pedaços de borracha.

Foi possível observar, também, que os resultados das amostras das misturas com umidades diferentes da umidade ótima apresentaram muitas fissuras. Constatou-se também que, quanto mais seca eram as misturas, maior era o número de poros e maiores eram as fissuras pela falta de coesão da areia e dos pedaços de borracha.

É importante destacar que a verificação da umidade das misturas necessita de maior atenção, quando aplicado em obras geotécnicas que venham a utilizar insumos com misturas semelhantes aos empregados nesta pesquisa, devendo realizar controle rigoroso da umidade ótima. Foi possível notar também um aumento na tensão cisalhante à medida que as tensões normais aumentaram.

O comportamento da variação volumétrica das misturas foram predominantemente de compressão e esta condição apresentou um comportamento crescente, sem expectativa de

estabilização pelo fato de a borracha ser elástica e não romper. Observou-se que a fluência dos pedaços de borracha não foi avaliado pois, não se sabe o tempo necessário para completar esta investigação. Foi possível observar, ainda, que até o teor M20% ocorreu pequeno aumento de volume, caracterizando possivelmente alguma dilatação. A partir de M30% a M50%, foi observado que esse aumento de volume diminuiu com o aumento da tensão normal.

A maior resistência ao cisalhamento foi obtida para o teor M30% em peso, em torno de 31% maior que a resistência ao cisalhamento da areia pura (M0%). Este resultado também foi obtido nos estudos de Zornberg et al. (2004), em ensaios de compressão triaxial de maior escala, empregando misturas de solo granular e resíduos de pneus. O aumento do teor de borracha influenciou diretamente em um aumento máximo de 10,6% da tensão cisalhante máxima até o teor M30% e para os teores M40% a M50% ocorreu uma diminuição de até 26,9%;

A variação do ângulo de atrito efetivo interno (ϕ') dos teores de misturas de borracha entre M10% e M50% apresentou valores entre zero e 9,6° maiores que o da areia pura (M0%), respectivamente. No caso da borracha pura (M100%), os valores foram entre 2,2° e 5,4° maiores que os teores de M10% a M50%, respectivamente. É importante destacar que o ângulo de atrito efetivo apresentou um aumento até o teor M20%, para, logo em seguida, diminuir até M50%. Essa ocorrência destacou a transição da predominância das características da areia até o teor M20%. Até o teor M50%, ocorreu a predominância das características da borracha.

Foram observadas pequenas variações no valor da coesão com a adição do tipo de borracha estudada. Esse valor diminuiu até o teor M20%, apresentando um aumento até o teor de M40% e depois diminuindo até M50%. No entanto, o maior valor da coesão foi de 14 kPa para o teor M40% e o menor foi de 9 kPa para o teor M20%, indicando uma variação máxima de apenas 5 kPa, valor considerado pequeno, em termos de variação para tal propriedade.

Os ensaios de compressão confinada demonstraram que a mistura solo-borracha se torna mais compressível que a areia pura empregada, com medições do deslocamento vertical médio de 11,1 mm e da variação volumétrica média de 7,3 %.

Desta forma, os dados dos resultados coletados nessa pesquisa demonstraram ser viável ambientalmente até 100% a sua utilização de mistura de pedaços de borracha com areia média lavada. Outro fato de destaque foi que os pedaços de pneus aumentam a resistência e a

compressibilidade das misturas estudadas. Assim, esse insumo pode ser empregado como reforço, dependendo das condições existentes na obra. Portanto, alguns teores de misturas estudados nessa pesquisa com areia média lavada podem ser aplicados em obras geotécnicas como drenagens, contenções e enchimentos diversos, em obras que permitam um certo nível de deslocamentos verticais, sendo possível dar destino ambientalmente viável para os resíduos de pneus inservíveis. Destaca-se também que o uso de pedaços de borracha em misturas apresentaram grande desagregação no campo, fato este a ser observado com cautela.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Atualmente, poucas pesquisas têm sido realizadas para estudar o real comportamento de misturas de pedaços de borracha com solos tropicais com relação a recalques a longo prazo, uma vez que pesquisas recentes demonstraram que as misturas solo-borracha continuam apresentando deformações. Assim, é importante a realização de ensaios mecânicos que possam avaliar as variações do deslocamento vertical, em períodos de curto, médio e longo prazo, com e sem presença de água. É importante, também, avaliar se é possível fazer simulação de vibração do solo.

