

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**

**ÁREA GEOTÉCNICA**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LODO TÊXTIL PARA FINS DE  
UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

**ALICE GONZAGA DE OLIVEIRA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2014**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LODO TÊXTIL PARA FINS DE  
UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

ALICE GONZAGA DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA  
GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
Orientador

Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena  
Orientadora

CAMPINA GRANDE – PB

048e	<p>Oliveira, Alice Gonzaga de. Estudo das propriedades mecânicas do lodo têxtil para fins de utilização em pavimentos rodoviários / Alice Gonzaga de Oliveira. - Campina Grande, 2014. 112 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2014. "Orientação : Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena". Referências.</p> <p>1. Indústria Têxtil. 2. Meio Ambiente. 3. Estabilização. 4. Lodo Têxtil. 5. Dissertação - Engenharia Civil e Ambiental. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Lucena, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 677(043)</p>
------	--

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Autora:** Alice Gonzaga de Oliveira

**Título:** ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LODO TÊXTIL PARA FINS DE UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.

**Dissertação defendida e aprovada em:** 31 / 10 / 2014

**Pela Banca Examinadora**

(Assinatura): Adriano Elísio de F. de Lucena

**Prof. D.Sc. (Orientador) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena**

**Universidade Federal de Campina Grande – UFCG**

(Assinatura): Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

**Profa. D.Sc. (Orientadora) Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena**

**Universidade Federal de Campina Grande – UFCG**

(Assinatura): J. Camapum de Carvalho

**Prof. Ph.D. (Examinador Externo) José Camapum de Carvalho**

**Universidade de Brasília - UnB**

(Assinatura): John Kennedy Guedes Rodrigues

**Prof. D.Sc. (Examinador Interno) John Kennedy Guedes Rodrigues**

**Universidade Federal de Campina Grande – UFCG**

## DEDICATÓRIA

Ao nosso Deus.

*“Ó profundidade das riquezas, tanto da sabedoria, como da ciência de Deus!*

*Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis os seus caminhos!*

*Por que quem compreendeu a mente do Senhor? Ou quem foi seu conselheiro?*

*Ou quem lhe deu primeiro a Ele, para que lhe seja recompensado?*

*Porque dEle e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente.*

*Amém.”*

Romanos 11:33-36

## AGRADECIMENTOS

Agradecer a Deus, por todas as bênçãos e realizações concedidas;

Em especial a Professora Lêda um exemplo de humildade e sabedoria. Obrigada por todo apoio e confiança, agradeço a Deus por Ele ter colocado a Senhora em meu caminho.

Espero tê-la não só nesta etapa, mas em outras etapas dessa longa jornada;

Ao professor Adriano, pelo apoio e confiança;

Aos amigos: Ildinho “minha energia de compactação” por toda ajuda, paciência e disposição a me ajudar. Joeberth por toda ajuda e risadas. Natália um verdadeiro anjo que Deus enviou para me ajudar. Jonny por toda ajuda na realização dos ensaios, explicações e companheirismo. Jadilson pela ajuda concedida na realização dos ensaios. Aos amigos companheiros nas aulas e nos lanches: Patrícia, Rômulo “Gordo”, Gerlane “Mamãe”, Denny.

Enfim a todos os amigos que estiveram presentes nesta preciosa etapa em minha vida.

A minha família, meu irmão Júnior, meu sobrinho Rafael, tios, tias, primos, primas. Por todo apoio em todas as horas, em especial meus pais minhas fontes para seguir em frente nos estudos;

A todos os amigos que mesmo não presentes no dia a dia da realização das atividades, mas permaneceram sempre apoiando;

A Fred meu grande inspirador a seguir neste caminho acadêmico, meu exemplo que o melhor caminho é o estudo e a persistência “KLY”.

Muito obrigada!

## RESUMO

A indústria têxtil, pioneira no processo de industrialização no Brasil, é relevante para a economia brasileira, sendo considerada a 2º maior geradora do primeiro emprego e responsável por cerca de 4% do PIB total brasileiro. Entretanto, apesar desta peculiaridade também produz alta quantidade de resíduos em seu processo final de fabricação. Este resíduo, também conhecido como lodo têxtil, possui composição variável formado basicamente por água (resultante do processo produtivo) óxidos de minerais (constituintes de pigmentos de tecidos e de substâncias usadas no tratamento de efluentes) e matéria orgânica. As indústrias procuram fazer o descarte correto do material sem causar tantos danos ao meio ambiente e a saúde dos colaboradores, porém mesmo em aterros sanitários há um impacto ambiental considerável. A utilização de solos estabilizados com o emprego de resíduos podem ter vantagens técnicas, econômica e ambientalmente corretas. Este trabalho de pesquisa teve como objetivo verificar a utilização da técnica de solidificação/estabilização com o lodo para aplicação em base e subbase de pavimentos. A metodologia utilizada para realização da fase experimental da pesquisa foi empírico e com adoção de um suporte teórico, baseado na revisão da literatura e na escolha dos métodos de ensaios. As atividades relacionadas a esta fase foram divididas em quatro etapas: ensaios de caracterização, estabilização granulométrica, estabilização química e caracterização ambiental do resíduo. Baseado nos resultados obtidos na primeira etapa foi adotado o percentual de 10% para a incorporação do lodo têxtil na mistura e, optou-se em adicionar o cimento como estabilizante, nos teores de 1%, 3%, 5% e 7%. Os sucessivos incrementos do teor dos estabilizantes nas misturas tiveram como consequências alterações significativas nos valores obtidos no Índice de Suporte Califórnia – ISC (%), na Resistência a Compressão Simples - RCS (kPa), na Resistência a Tração – RT (MPa) e no Módulo de Resiliência - MR (MPa). Os melhores resultados mecânicos obtidos na etapa de estabilização química foram com a incorporação de 5% e 7% de cimento. Portanto, conclui-se que a utilização do resíduo em base e subbase de pavimentos implica uma alternativa viável para a redução do grave problema ambiental que é a destinação correta do resíduo.

**Palavras Chave:** Indústria têxtil. Meio Ambiente. Estabilização.

## ABSTRACT

The textile industry, which is pioneer in the industrialization process in Brazil, is relevant for the Brazilian economy, being considered the second largest generator of first employment and responsible for about 4% of the total Brazilian GDP. However, despite this peculiarity, this industry also produces large amounts of waste in its final manufacturing process. This residue, also known as textile sludge, has a variable composition consisting mainly in water (resulting from the productive process), mineral oxides (constituents of pigments in fabrics and substances used in effluent treatment) and organic matter. Industries seek to properly dispose of the material without causing much damage to the environment and employee health. Nevertheless, even in landfills there is a considerable environmental impact. The use of stabilized soils with the addition of waste can provide technical, economical and environmentally correct advantages. This research aimed to examine the use of the technique of solidification / stabilization with the sludge to be applied in base and subbase pavement layers. The methodology used to perform the experimental phase of the research was empirical and with adoption of a theoretical support, based on the literature review and the choice of test methods. Activities related to this phase were divided into four steps: characterization tests, particle size stabilization, chemical stabilization and environmental characterization of the waste. Based on the results obtained in the first step, it was adopted the percentage of 10% for the incorporation of textile sludge in the mixture, and it was decided to add the cement as a stabilizer in the percentages of 1%, 3%, 5% and 7%. Successive increments of the content of stabilizers in the mixtures had significant consequences such as changes in the values of California Bearing Ratio – CBR (%), Compressive Strength – CS (kPa), Tensile Strength – TS (MPa) and Resilient Modulus – MR (MPa). The best mechanical results obtained in the chemical stabilization phase were with the incorporation of 5% and 7% of cement. Therefore, it is possible to conclude that the use of waste in base and subbase of pavements is a viable alternative to the reduction of the environmental problem caused by the incorrect disposal of the waste.

**Keywords:** Sludge textile. Environment. Stabilization.



## LISTA DE ABREVIACOES

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BNDES</b>	Banco Nacional de Desenvolvimento Econmico e Social
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>DNIT</b>	Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte
<b>ETA</b>	Estaao de Tratamento de água
<b>ETE</b>	Estaao de Tratamento de Esgoto
<b>ISC</b>	ndice Suporte Califórnia
<b>LVDT</b>	Linear Variable Differential Translucers
<b>LWT</b>	Loaded Wheel Test
<b>MR</b>	Módulo de Resiliência
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>RT</b>	Resistência a Tração
<b>RCS</b>	Resistência a Compressão Simples
<b>TRB</b>	Transportation Research Board
<b>WTAT</b>	Wet Track Abrasion Test

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Processo de Transformação na Indústria da Construção .....	18
<b>Figura 2</b> - Exemplos resíduos Classe I .....	21
<b>Figura 3</b> - Exemplos resíduos Classe II A .....	22
<b>Figura 4</b> - Dados BNDES geração de empregos .....	24
<b>Figura 5</b> - Unidade Coteminas Campina Grande .....	26
<b>Figura 6</b> - Lodo Têxtil .....	28
<b>Figura 7</b> - Estação de Tratamento de Efluentes .....	29
<b>Figura 8</b> - Caminhão sendo carregado de lodo têxtil.....	29
<b>Figura 9</b> - Distribuição das partículas solo e agregados .....	34
<b>Figura 10</b> - Fluxograma das atividades realizadas .....	40
<b>Figura 11</b> - Secagem prévia do lodo têxtil .....	42
<b>Figura 12</b> - Lodo seco em estufa e destorroado.....	43
<b>Figura 13</b> - Solo utilizado na pesquisa .....	43
<b>Figura 14</b> - Estabilizante utilizado na pesquisa .....	44
<b>Figura 15</b> - Fluxograma Ensaios de Caracterização .....	45
<b>Figura 16</b> - Limites de Atteberg para o Solo .....	46
<b>Figura 17</b> - Limites de Atteberg para o Lodo Têxtil .....	46
<b>Figura 18</b> - Equipamento EDX 720.....	47
<b>Figura 19</b> - Equipamento XDR-6000 .....	48
<b>Figura 20</b> - Fluxograma Estabilização Granulométrica.....	48
<b>Figura 21</b> - Ensaio de Compactação: mistura, compactação e moldagem .....	49
<b>Figura 22</b> - Ensaio de ISC: mistura, moldagem e imersão .....	50
<b>Figura 23</b> – Extensômetro .....	51
<b>Figura 24</b> - Ensaio de RCS: compactação e rompimento do corpo de prova.....	52
<b>Figura 25</b> - Compactação do corpo de prova para o ensaio RT .....	53
<b>Figura 26</b> - Compactação corpo de prova para o ensaio RT .....	53
<b>Figura 27</b> - Ensaios realizados para a Estabilização Química.....	54
<b>Figura 28</b> - Corpos de prova rompidos RCS .....	55
<b>Figura 29</b> - Corpo de prova rompido RT.....	56
<b>Figura 30</b> - Ensaio Módulo de Resiliência .....	58
<b>Figura 31</b> - Preparação e compactação corpo de prova para o ensaio LWT .....	59
<b>Figura 32</b> - Realização do ensaio LWT .....	60
<b>Figura 33</b> - Corpos de prova ensaiados .....	61
<b>Figura 34</b> - Preparação mistura corpos de prova WTAT .....	62
<b>Figura 35</b> - Compactação corpos de prova WTAT .....	62
<b>Figura 36</b> - Corpo de prova sendo nivelado .....	63
<b>Figura 37</b> - Pesagem corpo de prova .....	64
<b>Figura 38</b> - Corpo de prova sendo ensaiado .....	64
<b>Figura 39</b> - Material despreendido retirado com ajuda de pincel.....	65
<b>Figura 40</b> - Amostras lodo têxtil e solo .....	66
<b>Figura 41</b> - Agitação das amostras .....	66

<b>Figura 42</b> - Amostras em repouso e filtragem .....	67
<b>Figura 43</b> - Extratos obtidos do solo e lodo.....	67
<b>Figura 44</b> - Curva de distribuição dos tamanhos das partículas: solos e resíduo de lodo ..	69
<b>Figura 45</b> - Espectro de infravermelho das amostras de lodo .....	72
<b>Figura 46</b> - Curvas Termogravimétrica do lodo Curva TG do lodo “in natura” obtida à razão de aquecimento de 10°C/min e atmosfera de ar sintético .....	73
<b>Figura 47</b> - Difratoograma de raios – X do lodo têxtil.....	74
<b>Figura 48</b> - Curva de distribuição dos tamanhos das partículas mistura solo e lodo .....	75
<b>Figura 49</b> - Resultados para os Ensaio de Compactação .....	77
<b>Figura 50</b> - Resultados para os Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....	78
<b>Figura 51</b> - Resultados para o Ensaio de Resistência a Compressão Simples.....	80
<b>Figura 52</b> - Resultados para os Ensaio de Resistência a Tração .....	81
<b>Figura 53</b> - Resultados para os Ensaio de Compactação com Estabilizante.....	82
<b>Figura 54</b> - Resultados para os Ensaio de ISC com Estabilizante .....	83
<b>Figura 55</b> - Resultados para os Ensaio de RCS com Estabilizante.....	85
<b>Figura 56</b> - Resultados para os Ensaio de Resistência a Tração com Estabilizante .....	86
<b>Figura 57</b> - Gráfico Módulo de Resiliência Solo Puro .....	89
<b>Figura 58</b> - Gráfico Módulo de Resiliência Solo + 10% Lodo .....	89
<b>Figura 59</b> - Gráfico Módulo de Resiliência Adição 1% estabilizante .....	90
<b>Figura 60</b> - Gráfico Módulo de Resiliência Adição 3% estabilizante .....	90
<b>Figura 61</b> - Gráfico Módulo de Resiliência Adição 5% estabilizante .....	91
<b>Figura 62</b> - Gráfico Módulo de Resiliência Adição 7% estabilizante .....	91
<b>Figura 63</b> - Nível de tensões.....	92
<b>Figura 64</b> - Resultados para o Ensaio de LWT.....	94
<b>Figura 65</b> - Resultados dos ensaios de WTAT (Perda de massa por abrasão) .....	94
<b>Figura 66</b> - Resultados dos ensaios de WTAT (Afundamento) .....	95
<b>Figura 67</b> - Estufa depois da secagem do lodo .....	97

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Metais pesados utilizados na indústria .....	20-21
<b>Tabela 2</b> - Resultados de estabilizantes para determinados tipos de solos .....	33
<b>Tabela 3</b> - Coeficiente de Uniformidade e Curvatura para o solo e lodo .....	71
<b>Tabela 4</b> - Índices físicos dos materiais .....	71
<b>Tabela 5</b> - Composição química do lodo têxtil .....	73
<b>Tabela 6</b> - Índices físicos das misturas com os teores de lodo .....	76
<b>Tabela 7</b> - Valores de referência ISC e Expansão DNIT .....	78
<b>Tabela 8</b> - Valores de Expansão para as amostras .....	79
<b>Tabela 9</b> - Valores de Expansão para as amostras .....	84
<b>Tabela 10</b> - Parâmetros Modelos Clássicos de Resiliência .....	87
<b>Tabela 11</b> - Parâmetros Modelos Composto .....	88
<b>Tabela 12</b> - Resultados Ensaio de Lixiviação e Solubilização para o solo .....	96
<b>Tabela 13</b> - Resultados Ensaio de Lixiviação e Solubilização para o lodo .....	96

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Quantitativo de corpos de prova e materiais utilizados .....	41
<b>Quadro 2</b> - Critérios do cimento utilizados nesta pesquisa .....	44
<b>Quadro 3</b> - Tensões utilizadas na fase de condicionamento.....	57
<b>Quadro 4</b> - Tensões utilizadas durante o ensaio.....	57

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 OBJETIVOS .....	14
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	14
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	14
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
2.1 SUSTENTABILIDADE .....	17
<b>2.1.1 Resíduos Industriais</b> .....	19
2.2 INDÚSTRIA TÊXTIL .....	22
<b>2.2.1 Impacto Ambiental Gerado pela Indústria Têxtil</b> .....	26
<b>2.2.2 Utilização do Lodo Têxtil na Construção Civil</b> .....	30
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....	32
<b>2.3.1. Estabilização Granulométrica</b> .....	33
<b>2.3.2 Estabilização Mecânica</b> .....	34
<b>2.3.3 Estabilização Química</b> .....	34
<b>2.3.3.1 Solo Cimento</b> .....	35
<b>2.3.3.2 Solo Cal</b> .....	36
<b>2.3.3.3 Solo Emulsão</b> .....	37
2.4 ESTABILIZAÇÃO / SOLIDIFICAÇÃO DE RESÍDUOS .....	37
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	40
3.1 MATERIAIS .....	42
<b>3.1.1 Resíduo Lodo Têxtil</b> .....	42
<b>3.1.2 Solo</b> .....	43
<b>3.1.3 Estabilizante</b> .....	44
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	45
<b>3.2.1 Determinação das Propriedades Físicas</b> .....	45
<b>3.2.2 Análise Química</b> .....	46
<b>3.2.3 Difração de Raios – X</b> .....	47
3.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	48
<b>3.3.1 Ensaio de Compactação</b> .....	49
<b>3.3.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia</b> .....	50
<b>3.3.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples</b> .....	51
<b>3.3.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta</b> .....	52
3.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA .....	54
<b>3.4.1 Ensaio de Compactação</b> .....	54
<b>3.4.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia</b> .....	55
<b>3.4.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples</b> .....	55
<b>3.4.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta</b> .....	56
<b>3.4.5 Ensaio de Módulo de Resiliência</b> .....	56

3.4.6 Ensaio LWT ( <i>Loaded Wheel Test</i> ) .....	58
3.4.7 Ensaio WTAT ( <i>Wet Track Abrasion Test</i> ).....	61
3.5 ENSAIOS AMBIENTAIS.....	65
3.5.1 <i>Espectroscopia por Absorção Atômica</i> .....	65
<b>4 RESULTADOS</b> .....	69
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	69
4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	69
4.2.1 <i>Determinação das Propriedades Físicas</i> .....	70
4.2.2 <i>Análise Química – EDX</i> .....	72
4.2.3 <i>Difração de Raios – X</i> .....	74
4.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	75
4.3.1 <i>Análise Granulométrica para os Teores de Lodo</i> .....	75
4.3.2 <i>Determinação das Propriedades Físicas para os Teores de Lodo</i> .....	76
4.3.3 <i>Ensaio de Compactação</i> .....	76
4.3.4 <i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia</i> .....	78
4.3.5 <i>Ensaio de Resistência a Compressão Simples</i> .....	79
4.3.6 <i>Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral</i> .....	80
4.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA .....	81
4.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	82
4.5.1 <i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia</i> .....	82
4.5.2 <i>Ensaio de Resistência a Compressão Simples</i> .....	84
4.5.3 <i>Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral</i> .....	84
4.5.4 <i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i> .....	87
4.5.5 <i>Ensaio de LWT</i> .....	93
4.5.6 <i>Ensaio de WTAT</i> .....	94
4.6 ENSAIOS AMBIENTAIS.....	96
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	98
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	98
5.1.1 <i>Quanto à Caracterização Física</i> .....	98
5.1.2 <i>Quanto à estabilização granulométrica</i> .....	98
5.1.3 <i>Quanto à Estabilização Química</i> .....	99
5.1.4 <i>Quanto aos Ensaios Ambientais</i> .....	100
5.2 CONCLUSÕES .....	100
5.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	101
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	102
<b>APÊNDICES</b> .....	106

## 1 INTRODUÇÃO

A conscientização sobre a problemática da geração de resíduos e a busca por sua destinação correta são consideradas desafios a nível mundial. Diariamente, toneladas são descartadas de forma inadequada, sem cuidado prévio, causando sérios problemas ao meio ambiente.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei Nº 12.305 (2010) resíduo sólido é todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas. Toda atividade industrial gera resíduos como subproduto que causam impactos ambientais consideráveis independente de sua destinação final.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos determina que as empresas de qualquer segmento produtivo faça a destinação correta dos resíduos gerados durante o processo de produção. Tal determinação exige das empresas adoção de medidas de produção mais limpa e a gestão correta dos resíduos sólidos.

O setor têxtil mundial produz anualmente cerca de 83 milhões de toneladas e é responsável pelo crescimento econômico e social de muitos países emergentes inclusive no Brasil. A indústria têxtil é uma das mais antigas do país e pode ser comparada aos melhores e maiores produtores mundiais. Em 2013, países como China e Hong Kong detiveram 50% da produção mundial de têxteis, a Índia 7% e os Estados Unidos 5%. O Brasil é considerado o 5º maior produtor, com 2% da produção mundial, (BNDES, 2009).

Atualmente, o polo da indústria têxtil na Paraíba conta com 167 empresas que empregam aproximadamente 12.000 funcionários. A localização deste importante parque industrial se concentra na área metropolitana de João Pessoa e Campina Grande, embora parte significativa delas estejam presentes também nas cidades de Sousa, Patos e Cajazeiras.

Apesar da vantagem econômica gerada ao Estado este tipo de atividade gera um resíduo difícil de ser reciclado, o lodo têxtil. O lodo têxtil é de composição variável (Balan & Monteiro, 2001) e normalmente possui teores elevados de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e micronutrientes (Martinelli *et al.*, 2002). Este resíduo deve ter uma disposição correta devido a sua composição complexa, pois são utilizados corantes nos processos de tingimento, além de soda, polímero, sulfato de alumínio, ferro, cal e produtos utilizados no tratamento de efluentes (HEREK *et al.*, 2005).

As indústrias procuram fazer o descarte correto do material sem causar tantos danos ao meio ambiente e a saúde dos colaboradores, porém mesmo em aterros sanitários há um impacto ambiental considerável. A incorporação de lodo têxtil a materiais peculiares da



engenharia civil, tais como argamassas (GUEDES, 2012) e blocos cerâmicos (HEREK *et al.*, 2005), tem se mostrado uma alternativa viável e eficiente para a destinação correta desse tipo de resíduo.

A pavimentação por sua vez, pela sua extensão e grandes volumes de solo mobilizado, constitui-se uma alternativa ao reuso de resíduos, principalmente aqueles com certo potencial de estabilização. Esta alternativa consiste no processo de melhoria do solo com a adição de algum material. A estabilização de solos em conjunto com o reuso de resíduos industriais tem permitido aplicações proveitosas na execução de camadas de pavimentos (CORDEIRO, 2007). Portanto, acredita-se que o lodo têxtil também possa ser utilizado, por meio da técnica de estabilização/solidificação em bases e subbases de pavimentos de modo que confira aos mesmos, melhores características.

## 1.1 OBJETIVOS

### *1.1.1 Objetivo Geral*

Estudar as propriedades mecânicas de bases e subbases dos pavimentos com a incorporação do resíduo de lodo provenientes da indústria têxtil, objetivando uma aplicação racional deste resíduo na construção civil.

### *1.1.2 Objetivos Específicos*

- Realizar uma caracterização química, física e mineralógica do resíduo investigado e dos materiais convencionais de pavimentação;
- Estudar a estabilização granulométrica;
- Avaliar o processo de estabilização/solidificação química com a incorporação de um aditivo de lodo em solo por meio das propriedades mecânicas, físicas, químicas e mineralógicas;
- Verificar o potencial de contaminação do lodo têxtil;
- Sugerir um reaproveitamento ambientalmente correto do resíduo de lodo descartado pela indústria têxtil.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação é composta de cinco capítulos. A seguir é apresentada uma breve descrição do assunto abordado em cada um deles.

**Capítulo 1** - Composto de introdução, objetivos e organização do trabalho.

**Capítulo 2** - Compreende a fundamentação teórica, onde são abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: a relevância da indústria têxtil no Brasil e no mundo, uma abordagem sobre o resíduo da cadeia produtiva da indústria têxtil o lodo, a problemática do descarte dos resíduos da indústria têxtil, a utilização destes resíduos na pavimentação.

**Capítulo 3** - São descritos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento desta dissertação.

**Capítulo 4** - São apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental.

**Capítulo 5** - Apresentam-se as conclusões que foram obtidas neste trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras.

No final do trabalho estão inseridas as referências bibliográficas e apêndices.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são tratados os assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente faz-se um enfoque sobre a sustentabilidade e os resíduos industriais, em seguida é abordada a importância da indústria têxtil no cenário nacional e internacional enfatizando as principais vantagens econômicas originadas por este setor. Em seguida, são abordados os impactos ambientais gerados por este setor, com ênfase no resíduo do lodo têxtil. Finalizando, será enfatizada a utilização deste resíduo na construção civil, mostrando a utilização da técnica de estabilização/solidificação de solos e o uso de resíduos com esta técnica.

### 2.1 SUSTENTABILIDADE

A utilização de “tecnologias verdes” e processos sustentáveis tem ganhado adesão nos setores industriais e da construção civil. O termo sustentabilidade vem sendo amplamente usado em diversos aspectos, seja em indústrias, na construção civil ou até mesmo no dia-a-dia em pequenos gestos que levem ao melhor aproveitamento de produtos e a reutilização destes.

Ultimamente tem – se dado grande importância à reciclagem de materiais, evidenciando a necessidade de processos industriais sustentáveis. O conceito de desenvolvimento sustentável tem como meta garantir uma vida adequada às gerações futuras e ao desenvolvimento do país, com a utilização de técnicas de reuso e reciclagem, proporcionando que muitos rejeitos antes considerados impróprios, tornem-se matéria prima.

A palavra sustentabilidade passou a ser propagada mundialmente a partir da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em junho de 1972, em Estocolmo, capital da Suécia. No Brasil 20 anos depois, na Conferência Rio – 92, a política internacional reconheceu a importância de conciliar o desenvolvimento socioeconômico com os recursos naturais, viabilizando a interação entre o meio ambiente e os componentes econômicos sem causar danos à natureza.

