



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UnICEUB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIA SOCIAIS APLICADAS – FATECS**

**PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**SONNY ALBERT AMORIM DA SILVA**  
**CARLOS EDUARDO DINIZ VILANOVA**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO LATERÍTICO DE  
BRASÍLIA MISTURADO COM A FRAÇÃO FINA DE PNEU DE BORRACHA**

**BRASÍLIA – DF**

**2016**



**SONNY ALBERT AMORIM DA SILVA**

**CARLOS EDUARDO DINIZ VILANOVA**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO LATERÍTICO DE  
BRASÍLIA MISTURADO COM A FRAÇÃO FINA DE PNEU DE BORRACHA**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica  
Apresentado à Assessoria de Pós-graduação e  
Pesquisa pela Faculdade de Tecnologia e  
Ciências Sociais Aplicadas – FATECS

Orientação: Jaime Rafael Obando Ante, M.Sc.

**BRASÍLIA-DF**

**2016**

## RESUMO

O descarte de pneus inservíveis constitui um problema ambiental de grandes proporções, estima-se que a cada dia são descartados no Brasil ao redor de 2,0 milhões de pneus. Na maioria das vezes os pneus não são descartados de forma apropriada, gerando graves problemas ambientais devido que é um material polimérico de difícil decomposição. Devido à importância e crescente aumento da utilização de técnicas alternativas que permitam a reciclagem de materiais que demoram muitos anos em decompor, que preservem o meio ambiente e permitam um melhoramento das propriedades mecânicas do solo, foi desenvolvida a presente pesquisa com intuito de avaliar as mudanças do comportamento mecânico do solo laterítico de Brasília, misturado com uma porcentagem de borracha de pneu reciclado. A metodologia da pesquisa foi dividida em seis etapas principais: caracterização dos materiais, determinação do teor ótimo de borracha, ensaios de compactação, ensaios de resistência ao cisalhamento, ensaios de permeabilidade e ensaios de Índice de Suporte de Califórnia (ISC). Os ensaios que avaliaram as mudanças das propriedades mecânicas foram realizados sob corpos de prova compactados, na energia de compactação Proctor modificada. Os ensaios foram realizados para o solo em seu estado natural e com adição de 3% de borracha de pneu reciclada em relação à massa do solo seco. Dos resultados obtidos na pesquisa foi possível determinar que o melhoramento de solo com borracha, gerou um aumento significativo no ângulo de atrito e no coeficiente de permeabilidade. A presença da borracha como material para o melhoramento de solos, além de alterar algumas propriedades mecânicas do solo, permitirá reduções significativas na massa do material de preenchimento de estruturas de arrimo, permitindo construir aterros mais leves e dando um uso sustentável a um material de difícil decomposição.

**Palavras chaves:** melhoramento de solo, borracha de pneu reciclada, solo laterítico, sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

The disposal of scrap tires is a major environmental problem. It is estimated that every day are disposed in Brazil around 2,000,000 tyres. Most of the time the tires are not disposed properly generating serious environmental problems due to the complexity decomposition of the polymeric material. Therefore the importance and the increasing of alternative techniques which allow the recycling of materials that take many years to decompose. Preserving the environment and allow an improvement of the mechanical properties of the soil. The research was developed in order to evaluate the changes of the mechanical behavior of the laterite soil mixed with a percentage of recycled tire rubber. The research methodology was divided into six main steps: materials characterization, great content, compression tests, tests of shear resistance, permeability tests and tests of California Support index (CBR). The trials that evaluated the changes of mechanical properties were done specimens under compression energy compressed Proctor modified. The tests were carried out for the soil in its natural state and with addition of 3% recycled tire rubber in, relative to the mass of dry soil. The results that were obtained in the research made it possible to determine that the improvement of soil with rubber generated a significant increase in the angle of friction and the coefficient of permeability. The presence of rubber like material for soil improvement besides changing some mechanical properties of the soil will enable significant reductions in the weight of the fill material of supporting structures allowing to build landfills lighter and giving a sustainable use a hard material decomposition.

**Key words:** soil improvement, recycled tire rubber, laterite soil, sustainability.

## SUMÁRIO

RESUMO	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>4</b>
3.1 PROCESSO DE RECICLAGEM DE PNEUS .....	4
3.2 MELHORAMENTO DE SOLOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE PNEUS RECICLADOS .....	8
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>17</b>
4.1 BORRACHA DE PNEU RECICLADA.....	17
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	17
4.2.1 Amostragem do solo .....	17
4.2.2 Análise granulométrica.....	18
4.2.3 Limites de Atterberg.....	19
4.2.4 Massa específica real dos grãos e massa específica unitária .....	20
4.2.5 Classificação de solos tropicais (MCT) .....	20
4.2.6 Compactação.....	20
4.2.7 Permeabilidade .....	21
4.2.8 Mistura solo pneu.....	21

4.2.9	Cisalhamento direto .....	23
4.2.10	Índice de Suporte Califórnia .....	24
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	26
5.1.1	Ensaio de granulometria .....	26
5.1.2	Limites de Atterberg .....	27
5.1.3	Massa específica real dos grãos .....	27
5.1.4	Miniatura Compactação Tropical (MCT) .....	27
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA BORRACHA .....	28
5.2.1	Granulometria .....	28
5.2.2	Massa específica real dos grãos .....	29
5.2.3	Massa específica unitária .....	29
5.2.4	Análise da mistura solo borracha .....	29
5.2.5	Teste de absorção de água da borracha .....	30
5.3	COMPACTAÇÃO PROCTOR .....	30
5.4	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	32
5.5	AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA .....	34
5.6	ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	36
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .</b>	<b>37</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	38
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Pneus de carro em estado novo e inservível.....	4
Figura 3.2. Processo de reciclagem do pneu (traduzido).....	5
Figura 3.3. Processo de separação das substâncias que compõem um pneu.....	5
Figura 3.4. Borracha de pneu reciclada.....	6
Figura 3.5. Muro de contenção (novarussasnostrilhos, 2014).....	6
Figura 3.6. Fabricação de pneus no Brasil (ANIP, 2015). ....	7
Figura 3.7 Variação da condutividade hidráulica para diversos tamanhos de grão de borracha (Reddy & Marella, 2001).....	8
Figura 3.8. Resultados do peso específico seco versus o teor de umidade para cada porcentagem de tira de pneu (Cetin et al., 2006). ....	9
Figura 3.9 Parâmetros de resistência ao cisalhamento para diferentes teores de borracha (modificado de Cetin et al., 2006): (a) coesão; (b) ângulo de atrito. ....	9
Figura 3.10. Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão normal (Modificado de Cetin et al. 2006).....	10
Figura 3.11. Material de desbaste de pneu (Franco, 2012).....	10
Figura 3.12. Resultados dos ensaios de compactações com e sem adição de borracha (Franco, 2012).....	11
Figura 3.13. Envoltórias de resistências ao cisalhamento para diferentes porcentagens de resíduos de pneu (Franco, 2012). ....	11
Figura 3.14. Variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de borracha para amostras submetidas a uma tensão confinante de 100 kPa (Franco, 2012). ....	12
Figura 3.15. Resíduo de pneus triturados (Chrusciak, 2013). ....	13
Figura 3.16. Amostra com 5% de borracha (Chrusciak, 2013).....	13
Figura 3.17. Curvas de compactações para todos os teores de borracha (Chrusciak, 2013). ....	13
Figura 3.18. Pedaçõs de pneus (Suárez, 2016). ....	14
Figura 3.19. Trincas e planos de fraquezas nos corpos após a compactação (Suárez, 2016). ....	15
Figura 3.20. Curvas de compactação para diferentes teores de borracha (Suárez, 2016) .....	15
Figura 4.1. Borracha de pneu reciclada.....	17

Figura 4.2. Estacionamento Disbrave Quadra 503 Asa Norte Brasília DF. ....	18
Figura 4.3. Solo Laterítico de Brasília.....	18
Figura 4.4. Sequência do ensaio de granulometria: (a) solo passante na peneira N°4,8 mm; (b) peneiramento grosso; (c) sedimentação do solo.....	19
Figura 4.5. Limites de Atterberg: (a) determinação limite de liquidez); (b) determinação limite de plasticidade). ....	19
Figura 4.6. Ensaio MCT: (a) espalhamento da massa úmida; (b) medições das umidades e contrações da amostra; (c) medição da penetração com o penetrômetro. ....	20
Figura 4.7 Permeâmetro de carga variável.....	21
Figura 4.8. Amostra de solo-pneu com teor de 40% de borracha. ....	21
Figura 4.9. Amostra de solo-pneu com teor de 20% de borracha. ....	22
Figura 4.10. Amostra de solo-pneu com teor de 5% de borracha. ....	22
Figura 4.11. Amostra de solo-pneu com teor de 3% de borracha. ....	23
Figura 4.12. Moldagem de um corpo de prova no cilindro com teor de 3% de borracha. ....	23
Figura 4.13. Máquina de ensaio de resistência ao cisalhamento direto. ....	24
Figura 4.14. Corpo de prova submerso por 96 horas. ....	24
Figura 4.15. Ensaio de penetração no corpo de prova.....	25
Figura 5.1. Curvas granulométricas do solo puro com e sem defloculante. ....	26
Figura 5.2. Curva granulométrica da borracha. ....	28
Figura 5.3. Curvas de compactação solo em estado natural.....	30
Figura 5.4. Resultados dos ensaios de resistência ao: (a) solo em estado natural; (b) solo – borracha.....	32
Figura 5.5. Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal (solo puro e solo-borracha). ....	33
Figura 5.6. Envoltória de Mohr – Coulomb solo em estado natural e com adição de borracha. ....	33
Figura 5.7. Curvas de pressão por penetração. ....	35
Figura 5.8. Médias de resistências à penetração (ISC%). ....	35



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Passivo gerado pela não destinação adequada dos pneus (ANIP, 2015).	7
Tabela 3.2 Resultados coesão e o ângulo de atrito com e sem adição de borracha (Franco, 2012).	12
Tabela 3.3 Resultados coesão e o ângulo de atrito com e sem adição de pedaços de pneu (Chrusciak, 2013).	14
Tabela 3.5. Parâmetros envoltória Mohr Coulomb com e sem adição de borracha (Suárez, 2016).	16
Tabela 5.1. Análises granulométricas do solo puro com e sem defloculante.	26
Tabela 5.2. Limites de Atterberg para solos de Brasília.	27
Tabela 5.3. Análise granulométrica da borracha.	28
Tabela 5.4. Massa específica real dos grãos e massa unitária (solo e borracha).	29
Tabela 5.5. Pesos específicos secos máximos e umidades ótimas.	31
Tabela 5.6. Umidades de compactação e pesos específicos secos.	31
Tabela 5.7. Parâmetros obtidos de resistência ao cisalhamento (mistura).	34
Tabela 5.8. Resultados ensaios de permeabilidade de carga variável.	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO	- <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANIP	- Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos
ASTM	- American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNU	- Coeficiente de não uniformidade
CC	- Coeficiente de curvatura
CL	- Argila siltosa
Com defloc.	- Com defloculante
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ISC	- Índice de Suporte Califórnia
IP	- Índice de Plasticidade
LL	- Limite de Liquidez
LP	- Limite de Plasticidade
ML	- Silte argilo-arenoso de baixa compressibilidade
Mg	- Massa retida em cada peneira
Mh	- massa do material úmido submetido a sedimentação
MCT	- Miniatura Compactação Tropical
NBR	- Norma Brasileira Registrada
n°	- Número
Sem defloc.	- Sem defloculante
SUCS	- Sistema Unificado de Classificação de Solos
SB	- Solo com Borracha
SN	- Solo Natural