A ideia de trabalhar com modelos matemáticos que simulam deslocamentos e deformações destas misturas, variando as cargas externas é outra linha de pesquisa que precisa de maiores estudos.

É necessária ainda a realização de estudos por meio de construção de modelos reduzidos, simulando, em laboratório, aterros compactados com resíduos de pneus inservíveis, variando os insumos, visando a verificar o comportamento do aterro com os insumos, testando a aplicação de cargas em placa ou pontuais.

Por fim, é importante destacar a necessidade de realização de ensaios laboratoriais que permitam análise química e biológica da água e do solo, com aplicação de misturas solo-borracha, para melhor investigar os impactos ambientais, se positivos ou negativos, gerados em obras geotécnicas. Torna-se necessário, também, avaliar se apresentam algum efeito nocivo às águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS

ABNT (1995). NBR 6502: Rochas e Solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 18p.

ABNT (2016). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 8p.

ABNT (2016). NBR 6457: Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 2p.

ABNT (1985). NBR 6491: Reconhecimento e amostragem para fins de caracterização de pedregulho e areia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 9 p.

ABNT (2016). NBR 7180: Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 13 p.

ABNT (2016). NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 10 p.

ABNT (1990). NBR 12004: Solo – Ensaio de índice de vazios máximo.

ABNT (1990). NBR 12007: Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional.

ABNT (1991). NBR 12051: Solo – Ensaio de índice de vazios máximo.

ABIPR (2005). Associação Brasileira da Indústria de Pneus Remoldados – Disponível em: http://www.abip.com.br/abip/pneu/pne_beneficios.php>. Acesso em: julho de 2016.

AHMED, I.; LOVELL, C. W. (1993). Rubber Soils as Lightweight Geomaterials. Transportation Research Record, 1422: 61-70.

ANIP (2015). Disponível em: < <http://www.anip.com.br/>>. Acesso em 19/06/2016.

ASTM (2008). ASTM D6270/08 - Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos, 20p.

ASTM (1998). ASTM D3080/98 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Underconsolidated Drained. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos, 6p.

ATTOM, M. F. (2006). The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sands. *Environ Geol* 49: 497-503.

BALACHOWSKI, L. & GOTTELAND, P. (2007). Characteristics of tyre chips-sand mixtures from triaxial tests. *Archives of hydro-engineering and environmental mechanics*. Vol 54 (1): 25–36.

CHEBET, F.C. et al. (2014). An Investigation of Waste Tyre Shreds as Reinforcement Material for Typical South African Sandy Soils. Banzibaganye G., Civil Engineering Dept., University of Cape Town, South Africa

CHRUSCIAK, M. R. (2012). Análise da melhoria de solos utilizando fragmentos de borracha. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil, G.DM-221/13 109 p.

CABALAR, A. F. (2011). Direct Shear Tests on Waste Tires-Sand Mixtures. *GeotechGeol Eng.*, 29: 411-418.

CONAMA (1999). Resolução nº 258/1999. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>. Acesso em 21/07/2016.

EDINÇLILER, A.; BAYKAL, G.; SAYGILI, A. (2004). Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways. *Resources, conservation and Recycling*, 42: 223–237.

EDINÇLILER, A., (2007). Using waste tire–soil mixtures for embankment construction. In: *International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials “Opportunities and Challenges”*. Kanto Branch of Japanese Geotechnical Society, Japan, 1: 319–328

EDINÇLILER, A., BAYKAL, G. & SAYGILI, A. (2010). Influence of Different Processing Techniques on the Mechanical Properties of Used Tires in Embankment Construction. *Waste Management*, 30: 1073-1080.

FORSYTH, R.A.; EGAN, J.P. (1976). Use of waste materials in embankment construction. 55th Annual meeting of transportation research board. 76-06: 42 p.