O desenvolvimento sustentável tem como objetivo interligar questões ambientais, sociais, econômicas e humanas, visando o progresso social e humano ligado ao crescimento econômico tendo como ênfase a preservação ambiental (ARAÚJO, 2006), ou seja, trata – se

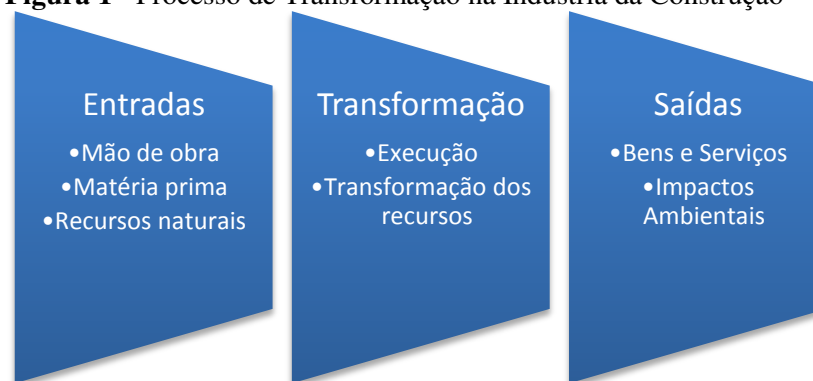
da exploração equilibrada dos recursos naturais para atender as necessidades da presente geração, sem causar danos ao meio ambiente e as gerações futuras.

Gradativamente, a preocupação com a preservação do meio ambiente passa a fazer parte do processo industrial. A mudança para a sustentabilidade pode ocorrer por meios traumáticos, ou seja, uma transição forçada que obriga a reorganização do sistema ocasionando o aumento na geração de custos e diminuição dos lucros, ainda que por um curto período. O ideal é a transição por escolhas, baseada em efeitos de mudanças culturais, políticas e econômicas voluntárias (SCHULTE, 2010).

A indústria da construção civil no Brasil é considerada ainda artesanal, devido à dificuldade de inserção de novas tecnologias e qualificação de mão de obra para determinadas atividades que utilizem conhecimentos avançados. Com a escassez de recursos naturais, a valorização de eco – produtos e a necessidade de minimizar e controlar impactos ambientais, a busca pela consciência ambiental vem crescendo consideravelmente no setor (GEHLEN, 2009).

O canteiro de obras é o local onde a mão de obra transforma os recursos em produtos. Além dos produtos, o processo de transformação no setor geram impactos ambientais consideráveis. O processo de transformação sustentável deve estar atento tanto aos recursos que serão utilizados quanto ao produto final, que varia desde os bens e serviços, a geração de resíduos. O planejamento da obra é primordial para a qualidade do empreendimento visando atender os prazos e custos estabelecidos. Além de prever e reduzir os impactos ambientais causados durante o processo de transformação (Figura 1).

**Figura 1** - Processo de Transformação na Indústria da Construção



**Fonte:** Adaptado de Gehlen, 2009.

Para a execução de uma obra, com a utilização da sustentabilidade em seu processo, é necessária a adoção de medidas estratégicas, como *e.g.*, a implantação de certificações de edifícios verdes, para a adaptação do setor as questões ambientais, além da qualificação da

mão de obra. A divulgação dessas práticas é importante para incentivar outras empresas à adoção de medidas que favoreçam a sustentabilidade (GEHLEN, 2009).

A gestão sustentável prioriza a diminuição e exploração de recursos naturais de atividades relacionadas entre o homem e o meio ambiente, utilizando o princípio dos 3 Rs (Reduzir, Reusar e Reciclar) apresentados na Agenda 21, onde: a redução engloba medidas para evitar o descarte de materiais, a reutilização consiste no aproveitamento de materiais antes de seu descarte e reciclagem como forma de reaproveitar resíduos antes descartados (TOCCHETTO, 2005).

A indústria têxtil, assim como outros setores preocupados em atender a necessidade da sociedade para a sustentabilidade, tem buscado formas de tornar a produção e o consumo de matéria – prima mais sustentável, além de agradar aos consumidores mais ligados as questões ambientais.

A utilização de embalagens que possam ser reaproveitadas após seu uso, produtos utilizados na indústria têxtil (tecidos ou fios) que possam ser reciclados e a utilização de produtos de origem florestal, como madeira e papel, que possuam origem certificada são exemplos de opções sustentáveis dentro da cadeia produtiva têxtil (BASTIAN, 2009).

### ***2.1.1 Resíduos Industriais***

Com o crescimento populacional, o aumento da renda e os avanços tecnológicos surge a necessidade da ampliação da produção industrial em diversos setores, e conseqüentemente aumenta a geração de resíduos. Segundo a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), são considerados resíduos industriais aqueles gerados no processo de produção e instalações industriais.

A PNRS determina princípios básicos para a minimização da geração, reciclagem e tratamento dos resíduos industriais, assim como sua disposição final. Além de beneficiar instituições com incentivos fiscais quando promovem a reutilização e reciclagem dos resíduos.

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2009), é considerado resíduo sólido industrial todo resíduo proveniente de atividades industriais nos estados sólido, semi – sólido, gasoso ou líquido. As características desse tipo de resíduo não torna viável sua destinação final em cursos d'água, na rede pública de esgoto ou aterros sanitários sem tratamento prévio.

Sobras de carvão mineral, refugos da indústria metalúrgica, resíduos químicos, gases e fumaças lançadas por chaminés são exemplos de resíduos gerados por indústrias e liberados ao meio ambiente. Isto ocorre muitas vezes sem controle ambiental, mesmo sendo de total responsabilidade das empresas o gerenciamento, transporte, tratamento e destinação final adequada de seus resíduos (KRAEMER, 2005).

Os resíduos industriais são originários de diversos ramos da atividade industrial, tais como: o petroquímico, o químico, indústria alimentícia, indústria têxtil, etc. Os resíduos industriais podem ser representados por lodos, óleos, plásticos, papel, madeira, vidros, cerâmica, além dos resíduos tóxicos que necessitam de tratamento especial em razão de sua periculosidade (KRAEMER, 2005).

Devido ao uso de produtos químicos, metais pesados e solventes químicos na cadeia produtiva industrial, o resíduo industrial é considerado um causador de agressões fatais ao meio ambiente. A Tabela 1 apresenta os principais metais pesados utilizados na indústria, sua origem e riscos à saúde.

**Tabela 1** - Metais pesados utilizados na indústria

<b>Metais</b>	<b>Origem</b>	<b>Efeitos</b>
Alumínio	Produção de artefatos de alumínio; serralheria e tratamento convencional de água.	Anemia por deficiência de ferro; intoxicação crônica.
Arsênio	Metalurgia; manufatura de vidros e fundição.	Câncer (seios paranasais)
Cádmio	Soldas; tabaco; baterias e pilhas.	Câncer de pulmões e próstata; lesão nos rins.
Chumbo	Fabricação e reciclagem de baterias de autos; indústria de tintas; pintura em cerâmica; soldagem.	Saturnismo (cólicas abdominais, tremores, fraqueza muscular, lesão renal e cerebral)
Cobalto	Preparo de ferramentas de corte e furadoras.	Fibrose pulmonar
Cromo	Indústrias de corantes, esmaltes, tintas, ligas com aço e níquel; cromagem de metais.	Asma (bronquite); câncer.
Fósforo amarelo	Veneno para baratas; rodenticidas (tipo de inseticida usado na lavoura) e fogos de artifício.	Náuseas; gastrite; odor de alho; fezes e vômitos fosforescentes; dor muscular; torpor; choque; coma e até morte.
Mercúrio	Moldes industriais; certas indústrias de cloro-soda; garimpo de ouro; lâmpadas fluorescentes.	Intoxicação do sistema nervoso central
Níquel	Baterias; aramados; fundição e niquelagem	Câncer de pulmão e seios

	de metais; refinarias.	paranasais
Fumos metálicos	Vapores (de cobre, cádmio, ferro, manganês, níquel e zinco) da soldagem industrial ou da galvanização de metais.	Febre dos fumos metálicos (febre, tosse, cansaço e dores musculares)

**Fonte:** Portal Ambiente Brasil, 2005.

Segundo a NBR 10004 a classificação dos resíduos sólidos depende da sua origem, características e composição. Os compostos são comparados com listagens de resíduos e substâncias que possuem impactos a saúde e meio ambiente, conhecidos. Estes podem ser classificados em dois grupos: perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II). Os resíduos não perigosos, ainda são subdivididos em: não inertes (Classe II A) e inertes (Classe II B).

A periculosidade de um resíduo (Classe I) está associada às características do material, podendo apresentar propriedades físicas, químicas ou infecto – contagiosas que podem acarretar perigo a saúde pública, provocando a incidência de doenças ou até mesmo a morte, e riscos ao meio ambiente, quando o resíduo não possui destinação correta (ABNT, 2004). Estes podem ainda apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade. A Figura 2 ilustra exemplos de resíduos de Classe I, provenientes da indústria têxtil (SENAI, 2007).

**Figura 2** - Exemplos resíduos Classe I



**Fonte:** Adaptado de SENAI (2007).

A Figura 3 exemplifica os resíduos da Classe II A na indústria têxtil, nos quais não se enquadram nas classificações dos resíduos de Classe I e II B, e possuem características de combustividade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Os resíduos da Classe II B, não possuem nenhum de seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água de acordo com a ABNT 10006 (SENAI, 2007).

**Figura 3** - Exemplos resíduos Classe II A



**Fonte:** Adaptado de SENAI (2007).

A NBR 12235 orienta o armazenamento de resíduos sólidos perigosos, devendo fazer a contenção temporária do resíduo em área autorizada por órgãos ambientais. Estes devem esperar por uma futura reciclagem, recuperação, tratamento ou adequada disposição final, atendendo as condições básicas de segurança.

## 2.2 INDÚSTRIA TÊXTIL

Desde a Pré – História, o homem sente a necessidade de cobrir – se, esta vontade vai além da necessidade humana de sobrevivência. Desde o Paleolítico o homem para sobreviver se alimentava de frutos e da caça, além disso, utilizava as peles de animais resultantes da caça para se proteger.

A Indústria Têxtil foi a pioneira no processo de industrialização no Brasil. Antes mesmo da ocupação portuguesa, os índios já exerciam atividades artesanais utilizando técnicas de entrelaçamento manuais de fibras vegetais para a confecção de diversos materiais com diferentes finalidades, incluindo a proteção do corpo.

De acordo com Melo (2004) a evolução da indústria têxtil no Brasil é dividida em quatro etapas: a fase colonial (compreende os anos de 1500 até 1844), a fase de implantação (considerado o período de 1844 até 1913), fase de consolidação (iniciou com o fim da I Guerra Mundial, na década de 20) e a fase atual (iniciou – se na segunda metade dos anos 50).

A fase colonial foi marcada pelo início da indústria têxtil no país. Políticas de estímulo ou restrição eram impostas pela Metrópole, segundo interesses próprios ou determinação de acordos internacionais. Devido à falta de interesse da Metrópole em produtos têxteis, e sim nos produtos como açúcar e metais preciosos, a indústria têxtil não obteve crescimento considerável nesta fase.



A fase de implantação iniciou o novo sistema tarifário em 1844, com a primeira política industrial brasileira, quando houve elevação para a média de 30% das tarifas alfandegárias. Esta medida reforçou o estímulo a industrialização no país, em especial para o ramo têxtil (PRADO, 1997).

Com o fim da I Guerra Mundial, teve início a fase de consolidação da indústria têxtil no Brasil. Devido a queda da capacidade de importação, os países tiveram que adotar a política de substituição dos produtos importados por produtos internos, aumentando a produção de mercadorias do país.

Na fase atual a indústria têxtil está no processo acelerado de desenvolvimento por influência do sistema industrial desta época, passando por grandes transformações com incentivos fiscais e financeiros. A década de 1980 foi marcada por um amplo avanço, com grande variedade de fabricantes competindo diretamente com o mercado internacional (GORINI, 2000).

A década de 90 foi marcada pela ascensão da indústria têxtil no cenário nacional devido as políticas de estabilização inseridas pelo Plano Real. A consolidação da nova moeda teve como resultado o aumento do consumo da população de renda mais baixa, aumentando o número de investimentos no setor e este crescimento tem se mantido (GORINI, 2000).

A indústria têxtil e de confecção, tem crescido de acordo com impulso das demandas ocasionando a geração de empregos. Em 2013 foram investidos US\$ 1,9 bilhões neste setor com intuito de melhorar a produção interna além de atender a demanda externa. Em valores monetários, a cadeia têxtil brasileira produziu neste ano US\$ 58 bilhões em vendas, com 33 mil indústrias. Os empregos gerados na cadeia têxtil somaram 1,6 milhão em 2013, o que confirma ser este um setor de grande importância para a economia do país (IEMI, 2013).

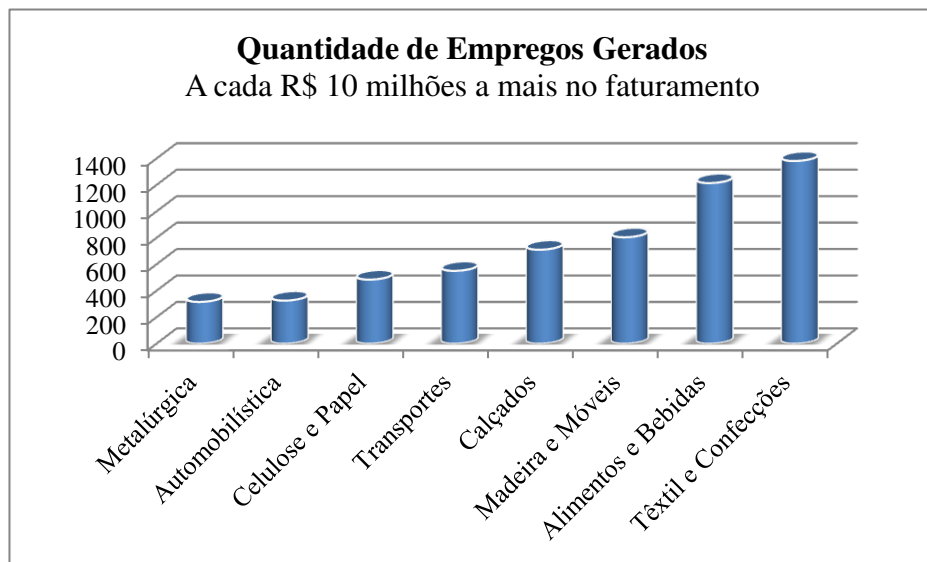
Segundo dados da Associação Brasileira de Indústria Têxtil e de Confecção, o comércio têxtil e de confecção alcança em 2014 cerca de 900 bilhões de dólares no mundo, sendo o Brasil responsável por 0,6% deste valor, mostrando a importância econômica do Brasil no cenário mundial.

Dados do BNDES (2009) afirmam que em 2006 a China respondia por 27,2% do total de exportações mundiais no setor têxtil, seguida por Hong Kong (8%), Alemanha (6,5%) e Itália (5,7%). O Brasil é o quinto produtor mundial na indústria têxtil e foi responsável por cerca de 2% da produção em 2009. O Brasil é um país “produtor/consumidor”, onde a maior parte da produção destina – se ao mercado interno, desse modo o Brasil não se destaca nos índices de exportações.

Entre os países exportadores o Brasil ocupa a 69ª posição e 51ª, entre os importadores. A Argentina é o maior receptor das exportações brasileiras, com 27,5% do total exportado em 2007, seguida pelos Estados Unidos, com 26,2%. As fibras naturais e o algodão puro estão entre os principais produtos exportados pelo Brasil (BNDES, 2009).

A Figura 3 mostra que este setor possui maior potencial de gerar empregos (BNDES, 2009). Atualmente, a cadeia produtiva têxtil do Brasil é formada por 30.000 empresas entre fiações, tecelagens, malharias, estamparias, tinturarias e confecções. Este setor produz 1,6 milhões de empregos formais e informais no país.

**Figura 4** - Dados BNDES geração de empregos



**Fonte:** BNDES, 2009.

No Brasil ocorre a existência de polos regionais de produção, os principais são: São Paulo (considerado o principal centro produtor, centro intelectual e financeiro da indústria têxtil), Rio de Janeiro (destaca – se a cidade de Nova Friburgo como principal polo produtor de lingerie do Brasil), Santa Catarina (possui um dos polos têxteis mais avançados do Brasil e o centro brasileiro com maior inclusão no mercado internacional) e no Ceará (grande quantidade de empresas instaladas a partir de incentivos fiscais).

Nos últimos anos, observou-se uma grande migração de empresas do Sul e Sudeste para o Nordeste brasileiro, devido a agressiva política de incentivos fiscais adotada por alguns estados nordestinos. Além disto, há o fator adicional de menor custo da mão-de-obra local frente às outras regiões. Hoje, a região Nordeste absorve cerca de 17% dos empregos do setor têxtil (Viana, 2005). Responsável por 38% das exportações brasileiras, o Nordeste ocupa o 1º lugar em exportações no país, gerando mais de 300 mil empregos no setor. (ABIT, 2013)

A indústria têxtil brasileira em geral, e a nordestina em particular, é predominantemente fabricante de produtos (fios, tecidos e malhas) originados das fibras naturais, especialmente o algodão. Em alguns casos, têm sido utilizadas fibras mistas, com a incorporação de produtos sintéticos, destacando-se o poliéster.

Atualmente, o pólo da indústria têxtil na Paraíba conta com 218 empresas que empregam aproximadamente 18.000 operários. A localização deste importante parque industrial se concentra na área metropolitana de João Pessoa e Campina Grande, embora parte significativa delas esteja presentes nas cidades de Sousa, Patos e Cajazeiras.

Dentro do complexo do pólo têxtil paraibano, destaca-se a presença do Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica do Algodão da EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Contando com os incentivos do Fundo de Apoio à Industrialização (FAIN), a Paraíba tem atraído novas empresas e expandido o volume de empreendimentos produtivos neste segmento industrial. As empresas do setor têxtil da Paraíba contempladas com o incentivo FAIN são: (i) BrasCorda, empresa especializada no fornecimento de cordões de polipropileno; (ii) BRATESTEX, fabrica fios de puro algodão; (iii) TOALIA S/A produz artigos de cama, mesa e banho; (iv) Fiação NORFIL S/A especializada em fios têxteis, (vi) Fiação PATAMUTÉ, preparação e fiação de fibras têxteis; entre outras.

O Sul do país é o maior consumidor do mercado paraibano. Em 2011 o faturamento do Estado chegou a R\$ 1,4 bilhões ocupando a 13ª colocação no ranking de faturamento do setor (ABIT, 2011). O maior concorrente do estado neste setor é a região do agreste de Pernambuco, que reúne 13 cidades que produzem mais de 800 milhões de peças por ano.

A Coteminas, com 64 anos de atuação no país, possui 11 fábricas no Brasil e mais de 16mil funcionários. A Figura 4 mostra a unidade industrial da Coteminas na cidade de Campina Grande, esta unidade apresenta a maior produção têxtil no estado. A empresa produz fios e tecidos para a produção de artigos de cama, mesa e banho, que atende a demanda de todo o país.

**Figura 5** - Unidade Coteminas Campina Grande



**Fonte:** Imagem de Satélite Google (2014).

Apesar da vantagem econômica gerada ao Estado e a cidade de Campina Grande este tipo de atividade gera um resíduo difícil de ser reciclado, o lodo têxtil. Na Paraíba, diariamente, são descartadas toneladas de lodo têxtil todos os dias, sendo apenas em João Pessoa gerados oito ton/dia.

### ***2.2.1 Impacto Ambiental Gerado pela Indústria Têxtil***

O CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986, define como impacto ambiental toda alteração do meio ambiente nas propriedades físicas, químicas e biológicas, decorrentes das atividades humanas que podem afetar a saúde, segurança e bem estar da população e a qualidade do meio ambiente.

O processo de produção da indústria têxtil gera vários tipos de resíduos: sólidos, líquidos e gasosos. Cada fase do processo produtivo gera um tipo de resíduo com características diferentes que vão depender dos processos inseridos, maquinários, reagentes e solventes utilizados. De acordo com Bastian (2009) as etapas da produção têxtil se dividem em: fiação, beneficiamento, tecelagem e /ou malharia, enobrecimento e confecções.

A etapa de fiação consiste na obtenção do fio a partir das fibras têxteis. Os principais impactos ambientais originários nesta etapa são o pó resultante do processo de fiação composto por partículas de algodão e os altos níveis de ruído e calor gerados pelas máquinas. Ainda nesta etapa, utiliza – se um lubrificante sólido para obter melhor rendimento no processo de malharia, porém este material é considerado prejudicial ao meio ambiente (SANTOS, 1997).

Em seguida, a etapa do beneficiamento consiste na preparação dos fios para seu uso final ou não. Nesta preparação os fios podem passar por processos de tingimento, engomagem e retorção (linhas e barbantes). Santos (1997) considera esta etapa da produção têxtil mais crítica em termos de poluição ambiental, pois nesta etapa ocorre processos de alvejamento e tingimento utilizando alta quantidade de substâncias químicas, consideradas agentes poluidores da água e do ar.

Na etapa de tecelagem e /ou malharia, os tecidos são cortados para produção de peças que serão confeccionadas posteriormente. Segundo Santos (1997), devido a tecnologia dos equipamentos que modelam e cortam os tecidos, esta etapa não possui um impacto ambiental considerável, pois a sobra de malha gerada nos cortes e os moldes de papel descartados quando terminada a etapa são encaminhados para a reciclagem.

Em seguida, a fase do enobrecimento consiste na estamparia do tecido com desenhos, marcas e logotipos. Neste processo são utilizados produtos químicos tóxicos considerados nocivos ao meio ambiente e a saúde humana. Deve – se ter o conhecimento prévio dos produtos que serão utilizados, conhecer o grau de toxicidade dos componentes e ter um tratamento adequado da água utilizada para lavagem das placas de estampas (SANTOS, 1997).

Por ultimo, na fase de confecção são feitas as costuras e acabamentos. Os resíduos gerados nesta etapa são pontas de linha, restos de tecidos e agulhas. Estes materiais podem ter sua destinação correta sendo encaminhados para reciclagem. A utilização de óleos para lubrificação das máquinas usadas nesse processo requer atenção quanto a sua periculosidade à saúde do homem e do ambiente (SANTOS, 1997).

Os tecidos possuem fibras de composições variadas, classificadas em dois grupos: naturais e artificiais. As fibras naturais podem ter origem animal ou vegetal e, as artificiais podem ser proteínicas, celulósicas ou sintéticas. Dependendo dos tipos de fibras e dos processos de produção que os tecidos são submetidos, a reciclagem e o tempo de decomposição diferem os impactos ambientais gerados pelo material (MILAN, 2010).

Outro subproduto gerado durante o processo de produção é o lodo têxtil, resultado do tratamento de efluentes da indústria têxtil (Figura 5), oriundo da prensagem do material decantado nas Estações de Tratamento. Este tipo de resíduo pode conter metais pesados e outros componentes tóxicos que são utilizados tanto no processo de fabricação como no tratamento de efluentes, como exemplo: soda, polímeros, gomas, sulfato de ferro, chumbo, entre outros (KUNZ *et al.*, 2002).

**Figura 6 - Lodo Têxtil**



**Fonte:** Pesquisa Direta, 2014.

Segundo Guedes (2012) o lodo têxtil é essencialmente composto por água, óxidos de minerais, matéria orgânica e esgotos sanitários da indústria. A água resultante no processo é proveniente do processo de produção e tingimento. Os óxidos de minerais vêm do maquinário da fábrica. A matéria orgânica provem das fibras e bactérias usadas nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE's) (Figura 6).

**Figura 7** - Estação de Tratamento de Efluentes



**Fonte:** GUEDES, 2011.

Diariamente toneladas destes resíduos são geradas nas Indústrias Têxteis, forçando as empresas a estudarem meios de descarte adequados sem prejudicar o meio ambiente. A Figura 7 ilustra como é realizado o descarte deste material transportados em caminhões para serem depositados em aterros (GUEDES, 2011).

**Figura 8** - Caminhão sendo carregado de lodo têxtil



**Fonte:** GUEDES, 2011.

Dentre as principais destinações finais utilizadas para o lodo têxtil pode – se citar: o armazenamento em grandes tanques (método que requer grandes áreas), disposição em aterros industriais (processo considerado economicamente inviável) e lançamento direto em cursos d'água ou terrenos (ambientalmente inadequado).



### ***2.2.2 Utilização do Lodo Têxtil na Construção Civil***

Guedes (2012), Prim et al. (2000), Moreira et al. (2001) realizaram diversos estudos com o objetivo de inserir o lodo têxtil na produção de materiais para construção civil, podendo ser utilizado como agregado ou misturado a outros resíduos, os autores ainda comprovam a compatibilidade química do lodo têxtil, com as matérias primas utilizadas na fabricação de materiais de construção.

Guedes (2012) estudou a adição de lodo têxtil em argamassas com diferentes temperaturas de calcinação. Nas composições de argamassas utilizou-se o traço 1: 2: 9 com os seguintes percentuais de lodo: 0%, 5%, 10%, 15% e 20% com tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Os ensaios de resistência à compressão indicaram que todas as composições estudadas apresentaram resultados que atendem ao mínimo estipulado pelas normas da ABNT em vigência. O autor observou que as composições de argamassa com cura de 28 dias e incorporação de lodo têxtil calcinado na temperatura de 600°C apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão simples.

Prim et al. (2000) estudou a adição do lodo com cimento em blocos de concreto. Os autores obtiveram resistências na ordem de 30 MPa para uma mistura constituída de 30% de lodo com cimento e da ordem de 20 MPa para misturas com 20% de cinza pesada, 30% de lodo e cimento. Os autores consideraram a utilização de lodo e cinza como sendo um único resíduo, sendo 50% a incorporação de resíduos ao cimento conferindo uma resistência de 20 MPa aos blocos de concreto, atribuindo desempenhos satisfatórios para a aplicação na construção civil.

Moreira et al. (2001) pesquisou a adição de lodo têxtil na cerâmica vermelha, foram utilizadas dois tipos de argilas diferentes para a preparação das peças cerâmicas. Os corpos de prova foram preparados utilizando a argila 1 e diferentes quantidades (0, 5 e 10% em peso) de resíduo (amostras A) e a mistura das argilas 1 e 2 em proporções iguais contendo as mesmas quantidades do lodo (amostras B). Os autores observaram parâmetros como retração, absorção e condutividade. A principal conclusão do autor é que é possível utilizar este resíduo no processo desde que se utilize proporção adequada de argila-lodo, bem como argilas de natureza adequada e aplicação de tratamento térmico apropriado.