SC - Areia argilosa  
UniCEUB - Centro Universitário de Brasília

### LISTA DE SÍMBOLOS

$D_{50}$  - Diâmetro correspondente a 50% que passa em peso

$c'$  - Coesão

$c'$  - Cálculo de contração

$CO_2$  - Gás carbono

cm/s - Centímetro por segundo

d(mm) - Diâmetro em milímetros

$G_{smist}$  - Massa específica real dos grãos da mistura

$G_s$  - Massa específica real dos grãos

$G_{solo}$  - Massa específica real dos grãos de solo

$G_{spneu}$  - Massa específica real dos grãos de pneu

$g/cm^3$  - Gramas por centímetros cúbicos

$h_1$  - Altura final do nível da água na bureta

$h_2$  - Altura inicial do nível da água na bureta

$k$  - Coeficiente de permeabilidade

$K_{20^\circ}$  - Coeficiente de permeabilidade à Temperatura de 20°C

kPa - Kilo Pascal

$kN/m^3$  - Kilo Newton por metro cúbico

log	- Logaritmo decimal
LA	- Areia laterítica
LA'	- Arenoso laterítico
LG	- Argiloso laterítico
mm	- Milímetros
mL	- Mililitro
min	- Minutos
MPA	- Mega Pascal
NA	- Areia não laterítica
NS'	- Siltoso não laterítico
NA'	- Arenoso não laterítico
NG'	- Argila não laterítica
P	- Peso dos desbastes de pneus
R <sup>2</sup>	- Porcentagem de acerto
t <sub>0</sub>	- Tempo inicial
t <sub>1</sub>	- Tempo final
W <sub>ótím</sub>	- Umidade ótima
w(%)	- Teor de umidade correspondente a 25 golpes
φ'	- Ângulo de atrito interno
Y <sub>dmáx</sub>	- Peso específico seco máximo

(°)	- Graus
°C	- Graus Celsius
*	- Fator de multiplicação
<	- Sinal de sentença (menor que)
>	- Sinal de sentença (maior que)
=	- Sinal de sentença (igual)
%solo	- Teor de solo da mistura
%pneu	- Teor de pneu granular da mistura
%mat pass.	- Porcentagem de materiais que passa
%mat ret.	- Porcentagem de materiais que fica retido

# 1 INTRODUÇÃO

Os solos podem ser utilizados para a construção de obras na engenharia civil como aterros, barragens, estruturas de pavimento e material de enchimento para estruturas de arrimo. Ao utilizar o solo como material de empréstimo, deve-se atentar para alguns fatores importantes como: localidade do material, quantidade e qualidade do material para poder tornar-se economicamente viável a exploração, entre outros fatores. A utilização de solos e agregados pétreos cresce continuamente com a demanda da construção civil, gerando graves prejuízos ambientais devido à exploração intensa das jazidas.

Segundo Chiossi (2013) os solos são materiais orgânicos ou inorgânicos, sendo inconsolidados ou parcialmente cimentados encontrados na superfície da Terra. Definindo como solo o material resultante da decomposição e desintegração da rocha por agentes atmosféricos, dois grupos foram divididos: os residuais e os transportados. Em muitas situações, os solos em estado natural não possuem as propriedades mecânicas necessárias para suportar determinados níveis de tensão, sendo assim, surge à necessidade promover o melhoramento destes para que possam suportar as condições de serviço. Dentre as diversas alternativas de melhoramento destaca-se a adição de borracha de pneu reciclada, a qual tem sido usada com sucesso em condições laboratoriais e em trechos experimentais rodoviários.

O Brasil produz aproximadamente 68 milhões de pneus por ano, sendo a Reciclanip (entidade fundada pelas empresas fabricantes de pneus) a administradora do processo de coleta e destinação correta de resíduos de pneus em todas as regiões (ANIP, 2015).

A resolução N° 416/2009 do Conama, determina aos fabricantes e importadores de pneus novos a coletarem e destinarem adequadamente a produção de pneus inservíveis existentes em todo território brasileiro. O processo de reciclagem de pneus atravessa diversas etapas até que o material possa ser reaproveitado.

A utilização de pneu granular em obras geotécnicas tem sido um assunto estudado por diversos autores, como Cetin *et al.* (2006); Franco (2012); Chrusciak (2013) e Suárez (2016), os quais realizaram estudos de pneu com solos lateríticos. Entre os

principais resultados obtidos nas diferentes pesquisas, destaca-se o aumento significativo na resistência ao cisalhamento em comparação ao solo puro.

Com o intuito de fornecer meios alternativos para a destinação dos pneus reciclados, foi estabelecida na presente pesquisa uma metodologia laboratorial de reaproveitamento de pneu de borracha reciclada, a qual visa misturar o material reciclado com solo laterítico, a fim de utilizá-lo como material de preenchimento em estruturas de arrimo rodoviárias.

As avaliações realizadas incluíram ensaios com e sem a presença de borracha. Determinado um teor ótimo de borracha que pode ser utilizada sob condições de compactação do ensaio Proctor modificado. Dos principais resultados obtidos na pesquisa, é possível concluir que a presença de 3% misturada com um 97% de solo laterítico, compactada sob condições de laboratório, gerou reduções na coesão, peso unitário seco, Índice de suporte de Califórnia e aumentos na permeabilidade e no ângulo de atrito. De forma geral o melhoramento de solos com pneu de borracha reciclada, constitui uma alternativa viável para a criação de materiais de preenchimento de estruturas de contenção leves e amigáveis com o meio ambiente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Determinar as mudanças no comportamento mecânico do solo laterítico de Brasília ao adicionar uma fração fina de pneu de borracha reciclada.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar o comportamento mecânico do solo com e sem a adição da borracha de pneu reciclada;
- Determinar o teor ótimo da fração de borracha a serem misturado com o solo;
- Determinar os parâmetros mecânico e hidráulico do solo-borracha, através da realização de ensaios de cisalhamento direto, Índice de Suporte de Califórnia (ISC) e permeabilidade.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 PROCESSO DE RECICLAGEM DE PNEUS

As matérias primas básicas que constituem um pneu são borrachas naturais e sintéticas, cabos de aço, cordonéis de aço e/ou náilon, enxofre e negro de fumo. Devidos a fatores ambientais e condições de serviço dos pneus, vão perdendo suas propriedades mecânicas e funcionais com o tempo.

Um pneu torna-se inservível quando não possui mais condições de ser submetidos a processos de reformação para rodagem adicional. Na Figura 3.1 pode-se observar um pneu em bom estado e outro considerado como inservível. Devido às suas propriedades constituintes, estes devem ser descartados em um ambiente correto a fim de não afetar o equilíbrio ecológico e ambiental.



Figura 3.1 Pneus de carro em estado novo e inservível.

([www.detran.mt.gov.br/noticias/2604/saiba-quais-sao-os-pecados-contra-os-pneus-que-devem-ser-evitados](http://www.detran.mt.gov.br/noticias/2604/saiba-quais-sao-os-pecados-contra-os-pneus-que-devem-ser-evitados)).

**Processo de Reciclagem:** o processo de reciclagem de pneus atravessa diversas etapas até que o material possa ser reaproveitado. A primeira etapa consiste na recolocção nos pontos de coleta definidos pelos fabricantes e importadores de pneus, em seguida vão para as centrais de armazenamento que os recebem temporariamente sendo inteiros ou picados e, logo após, são levados ao posto de reciclagem onde o material passa por várias etapas de separação e classificação (Lagarinhos, 2004).

Para separar o aço da borracha e fibras é utilizado um eletroímã, seguido da trituração realizada com temperatura variada, desde temperatura ambiente até 120°C, dependendo da eficiência do processo de granulação (Lagarinhos, 2004). Nas Figuras 3.2 e 3.3 são apresentados os esquemas do processo de reciclagem, e na Figura 3.4 apresenta o resultado final conforme a finalidade do trabalho a ser empregado.

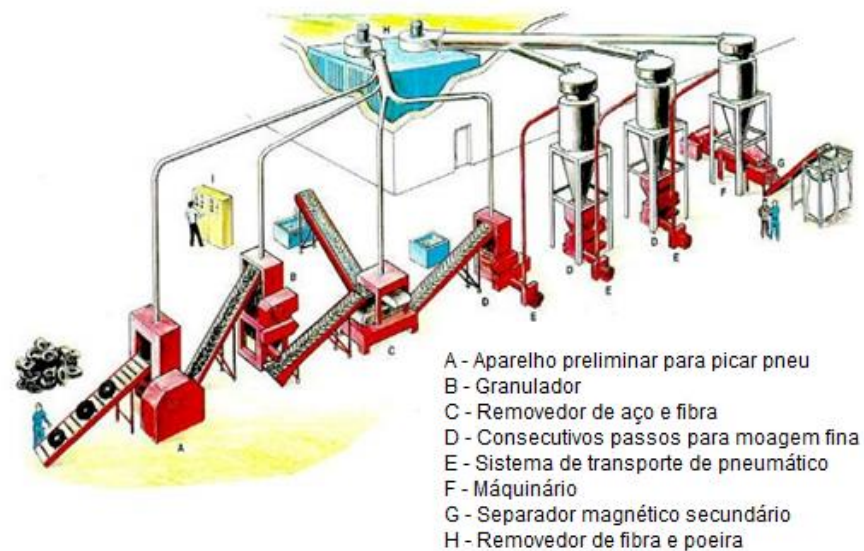


Figura 3.2. Processo de reciclagem do pneu (traduzido).

(<http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-pneus/>).

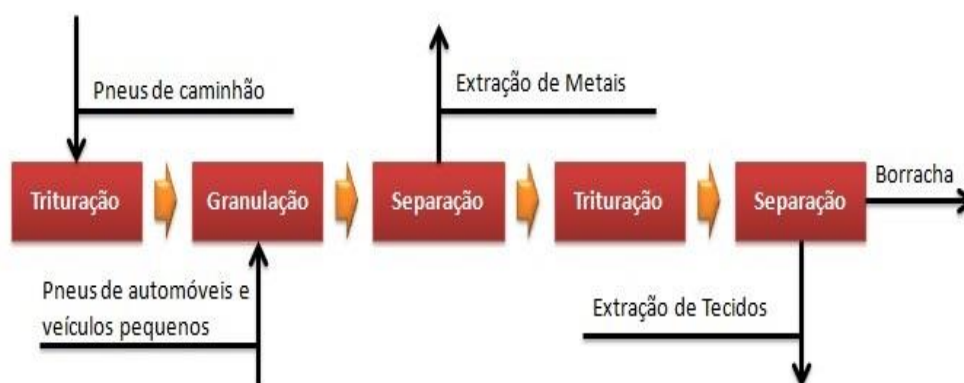


Figura 3.3. Processo de separação das substâncias que compõem um pneu.