FRANCO, K. L. B. (2012). Caracterização do Comportamento Geotécnico de Misturas de Resíduo de Pneus e Solo Laterítico. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 139 p.

GEOSUNTEC CONSULTANTS (2008). Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires. Geosyntec. Maryland Department of the Environment's Scrap Tire Program. Geosyntec Project N° ME0012-11, 182 p.

GHAZAVI, M. (2004). Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22: 401–416.

GHAZAVI M. GHAFARI, J., FARSHADFAR, A. (2011). Experimental Determination of Waste Tire chip-Sand-Geogrid Interface Parameters Using Large Direct Shear Tests. 5th Symposium on Advances in Science & Technology Khavaran Higher-education Institute, Mashhad, Iran 1 - 9.

GOOGLE EARTH (2012), disponível em: <<https://maps.google.com.br/>>. Acesso em 19/07/2016.

HOPPE, MEGAN AND OMAN, MATTHEW (2013). Use of Tire Derived Products (TDP) In Roadway Construction, Minnesota Department of Transportation. Research Final Report. <http://www.lrrb.org/PDF/201320.pdf>. MN/RC 2013-20, 58p.

HUMPHREY, D.; SANDFORD, T. C. (1993). Lightweight Subgrade Fill and Retaining Wall Backfill. Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and Byproducts for Construction of Highway Facilities Denver, Denver, Colorado, 19-22.

LAGARINHOS, C.A. & TENÓRIO, J.A. (2008b). Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EPUSP.

MASHIRI M.S.; VINOD J.S.; SHEIKH M. NEAZ ET AL. (2015). Shear strength and dilatancy Behaviour of sand-type chip mixtures, a School of Civil, Mining & Environmental Engineering, University of Wollongong, NSW 2522, Australia. Faculty of Engineering and Industrial Sciences, Swinburne University of Technology, Hawthorn, VIC, Australia, accepted 19 January 2015 Available online 7 May 2015.

OLIVEIRA, J. C. de (2000). Caracterização Geotécnica de Materiais Inconsolidados Arenosos do Distrito Federal utilizados como material de construção. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM 075A/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100p.

PALMEIRA, E.M. (1998). Equipamento para ensaios de tração confinada de geotêxteis em solos – Versão 2. Relatório de Pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília.

PALMEIRA, E.M. (2009). Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis. Geotextiles and Geomembranes, 27(2009): 368–390.

PINTO, Carlos Souza. (2006) Curso Básico de Mecânica dos Solos (dois volumes – Teoria e Exercícios) Editora Oficina de Texto – Professor Carlos de Souza Pinto. 2ª Edição.

SIDDIQUE, R. (2009). Utilization of waste materials and by products in producing controlled low-strength materials. Resources, Conservation and Recycling, 54: 1-8.

SEYED MAHMOUD ANVARI, ISSA SHOOSH PASHA, SAMAN SOLEIMANI KUTANA EI. (2017). Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (www.rockgeotech.org). Department of Civil Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran. Accepted 14 March 2017.

SHALABY, A. & KHAN, R.A. (2005). Design of Unsurfaced Roads Constructed with Large-Size Shredded Rubber Tires: a Case of Study. *Resources, Conservation and Recycling*, 44: 318-332.

SMITHERS RAPRA. (2017). *The Future of Tire Manufacturing to 2022*. Market report de 01 de fevereiro de 2017. <https://www.smithersrapra.com/market-reports/tire-industry-market-reports/the-future-of-tire-manufacturing-to-2022>. Acesso em novembro de 2017.

SOUZA, M. V. R. (2011). Relatório cisalhamento Direto, concepção e dimensionamento da prensa de cisalhamento de grande escala do PPG-UNB. Relatório, Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 29 p.

SUÁREZ, M. J. (2016). Avaliação da Resistência de Material Leve Utilizando Misturas de Pedacos de Pneus com Solo do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-267/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 119 p.