Castro (2010) utilizou o lodo gerado do tratamento de efluente de lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos. Foram produzidas amostras de blocos cerâmicos acústicos com 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35% de lodo. O autor realizou ensaios de análises químicas, análises físicas (pH, umidade, massa específica, TGA, limites de Atterberg



e granulometria) e análises mecânicas (Resistência a Compressão). O autor comprovou a eficácia da incorporação de 20% de lodo na massa de argila. Com a adição de 20% de lodo têxtil os blocos cerâmicos acústicos obtiveram coeficientes de absorção sonora maiores que os blocos de referência estudados, devido a maior quantidade e variedade de poros formados durante a queima com a adição do lodo.

Herek et al. (2005) confeccionaram blocos cerâmicos nas dosagens de 0%, 10% e 20% de lodo seco e 20% de lodo úmido em relação à argila. Os autores realizaram os testes nos tempos de cura de 7, 14, 28 e 90 dias. O teste de resistência a compressão mostrou que os blocos cerâmicos lodo/argila com 10% de lodo incorporado à argila apresentaram valores superiores aos dos blocos confeccionados somente com a argila pura. As análises do lixiviado mostraram que houve uma boa retenção dos metais no produto lodo/argila, avaliados conforme a norma NBR 10004/2004.

Herek et al. (2005), em pesquisa complementar, verificou que o tempo de cura teve uma influência significativa no processo de solubilização, principalmente para as amostras com elevadas concentrações de metais. No tempo de cura de 90 dias, a concentração de metais foi inferior aquelas determinadas nos tempos de cura anteriores, para todos os corpos de prova. O aumento do teor de argila na massa cerâmica também contribuiu de forma significativa para a diminuição da concentração de metais no solubilizado. Os autores ressaltaram que a adição do resíduo de lodo têxtil em blocos cerâmicos pode ser considerada uma alternativa de destinação final para o resíduo viável, tendo em vista que segue as normas técnicas vigentes para o reaproveitamento.

Segundo Schneiders et al. (2011) apesar dos lodos têxteis apresentarem um enorme potencial de aproveitamento para o setor energético, geralmente são dispostos em aterros industriais e sanitários sem nenhum tipo de reaproveitamento. A produção de energia elétrica e térmica a partir de biomassas, atualmente é muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento. Porém, seu emprego ainda não é bem difundido, uma vez que a geração de energia a partir de um combustível sólido é relativamente ineficiente, com uma eficiência de conversão que dificilmente excede os 10 %.

Estudos realizados em Tirupur na Índia, que tem produção de 200 t/dia de lodo têxtil, adicionou o resíduo em elementos de concreto. Os resultados indicaram a viabilidade de utilização deste apenas em elementos não estruturais, podendo ser adicionado até 30% de lodo têxtil em blocos de pavimentação, blocos vazados e blocos sólidos. Pois, o uso de lodo têxtil em concreto de cimento armado vai promover a corrosão da armadura devido a presença de

sais orgânicos na composição do lodo têxtil. (BALASUBRAMANIAN et al., 2005; RAJKUMAR & HEMA, 2011).

Arruda et al., (2007), verificou a compatibilidade química entre a composição do lodo têxtil e a matéria química do clínquer do cimento Portland. Percentuais de 1%, 2%, 3% e 5% de lodo têxtil foram adicionados na fabricação de clínquers. Após as amostras serem caracterizadas por difração de raios – x e análise térmica diferencial, constatou – se que a adição do resíduo não alterou significativamente a composição do clínquer e a temperatura de clinquerização diminuiu, originando economia energética. Estudos como estes corroboram a eficácia da reutilização do lodo têxtil em diversos setores da construção civil.

### 2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo é o material de construção de maior aplicabilidade e maior abundância no mundo. Contudo, as mais diversas utilizações de solos em engenharia requerem o atendimento de critérios técnicos rigorosos, o que restringe a utilização de jazidas de qualidade tecnológica inferior localizadas próximo à obra (GONDIM, 2008).

O transporte de materiais é considerado um acréscimo de custos para o orçamento final da obra. Neste contexto, a utilização de técnicas para o melhoramento de solos de jazidas próximas as obras são consideradas alternativas viáveis.

De maneira geral, a estabilização de solo é considerada qualquer alteração nas propriedades físicas, químicas ou mecânicas do material que acarretem melhorias no comportamento do solo levando em consideração os critérios técnicos sobre o ponto de vista de aplicação a engenharia (GONDIM, 2008).

Segundo Gondim (2008) deve-se observar as propriedades do solo que precisam ser alteradas e o resultado final a ser obtido, para assim escolher o método adequado para estabilização. A Tabela 2 apresenta os efeitos dos diferentes estabilizantes para determinados tipos de solos.

**Tabela 2** - Resultados de estabilizantes para determinados tipos de solos

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Estabilizante Recomendado</b>	<b>Efeitos</b>
Areia	Argila	Aumento da estabilidade mecânica
	Cimento	Aumento densidade e coesão
	Betume	Aumento coesão
Caulinita	Areia	Aumento da estabilidade mecânica
	Cimento	Aumento da resistência a curto prazo
	Cal	Melhor trabalhabilidade e resistência a longo prazo
Ilita	Cimento	Aumento da resistência a curto prazo
	Cal	Melhor trabalhabilidade e resistência a longo prazo
Montmorilonita	Cal	Melhor trabalhabilidade e resistência a longo prazo

**Fonte:** Gondim, 2008).

Existem três tipos principais de estabilização: a estabilização granulométrica, estabilização mecânica e estabilização química. Estes tipos de estabilização serão explicados nos itens subsequentes.

### ***2.3.1. Estabilização Granulométrica***

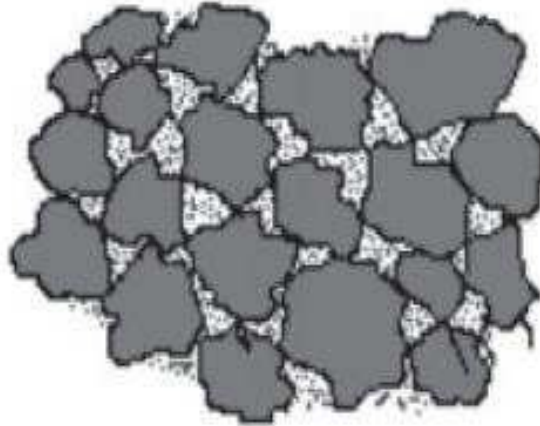
A estabilização granulométrica consiste na adição de outros materiais com diferentes granulometrias ao solo, em proporções apropriadas, com o intuito de obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade, quando propriamente compactado. O comportamento da estabilização está ligada a natureza das partículas e a estabilização (GONDIM, 2008).

A compactação consiste na expulsão de ar dos vazios dos solos quando submetidos a um determinado tipo de energia. Segundo Gondim (2008), tal processo é parte integrante de qualquer processo de estabilização, executado após a mistura com o agente estabilizante.

A estabilização granulométrica é obtida a partir da mistura de solo e agregados, de forma que a resistência seja garantida por meio do contato grão a grão entre as partículas maiores e o espaço vazio entre essas partículas seja preenchido por material mais fino,

garantindo maior densidade e uma menor permeabilidade, conforme apresentado na Figura 9 (GONDIM, 2008).

**Figura 9** - Distribuição das partículas solo e agregados



**Fonte:** GONDIM, 2008.

### ***2.3.2 Estabilização Mecânica***

A estabilização mecânica consiste em melhorar o desempenho do solo por meio de métodos mecânicos, aumentando a densidade do solo, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade.

O aumento da densidade é dado a partir das reduções dos vazios provocados pela ação de uma energia imposta mecanicamente, conseqüentemente com o aumento da compactação, tem – se o acréscimo da resistência mecânica (PINTO, 2008). Segundo Pinto (2008) o aumento da durabilidade por meio da ação mecânica dá - se com a redução dos poros inibindo a percolação da água e erosão provocada por esta.

### ***2.3.3 Estabilização Química***

A estabilização química consiste na adição de estabilizantes ao solo, modificando e melhorando suas propriedades físicas. Neste tipo de estabilização podem ser utilizados diversos tipos de aditivos que serão determinados conforme a compatibilidade com o solo

trabalhado, ocorrendo reações químicas entre o solo e estes. Os estabilizantes mais utilizados são: cimento, cal, produtos betuminosos, polímeros, entre outros (GONDIM, 2008).

### **2.3.3.1 Solo Cimento**

O cimento é um dos estabilizantes mais utilizados na estabilização química dos solos. As reações químicas entre as partículas de solo e cimento ocorrem por meio de reações de hidratação e hidrólise. A utilização do cimento confere a mistura melhorias nas propriedades mecânicas (LUCENA, 2012).

A técnica de solo – cimento consiste na adição do cimento Portland ao solo puro, mistura do solo com o cimento pulverizado com água e compactação da mistura. A quantidade de água deve ser definida a partir da umidade ótima conferida no ensaio de compactação. A mistura será estabilizada com a hidratação do cimento resultando ao material mais resistência (GONDIM, 2008).

Segundo Lucena (2012) deve – se destacar alguns fatores que influenciam a estabilização solo – cimento, dentre eles:

- a) Tipo de solo: em geral os solos arenosos exigem baixo teor de cimento;
- b) Presença de materiais no solo prejudiciais a eficiência do cimento: que pode afetar a hidratação do cimento;
- c) O teor de cimento utilizado na mistura: o aumento da resistência do solo é linearmente proporcional a quantidade de cimento utilizado para um mesmo tipo de solo;
- d) Operações da mistura e compactação: quanto maior o tempo entre a mistura e a compactação, maior será a perda de umidade, conseqüentemente, a resistência e a massa específica seca terão decréscimos consideráveis; e
- e) Tempo e condições de cura: durante os 28 dias iniciais do processo de cimentação das partículas, deve ser garantido um teor de umidade apropriado para ocorrer as reações pozolânicas adequadas.

Para este tipo de estabilização somente os tipos de solo A1, A2, A3 e A4 são estudados, pois os solos finos requerem teores elevados de cimento, tornando inadequado o uso do cimento por fatores econômicos.

### **2.3.3.2 Solo Cal**

A cal é resultante da calcinação de rochas calcárias, aglomerante que tem como intuito a aglutinação dos materiais melhorando a resistência do material resultante. Muito utilizada na construção civil: em argamassas proporcionando plasticidade, em bases e subbases de pavimentos, fabricação de tijolos, etc.

As características analisadas na estabilização solo – cimento e solo – cal são semelhantes no que se refere ao desempenho e aos métodos construtivos. O que difere os dois tipos de estabilização é o tipo de solo que pode ser utilizado em cada mistura. A estabilização solo – cal é indicada para solos argilosos (GONDIM, 2008).

Gondim (2008) afirma que a principal diferença entre as misturas solo – cimento e solo – cal consiste na velocidade do aumento da resistência com relação ao tempo: nas misturas de solo – cimento a resistência aumenta mais rápido num curto intervalo de tempo, enquanto que nas misturas solo – cal os resultados são difundidos ao longo do tempo de cura.

Lucena (2012) destaca alguns requisitos para a satisfatória estabilização de um solo com o uso da cal, dentre eles:

- a) Solos com características argilosas, com composição de argilominerais, alumínio, ferro;
- b) Elevado teor de cálcio na composição da cal, suficiente para desencadear as reações químicas;
- c) Proceder de forma minuciosa a execução e monitorar o desenvolvimento do projeto por meio de ensaios.

A utilização da técnica de estabilização solo – cal consiste da adição de teores de cal ao solo, observando efeitos como a plasticidade, coesão e resistência das misturas após um determinado período de cura. Fatores como: o teor de cal, o tipo de cal, o tipo de solo, o tempo de cura e a temperatura, influenciam no comportamento da mistura. Deve ser

considerado como sendo o teor ótimo aquele que proporcionar melhor comportamento a mistura (GONDIM, 2008).

### **2.3.3.3 Solo Emulsão**

A estabilização de solos com adição de emulsão é considerada uma técnica antiga, onde as primeiras experiências envolvendo este tipo de estabilização visando melhorar o desempenho de estradas de terra surgiram no início do século XX. Neste um material betuminoso é adicionado a um solo, ou mistura de solos visando a melhoria de suas características (GONDIM, 2008).

A estabilização solo – emulsão ocorre quando é adicionado um ligante asfáltico a um solo, onde essa mistura proporcione melhorias ao comportamento mecânico do solo e um efeito impermeabilizante, tornando o pavimento mais resistente às ações do tráfego e aos efeitos de variação de umidade (LUCENA, 2012).

Para os solos granulares a utilização deste processo acarreta um aumento na coesão, já em solos plásticos a impermeabilização aumenta devido ao efeito do asfalto na proteção das partículas de argila. Baixos teores de emulsão acarretam aumento considerável a resistência do solo, garantindo a eficácia no uso desta técnica (LUCENA, 2012).

## **2.4 ESTABILIZAÇÃO / SOLIDIFICAÇÃO DE RESÍDUOS**

A pavimentação requer grandes volumes de solo, por este motivo o uso de técnicas de estabilização são indicadas para este tipo de obra (LUCENA, 2012). Portanto, a utilização do resíduo de lodo têxtil em técnicas de estabilização/solidificação no solo para uso em pavimentação pode ser uma alternativa para destinação final desse resíduo.

A estabilização consiste na adição de um estabilizante envolvendo interação química onde componentes perigosos de um resíduo são transformados em formas menos solúveis e tóxicas.

A solidificação consiste na adição de material ao solo, melhorando propriedades físicas do material.

Estudos comprovam a utilização do uso de resíduos com a técnica de estabilização/solidificação, como descreve Cordeiro (2007), Lucena (2012), Santos (2010), Silva (2012) e Queiroz (2011).

Cordeiro (2007) utilizou o resíduo obtido de diversos setores da cadeia produtiva de petróleo como limpeza de filtros, fundo de tanques, derrames de óleo, etc. Conhecido como “resíduo oleoso” em solo para uso em bases e subbases de pavimentos rodoviários. O autor utilizou a técnica de estabilização química/solidificação para reincorporar o resíduo com o solo, utilizando como estabilizante a cal. Os incrementos com teor de cal na mistura tiveram como consequências alterações significativas nos valores obtidos do teor de umidade, da massa específica aparente seca, do ISC e expansão.

Santos (2010) aproveitou o resíduo da indústria petrolífera em solos. O autor usou a técnica de estabilização/solidificação utilizando o cimento como estabilizante. A adição de cimento a mistura ocasionou aumento significativo nos valores de ISC comparados ao solo em seu estado natural, todos os valores encontrados estavam dentro dos padrões estabelecidos pelo DNIT para uso em subbases de pavimentos rodoviários.

Silva (2012) observou a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) em bases e subbases de pavimentos e em misturas asfálticas. Ensaio foram realizados para análises das propriedades físicas e mecânicas dos agregados: composição, porcentagem de materiais indesejáveis, massa específica, forma dos grãos, compactação, influência da compactação, Índice de Suporte Califórnia. Além dos ensaios para as misturas asfálticas:

Viscosidade Brookfields, Ponto de Amolecimento e Penetração. Os resultados obtidos indicaram que compactado em energia intermediária o resíduo pode ser utilizado em subbases. Como agregado em misturas asfálticas, a mistura com 3,9% de RCD apresentou resultados satisfatórios.

Lucena (2012) estudou a aplicação técnica de estabilização/solidificação para os resíduos provenientes das Estações de Tratamento de Esgoto e Água em base e subbase de pavimentos. Com base nos resultados do experimento piloto, foram adotados os teores de 20% do resíduo de ETA e 10% do resíduo de ETE. Cal, cimento e emulsão foram adicionados como estabilizantes. Os incrementos com os teores de estabilizantes nas misturas tiveram consequências alterações significativas nos valores do ISC, RCS, RT e do MR.

Queiroz (2011) utilizou resíduos de fresagem em camadas de base e subbase de pavimentos rodoviários, utilizando cal e cimento como estabilizantes. A adição de cal e cimento às misturas ocasionou aumentos significativos nos valores de ISC quando comparados com os resultados obtidos para o solo puro e a mistura de solo (55%) e material



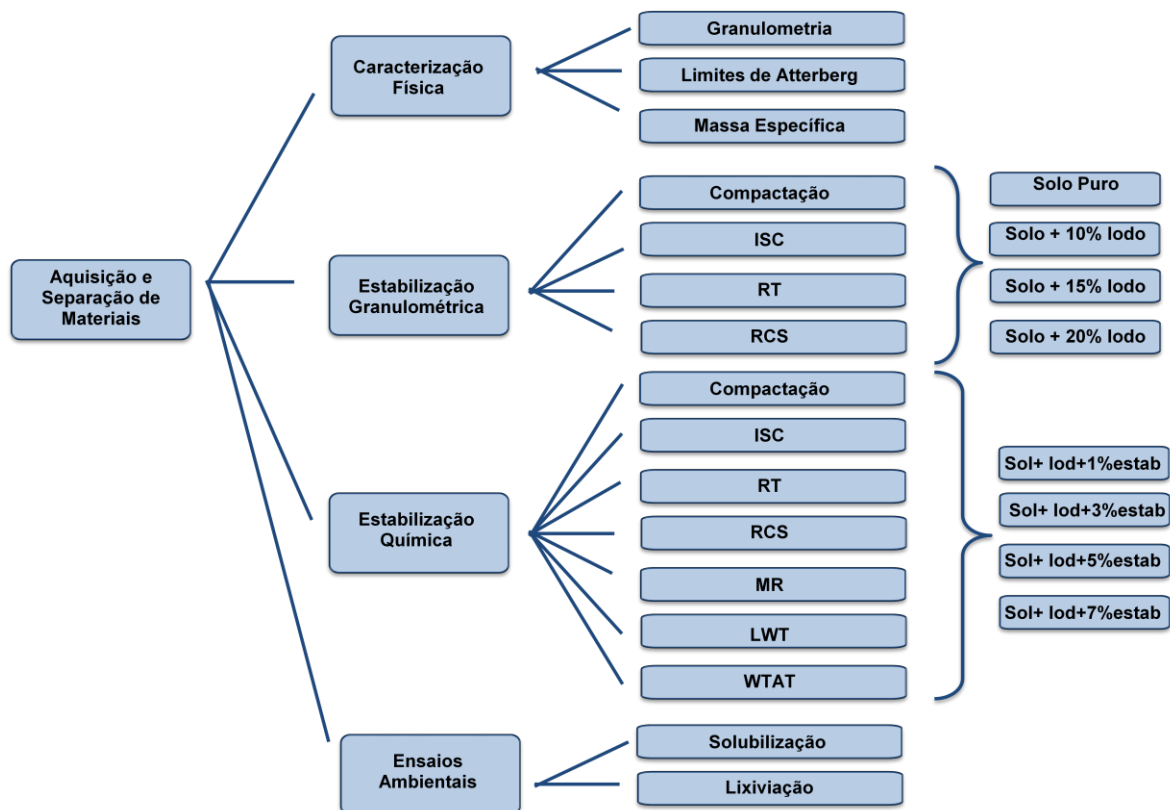
fresado (45%). Os melhores resultados foram obtidos nas misturas realizadas com a adição de cimento, onde foram observados valores de ISC variando entre 92% a 201%, compatíveis com as especificações do DNIT para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (DNIT- ES 140 e 142/10).

Nesta dissertação procurou – se utilizar a técnica estabilização/solidificação com lodos provenientes da indústria têxtil, viabilizando as propriedades físicas do solo possibilitando sua utilização em bases e subbases de pavimentos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, bem como os critérios e especificações adotadas para os estudos das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais. A metodologia adotada está apresentada conforme mostrado no fluxograma da Figura 10.

**Figura 10** - Fluxograma das atividades realizadas



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

O capítulo está dividido em cinco partes, onde na primeira estão descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, em seguida estão descritos os procedimentos dos ensaios realizados para a caracterização física dos materiais. Posteriormente são apresentados os ensaios realizados para a estabilização granulométrica, os detalhes dos ensaios para a estabilização química e por fim estão descritos os ensaios ambientais.

As etapas iniciais compreenderam a aquisição e caracterização dos materiais. Após esta etapa foi realizada a estabilização granulométrica com a finalidade de determinar a porcentagem em peso de lodo têxtil a ser adicionada a amostra de solo. Nesta etapa foram

adicionados teores de 10%, 15% e 20%, em peso, ao solo. Foram estudados e realizados ensaios de Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Resistência a Compressão Simples (RCS).

Em seguida, foram realizados ensaios da mistura solo-lodo-estabilizante para verificação do efeito da estabilização/solidificação química sob o resíduo (lodo). Os parâmetros eleitos para a análise de resistência mecânica das misturas solo-lodo-estabilizante foram de dois tipos: resistência mecânica (Compactação, ISC, RT, RCS e Módulo de Resiliência) e resistência ao desgaste (LWT - Loaded Wheel Test e WTAT - Wet Track AbrasionTest).

O Quadro 1 apresenta o número de corpos de prova que foram moldados e ensaiados durante a pesquisa, com as respectivas quantidades de materiais utilizados.

**Quadro1** - Quantitativo de corpos de prova e materiais utilizados

	Ensaio	Corpos de Prova	Material (Kg/CP)	Total por ensaio (kg)
Experimento Piloto	Compactação	6	6	36
	ISC	6	6	36
	RT	6	1	6
	RCS	6	3	18
Caracterização Mecânica (Solo + Lodo 10%+ Estabilizante)	Compactação	8	6	48
	ISC	8	6	48
	RT	16	1	16
	RCS	16	3	48
	MR	8	4	32
	LWT	8	2	16
	WTAT	8	6	48
TOTAL	11 ensaios	96	44	352

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), American Society for Testing and Materials (ASTM) e American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Todos os ensaios foram realizados

no LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos, laboratório pertencente à Universidade Federal de Campina Grande.

### 3.1 MATERIAIS

#### *3.1.1 Resíduo Lodo Têxtil*

O resíduo de lodo têxtil foi coletado numa empresa têxtil, localizada na cidade de João Pessoa - PB. O lodo foi disposto ao ar livre a uma temperatura média de 30°C, em bandejas para secagem prévia (Figura 11), durante 7 dias. Em seguida o lodo foi colocado em estufa a 110°C, temperatura estabelecida por estudos realizados por Guedes (2012), por aproximadamente 72 horas. A Figura 12 apresenta o lodo previamente destorroado para ser utilizado na realização dos ensaios.

**Figura 11** - Secagem prévia do lodo têxtil



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 12** - Lodo seco em estufa e destorroado



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### **3.1.2 Solo**

A Figura 13 apresenta o solo utilizado nesta pesquisa, que foi fornecido pela empresa ATECEL – Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior. As amostras de solos selecionadas foram coletados e armazenados em sacos plásticos com capacidade de 50 kg. Em seguida as amostras foram transportadas até o laboratório da Universidade Federal de Campina Grande onde foram, posteriormente, realizados os ensaios de caracterização. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, em quantidade específica para cada ensaio, para não perder a umidade.

**Figura 13** - Solo utilizado na pesquisa



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### 3.1.3 Estabilizante

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CPIIF-32 (Figura 14). O cimento foi adquirido no mercado varejista na cidade de Campina Grande em sacos de 50 kg e posteriormente acondicionado em sacos plásticos para evitar ocorrência de hidratação. O Quadro 2 apresenta os critérios do cimento exigidos pela NBR, utilizado nesta pesquisa.

**Figura 14** - Estabilizante utilizado na pesquisa



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Quadro 2** - Critérios do cimento utilizados nesta pesquisa

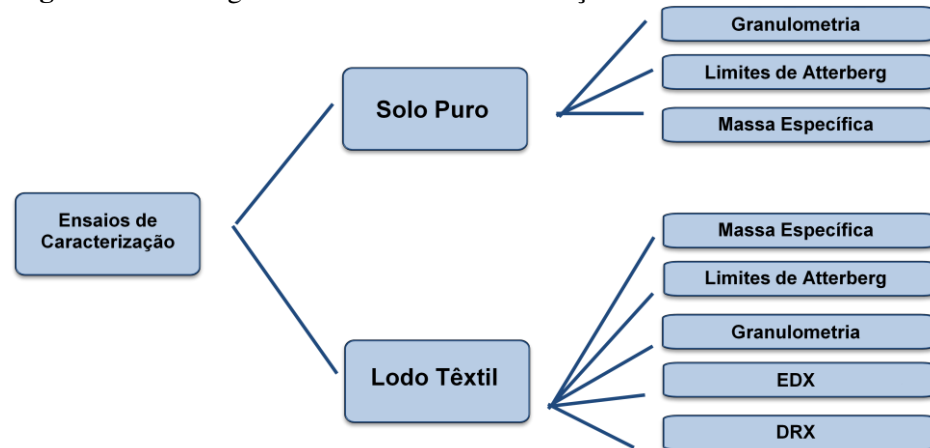
Ensaio Físicos	Critério	Norma
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	>2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	>1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	<10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	<12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	<5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	>10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	>20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	>32,0	NBR 7215

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A primeira etapa da pesquisa consistiu na realização de ensaios de caracterização física dos materiais. A Figura 15 apresenta o fluxograma com os ensaios que foram realizados para a caracterização física, química e mineralógica dos materiais convencionais e do resíduo de lodo têxtil.

**Figura 15** - Fluxograma Ensaios de Caracterização



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### 3.2.1 Determinação das Propriedades Físicas

O ensaio de granulometria dos materiais utilizados nesta pesquisa foi realizado, de forma manual segundo a norma NBR 7181 (ABNT, 1984) no Laboratório de Engenharia de Pavimentos.

A massa específica dos resíduos e solo foi determinada utilizando-se a norma NBR 6508 (ABNT, 1984). O limite de liquidez e o limite de plasticidade foram determinados para a amostra de solo puro e lodo, de acordo com as normas da ABNT NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente. As Figuras 16 e 17 apresentam os Ensaios dos Limites Atterberg para o solo e o lodo têxtil, respectivamente.



**Figura 16** - Limites de Atteberg para o Solo



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 17** - Limites de Atteberg para o Lodo Têxtil



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### **3.2.2 Análise Química**

As análises químicas (EDX) do resíduo do lodo têxtil foram realizadas no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande. As amostras foram passadas em peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,074mm), selecionados 10 gramas de material e submetidas à análise química por fluorescência de raios X em equipamento EDX 720 da Shimadzu (Figura 18). A geração de raios X é feita por meio de um tubo com alvo de Rh.