(<http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-pneus/>).



Figura 3.4. Borracha de pneu reciclada.

(<http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-pneus/>).

Pelo fato da borracha possuir propriedades elásticas e pouca degradação química ou biológica, este tipo de material pode ser reciclado para ser misturado com solo natural da região para a construção de aterros e como material de enchimento em estruturas de contenção (Figura 3.5) (novarussasnostrilhos, 2014).



Figura 3.5. Muro de contenção (novarussasnostrilhos, 2014).

(<http://novarussasnostrilhos.blogspot.com.br/2014/12/mil-e-uma-utilidade-com-pneus-velhos.html>).

A resolução do CONAMA N° 258 de 1999, prevê que as empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos para uso veicular automotor e bicicletas, ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional. Em 2014 foram produzidos em torno de 68 milhões de pneus, entretanto, 56% foram para a reposição, 27% para as montadoras e 17% destinados à exportação (Figura 3.6). Segundo a Tabela 3.1 pode-

se verificar a meta de destinação e o passivo gerado no Brasil desde 2009, havendo um crescimento favorável do setor de destinação correta do pneu (ANIP, 2015).

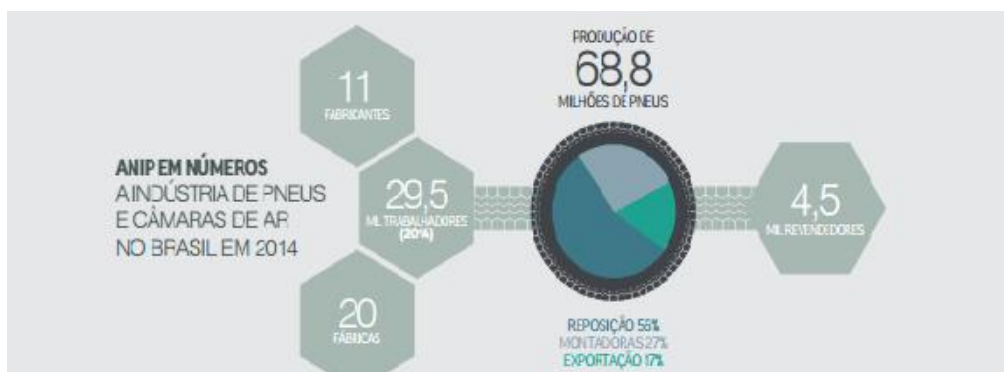


Figura 3.6. Fabricação de pneus no Brasil (ANIP, 2015).

( <http://www.anip.com.br/arquivos/f8201-white-book-versao-final.pdf>).

Tabela 3.1 Passivo gerado pela não destinação adequada dos pneus (ANIP, 2015).

PERÍODO	META BRASIL (t)		
	FABRICANTES	IMPORTADORES	TOTAL
out/ 2009 – dez	357.743	202.595	560.338
2011	280.119	265.692	545.811
2012	301.153	178.277	479.430
2013	352.757	182.511	535.268
<b>TOTAL</b>	<b>1.291.772</b>	<b>829.074</b>	<b>2.120.846</b>

PERÍODO	DESTINADO (t)			% DESTINADO TOTAL
	FABRICANTES	IMPORTADORES	TOTAL	
out/ 2009 – dez	378.774	176.334	555.108	99
2011	285.139	177.319	462.457	85
2012	317.151	141,88	459.030	95,75
2013	377.213	114.440	491.653	92
<b>TOTAL</b>		<b>609.972</b>	<b>1.968.248</b>	<b>93</b>

PERÍODO	PASSIVO (t)		
	FABRICANTES	IMPORTADORES	TOTAL
out/ 2009 – dez	21.031	-25.261	-5.230
2011	5.019	-99.373	-83.353
2012	15.998	-36.397	-20.399
2013	24.456	-68.071	-43.615
<b>TOTAL</b>	<b>66.504</b>	<b>-219.102</b>	<b>-152.598</b>

( <http://www.anip.com.br/arquivos/f8201-white-book-versao-final.pdf>).

### 3.2 MELHORAMENTO DE SOLOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE PNEUS RECICLADOS

Reddy & Marella (2001) estudaram o efeito do tamanho do grão de borracha na condutividade hidráulica, visando dar um uso apropriado como material para estruturas civis. Os estudos foram realizados com pedaços de pneus grandes (maiores que 10 cm) por serem econômicos ao ser utilizados como material de drenagem. Dos resultados obtidos na pesquisa, foi possível concluir que a o tamanho do grão de borracha influência diretamente na condutividade hidráulica (Figura 3.7), concluindo que partículas com maiores tamanhos permitem uma maior facilidade na percolação de água.

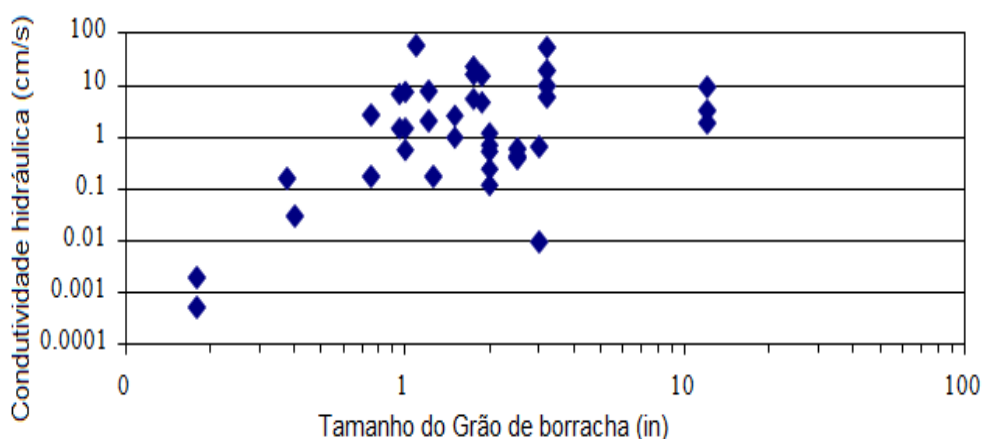


Figura 3.7 Variação da condutividade hidráulica para diversos tamanhos de grão de borracha (Reddy & Marella, 2001).

Cetin et al. (2006) estudaram a utilização de lascas de pneus grossas misturadas com solo como material de preenchimento de aterros rodoviários. Foram realizados ensaios de compactação, resistência ao cisalhamento e permeabilidade para amostras com e sem a presença de borracha. Os teores de borracha utilizados na pesquisa foram: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Dos resultados obtidos na pesquisa, as compactações Proctor normal apresentaram reduções significativas no peso específico seco com o aumento do teor de borracha, já com relação à umidade ótima de compactação as variações foram pouco significativas (Figura 3.8). As reduções de peso específico seco para o solo com 50% de borracha em comparação com o solo em estado natural, representaram uma diminuição de 28% de peso, o que permitiria construir aterros mais leves.

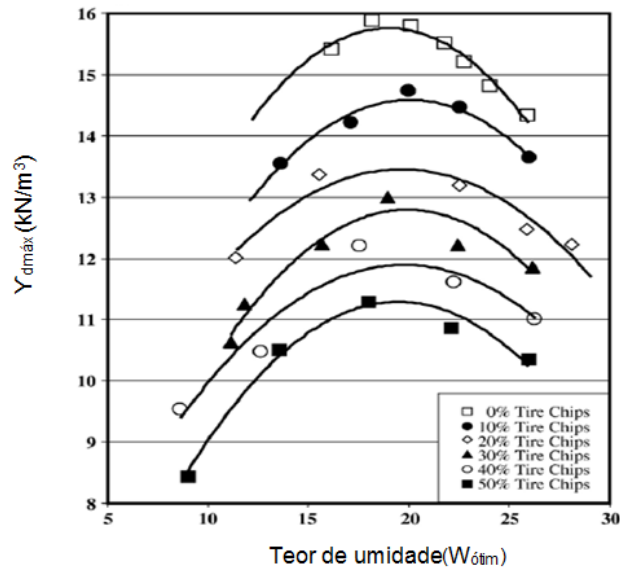


Figura 3.8. Resultados do peso específico seco versus o teor de umidade para cada porcentagem de tira de pneu (Cetin et al., 2006).

Com relação aos ensaios de resistência ao cisalhamento, foram avaliados os mesmos teores de borracha utilizados na compactação, incluindo o teor de borracha de 100%. Para efeitos de comparação foram estudadas lascas de pneu finas e grossas. Dos resultados obtidos na pesquisa, concluiu-se que para as lascas de pneu finas e grossas, a coesão apresenta um pico máximo para um teor de adição de borracha de 40%, decrescendo os valores seguintes (Figura 3.9 a). Porém o ângulo de atrito apresentou um comportamento inverso, apresentando reduções até o 40 % de borracha, e aumentando nos valores seguintes (Figura 3.9 b).

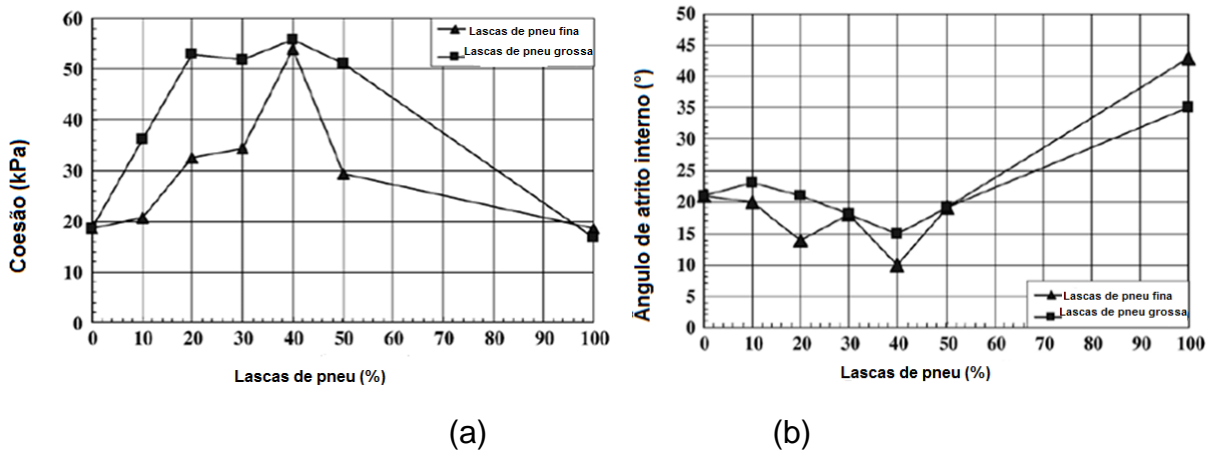


Figura 3.9 Parâmetros de resistência ao cisalhamento para diferentes teores de borracha (modificado de Cetin et al., 2006): (a) coesão; (b) ângulo de atrito.