SZELIGA, L.; RAMIREZ, G. D.; CASAGRANDE, M. D. T. (2014). Estudo experimental de solo reforçado com borracha moída de pneus inservíveis para aplicação em obras geotécnicas. XVI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – COBRAMSEG, Associação brasileira de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – ABMS, Porto de Galinhas, PE, ref. 231, 8p.

TATLISOZ, N.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. (1998). Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124 (11): 1109–1119.

YOUWAI, S.; BERGADO, D. T. (2004). Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material. *Computer and Geotechnics*, 31: 103-114.

WU, W.Y.; BENDA, C.C.; CAULEY, R.F. (1997). Triaxial determination of shear strength of tire chips. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5): 479–482.

ZORNBERG, J. G.; CABRAL, A. R.; VIRATJANDR, C. (2004). Behavior of tire shred – sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 41: 227-241.

APÊNDICE A – Relação dos componentes do equipamento.

Item (letra)	Descrição	Notas
1 (c)	bomba hidráulica (vermelha) que aciona o macaco hidráulico (verde)	capacidade máxima 600 lb = 400 psi = 10.000 kgf
2 (a e d)	prensa elétrica (cinza)	capacidade máxima
3 (a e d)	macaco hidráulico (verde) - carga horizontal	altura máxima 55mm
4 (a)	mangueiras (preta) interligam bombas aos macacos	diâmetro = 1", 20 m
5 (f)	célula de carga tipo "S" - para leituras horizontais	capacidade máxima 10.000 kgf
6 (f)	transdutor de deslocamento linear com base magnética – horizontal	1 unidade
7	tomadas elétricas	3 unidades
8 (e)	bomba hidráulica (amarela) que aciona o macaco hidráulico (cinza)	capacidade 10.000 kgf
9 (b)	macaco hidráulico (cinza) - carga vertical	comprimento máximo 50mm
10 (h)	célula de carga tipo "S" - para leituras verticais	capacidade 10.000 kgf
11 (h)	complementos diversos de altura	de 4,0 a 20,0 cm
12 (b)	caixa metálica inferior (azul)	30,5x30,5x17,0 cm
13 (b)	caixa metálica superior (amarela)	30,5x30,5x17,0 cm
14 (b)	esferas de aço no trilho embaixo da caixa inferior	diâmetro de 4,0 cm
15 (b)	esferas de aço embaixo da caixa superior	diâmetro de 2,0 cm
16 (g)	transdutor de deslocamento linear com base magnética – vertical	3 unidades
17 (h)	tampa de ferro com aba para levantar	29,0 x 29,0 x 2,0 cm
18	microcomputador completo	1 unidade
19	aquisitor de dados SPIDER 8	6 entradas
20	micro e Software Catman	1 unidade
21	cadeira com rodas	1 unidade
22	as demais peças de ferro e parafusos foram instaladas para dar suporte ao equipamento	---

Obs.: As letras entre parêntesis se referem a conjunto de equipamentos destacadas na Figura 3.5.

Apêndice B - Porcentagens calculadas para realização dos ensaios de compactação.

Amostra	Teor de Borracha (%)	Umidade estimada (%)	Umidade achada (%)	Peso da borracha seca (kg)	Peso do solo seco (kg)
M0	0%	8%	8,30%	-	5,00
M0	0%	10%	10,30%	-	5,00
M0	0%	12%	11,50%	-	5,00
M0	0%	14%	14,60%	-	5,00
M0	0%	16%	16,20%	-	5,00
M10	10%	8%	8,22%	0,50	4,50
M10	10%	10%	10,03%	0,50	4,50
M10	10%	12%	11,94%	0,50	4,50
M10	10%	14%	14,21%	0,50	4,50
M10	10%	16%	16,27%	0,50	4,50
M20	20%	8%	8,03%	1,00	4,00
M20	20%	10%	10,15%	1,00	4,00
M20	20%	12%	12,14%	1,00	4,00
M20	20%	14%	14,20%	1,00	4,00
M20	20%	16%	16,14%	1,00	4,00
M30	30%	8%	7,96%	1,50	3,50
M30	30%	10%	10,12%	1,50	3,50
M30	30%	12%	12,14%	1,50	3,50
M30	30%	14%	14,14%	1,50	3,50
M30	30%	16%	16,15%	1,50	3,50
M40	40%	8%	8,49%	2,00	3,00
M40	40%	10%	10,12%	2,00	3,00
M40	40%	12%	12,56%	2,00	3,00
M40	40%	14%	13,97%	2,00	3,00
M40	40%	16%	16,10%	2,00	3,00
M50	50%	8%	9,15%	2,50	2,50
M50	50%	10%	10,38%	2,50	2,50
M50	50%	12%	11,87%	2,50	2,50
M50	50%	14%	14,02%	2,50	2,50
M50	50%	16%	15,85%	2,50	2,50
M100	100%	5,0%	5,50%	5,00	-
M100	100%	6,0%	6,20%	5,00	-
M100	100%	7,0%	6,80%	5,00	-
M100	100%	8,0%	8,20%	5,00	-
M100	100%	9,0%	9,20%	5,00	-