**Figura 18** - Equipamento EDX 720



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### ***3.2.3 Difração de Raios – X***

A determinação dos principais elementos que compõem os resíduos de lodo têxtil ocorreu mediante a submissão das amostras para análise com o uso de um equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizando radiação de  $CuK\alpha$ , tensão de 40kV, corrente de 30mA, varredura de  $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$  e  $\lambda = 1,54\text{\AA}$  (Figura 19). A amostra do material foi passada em peneira ABNT N° 200 e selecionadas 10 gramas para submeter ao ensaio. As difrações de raios-X foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande.

**Figura 19** - Equipamento XDR-6000

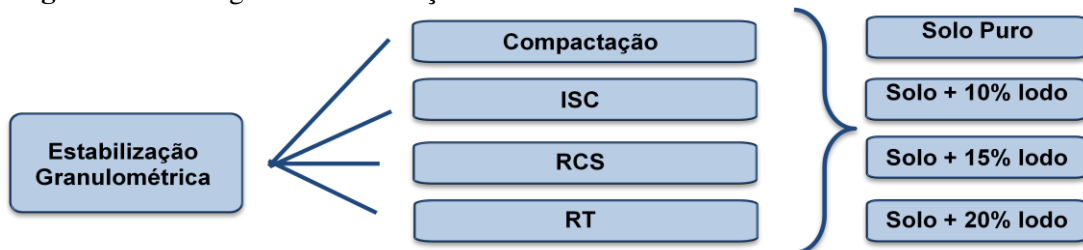


**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### 3.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A realização da Estabilização Granulométrica teve como finalidade verificar as influências do resíduo de lodo têxtil sobre o comportamento mecânico do solo. A adição ocorreu com os teores de 10%, 15%, 20% em peso, os teores escolhidos tiveram como base os valores adotados por Lucena (2012). Os Limites de Atteberg e a granulometria foram determinados para as amostras com as misturas de solo com os teores de 10%, 15% e 20% de lodo, com objetivo de classificar a mistura. A Figura 20 apresenta Fluxograma com os ensaios de Compactação, Índice Suporte Califórnia (ISC), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência a Tração que foram realizados para determinação do teor que apresenta melhor comportamento mecânico e para amostras de solo puro.

**Figura 20** - Fluxograma Estabilização Granulométrica



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### 3.3.1 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, segundo Método de Ensaio (ME 162/92) normalizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) na Energia do Proctor intermediário. Nesta etapa dois corpos de prova foram confeccionados para as amostras de solo puro, em seguida, foram confeccionados dois corpos de prova para cada teor de lodo, a Figura 21 apresenta a sequência do ensaio realizado.

**Figura 21** - Ensaio de Compactação: mistura, compactação e moldagem



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### 3.3.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Nesta etapa dois corpos de prova na umidade ótima e sob energia de compactação intermediária foram moldados para a determinação dos valores de Índice de Suporte Califórnia para o solo puro e para os teores de lodo. Os corpos de prova permaneceram em cura seca ao ar por sete dias e depois foram imersos em água durante quatro dias antes da ruptura. O procedimento para a realização do ensaio foi de acordo com a norma DNER ME 049/94 Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia, a Figura 22 apresenta a realização do ensaio de ISC.

**Figura 22** - Ensaio de ISC: mistura, moldagem e imersão



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

A expansão foi determinada com auxílio de extensômetros (colocados na parte superior de cada molde, de acordo com a Figura 23) nos corpos de prova moldados após a imersão em água. Finalizando este período, os corpos de prova foram retirados da imersão e



submetidos ao ensaio de ISC, onde os corpos de prova foram submetidos à penetração através de um pistão verificando a sua resistência à penetração.

**Figura 23** - Extensômetro



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### ***3.3.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples***

O ensaio de Resistência à Compressão Simples dos corpos-de-prova foi realizado de acordo com a norma NBR 12025 da ABNT (1990). A quantidade de água utilizada nas misturas dos materiais solo e lodo têxtil foi estimada em função dos resultados dos ensaios de compactação. Dois corpos de prova foram moldados para o solo puro e para cada teor de lodo têxtil (Figura 24).

O tempo de cura foi de sete dias para os corpos de prova serem rompidos, este tempo foi estabelecido para posterior comparação com os corpos de prova submetidos à estabilização química. Deste modo, os possíveis ganhos de resistência serão em função do desenvolvimento das reações químicas e não em função da sucção. Os corpos de prova foram rompidos na prensa SHIMADZU AG-IS, com velocidade de 1mm/min.

**Figura 24** - Ensaio de RCS: compactação e rompimento do corpo de prova



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### ***3.3.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta***

Devido a não existência de norma específica com relação a esse procedimento para solos foi adotado um procedimento semelhante ao que existe na norma DNIT-ME 138 (1994), que trata de misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral e a norma DNIT – ME 181 (1994), que trata de solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à tração por compressão diametral, com as devidas adequações.

A compactação ocorreu no molde do corpo de prova Marshall, em uma camada, aplicando-se 100 golpes na camada distribuída pelo corpo de prova, como mostra a Figura 25.

O número de golpes foi determinado em função da energia de compactação dado pela fórmula:

$$n = \frac{E.V}{9,8.P.H.N_c}$$

Onde:

n – número de golpes por camada

E – energia de compactação

V – volume do material compactado

P – massa do soquete em kg

H – altura do soquete em m

$N_c$  – número de camadas

**Figura 25** - Compactação do corpo de prova para o ensaio RT



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Após a moldagem, o corpo de prova foi extraído do molde e deixado em repouso por sete dias em cura seca ao ar. Os corpos de prova foram rompidos na prensa Marshall eletromecânica, com velocidade de deformação igual a 0,8 mm/s (Figura 26).

**Figura 26** - Compactação corpo de prova para o ensaio RT



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

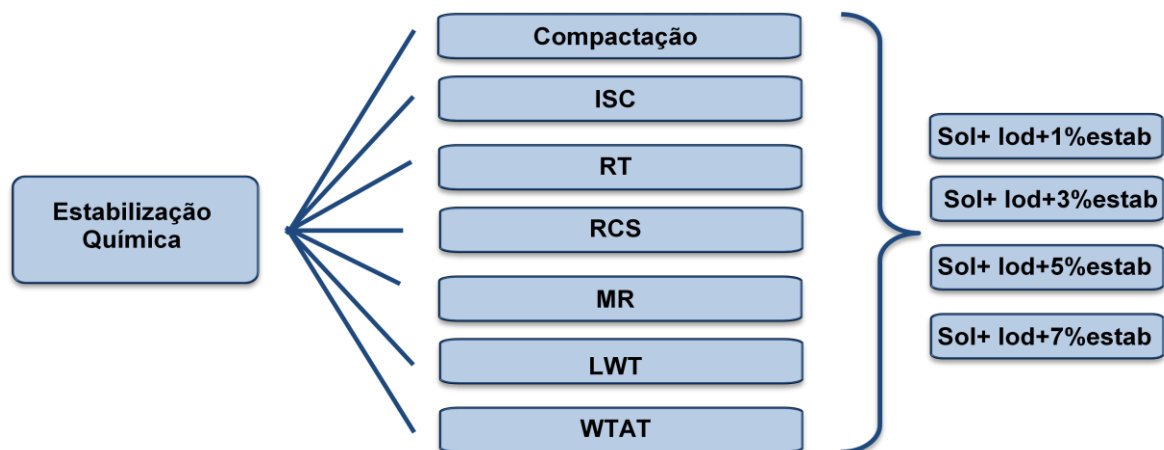
### 3.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

A partir dos resultados da estabilização granulométrica escolheu-se o teor de 10% do lodo têxtil, devido aos resultados favoráveis obtidos durante esta etapa. A escolha do cimento como estabilizante para esta etapa ocorreu em função do tipo do solo e da compatibilidade química do resíduo têxtil com o clínquer do cimento segundo Arruda (2007). Os teores de lodo utilizados foram de 1% (baixo teor), 3% e 5% (teores intermediários) e 7% (alto teor), tendo como base os valores adotados por Lucena (2012).

As misturas nesses teores foram comparadas aos solos sem aplicação de estabilizante e as misturas compostas apenas de solo e resíduo. Os ensaios mecânicos utilizados para caracterização das misturas foram realizados na energia Proctor intermediário, com dois corpos de prova para cada teor para uma melhor análise dos resultados.

Os ensaios realizados para a estabilização química das misturas foram: Compactação, Ensaio de ISC, Compressão Simples, Resistência a Tração por Compressão Indireta, Módulo de Resiliência, Loaded Wheel Test- LWT (determinação do excesso de asfalto e adesão de areia) e Wet Track Abrasion Test –WTAT (determinação da perda por abrasão) (Figura 27).

**Figura 27** - Ensaios realizados para a Estabilização Química



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### 3.4.1 Ensaio de Compactação

Os ensaios de Compactação foram realizados segundo Método de Ensaio (ME 129/94) normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Adotou-se



a energia de compactação intermediária, da mesma forma que ocorreu para as condições anteriormente apresentadas.

### ***3.4.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia***

O Índice de Suporte Califórnia foi determinado para as misturas solo + estabilizante + resíduo lodo em estudo de acordo com a norma DNIT-ME 049/94. Este ensaio estima a resistência à penetração de um pistão sobre um corpo-de-prova de uma amostra de solo e se relaciona a resistência de uma brita padrão. Dois corpos de prova da mistura foram moldados nas mesmas condições de compactação, ou seja, parâmetros umidade ótima e massa específica seca máxima sob o mesmo nível de energia (intermediário). Os corpos de prova permaneceram sete dias em cura seca e depois foram submetidos à imersão durante quatro dias antes da ruptura. O ISC tem a finalidade de verificar a expansão e suporte dos materiais destinados a pavimentação, o ensaio foi realizado nos mesmos teores da compactação. Neste estudo pretendeu-se verificar possíveis melhorias do solo após estabilização.

### ***3.4.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples***

O ensaio de Resistência à Compressão Simples foi realizado de acordo com a norma NBR 12025 da ABNT (1990). A quantidade de água a ser utilizada nas misturas dos materiais (solo, lodo têxtil e estabilizantes) foi estimada em função dos resultados dos ensaios de compactação. Os corpos-de-prova foram rompidos com o tempo de cura seca de 7 dias e 28 dias (Figura 28).

**Figura 28** - Corpos de prova rompidos RCS



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### ***3.4.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta***

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 138/94. Esse ensaio é comumente utilizado em concretos, rochas e misturas asfálticas podendo determinar a resistência à tração de uma forma indireta. O ensaio consistiu na aplicação de uma carga de compressão uniformemente distribuída ao longo da geratriz da amostra com a geração de um estado de tensões formado por tensões de tração e de compressão, na região do plano que contém a carga aplicada. O ensaio foi realizado com dois corpos-de-prova utilizando os teores de lodo e cimento estudados e anotados os valores para o tempo de cura de 7 dias e de 28 dias, com isso foi possível obter valores de resistência a tração (Figura 29).

**Figura 29** - Corpo de prova rompido RT



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### ***3.4.5 Ensaio de Módulo de Resiliência***

No ensaio de Módulo de Resiliência os corpos de prova foram moldados em cinco camadas em um cilindro com dimensões de aproximadamente 100mm de diâmetro e 200mm de altura obedecendo aos parâmetros de compactação determinados no ensaio Proctor Intermediário, de acordo com a norma DNIT – ME 134 (2010).

O ensaio de Módulo de Resiliência se divide em duas etapas: a primeira etapa consiste na fase de condicionamento e a segunda na de registro das deformações pelo equipamento. Na fase de condicionamento foram aplicadas 300 repetições com um ciclo de carga e descarga de

1 segundo para os pares de tensão-desvio ( $\sigma_d$ ) e tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) de acordo com o Quadro 3.

**Quadro 3** - Tensões utilizadas na fase de condicionamento

Par de Tensão	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	Número de ciclos
1	0,7	0,7	300
2	2,1	2,1	300
3	3,15	3,15	300

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

A segunda fase corresponde ao registro das deformações. Durante esta etapa ocorre a aplicação de três valores de tensão-desvio para cada uma das tensões confinantes pré-determinadas (Quadro 4). Durante os ciclos de aplicação de carga, os deslocamentos verticais são registrados através de instrumentos do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transducers).

**Quadro 4** - Tensões utilizadas durante o ensaio

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	Número de ciclos
0,21	0,21	100
	0,42	
	0,63	
0,35	0,35	100
	0,7	
	1,05	
0,53	0,53	100
	1,05	
	1,58	
0,7	0,7	100
	1,4	
	2,1	
1,05	1,05	100
	2,1	
	3,15	
1,4	1,4	100
	2,8	
	4,2	

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Para realização do ensaio de módulo de resiliência foram moldados dois corpos de prova de solo com adição de lodo têxtil e estabilizante nas proporções definidas, obedecendo aos parâmetros de compactação determinados no ensaio Proctor Intermediário. A Figura 30 apresenta a realização do ensaio.

**Figura 30** - Ensaio Módulo de Resiliência



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### ***3.4.6 Ensaio LWT (Loaded Wheel Test)***

Este ensaio tem como objetivo avaliar o comportamento do pavimento quando submetido à ação do tráfego, avaliando o efeito da compactação e as características de deformação. O corpo de prova é submetido à ação do movimento de uma roda de borracha com carga aplicada e de números fixos de ciclos.

Este ensaio é utilizado usualmente em estudos de dosagem de micro revestimento asfáltico a frio e lama asfáltica, de acordo com a norma NBR 14841. Para a metodologia deste ensaio em solos foram consideradas adaptações propostas por Duque Neto (2004).

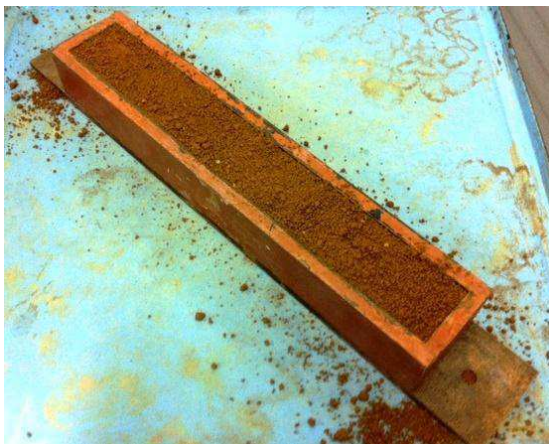
Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados:

- a) O molde composto de chapas de 12,70 mm de espessura compondo uma caixa fechada na base nas dimensões internas de 50,00 mm de altura, 50,80mm de largura e 400,0mm de comprimento e base desmontável.
- b) A base de fixação com 6 parafusos de 70,0mm de altura e 9,52mm (3/8”) de diâmetro.
- c) O êmbolo de compactação, de área plena, tem dimensões de 50,0mm de altura, 50,0mm de largura e 381,0mm de comprimento.
- d) Prensa hidráulica SHIMADZU AG-IS, de capacidade mínima de 5 toneladas para fazer a compactação semi-estática do solo dentro do molde.

Para a preparação do solo, moldagem e cura do corpo de prova foram seguidos os seguintes passos:

- a) Homogeneização do solo na umidade ótima de compactação da energia intermediária. Separar uma quantidade de solo úmido necessário para moldagem de um corpo de prova de 40,0 mm de altura. A quantidade de solo úmido é determinada a partir do volume a ser compactado (dado pelas dimensões do molde) e da densidade máxima obtida na curva de compactação da energia escolhida.
- b) Colocar a primeira metade do solo espalhando-o dentro do molde de forma uniforme, colocar o êmbolo de compactação e aplicar uma carga de 4 toneladas .
- c) Escarificar a primeira camada e colocar a segunda metade da porção do solo espalhando-o dentro do molde de forma uniforme, colocar o êmbolo de compactação e aplicar, novamente, uma carga de 4,0 toneladas (Figura 31);

**Figura 31** - Preparação e compactação corpo de prova para o ensaio LWT



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

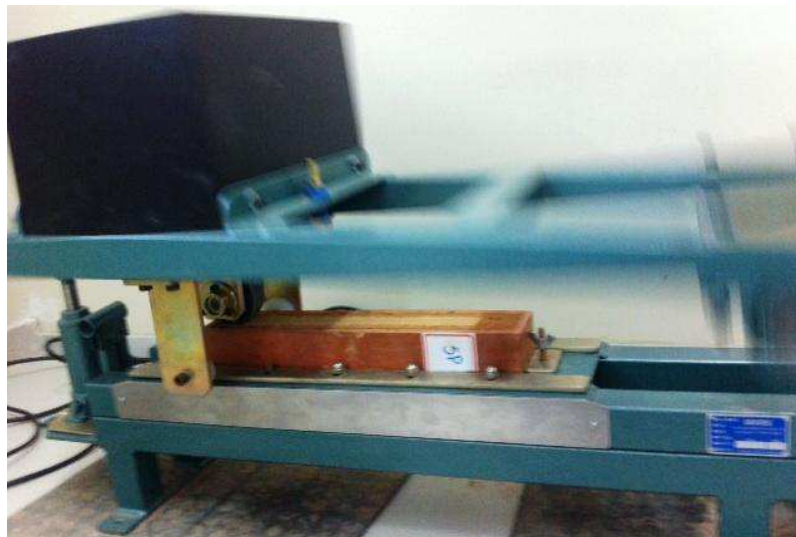


d) Após a compactação aguarda – se o tempo de cura seca de 7 dias para a realização dos ensaios de LWT.

A execução do ensaio de LWT foi realizada de acordo com Duque Neto (2004):

1. centralizar o molde de forma que a montagem da roda esteja alinhada com a linha central longitudinal do molde e fixá-lo utilizando os parafusos prisioneiros;
2. determinar a leitura zero com o auxílio do paquímetro de profundidade em um ponto fixo sobre o ponto central do corpo de prova, que deverá estar marcado na lateral do molde.
3. abaixar a roda, colocar o peso padrão (56 kg) e zerar o contador de ciclos. Ligar o aparelho e desligar ao completar os estágios de 20, 50, 100, 200, 300, 500 e 1000 ciclos, verificando o afundamento com o auxílio do paquímetro de profundidade e observando possíveis defeitos ocorridos durante a passagem dos ciclos. Caso haja contato da parte móvel do aparelho com o molde o ensaio deve ser paralisado, indicando um afundamento máximo impossibilitando a finalização do ensaio, além de poder resultar em danos ao equipamento. A Figura 32 apresenta a realização do ensaio com o equipamento em movimento, simulando a ação do tráfego.

**Figura 32** - Realização do ensaio LWT



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Para a realização deste ensaio foram moldados corpos de prova para solo puro, mistura de solo puro e o percentual de 10% de lodo e as misturas de solo puro, 10% de lodo e

estabilizante. A Figura 33 apresenta o corpo de prova moldado para o solo puro e a mistura de solo puro e 10% de lodo têxtil.

**Figura 33-** Corpos de prova ensaiados



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### ***3.4.7 Ensaio WTAT (Wet Track Abrasion Test)***

Este ensaio tem como objetivo determinar a deformação permanente vertical a partir do desgaste realizado devido à rolagem do equipamento e determinar a perda de massa por abrasão a partir das diferenças de massa final e inicial.

O ensaio WTAT foi realizado de acordo com a norma NBR 14746 – Determinação da perda por abrasão úmida, seguindo as condições determinadas por Duque Neto (2004). Este ensaio avalia a perda ao pó de um pavimento quando submetido a simulação da ação do tráfego. A Figura 34 mostra a preparação da mistura para realização do ensaio.

**Figura 34** - Preparação mistura corpos de prova WTAT



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

O molde utilizado para a preparação dos corpos de prova é composto por fôrma cilíndrica de 300mm de diâmetro por 50mm de altura. O corpo de prova foi compactado com o soquete Marshall e nivelado com o uso de uma régua de aço.

Para a preparação dos corpos de prova e cura para o ensaio WTAT modificado os passos sugeridos por Duque Neto (2004) foram utilizados:

- a) Colocar a primeira metade do solo espalhando-o dentro do molde de forma uniforme, compactar com o soquete Marshall a camada de solo distribuindo os 80 golpes em toda a área de solo, conforme descrito na Figura 35.

**Figura 35** - Compactação corpos de prova WTAT



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.



- b) Escarificar a primeira camada e colocar a segunda metade do solo espalhando-o dentro do molde de forma uniforme, compactar, com o soquete Marshall, a camada suplementar de solo. Nivelar a superfície de modo que fique horizontal e sem elevações (Figura 36). As amostras foram submetidas à cura ao ar por um período de 7 dias antes de realizar o ensaio.

Dois corpos de prova foram moldados para o solo puro, mistura de solo puro e o percentual de 10% de lodo e as misturas de solo puro, 10% de lodo e os teores de estabilizantes.

**Figura 36** - Corpo de prova sendo nivelado



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

A execução do ensaio consistiu nas seguintes etapas:

- a) Pesar o conjunto molde + solo antes de começar o ensaio (Figura 37).

**Figura 37** - Pesagem corpo de prova



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

- a) Centralizar o molde de forma que a montagem do cilindro esteja centralizada com o equipamento;
- b) Travar o cabeçote de abrasão da mangueira de borracha no eixo da máquina. Elevar a plataforma da máquina até que a mangueira de borracha se apoie livremente sobre a superfície da amostra.
- c) Regular a máquina para 110 rpm e tempo de operação de 5 minutos (Figura 38).
- d) Ligar a máquina e esperar o fim do ensaio.

**Figura 38** - Corpo de prova sendo ensaiado



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

e) Retirar o material desprendido após o ensaio com ajuda de um pincel (Figura 39). Pesar o conjunto depois de pincelado sem o excesso de material. Determinar três alturas no centro do molde com auxílio da régua de aço e do paquímetro de profundidade, verificando as condições finais do corpo de prova. Pesar o mesmo conjunto.

**Figura 39** - Material desprendido retirado com ajuda de pincel



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### 3.5 ENSAIOS AMBIENTAIS

#### ***3.5.1 Espectroscopia por Absorção Atômica***

Os ensaios de solubilização e lixiviação compõem a caracterização ambiental do resíduo. Estes estabelecem os critérios para a classificação dos resíduos de lodo têxtil quanto aos seus riscos potenciais para o meio ambiente, saúde pública, a inerticidade e toxicidade. A Classificação dos resíduos sólidos de lodo foi realizada segundo os procedimentos da norma NBR 10004. Para a avaliação da imobilização dos contaminantes, as amostras foram preparadas por meio dos extratos lixiviados (NBR 10005) e solubilizados (NBR 10006) e submetidas ao ensaio de Espectroscopia por Absorção Atômica.

Na preparação do extrato solubilizado são utilizadas 250g (base seca) do material colocada em frasco de 2.000 ml (Figura 40). Para a preparação da base seca, o resíduo de lodo têxtil foi destorroado conforme utilizado na preparação dos corpos de prova dos ensaios.

Em seguida, foram adicionados 1.000mL de água isenta de orgânicos, a amostra foi agitada manualmente por cinco minutos sem interrupção (Figura 41). Após sete dias em repouso a amostra foi filtrada (Figura 42), para obtenção dos extratos solubilizados, para o lodo têxtil e solo. A Figura 43 apresentam os extratos obtidos.

**Figura 40** – Amostras lodo têxtil e solo



Fonte: Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 41** - Agitação das amostras



Fonte: Dados da Pesquisa, 2014.



**Figura 42** – Amostras em repouso e filtragem



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 43** - Extratos obtidos do solo e lodo



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Para a preparação do extrato lixiviado, uma amostra representativa de 100g (base seca) foi colocada em frasco de 2.000 mL com água deionizada e isenta de matéria orgânica mais solução lixivante (ácido acético glacial, hidróxido de sódio e água em concentrações estabelecidas pela norma). Em seguida, a solução foi submetida à agitação em equipamento rotativo com 30 rotações por minuto, relação L/S igual a 20:1 e tempo de contato com o meio lixivante igual a  $18 \pm 2$  horas.

As amostras foram preparadas no Laboratório de Engenharia de Pavimentos, pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da UFCG e no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos – LABGER da Unidade de Engenharia Química

da mesma instituição. As amostras dos extratos foram enviadas para análise no Fundo de Apoio à Mineração (FUMINERAL) em Goiás-GO.

## 4 RESULTADOS

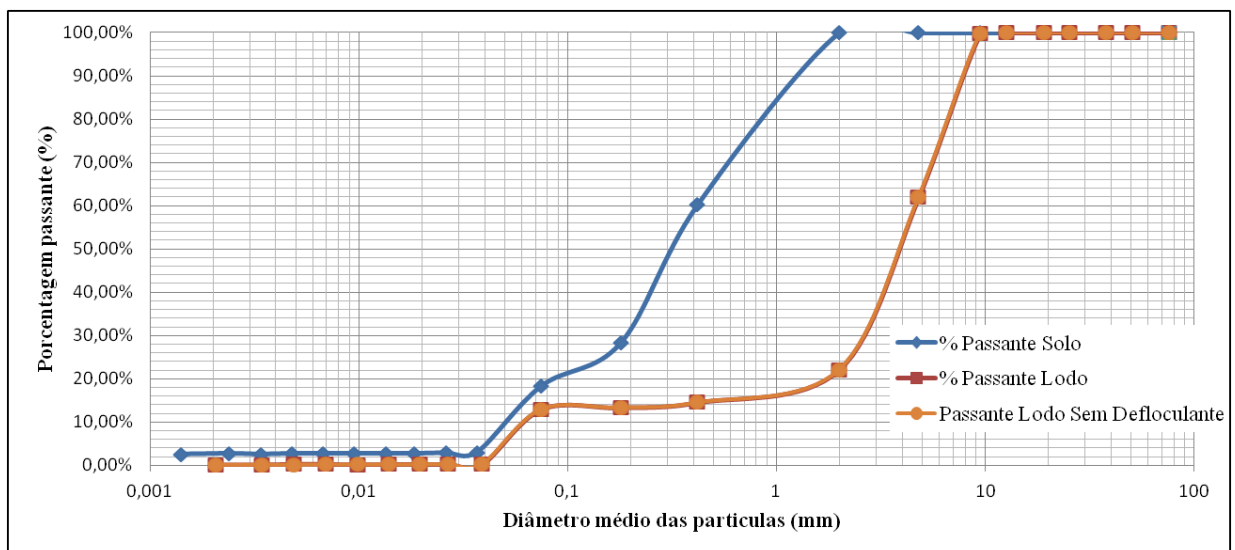
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Primeiramente são apresentados os resultados de caracterização física dos materiais, em seguida encontra-se os da estabilização granulométrica obtida a partir da introdução do lodo têxtil ao solo e por último são apresentados os dados obtidos para a estabilização química com a adição do cimento e os ensaios ambientais.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

### 4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Figura 44 apresenta as curvas granulométricas para o solo e para o resíduo de lodo têxtil. Observa-se que os grãos do solo puro e do lodo têxtil não se assemelham. O solo apresenta distribuição granulométrica bem graduada e de uniformidade média, com apenas cerca de 20% das partículas apresentando diâmetros inferior a 0,1 mm.