Os mesmos autores estudaram o efeito das lascas de borracha na permeabilidade, aplicando diversas tensões normais (46 kPa, 93 kPa, 185 kPa, 287kPa e 370 kPa). Os resultados obtidos apresentaram que o coeficiente de permeabilidade aumenta de proporcionalmente com o acréscimo do teor de borracha, e com o aumento da pressão normal (Figura 3.10).

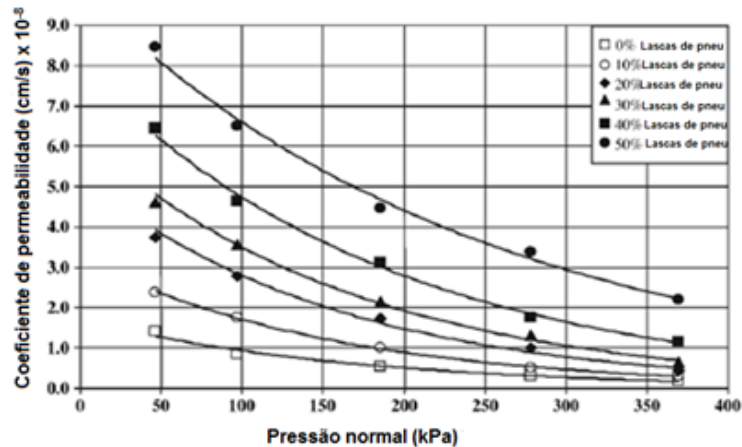


Figura 3.10. Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão normal (Modificado de Cetin *et al.* 2006).

Franco (2012) utilizou o material denominado como desbaste de pneu (Figura 3.11), ou seja, resíduos de pneus com diâmetro médio de 1,4 mm, visando a sua utilização ao ser misturado com solo como material de enchimento de estruturas de arrimo. Dentro dos ensaios de caracterização foram determinadas a gravidade específica e a absorção, obtendo resultados de 1,1 e 5,6% respectivamente.



Figura 3.11. Material de desbaste de pneu (Franco, 2012).

Para avaliar os efeitos nas propriedades mecânicas e hidráulicas Franco (2012) realizou ensaios de compactação, resistência ao cisalhamento e permeabilidade. Os teores de borracha estudados foram de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Dos resultados obtidos nos ensaios de compactação (Figura 3.12), pode-se observar que

apresentam a mesma tendência relatada por Cetin *et al.* (2006), ou seja, com aumento progressivo do teor de borracha na mistura, o peso específico seco reduz mantendo aproximadamente constante a umidade ótima de compactação.

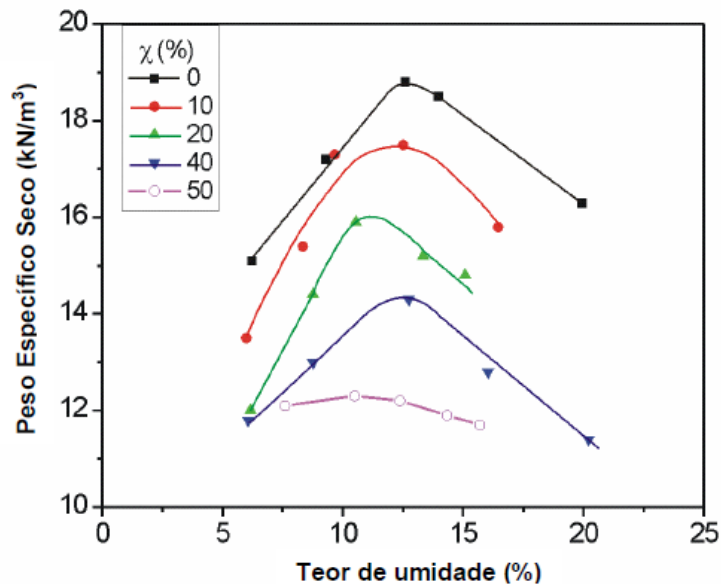


Figura 3.12. Resultados dos ensaios de compactações com e sem adição de borracha (Franco, 2012).

Os estudos de resistência ao cisalhamento realizados por Franco (2012), foram executados sob corpos de prova compactados diretamente na caixa de cisalhamento, aplicando tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, cisalhando os corpos de prova numa velocidade de 0,05mm/min. Na Figura 3.13 e na Tabela 3.2 são exibidas as envoltórias de Mohr-Coulomb para os ensaios com e sem adição de borracha, assim, pode-se verificar a existência de uma tendência do aumento do ângulo de atrito até certo teor de borracha (Franco, 2012).

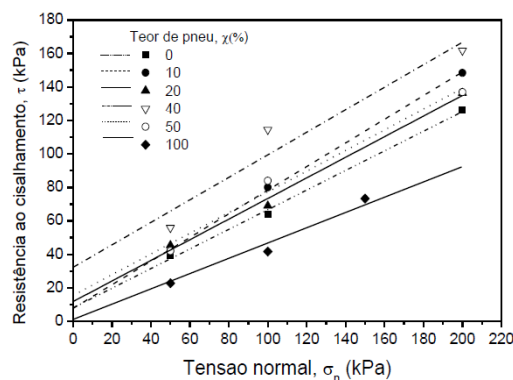


Figura 3.13. Envoltórias de resistências ao cisalhamento para diferentes percentagens de resíduos de pneu (Franco, 2012).



Tabela 3.2 Resultados coesão e o ângulo de atrito com e sem adição de borracha (Franco, 2012).

% de borracha	Ângulo de atrito $\phi'$ (°)	Coesão $c'$ (kPa)
0	31	8,05
10	35	7,89
20	33	11,77
40	34	32,09
50	32	15,51
100	25	-

Os resultados obtidos por Franco (2012) apresentam de forma geral, variações pouco significativas para o ângulo de atrito no intervalo de valores entre 0% e 50% de borracha. Com relação à coesão o máximo valor foi obtido para um teor de 40% (Tabela 3.2).

Franco (2012) executou ensaios de permeabilidade com carga variável para diferentes teores de borracha. Os resultados obtidos apresentaram valores crescente na permeabilidade até o teor de 40%, onde os valores de estabilizaram (Figura 3.14).

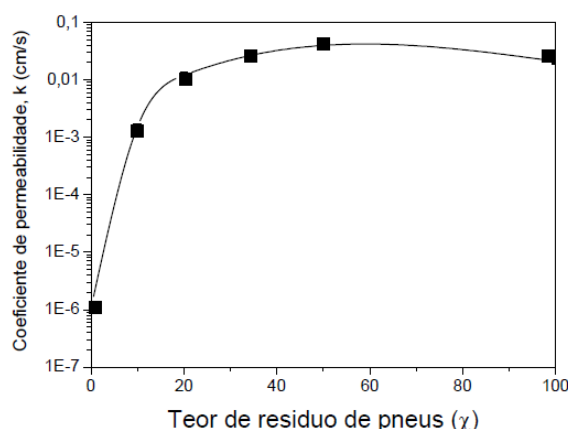


Figura 3.14. Variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de borracha para amostras submetidas a uma tensão confinante de 100 kPa (Franco, 2012).

Chrusciak (2013) utilizou pedaços de pneu reciclados compostos por fios de aço e barbantes, entre outros componentes. O objetivo da pesquisa foi melhorar o solo laterítico de Brasília, visando o aproveitamento sustentável às lascas de pneu. Na pesquisa foram utilizados fragmentos de borracha com diâmetros variados (Figura 3.15). Do ensaio de granulometria foi determinado que o material apresentou um  $D_{50}$  de 11,0 mm e uma gravidade específica de 1,18.



Figura 3.15. Resíduo de pneus triturados (Chrusciak, 2013).

Os teores de borracha inicialmente estudados por Chrusciak (2013) foram de 5%, 10% e 15% de resíduo com relação ao peso, após a compactação de corpos de prova em condições de laboratório, foram observadas trincas no corpo de prova de 5% de borracha (Figura 3.16). Devido às trincas evidenciadas nos corpos de prova, a autora decidiu realizar estudos com 2,5%, 3,75% e 7,5% de borracha.



Figura 3.16. Amostra com 5% de borracha (Chrusciak, 2013).

Os resultados apresentados por Chrusciak (2013) confirmam os obtidos por outros autores (Cetin et al. 2006; Franco, 2012), nos quais o peso específico seco diminui com o acréscimo de teores de borracha, sem influenciar de forma considerável a umidade ótima de compactação (Figura 3.17).

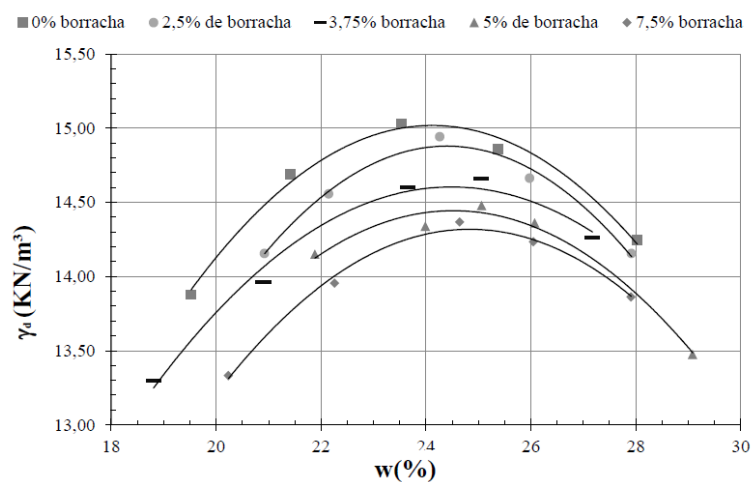


Figura 3.17. Curvas de compactações para todos os teores de borracha (Chrusciak, 2013).

Com relação aos ensaios de resistência ao cisalhamento, foi utilizado um equipamento de média escala, compactando os corpos de prova por meio de compactação estática. Assim, após a compactação foram aplicadas tensões de 25 kPa, 50 kPa e 80 kPa, para os teores de 2,5%, 3,75%, 5% e 7,5% de pedaços de pneu, para determinar a envoltória de cisalhamento de Mohr - Coulomb.

Dos resultados obtidos foi possível concluir que a coesão diminui e o ângulo de atrito aumentou para as amostras com adição de borracha (Tabela 3.3). Isso ocorre devido que os pedaços de pneu se comportam como um material granular (Chrusciak, 2013).

Tabela 3.3 Resultados coesão e o ângulo de atrito com e sem adição de pedaços de pneu (Chrusciak, 2013).

% de borracha	Ângulo de atrito $\phi'$ (°)	Coesão $c'$ (kPa)
0	29,35	35,60
2,5	32,64	27,98
3,75	32,26	24,35
5	37,60	20,64
7,5	39,65	13,52

Suárez (2016) utilizou fragmentos de borracha procedentes da trituração primária e secundária de pneus (Figura 3.18), pretendendo melhorar as propriedades mecânicas do solo laterítico de Brasília. Os ensaios realizados para determinar as variações nas propriedades mecânicas foram: compactação Proctor e resistência ao cisalhamento em equipamento de média escala. O diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) foi igual a 20 mm, apresentando presença de malha de aço. Para efeito de controle do tamanho das partículas, foi descartado o material passante da peneira de 9,5 mm. Entre os resultados dos ensaios de caracterização destacam-se a gravidade específica que apresentou um valor médio de 1,18 e absorção de 2,6%.