Apêndice C - Dados para preparação do material para o ensaio de cisalhamento.

Teor de Borracha (%)		M0%		G_s (g/cm³)	2,65
γ_{dmax} (kN/m³)	15,50	w (%)	12,50	ρ_d (g/cm³)	1,58
Camadas -->		1^a	2^a	3^a	Total
volume (cm³)		4.651,30	5.581,50	4.651,30	14.884,00
massa (g)		7.293,90	8.752,70	7.293,90	23.340,50
Teor de Borracha (%)		M10%		G_s (g/cm³)	2,39
γ_{dmax} (kN/m³)	15,00	w (%)	13,50	ρ_d (g/cm³)	1,53
Camadas -->		1^a	2^a	3^a	Total
volume (cm³)		4.651,30	5.581,50	4.651,30	14.884,00
massa (g)		8.129,90	9.755,90	8.129,90	26.015,70
Teor de Borracha (%)		M20%		G_s (g/cm³)	2,12
γ_{dmax} (kN/m³)	13,57	w (%)	12,50	ρ_d (g/cm³)	1,39
Camadas -->		1^a	2^a	3^a	Total
volume (cm³)		4.651,30	5.581,50	4.651,30	14.884,00
massa (g)		6.336,60	7.603,90	6.336,60	20.277,10
Teor de Borracha (%)		M30%		G_s (g/cm³)	1,86
γ_{dmax} (kN/m³)	13,08	w (%)	11,40	ρ_d (g/cm³)	1,34
Camadas -->		1^a	2^a	3^a	Total
volume (cm³)		4.651,30	5.581,50	4.651,30	14.884,00
massa (g)		6.154,20	7.385,10	6.154,20	19.693,50
Teor de Borracha (%)		M40%		G_s (g/cm³)	1,59
γ_{dmax} (kN/m³)	12,35	w (%)	11,20	ρ_d (g/cm³)	1,26
Camadas -->		1^a	2^a	3^a	Total
volume (cm³)		4.651,30	5.581,50	4.651,30	14.884,00
massa (g)		5.789,50	6.947,40	5.789,50	18.526,50
Teor de Borracha (%)		M50%		G_s (g/cm³)	1,33
γ_{dmax} (kN/m³)	11,66	w (%)	10,80	ρ_d (g/cm³)	1,19
Camadas -->		1^a	2^a	3^a	Total
volume (cm³)		4.651,30	5.581,50	4.651,30	14.884,00
massa (g)		5.379,30	6.455,10	5.379,30	17.213,60
Teor de Borracha (%)		M100%		G_s (g/cm³)	1,14
γ_{dmax} (kN/m³)	4,70	w (%)	7,50	ρ_d (g/cm³)	0,47
Camadas -->		1^a	2^a	3^a	Total
volume (cm³)		4.651,30	5.581,50	4.651,30	14.884,00
massa (g)		2.186,10	2.623,30	2.186,10	6.995,50
Corpo de prova Dimensões		L1 (cm)	L2 (cm)	H (cm)	Volume (cm³)
		30,5	30,5	16,0	14.884,00