**Figura 44** - Curva de distribuição dos tamanhos das partículas: solos e resíduo de lodo



Fonte: Dados da Pesquisa, 2014.

O lodo possui graduação com cerca de 80% das partículas com diâmetro superior a 2mm, o que caracteriza granulometria superior a do solo trabalhado. As curvas destes materiais apresentam comportamentos distintos, não indicando uma compatibilidade física das amostras. Para o ensaio de sedimentação sem a utilização do defloculante na solução não houve alteração significativa em relação aos dados obtidos anteriormente.

A Tabela 3 apresenta o Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc), para amostras com o solo e lodo têxtil.

**Tabela 3** - Coeficiente de Uniformidade e Curvatura para o solo e lodo

<b>Amostras</b>	<b>Solo</b>	<b>Lodo Têxtil</b>
Cc	3,33	34,84
Cu	7,5	90

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Os solos que apresentam  $Cu < 5$  são denominados uniformes; e com  $Cu > 15$  desuniformes. Para valores de Cu entre 5 e 15 são denominados de medianamente uniformes. Neste caso o solo é considerado medianamente uniforme, já o lodo é considerado desuniforme devido a sua estrutura. Para um solo bem graduado, o valor do coeficiente de curvatura, deverá estar entre 1 e 3. Neste caso, o solo é considerado bem graduado.

#### **4.2.1 Determinação das Propriedades Físicas**

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos para os índices de consistência dos materiais nos ensaios de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), umidade (h) e massa específica. Nos Ensaio dos Limites de Atteberg para o resíduo de lodo têxtil, verificou-se que o resíduo não absorveu a água durante a realização do ensaio sendo considerado como não plástico.

Este comportamento ocorre devido aos aditivos adicionados no processo de floculação do tratamento de efluentes da indústria têxtil. Estes podem ser o Sulfato de Alumínio ou de Ferro e sua adição permite a formação das partículas em suspensão em pequenos flocos. Após a formação destes, estes sedimentam devido a densidade de suas partículas. O produto final resultante da sedimentação é o lodo têxtil, explicando o comportamento repulsivo do resíduo



em relação a água adicionada durante o ensaio (SILVA,2007), uma vez que a concentração dos aditivos nas partículas atuam como impermeabilizantes destas.

A umidade média para o lodo têxtil foi observada em duas condições: para o lodo in natura e após seco em estufa por 72 horas a 110°C . O lodo in natura, mesmo após prensagem, possui elevada quantidade de água de livre, enquanto a umidade do lodo seco é devido a água existente em sua constituição. O resultado da massa específica do resíduo do lodo foi inferior a do solo, ou seja, mostra que o lodo é um material de baixa densidade, fato que pode estar associado a elevada quantidade de água e matéria orgânica presente no lodo. O valor encontrado para este parâmetro está de acordo com o encontrado por Prim et al. (2000), Castro (2010) e Jahagirdar et al. (2013) quando estudaram resíduos de lodo têxtil.

**Tabela 4** – Índices físicos dos materiais

<b>Amostra</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>Umidade média (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Lodo Têxtil	Não Líquido	Não Plástico	452,00 (In Natura) 6 (Seco)	1,717
Solo Siltoso	24,70	18,54	0,57	2,72

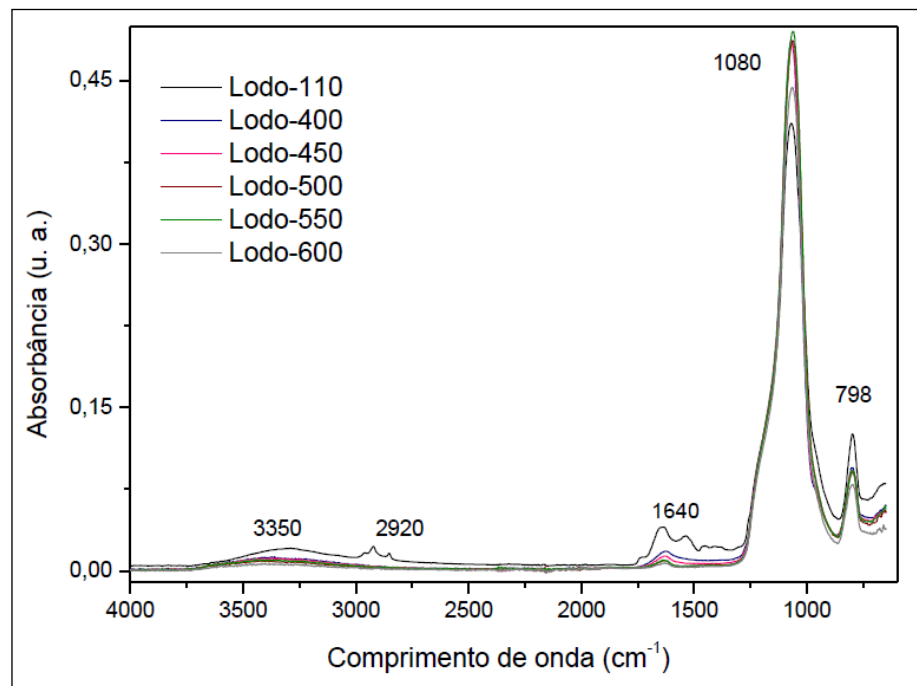
**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

A partir dos resultados da distribuição dos tamanhos das partículas e dos índices de consistência, o solo foi classificado como A-2-4 areia siltosa, de acordo com o sistema de classificação TRB (Transportation Research Board). A classificação TRB aponta como de bom a excelente um solo do tipo A-2-4 para uso em pavimentação. O lodo pode ser classificado como A-1-a fragmentos de pedra ou pedregulho, devido a sua granulometria, tal classificação é considerada positiva para utilização deste resíduo em subleito, podendo ser considerado como excelente a bom, segundo o Sistema Rodoviário de Classificação.

#### 4.2.2 Análise Química – EDX

Guedes (2012) realizou análise de espectrometria vibracional de absorção no infravermelho (FTIR) com amostras de lodo tratadas termicamente nas temperaturas de 110°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C e 600°C, conforme pode ser observado na Figura 45.

**Figura 45** - Espectro de infravermelho das amostras de lodo

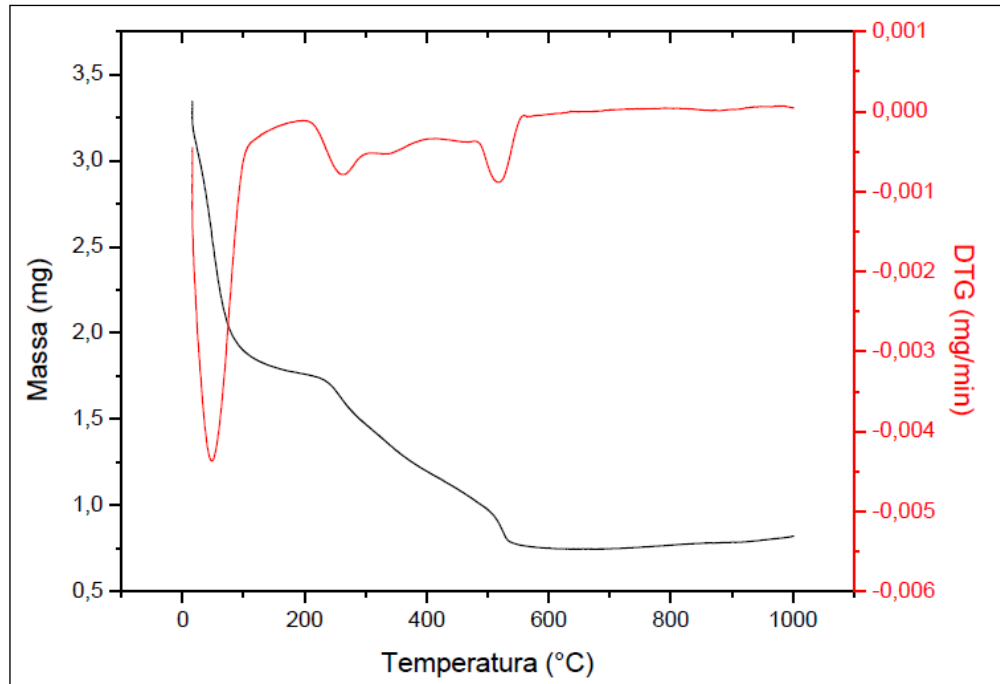


**Fonte:** Guedes, 2012.

As amostras submetidas a temperatura de 110°C obtiveram melhores respostas quanto a deformação axial de CH e CC tal fenômeno diminui com o aumento da temperatura, justificando a utilização de 110 °C nesta pesquisa. Além disto, o autor observou em análise Termogravimétrica (Figura 46) que o lodo seco à 110°C teve uma grande perda de massa (44,3%), provavelmente relacionada ao excesso de água presente no lodo. O autor verificou que até 100°C a perda de massa é equivalente a água livre contida no lodo, após essa temperatura esta é relacionada a perda de água de constituição e presença de matéria orgânica. Comportamento similar a este também foi observado por Schneiders et al. (2011) e Araújo & Sellin (2008).

Portanto, como o lodo perde toda sua água livre na temperatura de 110°C, e temperaturas superiores implicam em maiores gastos energéticos e conseqüentemente elevação de custos, esta foi a temperatura escolhida para esta pesquisa.

**Figura 46** - Curvas Termogravimétrica do lodo Curva TG do lodo “in natura” obtida à razão de aquecimento de 10°C/min e atmosfera de ar sintético



**Fonte:** Guedes, 2012.

A Tabela 5 apresenta a composição química do lodo têxtil utilizado na pesquisa.

**Tabela 5** - Composição química do lodo têxtil

		Determinações (%)							
Lodo	PF	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Outros
Têxtil	11,22	59,59	11,71	6,53	3,51	2,62	2,51	1,28	1,03

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que o lodo têxtil é constituído basicamente de SiO<sub>2</sub> (59%), CaO(11%), MgO(6%), SO<sub>3</sub>(3%) e baixos teores de P<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1%). A calcinação do lodo à 1000°C mostrou perda ao fogo de 11,22% em peso. Esta perda corresponde à quantidade de matéria orgânica existente no lodo. A presença de sílica provavelmente provém da pasta de estamparia que possui em sua composição silicato, bem como pode ser resultado de alguma contaminação por areia, tal qual observado por Barboza (2011).

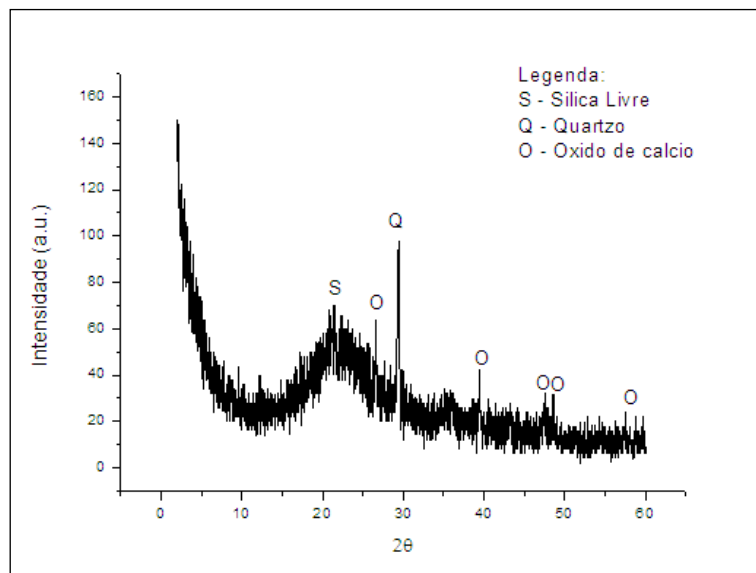
Jahagirdar et al (2013) obteve quantidades equivalentes de óxido de Cálcio (15%) e inferiores de Sílica (15%) ao encontrado nesta pesquisa. De acordo com estes autores a presença deste materiais indicam a viabilidade do uso do resíduo na construção civil.

Segundo Guedes (2012), a presença de óxido de alumínio e óxido de ferro são provenientes do processo de floculação e dos corantes provenientes do processo de tingimento. A grande quantidade de sílica presente na composição química do lodo indica compatibilidade com o estabilizante utilizado, o cimento, confirmando estudo realizado por Arruda (2007).

#### 4.2.3 Difração de Raios – X

A Figura 47 apresenta o difratograma da amostra do lodo têxtil.

**Figura 47** - Difratograma de raios – X do lodo têxtil



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Nesta figura observa-se a presença de picos de quartzo, sílica e óxido de cálcio. Os picos de quartzo são evidenciados entre  $2\theta \sim 25$  e  $30^\circ$  este promove melhorias nas propriedades do material quanto a dureza. Os picos de sílica ocorrem em  $2\theta \sim 10$  e  $20^\circ$  e também são observados picos de óxido de cálcio entre  $2\theta \sim 25$  e  $60^\circ$ .

Os resultados encontrados para o lodo estudado nesta pesquisa apresentam similaridades aos dados obtidos por Guedes(2012) e Castro (2010). Guedes (2012) analisou os lodos tratados termicamente em temperaturas variando de  $400^\circ\text{C}$  a  $650^\circ\text{C}$ , os resultados apresentados pelo autor mostra apenas uma banda amorfa com pico cristalino apenas de sílica. Castro (2010) observou a presença de picos de sílica, quartzo, Hercynite (Her), Gmelinite (Gm) e Silicato de Alumínio.

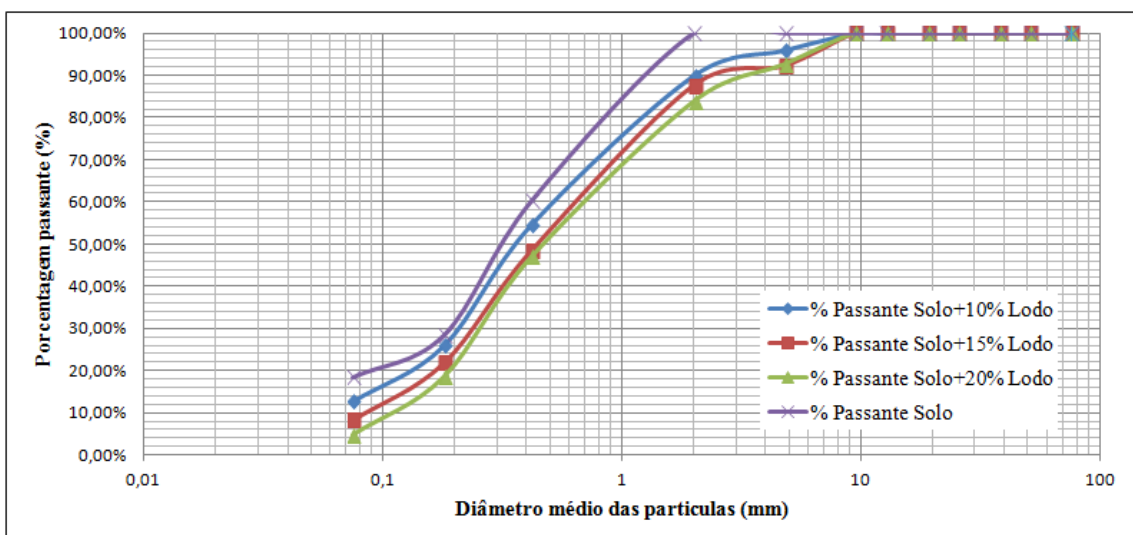
Os picos cristalinos de sílica e óxido de cálcio observados no DRX estão compatíveis com os resultados no EDX, corroborando a compatibilidade entre os ensaios.

### 4.3 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

#### 4.3.1 Análise Granulométrica para os Teores de Lodo

A Figura 48 apresenta as curvas granulométricas para as misturas de solo e o resíduo de lodo têxtil, nas porcentagens de 10%, 15% e 20%, que foram utilizados para a estabilização granulométrica. Observa-se que quanto maior o teor de lodo adicionado ao solo, a granulometria da mistura solo+lodo adquire maior graduação. A mistura com adição 10% de lodo apresentou 12,77% do material passante na peneira N° 200, enquanto para 15% de lodo este valor foi de 8,35% e de 4,7% para a mistura de solo com 20% de lodo. Portanto, apesar da semelhança da distribuição de tamanho de grãos entre o solo puro e as misturas com lodo têxtil, verifica-se que o lodo altera a granulometria do solo.

**Figura 48** - Curva de distribuição dos tamanhos das partículas mistura solo e lodo



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

### 4.3.2 Determinação das Propriedades Físicas para os Teores de Lodo

Os Ensaio dos Limites de Atteberg foram realizados para misturas com incrementos de porcentagens de lodo de 10%, 15% e 20% ao solo. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** – Índices físicos das misturas com os teores de lodo

<b>Mistura</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>
Solo + 10% Lodo	26,50	23,10
Solo + 15% Lodo	31,50	Não Plástico
Solo + 20% Lodo	30,20	Não Plástico

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Observa-se que com o aumento da quantidade de lodo, ao solo, a mistura torna-se não plástica e apresenta pouca variação do LL. Esta variação pode ser explicada em virtude do destorroamento do resíduo não ocorrer de forma homogênea.

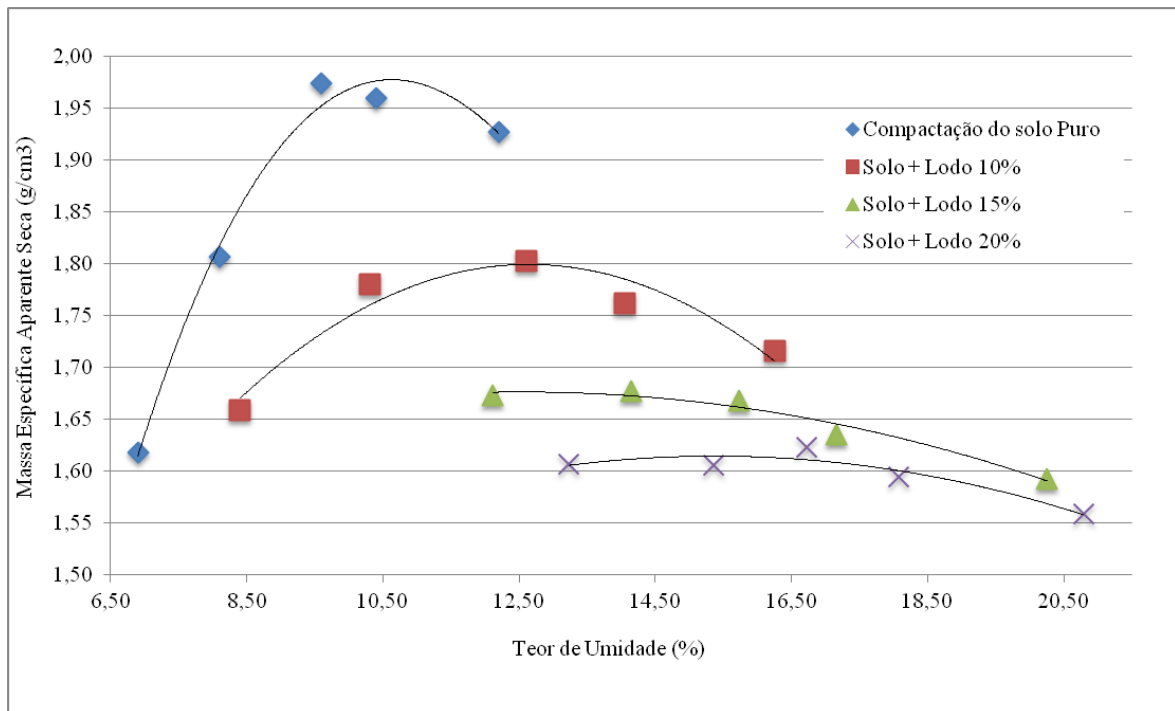
### 4.3.3 Ensaio de Compactação

A Figura 49 apresenta os resultados do ensaio de compactação, que visa determinar a umidade ótima para compactação em campo. Observa-se que à medida que se aumenta a quantidade de resíduo incorporada, para todos os teores, ocorre uma diminuição do peso específico aparente seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e um aumento da umidade ótima.

Este comportamento era esperado em função da massa específica do lodo ser inferior ao do solo, portanto como parte deste é substituído pelo resíduo acarreta uma diminuição deste parâmetro. O aumento da umidade ótima pode ser justificado pela água de constituição existente no resíduo, ou seja a medida que aumenta-se o teor de lodo incorporado ao solo a umidade ótima cresce na mesma proporção.

As curvas de compactação para as misturas com adição de teores de 15% e 20% de lodo ao solo tendem a apresentar comportamento linear sem pico definido, possivelmente devido à fração mais grossa do solo que interfere nas ligações intermoleculares do solo.

**Figura 49** - Resultados para os Ensaio de Compactação

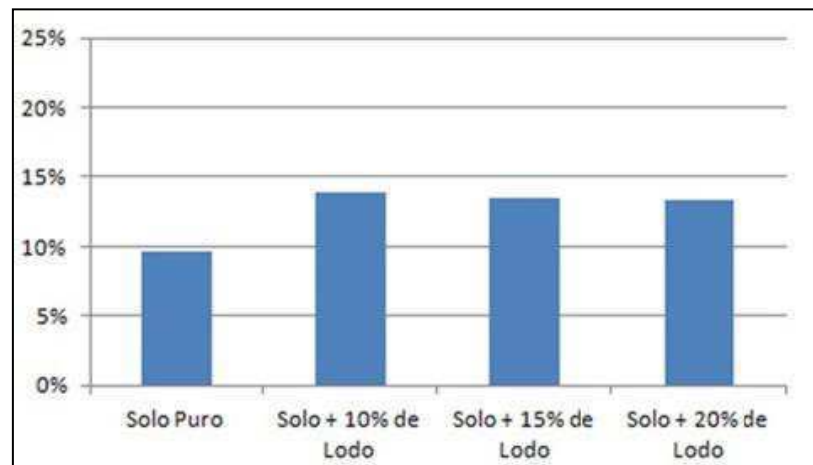


**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### 4.3.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

A Figura 50 apresenta o resultado de ISC para as misturas de solo e lodo têxtil e para o solo puro. Verifica-se que a adição dos teores de 10,0%, 15,0% e 20,0 % de lodo têxtil ao solo melhoram o ISC em cerca de 4,3%, 3,9% e 3,7% , respectivamente.

**Figura 50** - Resultados para os Ensaios de Índice de Suporte Califórnia



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

A Tabela 7 apresenta os valores de ISC e de Expansão adotados pelo DNIT para solos estabilizados. Salienta-se que os valores de referência fazem parte das especificações de serviços para uso em estradas com tráfego pesado, ou seja, calculados para  $N > 5 \times 10^6$ . Para base de tráfego intermediário,  $10^6 < N < 5 \times 10^6$ , o ISC deve ser superior a 60% para uso em base.

**Tabela 7** - Valores de referência ISC e Expansão DNIT

Camada do Pavimento	ISC (%)	Expansão (%)
Subbase	$\geq 20\%$	Máxima de 1%
Base	$\geq 80\%$	Máxima de 0,5%

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.



Pela análise dos dados observa-se que os teores de incorporação de 10%, 15% e 20% de lodo têxtil apresentam-se abaixo do mínimo recomendado pelo DNIT para uso em subbase que corresponde a  $\geq 20\%$  de acordo com a norma ES 140/10. Os valores alcançados para o ISC também estão abaixo do recomendado pelas normas para uso em rodovias de tráfego pesado que corresponde a  $\geq 80\%$  de acordo com a norma ES 142/10.

A Tabela 8 apresenta os valores de Expansão encontrados após realização do ensaio, referentes as amostras de solo com adição dos teores de lodo estudados para obtenção da estabilização granulométrica. Verifica-se que a adição de lodo ao solo aumenta o valor de expansão, entretanto estas ainda estão abaixo do mínimo recomendado pelo DNIT.

**Tabela 8** - Valores de Expansão para as amostras

<b>Amostras</b>	<b>Expansão (%)</b>
Solo Puro	0,02
Solo + 10% Lodo	0,07
Solo + 15% Lodo	0,12
Solo + 20% Lodo	0,21

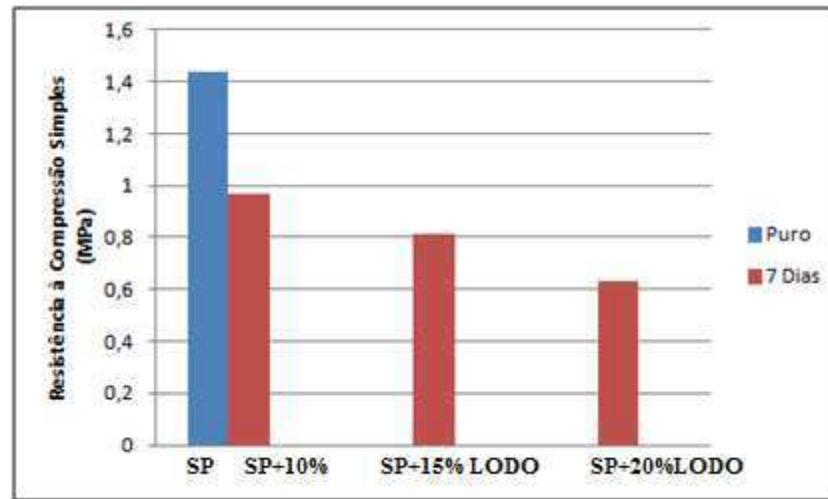
**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### ***4.3.5 Ensaio de Resistência a Compressão Simples***

A Figura 51 apresenta os resultados do ensaio de compressão simples realizados em corpos de prova para diferentes teores de lodo adicionado ao solo puro. A partir da figura nota-se que com a adição do lodo são obtidos menores valores de RCS.