Figura 3.18. Pedaços de pneus (Suárez, 2016).

Os ensaios de compactação foram realizados com teores de borracha de 2,5%, 3,75%, 5%, 7,5%, 10% e 100%, utilizando o método de compactação Proctor conforme a norma NBR 7182. Após a compactação foram evidenciados trincas e planos de fraqueza resultantes da adição de borracha (Figura 3.19) e, o consequente relaxamento dos materiais após o desconfinamento. No entanto, as estruturas dos corpos de prova não se encontraram muito afetadas até 5% de borracha.



Figura 3.19. Trincas e planos de fraqueza nos corpos após a compactação (Suárez, 2016).

Com os resultados das compactações apresentados na Figura 3.20, pode-se observar que o peso específico seco das misturas apresentou uma diminuição de até 6,0 % com o aumento do teor de borracha de 0% a 10%.

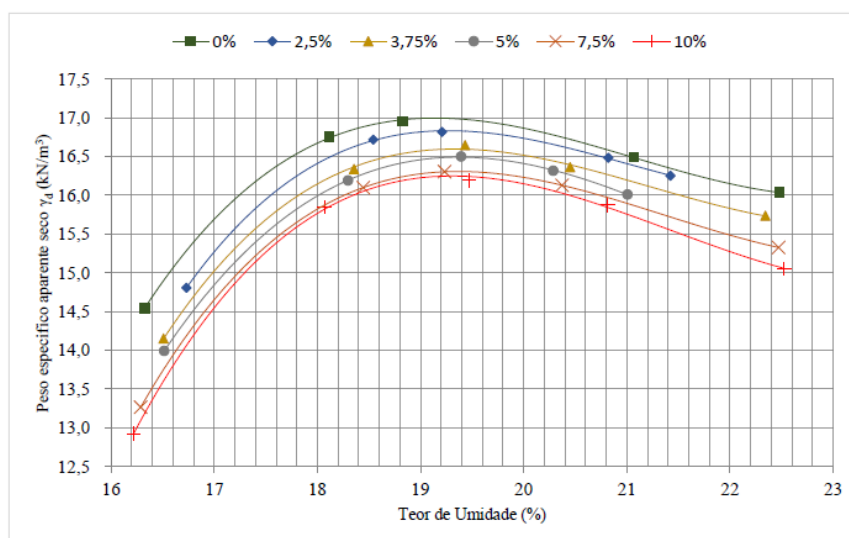


Figura 3.20. Curvas de compactação para diferentes teores de borracha (Suárez, 2016)

Ainda Suárez (2016) executou ensaios de cisalhamento com tensões confinantes de 25 kPa, 50 kPa, 80 kPa e 100 kPa em caixa de média escala por meio de compactação estática, utilizando os mesmos teores de borracha dos ensaios de compactação. Os

ensaios forma realizados em condições drenadas e adensadas com velocidade de cisalhamento igual a 0,1016 mm/min. Na Tabela 3.5 são apresentados os parâmetros das envoltórias de Mohr Coulomb para o solo com e sem adição de borracha.

Baseando-se na investigação visual e resultados adquiridos em laboratório, Suárez (2016) concluiu-se que o teor ótimo de pedaços de borracha a ser aplicado é de 5%, conforme sua metodologia.

Tabela 3.4. Parâmetros envoltória Mohr Coulomb com e sem adição de borracha (Suárez, 2016).

% de borracha	Ângulo de atrito $\phi'$ (°)	Coesão $c'$ (kPa)
0	27	25
2,5	32	25
3,75	35	23
5	36	22
7,5	39	20
10	42	18
100	21	6

A partir dos resultados encontrados por diversos autores (Cetin et al., 2006; Franco, 2012; Chrusciak, 2013; e Suárez, 2016), pode-se concluir que a granulometria, geometria e a porcentagem de borracha influenciam substancialmente nos resultados do melhoramento de solos. O tipo de energia compactação e condições de contorno da realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento, também são fatores determinantes no comportamento mecânico do material misturado. Portanto, existe o aumento na resistência ao cisalhamento até certo teor de borracha e, após esse teor máximo, os resultados posteriores são decrescentes.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 BORRACHA DE PNEU RECICLADA**

A fração fina da borracha reciclada (Figura 4.1) utilizada na pesquisa, foi um material proveniente da trituração do subproduto do pneu, submetido a um processo de separação de diversos componentes do pneu. Após a seleção e caracterização do material, foram realizados ensaios de granulometria, massa específica real dos sólidos e massa unitária solta da borracha de acordo com as normas NBR 7181, 6508 e 7251, respectivamente.



Figura 4.1. Borracha de pneu reciclada.

Para determinar a capacidade de absorção de água, foi realizada a determinação segundo a norma NBR 6458. No procedimento de ensaio, uma amostra representativa de borracha ficou imersa em água destilada por 5 dias e posteriormente retirada. Em seguida passou pelo processo de secagem na estufa para determinar a quantidade de água absorvida.

### **4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**

#### **4.2.1 Amostragem do solo**

O solo utilizado na pesquisa foi extraído a uma profundidade de 4 metros por uma retroescavadeira no estacionamento da Disbrave (Figura 4.2), localizado na quadra 503 da Asa Norte Brasília DF. O material coletado foi devidamente ensacado, referenciado e transportado até as instalações do laboratório de solos e materiais, no Bloco 11 do campus asa norte do UniCEUB.

Conforme os procedimentos estabelecidos na norma NBR 6457, foram preparadas as amostras para os ensaios de compactação e de caracterização física do solo (Figura 4.3). Os ensaios de caracterização realizados foram: granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos sólidos, massa unitária solta, classificação de solos tropicais MCT, permeabilidade, cisalhamento direto o e Índice de Suporte Califórnia, de acordo com as normas NBR 7181, NBR 6459, NBR 7180, NBR 6508, NBR 7251, NBR 14545, ASTM D 3080/98 e NBR 9895, observando que a metodologia de classificação MCT não possui norma técnica.



Figura 4.2. Estacionamento Disbrave Quadra 503 Asa Norte Brasília DF.



Figura 4.3. Solo Laterítico de Brasília.

#### 4.2.2 Análise granulométrica

Prévio à realização dos ensaios de laboratório, foram preparadas amostras representativas conforme a norma NBR 6457. A norma prescreve o método para a preparação do material para alguns ensaios como: granulometria, determinação dos limites de Atteberg, a massa específica dos grãos (passante na peneira 4,8 mm), entre outros.

A preparação da amostra de solo foi realizada através da secagem do material ao ar livre, até atingir a umidade higroscópica. Em seguida o material foi separado na peneira 4,8 mm (Figura 4.4 a). Realizando posteriormente a avaliação granulometria

do material por peneiramento para a fração grossa (Figura 4.4 b), e por sedimentação para a fração fina (Figura 4.4 c).

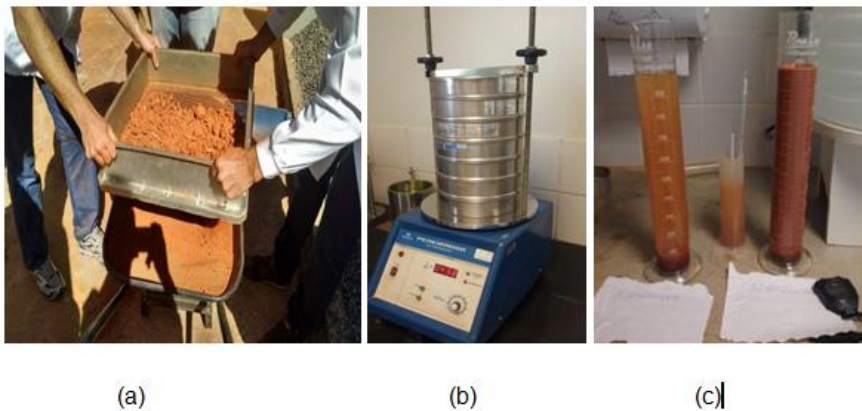


Figura 4.4. Sequência do ensaio de granulometria: (a) solo passante na peneira N°4,8 mm; (b) peneiramento grosso; (c) sedimentação do solo.

#### 4.2.3 Limites de Atterberg

Os ensaios foram realizados conforme as normas NBR 6459 e NBR 7180. Onde a primeira norma tem como objetivo determinar o teor de umidade do solo argiloso, correspondente ao estado limite entre os estados sólido e semi-sólido (Limite de liquidez) (Figura 4.5 a). A segunda norma determina o teor de umidade do solo argiloso, correspondente ao estado limite entre os estados plástico e semi-plástico (Limite de Plasticidade) (Figura 4.5 b).

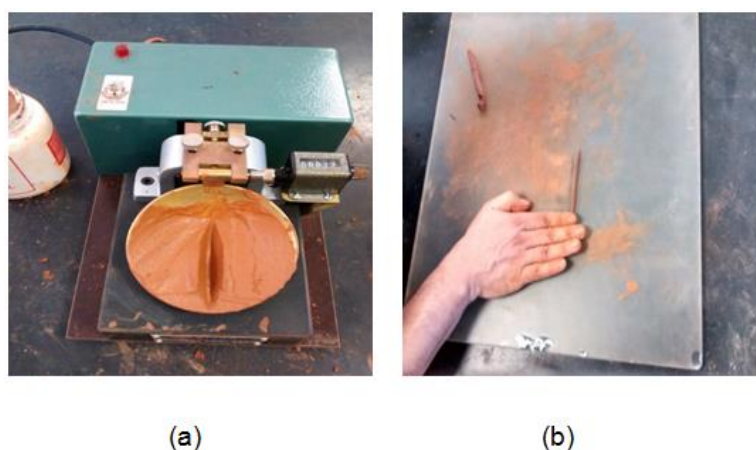


Figura 4.5. Limites de Atterberg: (a) determinação limite de liquidez); (b) determinação limite de plasticidade).



#### 4.2.4 Massa específica real dos grãos e massa específica unitária

O ensaio da massa específica real dos grãos foi realizado de acordo com a NBR 6508, que determina a relação entre a massa e o volume dos grãos do solo. O experimento da massa específica unitária foi realizado de acordo com a norma NBR 7251.

#### 4.2.5 Classificação de solos tropicais (MCT)

Miniatura Compactada Tropical é uma metodologia de ensaio rápido, realizado in loco ou em laboratório, de solos com origem lateríticos. O ensaio MCT procura obter como resultados as propriedades relacionadas à consistência dos solos, a resistência no estado seco, e se existe ou não expansão ou contração. O ensaio MCT não tem até o momento uma norma que permita obter resultados com a acurácia que as pesquisas precisam (Nogami & Villibor, 1996).