Este comportamento era esperado, pois o solo utilizado nesta pesquisa é granular (A-2-4) e a medida que são incorporados teores maiores de lodo, a mistura adquire granulometria com maior graduação. Os ensaios de RCS são indicados para solos coesivos, portanto misturas com maior graduação tendem a apresentar menor RCS, fato comprovado pelos resultados da Figura 53.

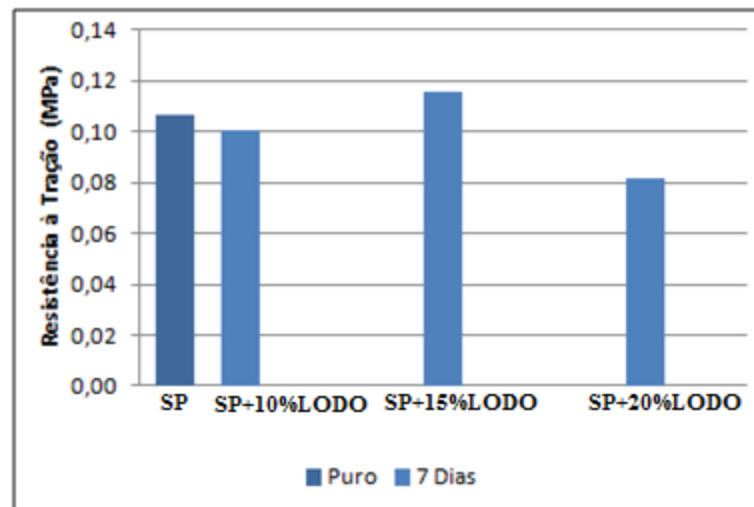
**Figura 51** - Resultados para o Ensaio de Resistência a Compressão Simples



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### ***4.3.6 Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral***

Na Figura 52 são apresentados os resultados do ensaio de Resistência à tração por compressão diametral das misturas. Embora não seja usual a utilização deste ensaio em solos, por estes apresentarem baixa resistência à tração, um dos esforços críticos a ser suportado pelo material empregado é a tensão de tração na base da camada solicitada, o que justifica a relevância do ensaio. Os resultados obtidos mostraram que houve um aumento nos valores de RT até o teor de 15%, após isso os valores apresentam uma queda.

**Figura 52** - Resultados para os Ensaio de Resistência a Tração

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

De acordo com os resultados apresentados na etapa de estabilização granulométrica (granulometria, Limites de Atteberg, RCS, ISC e RT) verificou-se que o teor de 10% foi o que apresentou melhores resultados. A incorporação de quantidades superiores de resíduos ao solo poderiam vir a contribuir de forma mais eficaz para a gestão deste resíduo, entretanto poderia reduzir a resistência mecânica do solo.

Apesar do aumento do ISC observado para o teor de 10%, a estabilização granulométrica não deve ser usada isoladamente, pois os resultados mecânicos encontram-se aquém do desejado. Portanto a estabilização química torna-se necessária para melhor estabilização do resíduo.

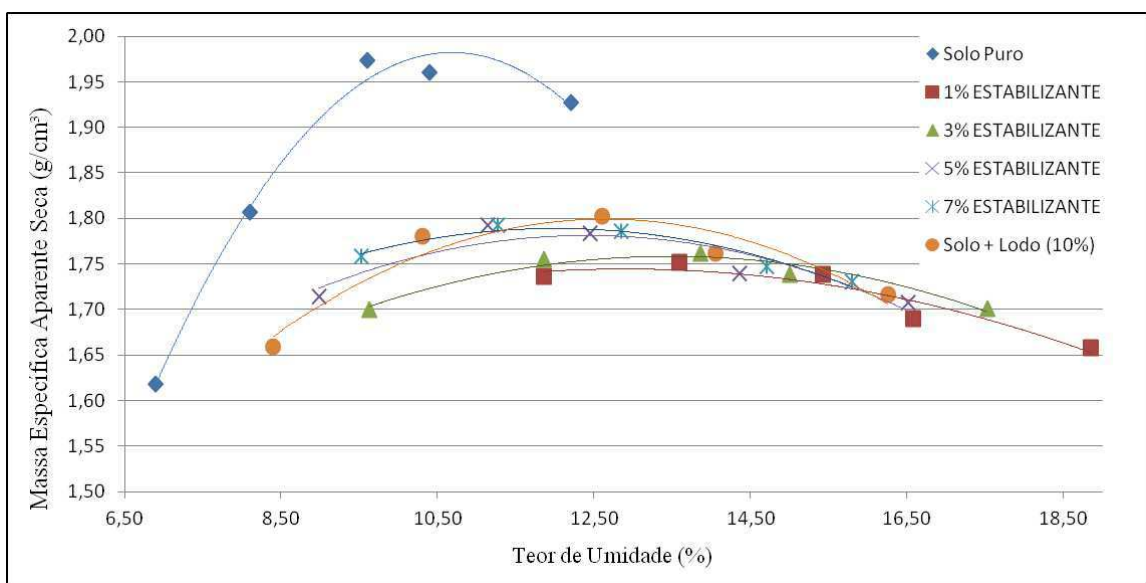
#### 4.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

De acordo com Cristelo (2001) para solos pouco plásticos a utilização de cimento como estabilizante é teoricamente mais viável. Dado que o solo utilizado na pesquisa foi um A-2-4, escolheu-se o cimento para estabilizar quimicamente a mistura solo + lodo têxtil. Ocorreu devido à viabilidade técnica e econômica, tendo em vista que para este tipo de solo será utilizada pouca quantidade de estabilizante para atingir valores satisfatórios.

#### 4.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Na Figura 53 são apresentadas as curvas de compactação para diferentes teores de cimento adicionados à mistura de solo + lodo têxtil. Observa-se que este aditivo acarretou um queda nos valores da umidade ótima da mistura. A massa específica aparente seca da mistura solo/lodo/cimento teve um leve aumento, visto que o Estabilizante tem massa específica maior do que o solo.

**Figura 53** - Resultados para os Ensaio de Compactação com Estabilizante



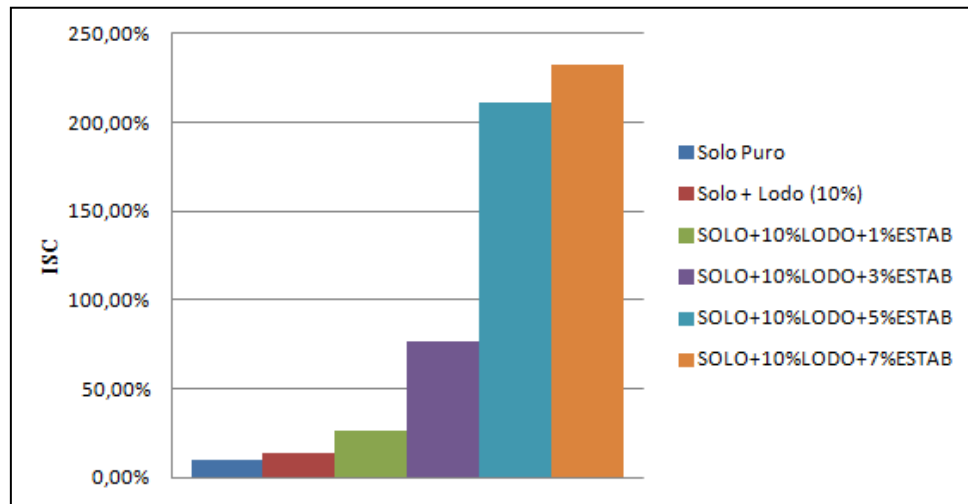
**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

##### 4.5.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

A Figura 54 apresenta os resultados dos ensaios de ISC para as misturas estudadas. A análise destes mostra que a adição de teores crescentes de estabilizante conduzem a maiores valores de ISC. A norma DNIT ES- 098/2007 estabelece critérios para a utilização de solos de acordo com o tráfego (número N) a ser suportado pelo pavimento. Para uma via com baixo volume de tráfego ( $N > 10^6$ ), o valor mínimo ISC deve ser de 40%. No caso do volume de tráfego (N) variar entre  $10^6$  e  $5 \times 10^6$ , o DNIT determina o ISC igual ou superior a 60% e para  $N > 5 \times 10^6$ , o valor mínimo de ISC deve ser 80%.

De acordo com os dados obtidos nos ensaios realizados, a mistura lodo têxtil e cimento pode ser utilizada em bases de pavimentação asfáltica. O teor de 3% de estabilizante é indicado para tráfegos leves e moderados, os teores de 5% e 7% de estabilizante são considerados próprios para utilização de base de solo granular em pavimentos com tráfegos pesados.

**Figura 54** - Resultados para os Ensaios de ISC com Estabilizante



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Lucena (2012) encontrou valor máximo de 60% de ISC para adição de 4%, 6% e 8% de cimento a mistura de solo siltoso e lodo de ETE. Além de obter ISC máximo de 70% para a adição de 1% de cimento a mistura solo e lodo de ETA. Santos (2010) obteve aumento de aproximadamente 80% de ISC com a adição de 10% de cimento a mistura de solo e resíduo oleoso. Portanto, os valores encontrados para as misturas estudadas nesta pesquisa estão acima dos encontrados na literatura para a estabilização de solos com a adição de cimento.

A Tabela 9 apresenta os valores de Expansão encontrados após realização do ensaio, referentes as amostras de solo com adição dos teores de estabilizante estudados para obtenção da estabilização química. Observa – se que os valores alcançados para expansão estão de acordo com o valor máximo preconizado pelo DNIT, e que a adição do cimento promove a diminuição da expansão.

**Tabela 9** - Valores de Expansão para as amostras

<b>Amostra</b>	<b>Expansão (%)</b>
10% Lodo Têxtil + 1% Estab	0,07
10% Lodo Têxtil + 3% Estab	0,03
10% Lodo Têxtil + 5% Estab	0,02
10% Lodo Têxtil + 7% Estab	0,01

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

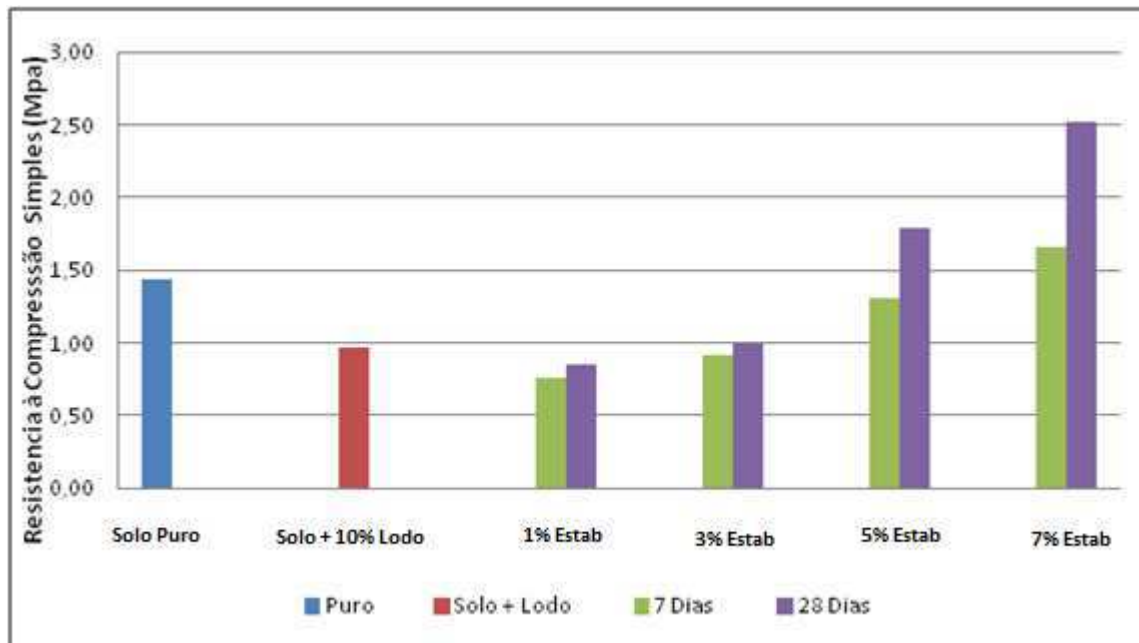
#### ***4.5.2 Ensaio de Resistência a Compressão Simples***

A Figura 55 apresenta os resultados de Resistência a Compressão Simples. Verifica-se que o incremento do teor de cimento proporciona melhoria na resistência à compressão simples, principalmente para o teor de 7% aos 28 dias.

As possíveis explicações para o aumento da RCS com o prolongamento do tempo de cura são devido a ação da sucção e as reações pozolânicas. Entretanto como o solo utilizado nesta pesquisa foi um solo granular A-2-4, com adição de um resíduo granular, infere – se que a ação da sucção não será relevante frente ao desenvolvimento das reações pozolânicas, creditando o aumento observado ao desenvolvimento destas.

Os valores mais expressivos de RCS foram obtidos para os maiores teores de cimento (5% e 7%), enquanto que o solo+lodo e as misturas estabilizadas com adição de 1% e 3% de cimento apresentaram comportamento similares entre elas. Uma possível explicação para este fato é que pequenos teores de cimento não conseguem modificar a estrutura granular da mistura ou que a constituição hidrofóbica do lodo têxtil compromete, ou retarda, a hidratação do cimento. Acredita-se que com o prolongamento do tempo de cura, estes teores poderão alcançar maiores resistências.

**Figura 55** - Resultados para os Ensaio de RCS com Estabilizante



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Lucena (2012) utilizou lodos provenientes de estações de tratamento de água (ETA) e esgoto (ETE) adicionados a um solo A-2-4 e estabilizados com cimento.. A autora obteve maiores valores de RCS ( 1MPa para 4% de cimento com 20% lodo de ETA e 1.6 MPa para 8% de cimento com 10% de lodo de ETE) para os maiores teores de cimento, assim como nesta pesquisa. Entretanto, apesar da autora ter utilizado solo e teores de cimento similares ao adotado nesta pesquisa, ela obteve valores 40% inferiores ao encontrado. Este fato evidencia, tal como o observado no ISC, a compatibilidade química do lodo têxtil com o cimento.

#### ***4.5.3 Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral***

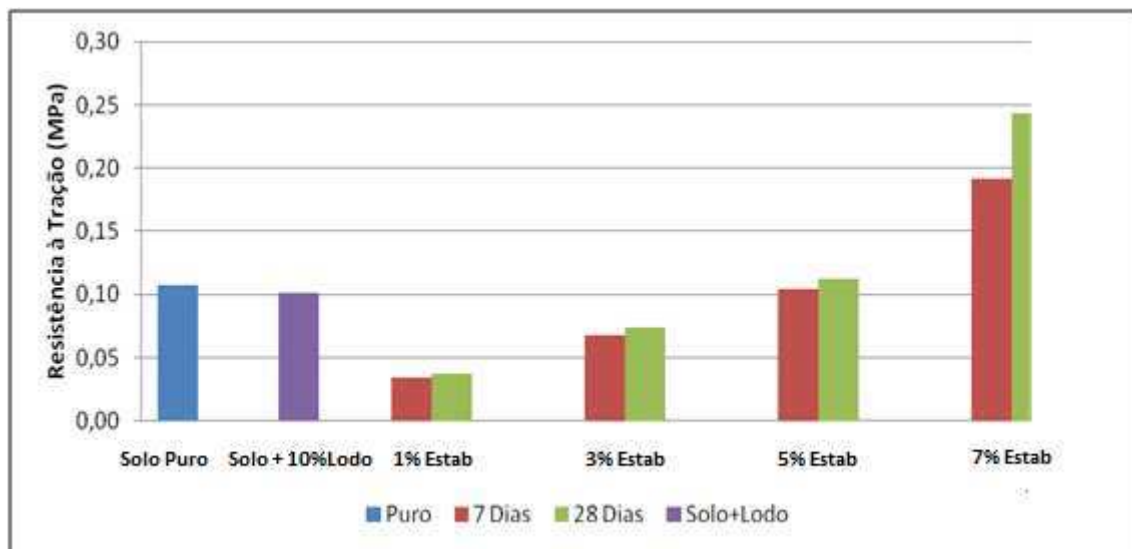
A Figura 58 apresenta os resultados de RT realizados nos corpos de prova das misturas estudadas. Nota-se que para o teor de 7% de estabilizante na mistura foi obtido o maior valor de RT alcançando valor próximo de 0,25 MPa. Observa-se também que a cura a 7 dias para alguns dos teores de estabilizantes adicionados trouxeram incrementos significativos à sua resistência à tração em relação a mistura apenas do solo com o lodo têxtil. O comportamento

observado para RT foi análogo ao verificado para RCS e ISC, ou seja as maiores RT foram obtidas nas misturas estabilizadas com 5% e 7% de cimento.

Lucena (2012) encontrou valor máximo de aproximadamente 0,13 MPa no ensaio de RT para o teor de 3% de cimento a mistura lodo de ETA e solo. Para a mistura de lodo de ETE com 8% de cimento os resultados obtidos foram melhores, chegando a 0,35Mpa.

Thompson (1966) afirma que a RT corresponde a aproximadamente 13% da RCS. Na Figura 56 nota - se que os valores de RT obtidos neste estudo correspondem a aproximadamente 10% da RCS, confirmando a correlação estabelecida por Thompson (1966), e corroborando os valores encontrados neste trabalho.

**Figura 56** - Resultados para os Ensaio de Resistência a Tração com Estabilizante



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Devido ao fato dos corpos de prova do ensaio de RT serem mais delgados que os do ensaio de RCS, fazendo com que a taxa de difusão fosse mais elevadas, pode ter ocorrido uma evaporação prematura da água. Este fato diminui a água disponível para hidratação do cimento, o que prejudica o desenvolvimento das reações pozolânicas. Portanto, esta pode ser a explicação para a baixa diferença entre a RT observada aos 7 dias para a 28 dias ( com exceção para a adição de 7% de cimento).



#### 4.5.4 Ensaio de Módulo de Resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados no âmbito desta pesquisa com a finalidade de investigar o comportamento da deformabilidade das misturas de solo, lodo têxtil e os teores de estabilizante. De acordo com Lucena (2012) estes estudos se justificam pela maior representatividade desta metodologia de análise em relação aos estudos utilizando o ISC e RCS na previsão do comportamento real das estruturas dos pavimentos quando considerado apenas as energias externas provenientes do carregamento.

Para modelagem da variação do MR com o estado de tensão foram utilizadas três relações, denominadas equações 4.1, 4.2 e 4.3. A equação 4.1 relaciona o MR com a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), a equação 4.2 com a tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) e a 4.3 relaciona o MR em função das tensões de confinamento e desvio simultaneamente.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (4.1)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (4.2)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (4.3)$$

Onde:

MR : Módulo de Resiliência;

$\sigma_d$  : tensão desvio;

$\sigma_3$ : tensão de confinamento;

Os parâmetros de modelagem (valores de k) e os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) dos modelos clássicos para as misturas dos solos com o resíduo de lodo e cimento são apresentados na Tabela 10 e 11.

**Tabela 10** - Parâmetros Modelos Clássicos de Resiliência

AMOSTRA	MR = K <sub>1</sub> * $\sigma_3^{K_2}$			MR = K <sub>1</sub> * $\sigma_d^{K_3}$		
	K1	K2	R <sup>2</sup>	K1	K2	R <sup>2</sup>
Solo Puro	580,460	0,2249	0,4485	531,660	0,2457	0,8049
Solo + 10% Lodo	1046,200	0,3943	0,6909	640,320	0,2817	0,5303
10% Lodo Têxtil + 1% Estab	1348,000	0,4353	0,8148	673,590	0,2439	0,3845
10% Lodo Têxtil + 3% Estab	1588,300	0,4570	0,8011	763,760	0,2543	0,3731
10% Lodo Têxtil + 5% Estab	2991,700	0,5688	0,4534	812,170	0,1419	0,0430
10% Lodo Têxtil + 7% Estab	1307,600	0,4895	0,6161	580,560	0,2601	0,2616

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Tabela 11** - Parâmetros Modelos Composto

AMOSTRA	$MR = K1 * \sigma_3^{K2} * \sigma_3^{K3}$			
	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>
Solo Puro	290207,00	-0,5130	0,3215	0,866
Solo + 10% Lodo	393688,00	0,3149	0,1706	0,803
10% Lodo Têxtil + 1% Estab	538167,00	0,6141	-0,0997	0,890
10% Lodo Têxtil + 3% Estab	614490,00	0,6759	-0,1200	0,882
10% Lodo Têxtil + 5% Estab	1368497,00	1,6530	-0,7505	0,844
10% Lodo Têxtil + 7% Estab	489089,00	0,7985	-0,1269	0,739

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

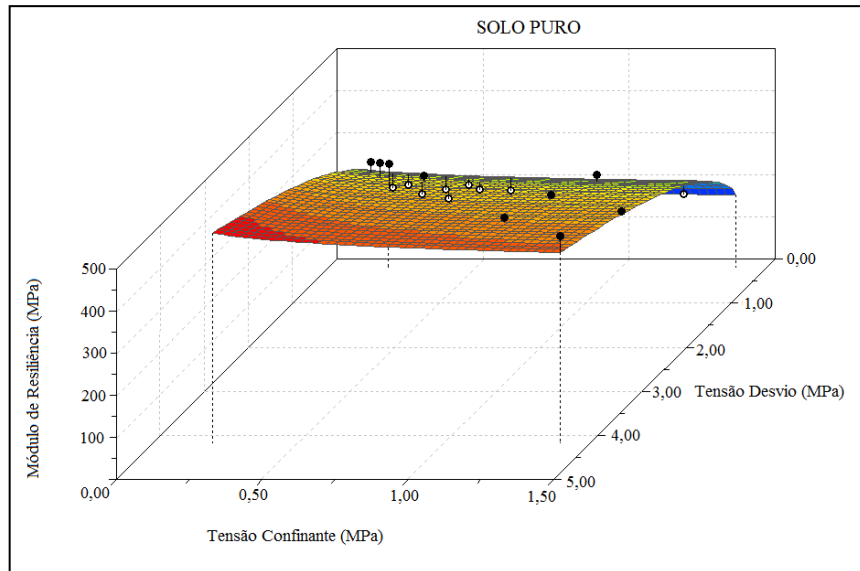
Analisando-se os valores de R<sup>2</sup> obtidos com a utilização dos modelos clássicos verifica-se que o que mais se adequa é o dependente da tensão de confinamento, característico de solos granulares, embora tenham sido observadas variações significativas entre os coeficientes de correlação de um modelo para outro. Portanto, a análise do MR deve ocorrer em função de duas tensões aplicadas ao corpo de prova.

Ao analisar a tabela 11 verifica-se maiores valores de K<sub>2</sub> em relação ao K<sub>3</sub>, o que evidencia uma maior dependência do módulo em relação a tensão de desvio do que da tensão de confinamento, diferente do verificado na Tabela 10. Gondim (2008) observou este fato, no qual solos granulares quando submetidos à períodos de cura ficavam dependentes da tensão de desvio em virtude de uma maior coesão da amostra. Os valores de R<sup>2</sup> variam de 0 a 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R<sup>2</sup>, mais explicativo é modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. Portanto, verifica-se que o modelo composto, dentre os modelos estudados, representa satisfatoriamente os solos e misturas estudados.

A representação da relação do MR com as tensões de desvio e de confinamento para os modelos clássicos estão apresentadas no apêndice. O modelo composto foi representado por gráfico tridimensional. Os gráficos gerados apresentam 3 eixos principais, sendo o primeiro deles referente aos valores de MR das amostras (eixo z), o segundo referente a tensão confinante aplicada durante os ensaios triaxiais dinâmicos (eixo x) e o terceiro referente a tensão desvio (eixo y), também aplicada durante a realização dos ensaios citados anteriormente.

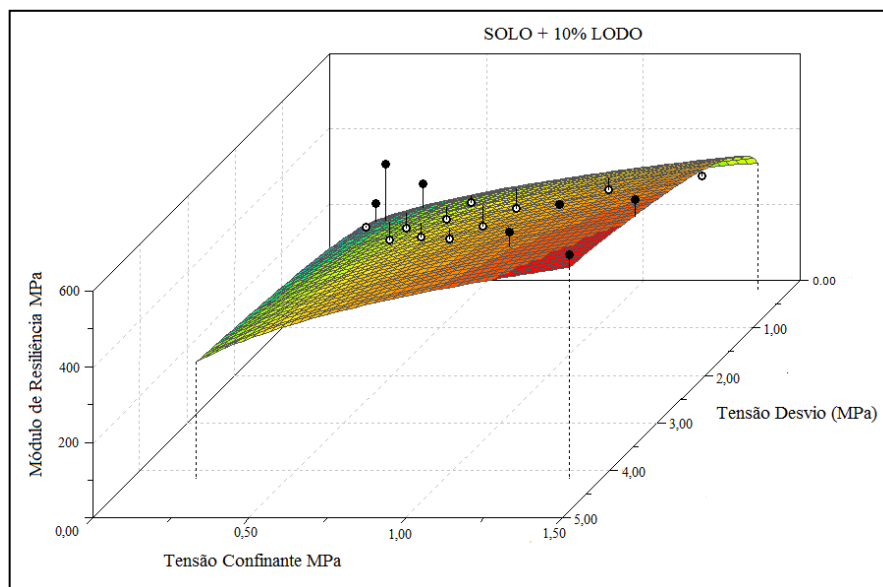
As Figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62 apresentam os resultados do Módulo de Resiliência, respectivamente, para o solo puro, solo e 10% de lodo têxtil e com os teores de 1%, 3%, 5% e 7% de estabilizante.