As determinações realizadas incluíram umidade natural, granulometria, contração, penetração, absorção, plasticidade e resistência ao esmagamento do solo. Na Figura 4.6 é apresentada a metodologia utilizada durante a realização dos ensaios.

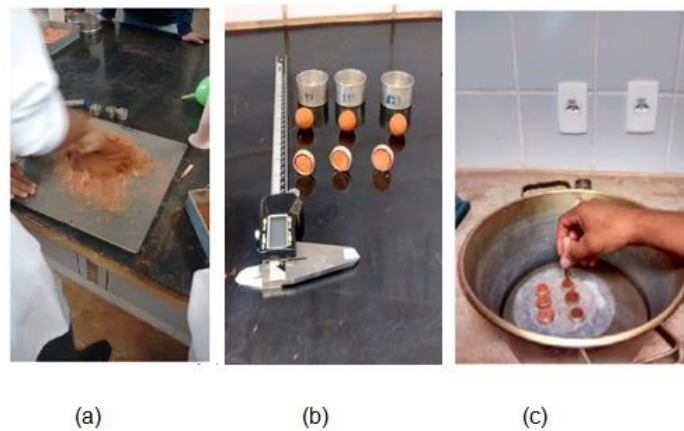


Figura 4.6. Ensaio MCT: (a) espalhamento da massa úmida; (b) medições das umidades e contrações da amostra; (c) medição da penetração com o penetrômetro.

#### 4.2.6 Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo as normas NBR 6457 e NBR 7182, com o objetivo de determinar a relação entre a umidade ótima e a massa específica aparente seca dos solos.

#### 4.2.7 Permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade foram compactados corpos de prova com e sem adição de borracha. Uma vez elaborados os corpos de prova foram dispostos num permeâmetro de carga variável (Figura 4.7) conforme a norma NBR 14545.



Figura 4.7 Permeâmetro de carga variável.

#### 4.2.8 Mistura solo pneu

Após a determinação da umidade ótima para o solo em estado natural, sob a energia de compactação Proctor modifica, foram realizadas as misturas do solo-pneu com diferentes teores de borracha (40%, 20%, 5% e 3%). Os teores de pneu foram estabelecidos em relação à massa total do composto. Por exemplo: Foram utilizados 60% de solo + 40% de borracha.

Ao realizar a primeira tentativa de compactação sob a energia Proctor Modificada com mistura de 40% de borracha e 60% de solo, apresentou um comportamento similar à de uma mola (estado confinado), posteriormente ao realizar a extração do corpo de prova do cilindro de compactação, o mesmo não apresentou coesão suficiente para manter-se estável, esfarelando totalmente (Figura 4.).



Figura 4.8. Amostra de solo-pneu com teor de 40% de borracha.

Na segunda tentativa, foi realizada a compactação com uma mistura composta por 20 % de borracha e 80% de solo, apresentando as mesmas características ao anterior, no entanto, com uma coesão maior, mas ainda insuficiente para a realização dos ensaios (Figura 4.9).



Figura 4.9. Amostra de solo-pneu com teor de 20% de borracha.

Na terceira tentativa, foi definido acrescentar apenas 5% de borracha e 95% de solo, observando melhores resultados na coesão da mistura, mas continuou apresentando muitas fissuras ao extrair o corpo de prova do cilindro de compactação (Figura 4.10).



Figura 4.10. Amostra de solo-pneu com teor de 5% de borracha.

Ao realizar a quarta tentativa, foi definido acrescentar 3% de borracha e 97% de solo, observando melhores condições em relação aos testes anteriores (Figura 4.11). Apresentando uma coesão aceitável, para poder extrair os corpos de prova dos cilindros de compactação.



Figura 4.11. Amostra de solo-pneu com teor de 3% de borracha.

#### 4.2.9 Cisalhamento direto

Com a finalidade de avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento direto, para amostras com e sem adição de borracha, foram compactados corpos de prova cilíndricos conforme a norma NBR 7182, na umidade ótima da energia de compactação Proctor Modificada. Após a extração dos corpos de prova, foram moldadas as amostras para a realização dos ensaios de cisalhamento (Figura 4.12).



Figura 4.12. Moldagem de um corpo de prova no cilindro com teor de 3% de borracha.

Os ensaios foram realizados de acordo ao estabelecido na norma ASTM D 3080/98, utilizando a máquina de cisalhamento direto (Figura 4.13). As tensões normais avaliadas para obter a envoltória de Mohr – Coulomb foram: 200 kPa, 400 kPa, 600 kPa e 800 kPa. As avaliações foram realizadas a uma velocidade controlada de 0,029 mm/min, e após a saturação dos corpos de prova.



Figura 4.13. Máquina de ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

#### 4.2.10 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de ISC (Índice de Suporte Califórnia) foi realizado de acordo com a norma NBR 9895, para amostras com e sem adição de borracha. Os resultados obtidos de ISC, são empregados como base no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

#### Expansão

Após a compactação dos corpos de prova na umidade ótima, cada uma das amostras foi posicionada em um prato perfurado para a determinação de expansão, aos estar os corpos de prova em saturação durante 4 dias (Figura 4.14)



Figura 4.14. Corpo de prova submerso por 96 horas.

## Penetração

Após deixar os corpos saturando por 96 horas, os corpos de prova foram retirados do tanque de saturação e deixando-os escorrer por 15 min, levando as amostras para a prensa onde foram efetuados os ensaios de penetração (Figura 4.15). Durante a realização dos ensaios foram realizadas leituras de carga sob diferentes deformações. Para finalizar foram realizados os cálculos conforme a norma NBR 9895.



Figura 4.15. Ensaio de penetração no corpo de prova.

## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física do solo, e os resultados que avaliaram as mudanças da resistência mecânica dos corpos de prova com e sem adição de borracha.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

#### 5.1.1 Ensaio de granulometria

A análise granulométrica do solo foi realizada acordo a norma NBR 7181 (Figura 5.1).

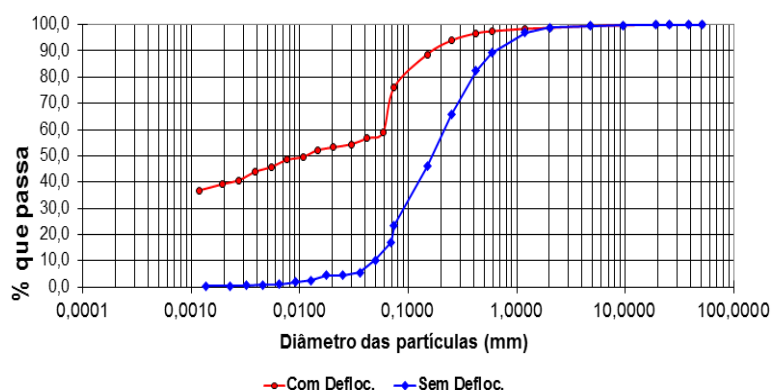


Figura 5.1. Curvas granulométricas do solo puro com e sem defloculante.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS), o solo foi classificado como Silte arenoso de baixa compressibilidade – ML e no Sistema de Classificação (AASHTO) como solo do tipo A-7-5(10).

Na Tabela 5.1, são apresentados os resultados da composição granulométrica das amostras de solo avaliadas com e sem defloculante, respectivamente.

Tabela 5.1. Análises granulométricas do solo puro com e sem defloculante.

Propriedades	Amostra	
	Com defloculante	Sem defloculante
Granulometria (%)		
Argila (<0,005 mm)	39,4	0,4
Silte (0,05 - 0,005 mm)	19,8	13,4
Areia (2,0 - 0,05 mm)	39,7	85
Pedregulo (> 2,0 mm)	1,2	1,2

Ao analisar os resultados obtidos para o solo com e sem adição de defloculante, foi possível verificar que: existe uma influencia da solução defloculante na dispersão dos grãos. A solução defloculante age sobre as partículas ajudando na desagregação dos grãos, quando ocorreu a sedimentação.

Portanto, a granulometria sem defloculante, apresentam os grãos agrupados, como ocorre naturalmente na natureza, a sedimentação acontece mais rápido, sinalizando diâmetros maiores, que em muitas vezes, não são os das partículas, mas sim das agregações.

### 5.1.2 Limites de Atterberg

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados dos limites de Atteberg: limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e índice de compressão da amostra de solo. Através dos resultados obtidos, a amostra apresento plasticidade média segundo a tabela de classificação de índice de plasticidade (Das, 2007).

Tabela 5.2. Limites de Atteberg para solos de Brasília.

Propriedades	Amostra
Limite de Liquidez (%)	43
Limite de Plasticidade (%)	31
Índice de Plasticidade (%)	12
Índice de compressão	0,297

### 5.1.3 Massa específica real dos grãos

O ensaio de massa específica real dos grãos foi realizado de acordo com a norma NBR 6508, obtendo uma gravidade especifica média de 2,71.

### 5.1.4 Miniatura Compactação Tropical (MCT)

Os ensaios foram realizados conforme a metodologia MCT expedita, apresentaram uma classificação do solo como uma Areia argilosa laterítica (LA'-LG'). Com relação ao índice  $c'$ , que está associado a argilosidade do solo, o valor obtido foi considerado médio.



## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA BORRACHA

A fração fina da borracha reciclada foi um material provido da trituração do pneu, após o processo de separação de diversos componentes, apresentando as propriedades descritas a continuação.

### 5.2.1 Granulometria

No ensaio de granulometria a análise foi realizada somente pelo peneiramento grosso conforme a norma NBR 7181, sendo adaptado os procedimentos de ensaio para as condições do material reciclado (Figura 5.2).

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados de granulometria para a borracha. Conforme os coeficientes de uniformidade e curvatura, o material foi classificado como mal graduado.

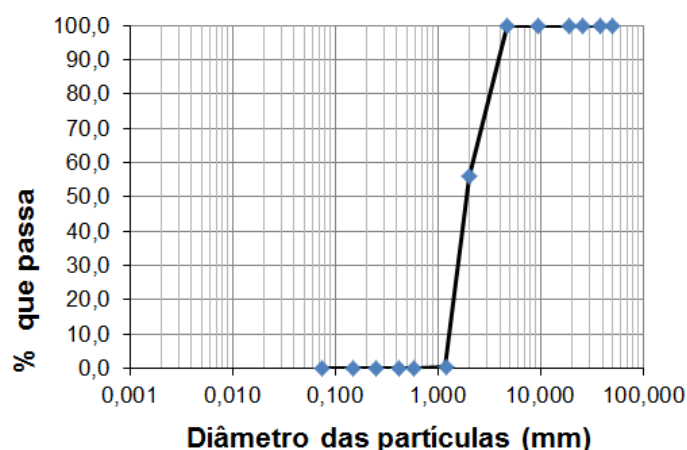


Figura 5.2. Curva granulométrica da borracha.

Tabela 5.3. Análise granulométrica da borracha.

Índices físicos	Amostra de borracha
Coefficiente de uniformidade (CU)	1,5
Coefficiente de curvatura (CC)	0,87
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) mm	1,4
Diâmetro ( $D_{30}$ ) mm	1,6
Diâmetro médio ( $D_{50}$ ) mm	1,9
Diâmetro ( $D_{60}$ ) mm	2,1

### 5.2.2 Massa específica real dos grãos

O ensaio de massa específica real dos grãos para a borracha foi realizado de acordo com a norma NBR 6508 adaptada para borracha. O valor de gravidade específica obtido foi de 1,18.

### 5.2.3 Massa específica unitária

De acordo NBR 7251 adaptada para borracha, a qual determina a massa unitária e o volume de vazios, o valor obtido para a fração fina de borracha reciclada foi de 0,533 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.2.4 Análise da mistura solo borracha

Através dos resultados das massas específica dos grãos do solo e pneu, foi utilizada uma média ponderada entre os teores e o valor de  $G_{smist}$ , conforme a equação a seguir.

$$G_{smist} = \frac{G_{ssolo} \times \%solo + G_{spneu} \times \%pneu}{100} \quad (5.2.4)$$

Onde:

$G_{smist}$ : massa específica real dos grãos da mistura;

$G_{ssolo}$ : massa específica real dos grãos de solo;

$G_{spneu}$ : massa específica real dos grãos de pneu granular;

$\%solo$ : teor de solo da mistura;

$\%pneu$ : teor de pneu granular da mistura.

Comparando os valores de massa específica real dos grãos obtidos na pesquisa (Tabela 5.4), com os valores apresentados por Chursciak (2013) e Suárez (2016) pode ser concluído que os valores são coerentes com os resultados de outros autores.

Tabela 5.4. Massa específica real dos grãos e massa unitária (solo e borracha).

Materiais	
$G_{ssolo}$	2,71
$G_{smist}$	2,664
$G_{spneu}$	1,18
Massa unitária Solo (g/cm <sup>3</sup> )	1,007
Massa unitária Borracha (g/cm <sup>3</sup> )	0,533

### 5.2.5 Teste de absorção de água da borracha

Para a realização do ensaio, imergiu-se uma amostra da borracha em um recipiente por 120 horas, medindo o seu peso antes e depois da saturação. Concluiu-se que a borracha apresenta absorção menor do que 1%, tornando-a desprezível. Assim, pode-se verificar que a borracha não influencia significativamente na retenção de umidade, ou seja, a borracha não absorve água suficiente para comprometer a umidade do composto.

Franco (2012) apresentou 5,6% de absorção de água. Suárez (2016) relatou absorção de água igual a 2,6%. É importante destacar que os resultados obtidos pelos autores, correspondem a materiais diferentes aos usados na presente pesquisa.

### 5.3 COMPACTAÇÃO PROCTOR

Na Figura 5.3 são apresentadas as curvas de compactação para o solo no estado natural nas energias de compactação Proctor normal, intermediária e modificada.

A tendência geral que acontece na compactação de solos finos, usando a energia de compactação Proctor, gerou aumentos no peso específico seco e reduções na umidade ótima.

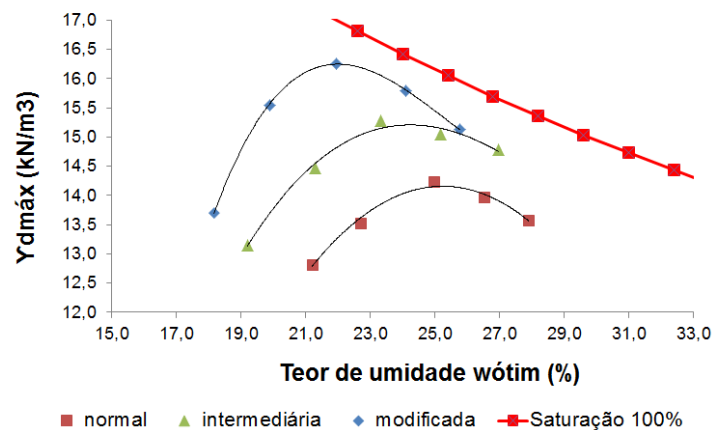


Figura 5.3. Curvas de compactação solo em estado natural.

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores de umidades ótimas ( $w_{\acute{o}tim}$ ) e pesos específicos secos máximos ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) das curvas de compactação.

Tabela 5.5. Pesos específicos secos máximos e umidades ótimas.

<b>Energia de compactação</b>	<b><math>W_{\text{ótím}}</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_{\text{dmáx}}</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Modificada</b>	21,65	16,26
<b>Intermediária</b>	23,33	15,28
<b>Normal</b>	24,96	14,23

Definidas as condições de compactação para o solo em estado natural, foram compactados corpos de prova com e sem adição de borracha, nas condições da energia modificada e sob a mesma úmida ótima. Na Tabela 5.6, são apresentados os valores médios de umidade de compactação e peso específico seco, obtidos nos corpos de prova após a compactação em estado natural e com a adição de borracha.

Tabela 5.6. Umidades de compactação e pesos específicos secos.

<b>Material</b>	<b>W (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Solo natural (SN)</b>	21,65	16,26
<b>Mistura com 3% de borracha (SB)</b>	19,93	14,95

Franco (2012) encontrou peso específico seco máximo de 18,80 kN/m<sup>3</sup> para o solo puro e 17,50 kN/m<sup>3</sup> para o solo com 10% de borracha. Chrusciak (2013) obteve peso específico seco máximo de 15,02 kN/m<sup>3</sup> e 14,88 kN/m<sup>3</sup> para o solo puro e solo-borracha. Suárez (2016) determinou um peso específico seco máximo de 16,98 kN/m<sup>3</sup> para o solo puro e 16,83 kN/m<sup>3</sup> para o solo-borracha.

Com os resultados obtidos por outros autores, é possível concluir que ao acrescentar o pneu granular, este exerce certa influência sobre o peso específico seco máximo, ao tornar camadas de solo mais leves. Assim, podem-se construir estruturas de arrimo e aterros de menor peso com esse tipo de composto, diminuindo o consumo de solo e dando um aproveitamento sustentável a um material de difícil decomposição.

Suárez (2016) relatou que esse fenômeno acontece devido à densidade do material de borracha ser menor que a densidade do solo compactado e, assim, com a adição da borracha na mistura configura-se um composto mais leve.

#### 5.4 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de cisalhamento para o solo sem adição de borracha (Figura 5.4 a). Segundo os resultados obtidos para os diferentes níveis de tensão, é possível identificar a ruptura pico da curva.

Os resultados do ensaio de cisalhamento com adição de borracha (Figura 5.4 b), não apresentam claramente a tensão máxima de ruptura para os níveis de tensão estudados.

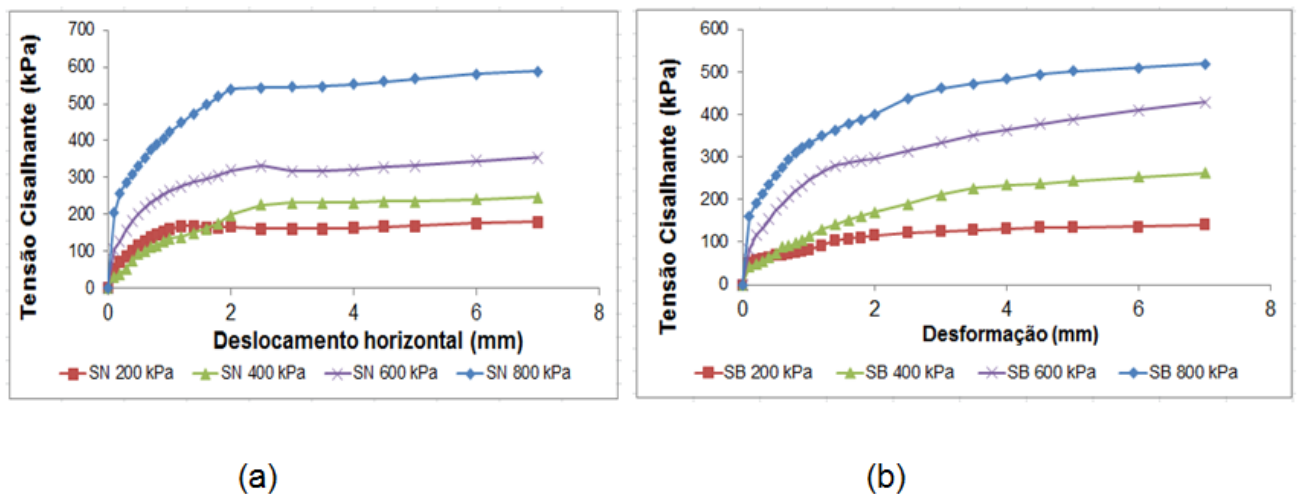


Figura 5.4. Resultados dos ensaios de resistência ao: (a) solo em estado natural; (b) solo – borracha.

Chrusciak (2013) relatou que, à medida que é adicionado o teor de borracha na mistura, o composto tende a não apresentar o pico de resistência ao cisalhamento, dificultando na evidência do valor máximo adquirido, este comportamento pode ser explicado pelo fato dos grãos de borracha absorver uma parcela da força cisalhante aplicada.

Segundo Suárez (2016) a adição de borracha proporciona elasticidade à mistura, assim, o composto permanece elástico, dificultando o rompimento e, os pedaços de pneus se comportam como material granular dentro da mistura, interferindo no plano de ruptura.

Ao analisar a variação do volume do solo puro e do solo-borracha, ambos apresentaram redução de volume quando submetidos a tensões de cisalhamento (Figura 5.5). No entanto, é observado um aumento de 2,1% de compressão em

relação ao solo puro quando a carga de 200 kPa é aplicada. À medida que é aplicada a tensão de 400 kPa, o solo-borracha apresenta um aumento de 0,95% de compressão em relação ao solo puro. O solo puro e solo-borracha não apresentam dilatação quando são submetidos a tensões cisalhantes.

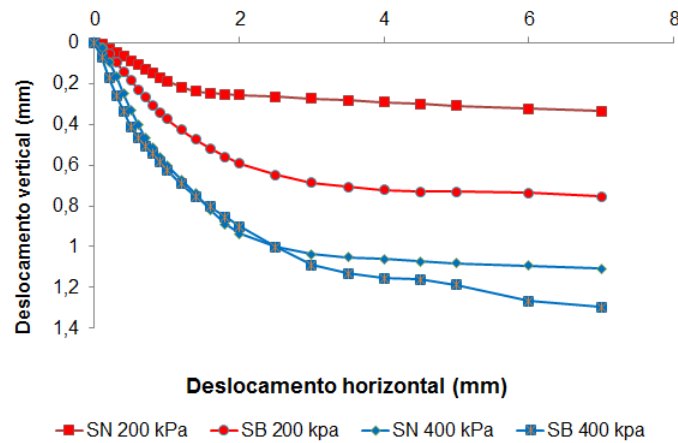


Figura 5.5. Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal (solo puro e solo-borracha).

Na Figura 5.6 são apresentadas as envoltórias de resistência ao cisalhamento de Mohr – Coulomb, obtidas para o solo no estado natural e com adição de 3% de borracha de pneu reciclada.