**Figura 57** - Gráfico Módulo de Resiliência Solo Puro



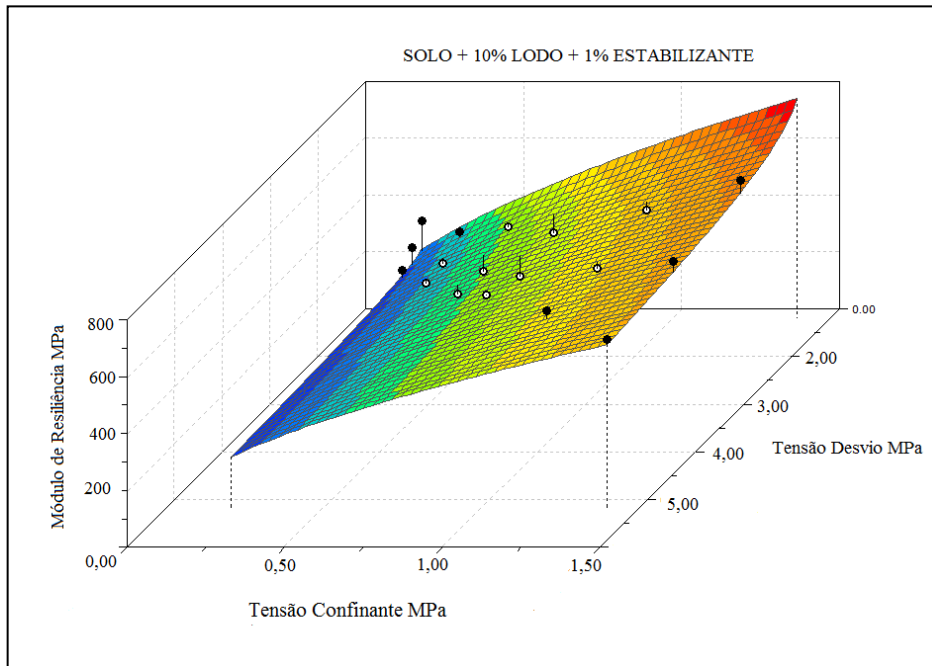
**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 58** - Gráfico Módulo de Resiliência Solo + 10% Lodo



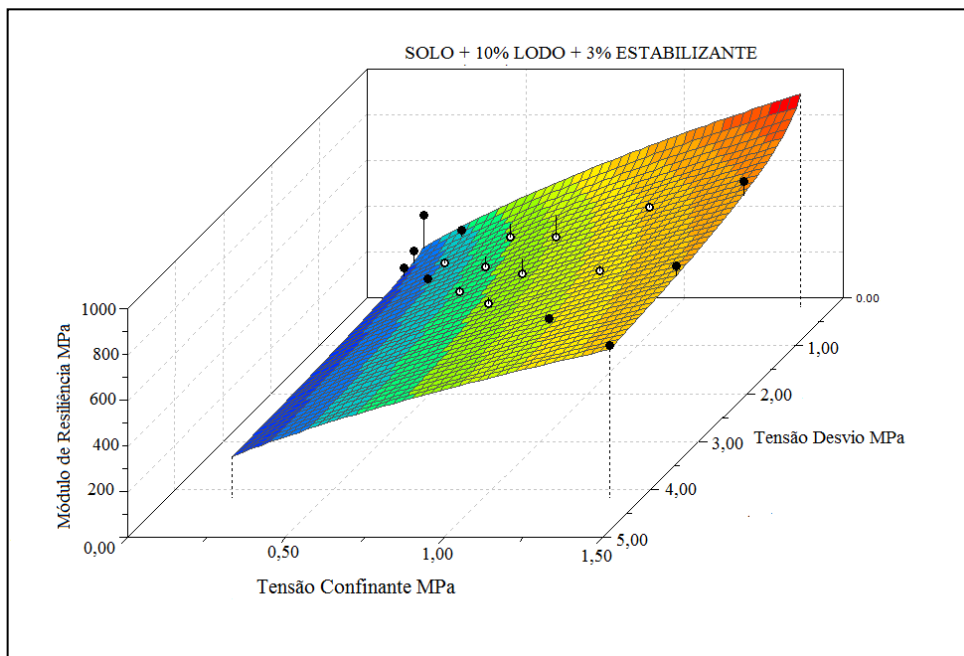
**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 59-** Gráfico Módulo de Resiliência Adição 1% estabilizante



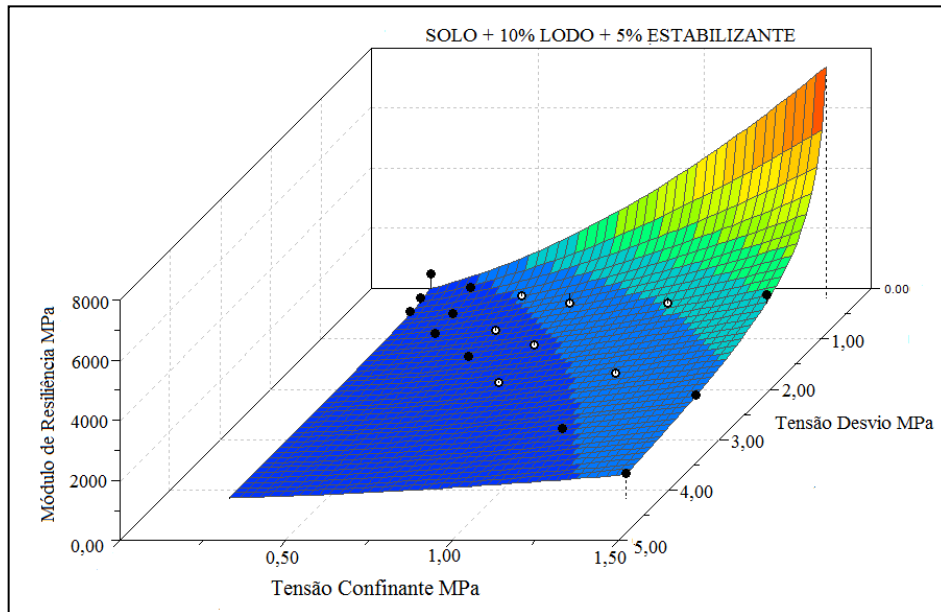
Fonte: Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 60 -** Gráfico Módulo de Resiliência Adição 3% estabilizante



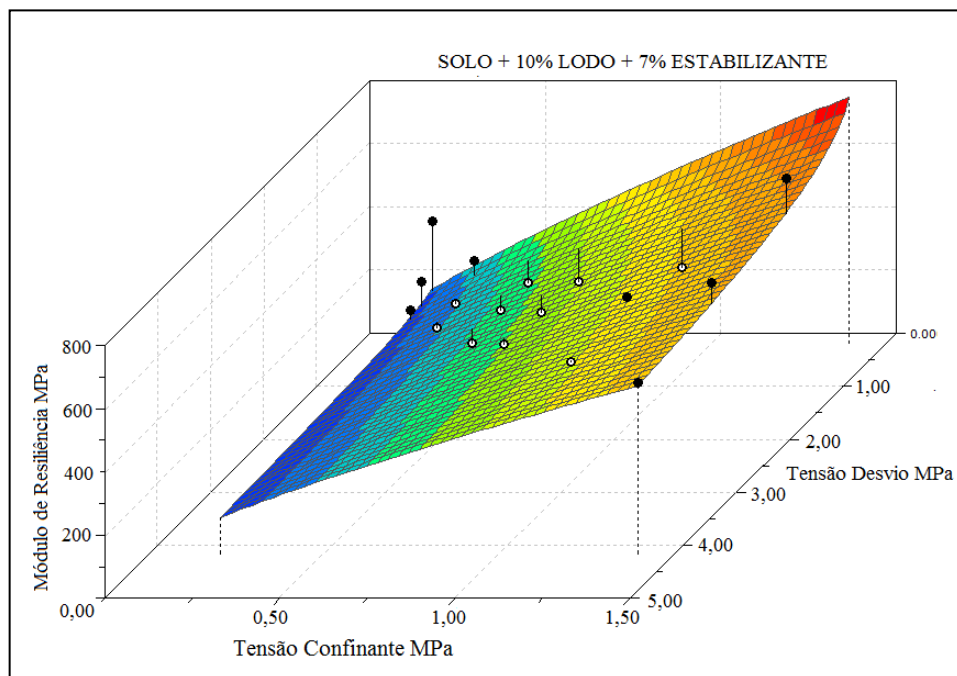
Fonte: Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 61** - Gráfico Módulo de Resiliência Adição 5% estabilizante



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Figura 62** - Gráfico Módulo de Resiliência Adição 7% estabilizante



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

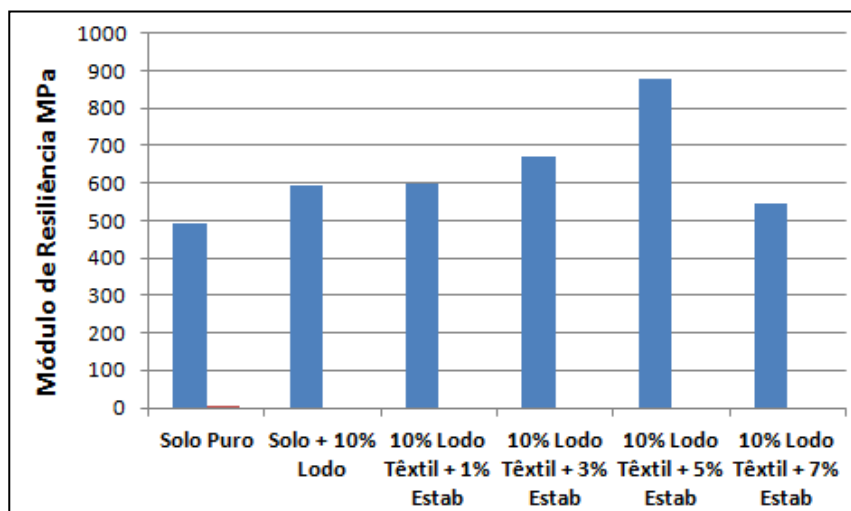
Analisando-se as Figuras percebe-se comportamento similar nas curvaturas das misturas estabilizadas, apresentando MR com maior dependência da tensão de desvio.

Medrado (2009) explicou o comportamento não linear do comportamento elástico, das misturas dos solos no modelo composto. Segundo o autor, a irregularidade da superfície definida pelos valores de módulos está relacionada a sua natureza particulada, o que permite a variação do arranjo das partículas para condições diferentes de umidade, compactação e estado de tensões.

Lucena (2012) ao analisar seus resultados e encontrar comportamento semelhante conclui que a curvatura das superfícies definidas pelo modelo composto ocorre em razão da natureza particulada dos lodos. A autora observou que a introdução de cimento às misturas resultou em superfícies mais estáveis com mudanças menos bruscas de MR em função dos pares de tensões atuantes, evidenciando que a adição de estabilizante conseguiu neutralizar as interações químicas dos resíduos tornando as misturas menos susceptíveis às ações de carregamento externo. Este fato também foi verificado nesta pesquisa.

Para realizar a avaliação dos parâmetros do comportamento de cada amostra estudada, o Módulo de Resiliência de cada amostra foi o resultante da aplicação do último par de tensões do ensaio triaxial dinâmico, que representa o nível de tensões mais severo do ensaio -  $\sigma_d = 0,412$  MPa e  $\sigma_3 = 0,137$ MPa. De acordo com Marangon (2004) esse nível de tensões corresponde aproximadamente às condições que os materiais estão submetidos no topo da camada logo abaixo de um revestimento esbelto – topo da base - sob o eixo padrão nos pavimentos de baixo volume de tráfego.

**Figura 63** - Nível de tensões



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Analisando-se a Figura 63 verifica-se comportamento crescente do MR da amostra de solo puro até a mistura de solo+ 10% de lodo+ 5% de cimento, caindo para o teor de 7%. Os resultados de MR são considerados mais que representativos em relação ao ISC e RCS na previsão do comportamento real das estruturas dos pavimentos quando considerado apenas as energias externas provenientes do carregamento

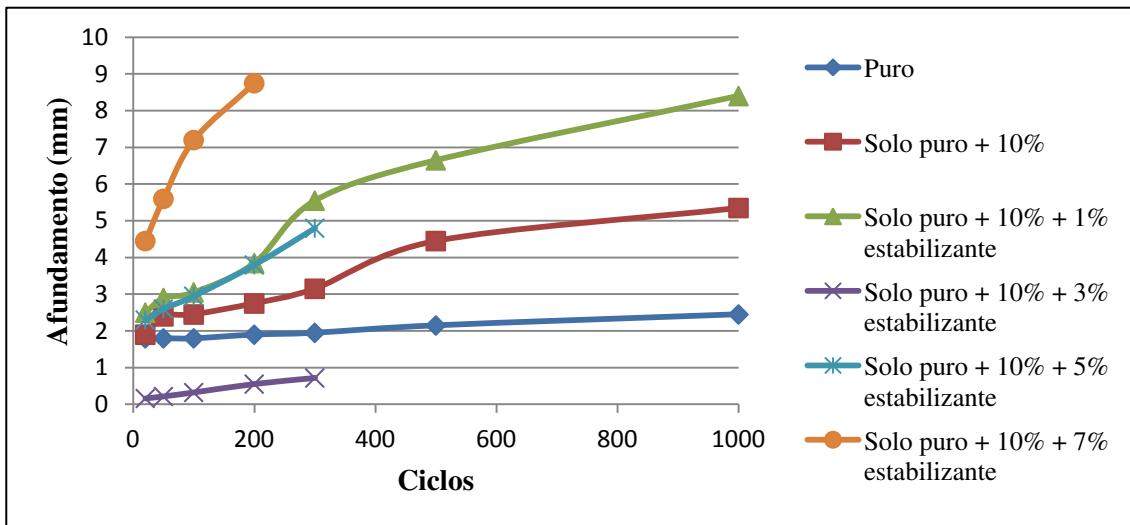
#### ***4.5.5 Ensaio de LWT***

A Figura 66 apresenta o ensaio de LWT para o solo puro, a mistura solo+lodo e as misturas solo+lodo+estabilizantes. Analisando-se a figura verifica-se que o solo puro apresentou menor desgaste apresentando maior resistência que as misturas estabilizadas. O critério de parada determinado por Gondim (2008), em função de limitação no equipamento de LWT, foi utilizado para as misturas de solo e lodo adicionado aos de teores de: 3%, 5% e 7% de estabilizante.

Este comportamento pode ser explicado devido a granulometria do lodo causar maior desgaste durante a rolagem na simulação do tráfego. Dado que o lodo tem granulometria pedregulhosa, verificou-se que a roda do LWT ao tocar nestes pontos promovia um desgaste localizado. Este resultado indica que ao projetar uma base, nas condições estudadas, deve-se realizar um tratamento superficial para evitar este problema.

Lucena (2012), realizou o ensaio para misturas de lodo de ETE e 8% de cimento. A autora observou que com a adição do estabilizante a amostra foi resistente a passagem da roda, chegando a uma deformação máxima de 2 milímetros ao final de 1000 ciclos. Este fato corrobora a inferência que a granulometria do lodo têxtil é a responsável pelo comportamento apresentado neste ensaio.

**Figura 64** - Resultados para o Ensaio de LWT

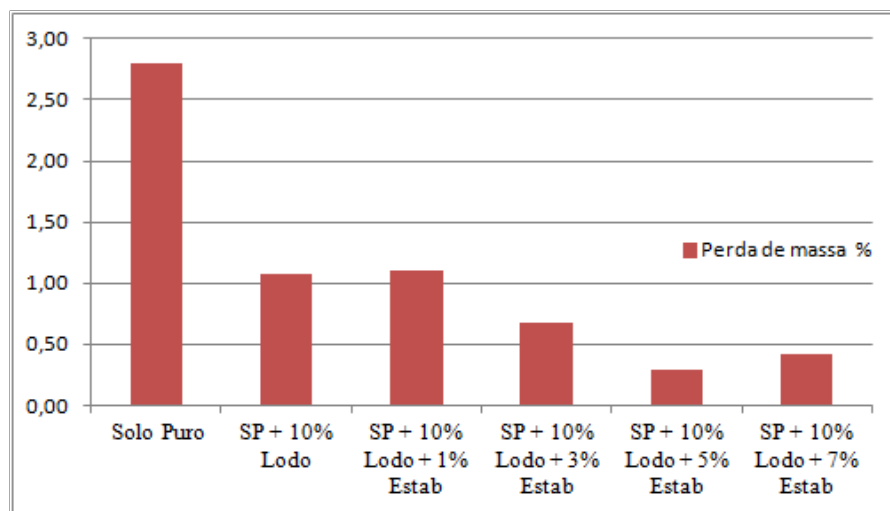


**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

#### 4.5.6 Ensaio de WTAT

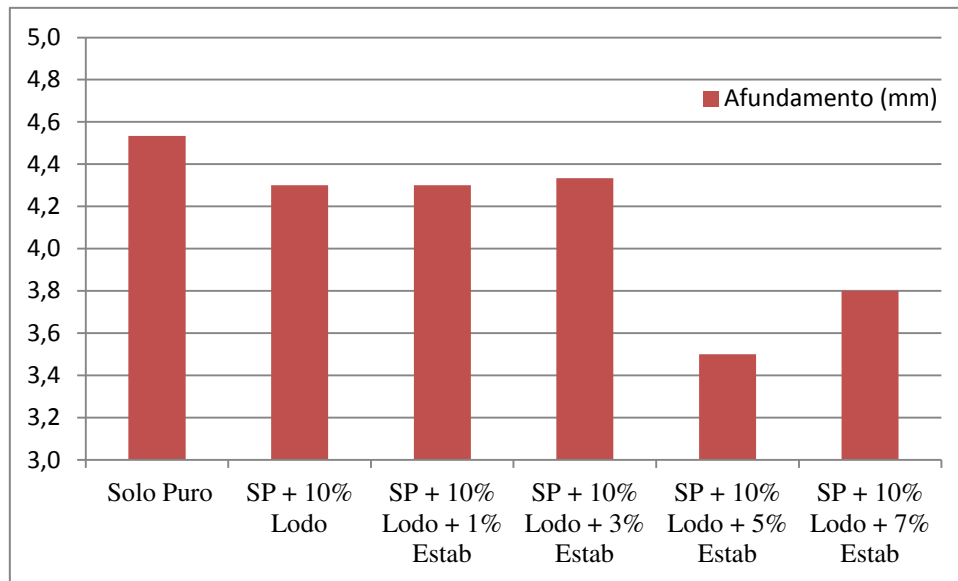
Os resultados da perda de massa por abrasão e do afundamento decorrentes da realização dos ensaios de WTAT, para as amostras de solo puro e com adição de lodo e estabilizante, são apresentados na Figura 65 e na Figura 66, respectivamente.

**Figura 65** - Resultados dos ensaios de WTAT (Perda de massa por abrasão)



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.



**Figura 66** - Resultados dos ensaios de WTAT (Afundamento)

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Observa-se nos resultados que a resistência à abrasão da mistura solo e lodo têxtil foi beneficiada com o processo de estabilização química. Verifica-se a redução da perda ao pó quando estabiliza-se o solo com o lodo têxtil. A adição acima de 3% de cimento promove redução de 400% de perda ao pó em relação à amostra estabilizada granulometricamente.

A adição de 5% de estabilizante a mistura apresentou melhor resultado, com este teor o afundamento reduziu em aproximadamente 25% em relação ao valor da amostra com solo puro. Este resultado vai de encontro ao obtido no item anterior, no qual as misturas estabilizadas apresentavam maior afundamento que as amostras puras. Entretanto, as condições de realização do ensaio são diferentes, o que pode justificar esta discrepância.

Lucena (2012) ao estudar a adição de lodo de ETE e lodo de ETA em misturas com o solo também obteve resultados significativos para as misturas estabilizadas estudadas. Gondim (2008) ao estudar três solos do Ceará observou melhorias satisfatórias para 2 solos enquanto que para 1 solo, a amostra pura apresentou melhores resultados. Estudos como estes corroboram os resultados alcançados nesta pesquisa.

#### 4.6 ENSAIOS AMBIENTAIS

Nas Tabelas 12 e 13 estão apresentados os valores dos constituintes químicos encontrados nos extratos lixiviados e solubilizados com o auxílio do ensaio de Espectrofotometria por Absorção Atômica para as amostras de solo e lodo, respectivamente.

**Tabela 12** - Resultados Ensaio de Lixiviação e Solubilização para o solo

Análise	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Cr (mg/l)	Al (mg/l)	Ca (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)
Lixiviação	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-	-	-	-	-	-	-
<i>Valor Limite</i>	0,50 <sup>1</sup>	1,00 <sup>1</sup>	5,00 <sup>1</sup>	0,82 <sup>2</sup>	-	2,00 <sup>3</sup>	0,30 <sup>3</sup>	0,10 <sup>2</sup>	0,02 <sup>3</sup>	5,00 <sup>3</sup>
Solubilização	< 0,010	0,016	0,015	< 0,10	65,2	0,55	0,097	0,027	0,067	0,048
<i>Valor Limite</i>	0,05 <sup>1</sup>	0,01 <sup>1</sup>	0,005 <sup>1</sup>	0,2 <sup>2</sup>	-	2,3 <sup>3</sup>	0,3 <sup>3</sup>	0,1 <sup>2</sup>	0,02 <sup>3</sup>	5,0 <sup>3</sup>

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

**Tabela 13** - Resultados Ensaio de Lixiviação e Solubilização para o lodo

Análise	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Cr (mg/l)	Al (mg/l)	Ca (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)
Lixiviação	0,012	0,089	0,071	-	-	-	-	-	-	-
<i>Valor Limite</i>	0,50 <sup>1</sup>	1,00 <sup>1</sup>	5,00 <sup>1</sup>	0,82 <sup>2</sup>	-	2,00 <sup>3</sup>	0,30 <sup>3</sup>	0,10 <sup>2</sup>	0,02 <sup>3</sup>	5,00 <sup>3</sup>
Solubilização	0,012	0,092	0,084	< 0,10	1250	0,023	0,050	0,024	0,062	0,015
<i>Valor Limite</i>	0,05 <sup>1</sup>	0,01 <sup>1</sup>	0,005 <sup>1</sup>	0,2 <sup>2</sup>	-	2,3 <sup>3</sup>	0,3 <sup>3</sup>	0,1 <sup>2</sup>	0,02 <sup>3</sup>	5,0 <sup>3</sup>

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

Nota:

<sup>1</sup> Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviado ou solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10005 (2004<sup>b</sup>) e ABNT NBR 10006 (2004<sup>c</sup>) e CFR (2003).

<sup>2</sup> Valores baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria No 518 de 2004 (MS, 2004)

<sup>3</sup> Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria No 195 de 2005 (CETESB, 2005)

Os resultados para a amostra com o solo não obtiveram valores significativos para os extratos lixiviados e solubilizados. Para as amostras de solo ensaiadas, todos os constituintes, apresentam concentrações inferiores aos limites do Anexo F estabelecidos pela NBR 10004/2004 (ABNT) e pela Code Federal Register (CFR) para análise de extratos lixiviados.

Nos extratos solubilizados apenas o teor de cromo encontra-se um pouco acima do estipulado pelas normas vigentes. Entretanto, este valor não é considerado significativo.

Apesar dos extrato lixiviado do lodo ter atendido as normas vigentes, os teores de Chumbo e Níquel encontram-se acima do máximo recomendado pela NBR 10004/2004 (ABNT) e pela CETESB, respectivamente. A presença de cálcio na amostra de lodo para o ensaio confirma os picos de óxido de cálcio analisados nos ensaios DRX e observados no EDX. De acordo com os resultados obtidos, o resíduo pode ser classificados como resíduo não tóxico e de “Classe II A” (Não Inerte).

Herek et al. (2005) obteve concentração dos metais Alumínio, Ferro, Sódio e Potássio superiores ao encontrado neste trabalho. O autor justifica que esta composição pode variar em função das atividades e aditivos utilizados neste período. Ou seja, a concentração de metais pesados presentes no lodo têxtil pode variar em função da data da coleta. O autor ainda complementa que a elevada concentração de cálcio, observada nesta pesquisa e na do autor, ocorre em função dos aditivos provenientes da lavanderia, mas a norma não limita este constituinte.

Durante a secagem do lodo observou-se que a estufa utilizada sofreu corrosão (Figura 67). Apesar dos ensaios ambientais e EDX, que foram realizados com o resíduo já calcinado, não indicarem a presença de cloro na amostra, a intensidade da oxidação pode – se atribuir a este fenômeno a presença de cloro livre, que foi evaporado durante a calcinação, porém é necessária a realização de análise química convencional para indicar a presença de cloro. Este fato indica que a disposição final deste resíduo não pode ser realizada de forma aleatória.

**Figura 67** - Estufa depois da secagem do lodo



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2014.

## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos as considerações finais e conclusões deste trabalho que teve como objetivo verificar a utilização do resíduo de lodo da indústria têxtil em base e subbases de pavimentos rodoviários. O capítulo foi dividido em considerações finais e conclusões.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### *5.1.1 Quanto à Caracterização Física*

a) A temperatura de calcinação do resíduo escolhida foi de 110°C, pois nesta temperatura ocorre a perda total de água livre, temperaturas mais elevadas iriam acarretar a elevação de custos com o processo;

b) O resíduo de lodo têxtil obteve graduação elevada e é considerado não plástico;

c) O resíduo possui composição química de aproximadamente 60% de dióxido de silício, 11% de óxido de cálcio, 6% hidróxido de magnésio, 3% de óxido sulfúrico e 1% de óxido de ferro (devido aos floculantes utilizados no processo de tratamento dos efluentes). A elevada concentração de silício e óxido de cálcio faz com que o material apresente compatibilidade com materiais utilizados na construção civil

d) O solo utilizado, classificado como A-2-4 pelo TRB, indica a utilização do cimento como estabilizante químico.

#### *5.1.2 Quanto à estabilização granulométrica*

a) Apesar das diferenças nas análises granulométricas e nos limites de Atteberg para as misturas de solo com os diversos teores de lodo, as misturas continuaram sendo classificadas como A-2-4;

- b) Verificou-se que o aumento do teor de resíduo incorporado ao solo provoca diminuição da massa específica seca máxima e aumento da umidade ótima;
- c) A adição de lodo têxtil à mistura melhorou o ISC em relação ao solo puro, entretanto reduziu a RCS em 35% ;
- d) Para o ensaio de resistência a tração o teor de 15% de lodo obteve melhor resultado;
- e) Analisando-se os resultados obtidos com a estabilização granulométrica, observou-se que o teor de 10% apresentou melhores resultados quanto ao ganho de resistência. Entretanto, torna-se necessário a estabilização química para possibilitar a incorporação do resíduo em camadas de pavimento.