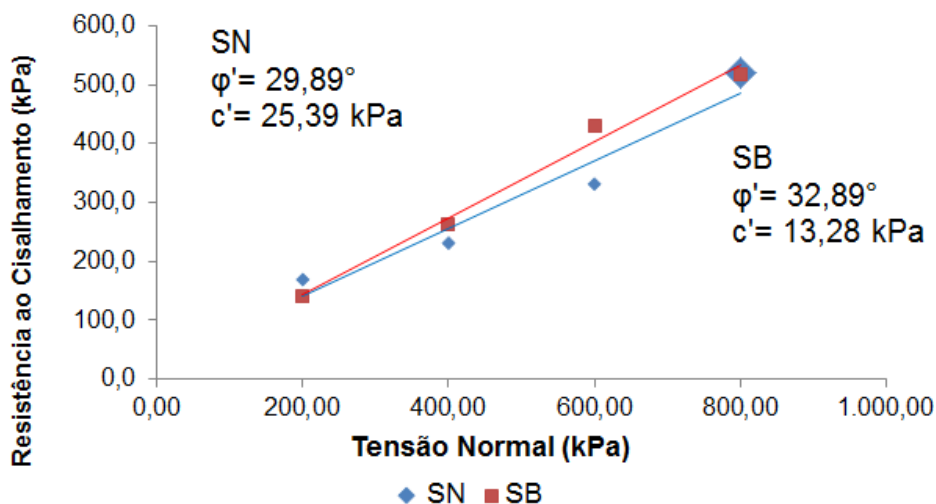


Figura 5.6. Envoltória de Mohr – Coulomb solo em estado natural e com adição de borracha.

Ao comparar os resultados na pesquisa com os valores de coesão e ângulo de atrito, apresentado por outros autores (Tabela 5.7), é possível concluir que a presença de borracha aumenta o ângulo de atrito e reduz a coesão.

Tabela 5.7. Parâmetros obtidos de resistência ao cisalhamento (mistura).

<b>Autor</b>	<b>Teor de pneu (%)</b>	<b>C' (kPa)</b>	<b><math>\Phi'</math> (°)</b>
<b>SN</b>	0	25	29
<b>SB</b>	3	13	33
<b>Cetin et al., (2006)</b>	0	18	22
	10	21	20
<b>Franco (2012)</b>	0	8	31
	10	8	35
<b>Chrusciak (2013)</b>	0	35	29
	7,5	13	40
<b>Suárez (2016)</b>	0	25	27
	10	18	42

Segundo Ramirez (2012) o comportamento da mistura de solo-borracha, não só depende do teor de borracha na mistura, outro fator que afeta consideravelmente os resultados é o nível de confinamento no qual a amostra é submetida.

Chrusciak (2013) relatou que existem fatores que influenciaram diretamente nos resultados encontrados para a resistência ao cisalhamento, assim, durante as compactações em médias dimensões, podem existir regiões menos compactadas que outras, devido às dimensões da amostra.

Suárez (2016) concluiu que a escolha do teor ótimo de borracha deve considerar além da resistência ao cisalhamento, a estruturação dos corpos de prova compactados, evitando a utilização de compostos com excessivas trincas que eventualmente podem gerar planos de fraqueza.

## 5.5 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Na Figura 5.7 são apresentadas as curvas de penetração para o solo no estado natural e com adição de borracha, verificando que ao acrescentar a borracha, a mistura apresentou uma capacidade menor de suportar a pressão normal aplicada.

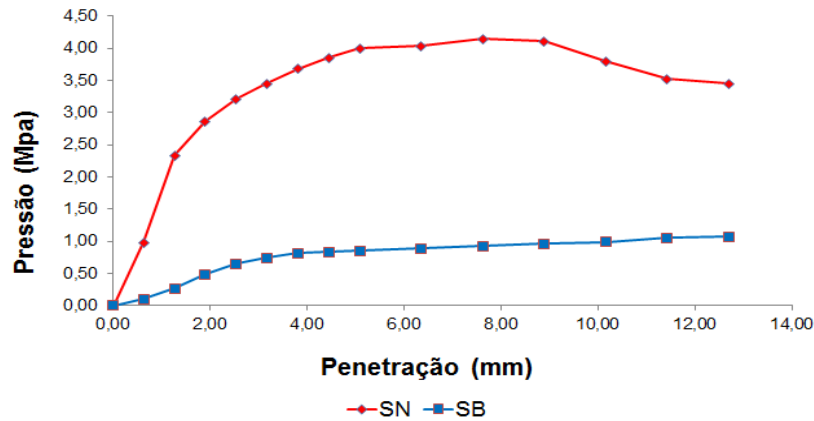


Figura 5.7. Curvas de pressão por penetração.

Os valores de ISC para as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm são apresentados na Figura 5.8. De forma geral foram obtidos valores de ISC de 46,53% para o solo no estado natural e de 9,36% para o solo com a adição de borracha (valores avaliados a 2,54 mm de penetração).

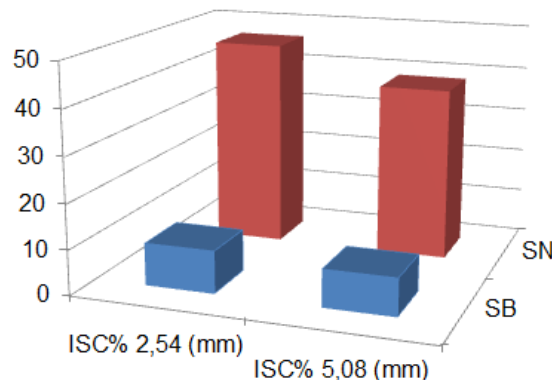


Figura 5.8. Médias de resistências à penetração (ISC%).

O solo-borracha teve uma redução de 80% do seu Índice de Suporte de Califórnia, do solo melhorado com borracha em comparação com o solo em estado natural. A redução no ISC pode ser explicada devido que a presença de borracha, gerou maiores vazios no composto facilitando a percolação da água, e permitindo o aumento da expansão do solo. O resultado da expansão para o solo com a presença de borracha foi de 35,6%.

De acordo com as solicitações do DNIT 2006, o ISC tem que atingir no mínimo 20% com o objetivo de ser utilizada em sub-bases e no mínimo 60% para bases, como o solo-borracha não atendeu as especificações pelo DNIT 2006, pode-se sugerir como inadequado para ser utilizado em estruturas de pavimentação.



## 5.6 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Para determinação do coeficiente de permeabilidade com carga variável, foram usadas duas amostras de solo, com e sem a adição de borracha. Sendo obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.8.  $10^{-7}$

Tabela 5.8. Resultados ensaios de permeabilidade de carga variável

	<b>Solo sem borracha</b>	<b>Solo com borracha</b>
<b>Temperatura da água (°C)</b>	23,5	23,7
<b>k (cm/s)</b>	$1,82 \times 10^{-7}$	$1,15 \times 10^{-5}$
<b>K<sub>20°</sub> (cm/s)</b>	$1,67 \times 10^{-7}$	$1,05 \times 10^{-5}$

Nos resultados obtidos nos ensaios de coeficiente de permeabilidade, pode-se verificar que, o solo com borracha é mais permeável devido ao aumento dos espaços vazios interconectados, devido que a água consegue percolar com maior facilidade.

Nas condições de ensaio o solo sem borracha levou um período de 16 dias para saturação completa, por enquanto que o solo com adição de borracha levou 5 dias para a saturação total.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

### **6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Através dos resultados obtidos na presente pesquisa é possível concluir que:

- Para as condições de compactação da energia do Proctor modificada, o teor máximo de borracha que pode ser empregado é de 3%.
- Ao realizar a compactação com o teor de pneu, apresentou uma redução do peso específico seco máximo de 8,06% com relação ao solo em estado natural. A partir do resultado anterior, pode-se concluir os efeitos benéficos que gera a inclusão de borracha, ao gerar camadas mais leves, como material de preenchimento de estruturas de arrimo.
- O solo misturado com borracha apresentou uma redução na coesão de 48%, e um aumento do ângulo de atrito de 10%, em relação aos resultados do solo em estado natural.
- Os resultados do ISC para o solo misturado com borracha apresentaram um ISC de 9,36%, gerando uma redução de 80% em relação ao do solo natural, impossibilitando seu uso em camadas para estruturas de pavimento.
- Dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade, pode-se concluir que a adição da borracha aumenta a capacidade percolação da água em regime de escoamento laminar.

## 6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Estudar o comportamento de solo melhorado com borracha em diferentes teores de umidade e energias de compactação.
- Estudar o comportamento de diferentes tipos de solo com a incorporação de borracha de pneu.
- Avaliar o efeito de materiais cimentantes misturados ao solo com adição de borracha.
- Realizar ensaios de resistência triaxial e de módulos de resiliência para determinar o comportamento mecânico e dinâmico do solo melhorado com borracha.

## 7 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

\_NBR 6457: Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

\_ NBR 6458: Grãos e pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

\_NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

\_NBR 6508: Solo – Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

\_NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

\_NBR 7251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_NBR 9895: Solo - Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.

\_NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, (2015). Livro branco da indústria de pneus, São Paulo, 16-28 p.

ASTM – American Society for Testing Materials

\_ASTM D3080-98: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions,

\_ASTM D6270-08: Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications.

Cetin, H., Ferner, M., Gunaydin, O. (2006). Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as fill material, *Engineering Geology*, Vol 88, 110-130 p.

Chiossi, N. J. (2013). *Geologia de engenharia*. Oficina de Textos, São Paulo, 3 ed, 81-90 p.

Chursciak, M. R. (2013). *Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-221/13, Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.

Das, B. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. Thomson, São Paulo, 6 ed, 36-60 p.

Eco4u, Disponível em <<https://eco4u.wordpress.com/tag/asfalto-borracha/>>, acesso em: 01 de mai.2015.

Franco, K. L. B. (2012). *Caracterização do comportamento geotécnico de mistura de resíduo de pneus e solo laterítico*. Dissertação de Mestrado em Saneamento Ambiental; Meio Ambiente; Recursos Hídricos e Hidráulica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal RN.

*Gestão de Resíduos e Produtos Perigosos - Tratamento*. Disponível <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=258>> acesso em: 25 de abr.2015.

Lagarinhos, C. A. F. (2004). *Reciclagem de Pneus: coleta e reciclagem de pneus*. 2004. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, SP.

Nogami, J. S.; Villibor, D. F. (1994). A New Simple Method for Classification of Lateritic and Saprolitic Soils. 7th International IAEG Congress, Balkema, Rotterdam.

Nova russas nos trilhos. Reciclagem de pneus. Disponível em: <<http://novarussasnostrilhos.blogspot.com.br/2014/12/mil-e-uma-utilidade-com-pneus-velhos.html>>. Acesso em: 10 mai. 2016.

Portal resíduos. Reciclagem de pneus. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-pneus/>>. Acesso em: 22 mai. 2015.

Reddy, K. R.; Marella, A. (2001). Properties of Different Size Scrap Tire Shreds: Implications on Using as Drainage Material in Landfill Cover System, Philadelphia. Proceeding.

Suárez, M. J. (2016). Avaliação da Resistência Mecânica 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.