### ***5.1.3 Quanto à Estabilização Química***

- a) A adição do estabilizante acarreta aumento na massa específica seca da mistura solo e lodo e provoca uma redução na umidade ótima;
- b) A adição do estabilizante em teores acima de 1% atende aos critérios de ISC para uso em subbase e os acima do teor 3% atendem aos critérios ISC para uso em base de pavimentos de acordo com o DNIT ES- 098/2007;
- c) O aumento nos valores de RCS para idades de cura de 28 dias ocorreu, provavelmente, em função das reações pozolânicas do cimento. O acréscimo de resistência foi mais expressivo para os teores de 5% e 7% de cimento;
- d) Observou-se para o solo puro e as misturas estabilizadas, que a variação do módulo de resiliência com o estado de tensão é melhor representada pelo modelo composto;
- e) Verificou-se que a adição de estabilizante promoveu aumento do módulo de resiliência até o teor de 5% de cimento;
- f) Para o ensaio de desgaste LWT, os valores não foram satisfatórios devido a influencia da granulometria do lodo durante a realização do ensaio;

g) Para o ensaio de WTAT a adição de 5% de estabilizante à mistura obteve melhor resultado, com este teor o afundamento reduziu em aproximadamente 25%, contrariando o observado no ensaio de LWT.

#### ***5.1.4 Quanto aos Ensaio Ambientais***

- a) De acordo com os ensaios ambientais o resíduo é classificado como não tóxico e de Classe II A;
- b) Ocorreu corrosão da estufa durante calcinação do lodo, provavelmente devido a presença de cloro livre presente na composição do lodo têxtil. Portanto, sua disposição final deve ocorrer de forma criteriosa para não promover danos ao meio ambiente.

## **5.2 CONCLUSÕES**

Considerando os resultados alcançados nesta pesquisa verifica-se a necessidade da disposição final correta do lodo têxtil. Este, além de ser considerado um resíduo não-inerte, pode conter elementos danosos ao meio ambiente. A incorporação de 5% e 7% de cimento o solo estabilizado com o lodo obtiveram resultados mecânicos satisfatórios. Entretanto, sugere-se a utilização do teor de 5% por este atender as normas vigentes e apresentar-se como uma alternativa de projeto mais econômica.

Portanto, a utilização do resíduo em base e subbase de pavimentos implica uma alternativa viável para a redução do grave problema ambiental que é a destinação correta do resíduo. Entretanto, para assegurar a viabilidade técnica e ambiental para utilização deste resíduo, em camadas de pavimentos, devem ser realizados estudos complementares.

### 5.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O estudo realizado para o reaproveitamento do lodo têxtil em bases e subbases de pavimentos evidenciaram a eficácia da utilização deste resíduo, porém é necessária a realização de outros estudos. A seguir são apresentadas sugestões para futuras pesquisas:

- a) Analisar a técnica de estabilização / solidificação com a utilização de outros tipos de solos e estabilizantes;
- b) Verificar a possibilidade de um maior destorroamento do resíduo para avaliação em ensaios de desgaste LWT e WTAT;
- c) Estudar a utilização de diferentes temperaturas para calcinação do lodo têxtil, verificando as alterações nos resultados dos ensaios;
- d) Executar modelo reduzido verificando a migração dos metais pesados para as camadas do pavimento e no lençol freático;
- e) Verificar a influência da sucção nas misturas estabilizadas mediante o uso da técnica de papel filtro;
- f) Realizar análise química convencional para o resíduo de lodo têxtil para verificar a presença de cloro em sua composição.

## REFERÊNCIAS

ABIT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL, Belo Horizonte, 2013.

ARAÚJO, Geraldino Carneiro de. et AL. Sustentabilidade empresarial: conceito e indicadores. In: III CONVIBRA - Congresso Virtual Brasileiro de Administração, 2006. **Anais...**

ARRUDA, S. M., NEGRI, R., GEMELLI, E., CAMRAGO, N. H. A.. Influência da adição de resíduos industriais de tinturarias têxteis na composição de clínquer de cimento portland., in 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 2011.

BALAN, D.S.L.; MONTEIRO, R.T.R. **Decolorization of textile indigo dye by lignolytic fungi. Journal of Biotechnology**, v.89, p.141-145, 2001.

BALASUBRAMANIAN, J. ; SABUMON, P.C.; Lazar, J. U. ; ILANGOVAN, R. **Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials.** Waste Management, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei Nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010, Brasília, 2010.

\_\_\_\_\_. Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Nº 258 de 26 de Agosto de 2009.

\_\_\_\_\_. Ministério do Trabalho e Emprego. **Relação anual de informações sociais (RAIS)**. Brasília, 2003.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Brasília, 2009.

BASTIAN, E. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil.** CETESB : SINDITÊXTIL, São Paulo, 2009

CASTRO, T. M., **Solidificação/estabilização de lodo gerado no tratamento de efluente de lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos e seu desempenho em câmara reverberante.** 2010. 94f. Dissertação. (Mestrado em...) - Universidade Estadual de Maringá, 2010.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS – CNTL. **Produção mais limpa em confecções.** Porto Alegre, CNTL/SENAI-RS. 2007.

BRASIL. Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Nº 258 de 26 de Agosto de 2009.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS – CNTL. **Produção mais limpa em confecções.** Porto Alegre, CNTL/SENAI-RS. 2007.



CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e Solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou subbases de pavimentos rodoviários.** 2007. 89f. Dissertação. (Mestrado em...) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

DUQUE NETO, F.S. **Proposição de metodologia para a escolha de solo e dosagem de antipo com emulsão de xisto.** 2004. 150f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

GEHLEN, J. **Aplicando a sustentabilidade e a produção limpa aos canteiros de obras.** International Workshop Advances in Cleaner Production. Maio 2009.

GONDIM, L. M., Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2008.

GORINI, Ana Paula Fontenelle; MARTINS, Renato Francisco. **Novas tecnologias e Organizações do Trabalho no Setor Têxtil.** Uma avaliação do Programa de Financiamento do BNDES, 2000.

GUEDES, B. F. R., **Desenvolvimento de argamassa com incorporação de lodo de indústria têxtil visando a aplicação sustentável na construção civil.** 2012. 118f. Dissertação. ( Mestrado em...) - Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

HEREK, L. ;et AL. Incorporation of the textile sludge in a solid matrix sludge/clay. **In: Enpromer- 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4 th Mercosur Congress on Process Systems Engineering,,2005**

IEMI. Instituto de Estudos e Marketing Industrial Ltda. Brasil Tíxtil 2004. Relatório Setorial da Cadeia Têxtil Brasileira. São Paulo,2013.

JAHAGIRDAR, S.S., SHRIHARI, S.; MANU, B. Reuse of Textile Mill Sludge in Burnt Clay Bricks. International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering, Volume-2, 2013

KRAEMER, M. E. P. **A questão ambiental e os resíduos industriais** . Alfinal Com, Argentina - Buenos Aires, 2005

KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. Química Nova, São Paulo, v.25, p.73-82, jan.-feb. 2002.

LUCENA, L.C.F.L. (2012) Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. MARANGON, 2004

MARTINELLI, L.A.; SILVA, A.M.; CAMARGO, P.B.; MORETTI, L.R.; TOMAZELLI, A.C.; SILVA, D.M.L.; FISCHER, E.G.; SONODA, K.C.; SALOMÃO, M.S.M.B. Levantamento das cargas orgânicas lançadas nos rios do Estado de São Paulo. Biota Neotropical. V. 2: 1-17, 2002.

MEDRADO, A.W., Caracterização Geotécnica de Solo da Região Norte de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviárias. Dissertação de Mestrado Profissional. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, 2009.

MELO, M. C. V. **Uma Análise Sobre a Abertura do Mercado Brasileiro para a Indústria Têxtil e de Confecções no Nordeste no Período de 1989 a 200.** 2004. 97f. Monografia. (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2004.

MOREIRA, A H., OLIVEIRA, R.M.; LIMA, P.D.S. Efeito da adição do lodo de águas residuais da indústria têxtil nas propriedades de materiais de construção. In: **Revista Cerâmica**, n 47, 2001.

PINTO, A. R. A. G., Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Dissertação de Mestrado. Pontífca Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.

PRADO, J. C. **História Econômica do Brasil.** São Paulo, Editora Brasiliense, 1997.

PRIM, E. C. C. ; et al. Solidificação de Lodo da Indústria Têxtil e Valorização como Material de Construção Civil . **Saneamento Ambiental**, São Paulo, , v. 58, p. 32 - 29, 2000

QUEIROZ, F.A., Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

RAJKUMAR, N. & HEMA, N. Reuse of Textile ETP Sludge as construction Material, NBMCW October 2011

SANTOS, Simone. **Impacto ambiental causado pela Indústria Têxtil.** 1997. 97 f. Dissertação. (Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas) - Centro Tecnológico - Trindade - Florianópolis, Santa Catarina, 1997.

SANTOS, A.F.M.S., **Caracterização, Avaliação da Biodegradabilidade Aeróbia e Anaeróbia e Tratamento em Reator UASB do Chorume do Aterro da Muribeca.** 2000. 98f. Dissertação (Mestrado em...) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003

SCHULTE, N. K. ; LOPES, Luciana Dornbush . Sustentabilidade ambiental: um desafio para a moda.. **Actas de Diseño**, v. 9, p. 157-161, 2010.

SCHNEIDERS, D. ; et al. Avaliação Termogravimétrica do Lodo de uma Indústria Têxtil de Blumenau-SC. In: **III Seminário da Região Sudeste de Resíduos Sólidos e IX Seminário Estadual Sobre Saneamento e Meio Ambiente**, 2011

SILVA, V. C., Estudo da aplicação de resíduos da construção e demolição da Universidade Federal de Campina Grande em pavimentos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

TOCCHETTO, M. R. L. ; COUTINHO, H. L. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais.** São Paulo, 2005.

SCHNEIDERS, D. ; TILL, A. ; AGUIDA, L. M. ; SILVA, J. D. ; PINHEIRO, A. . Avaliação Termogravimétrica do Lodo de uma Indústria Têxtil de Blumenau-SC. **In: III Seminário da Região Sudeste de Resíduos Sólidos e IX Seminário Estadual Sobre Saneamento e Meio Ambiente**, 2011

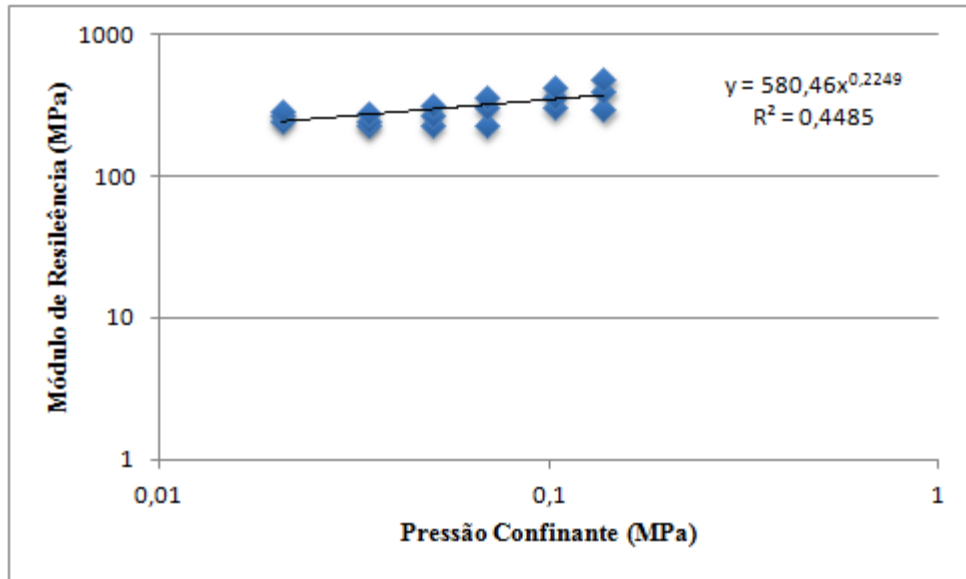
SHI, C.; SPENCE, R. Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 34, n. 4, jul./ago. 2005

VALLS, S. & VA` ZQUEZ, E. Leaching properties of stabilized/solidified cement-admixturessewage sludges systems. *Waste Management* , n 22, 2002.

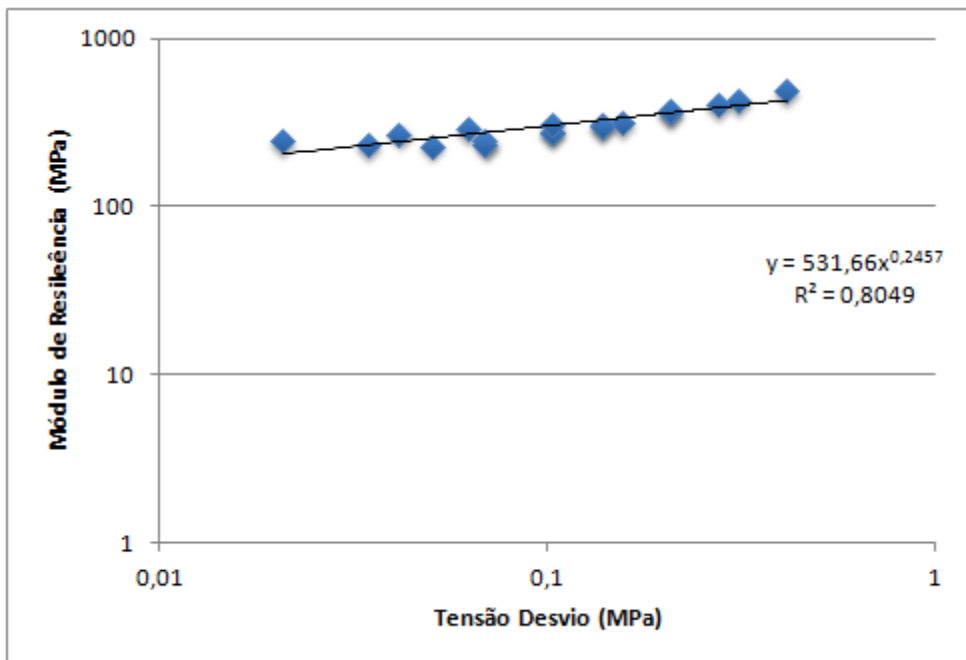
VIANA, F.L. , **A Indústria Têxtil e de Confecções No Nordeste: Características, Desafios e Oportunidades**. Série de documentos ETENE, Fortaleza, 2005.

# APÊNDICES

**APÊNDICE A – Módulo de Resiliência do Solo Puro em função dos Modelos Clássicos**  
**(a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio**

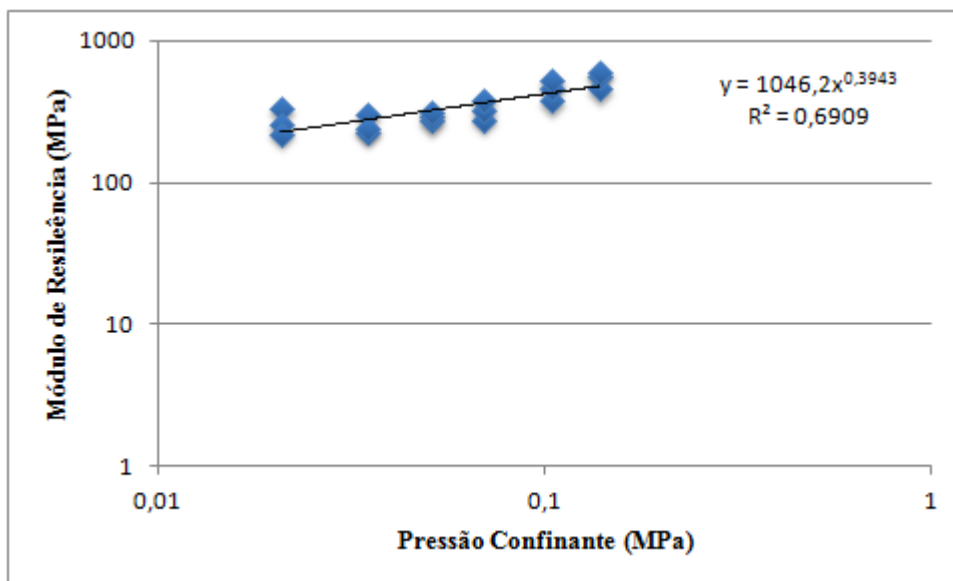


(a)

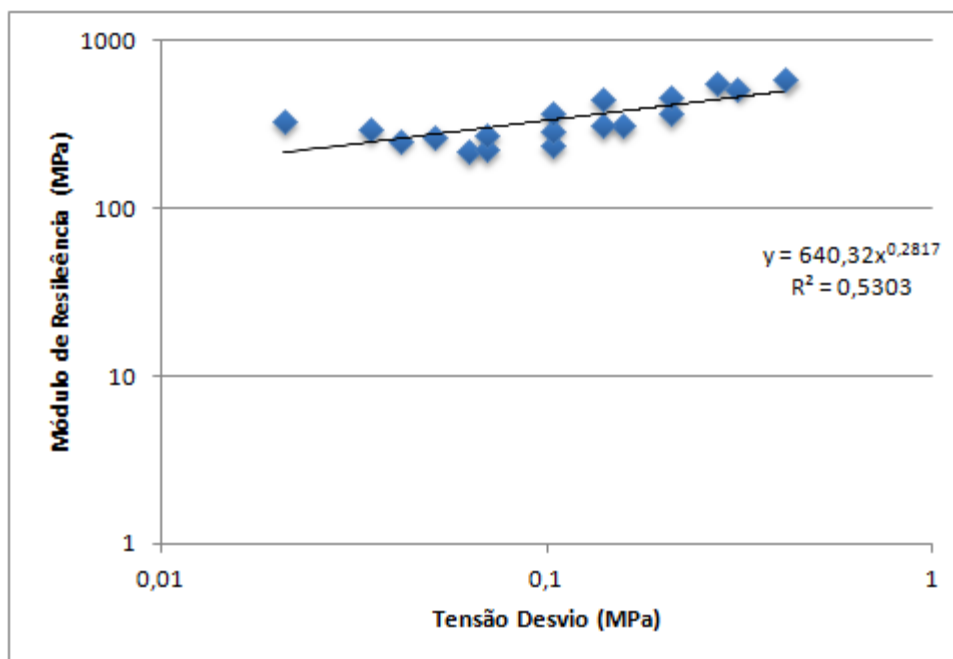


(b)

**APÊNDICE B – Módulo de Resiliência do Solo + 10% Lodo em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio**

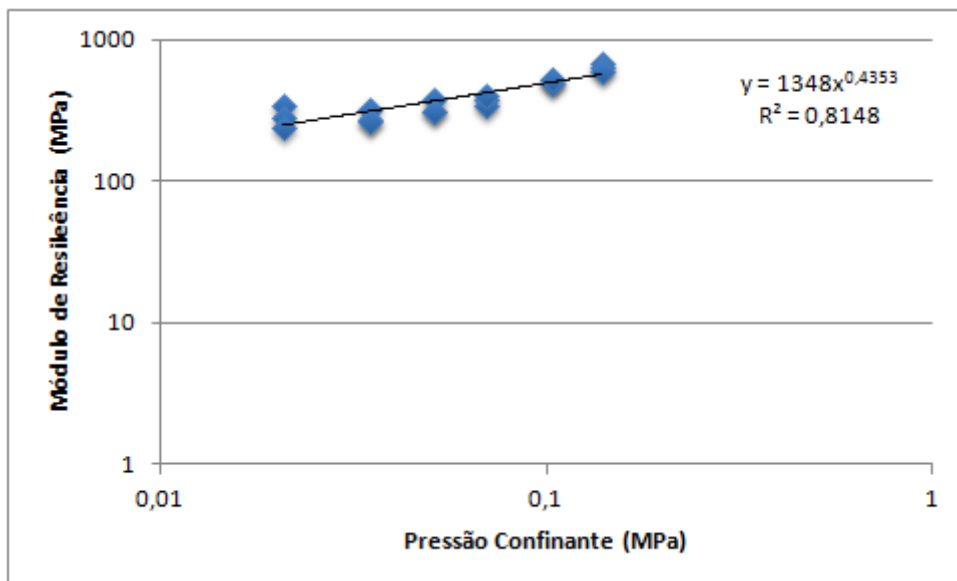


(a)

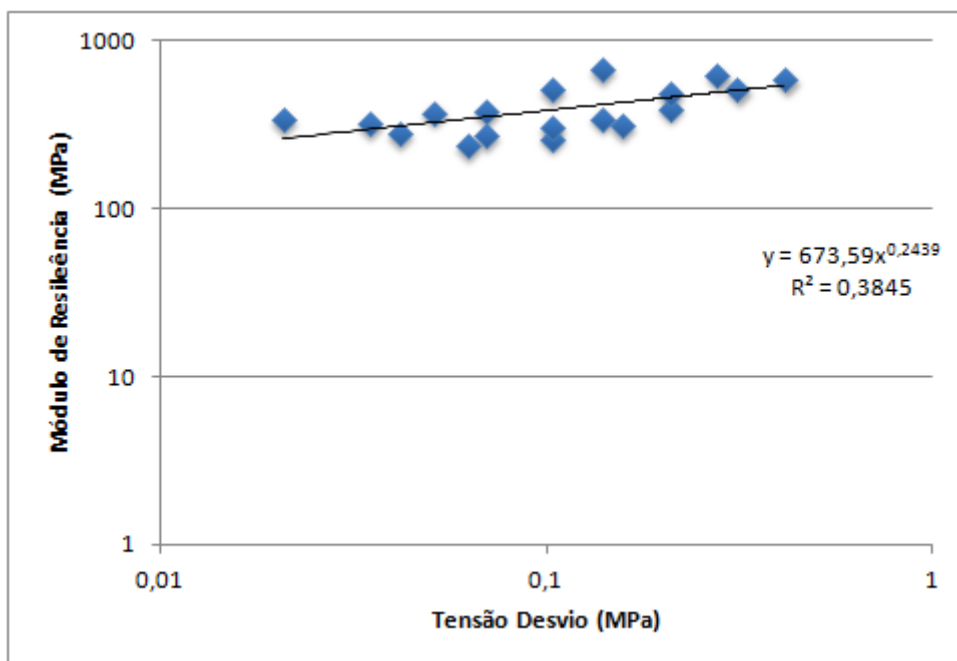


(b)

**APÊNDICE C – Módulo de Resiliência do Solo + 10% Lodo + 1% Estabilizante em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio**

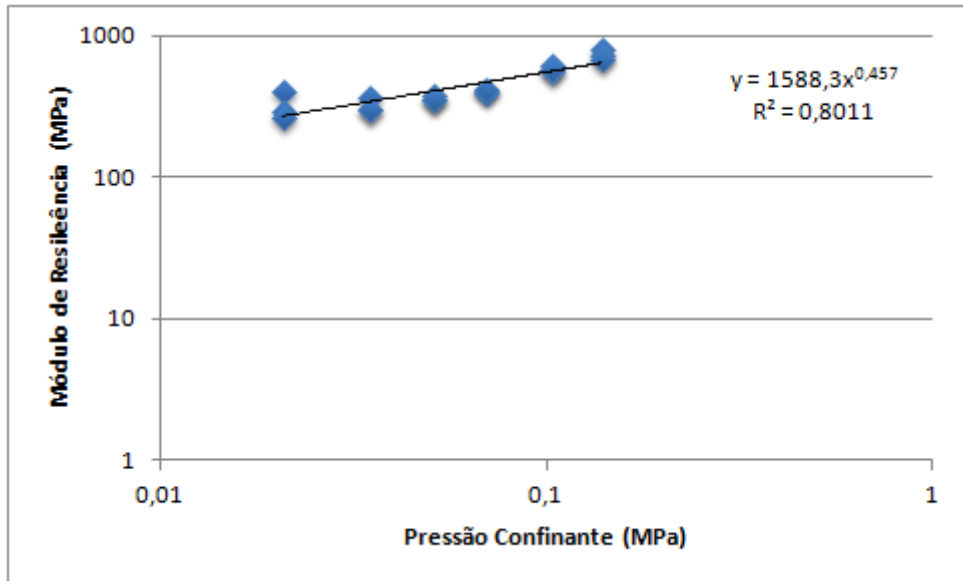


(a)

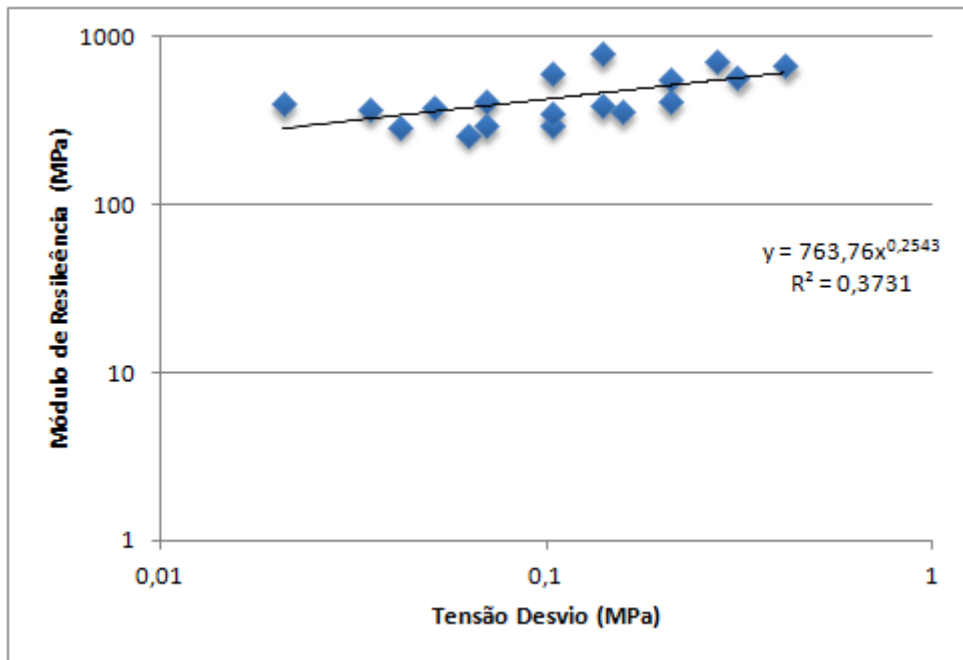


(b)

**APÊNDICE D – Módulo de Resiliência do Solo + 10% Lodo + 3% Estabilizante em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio**



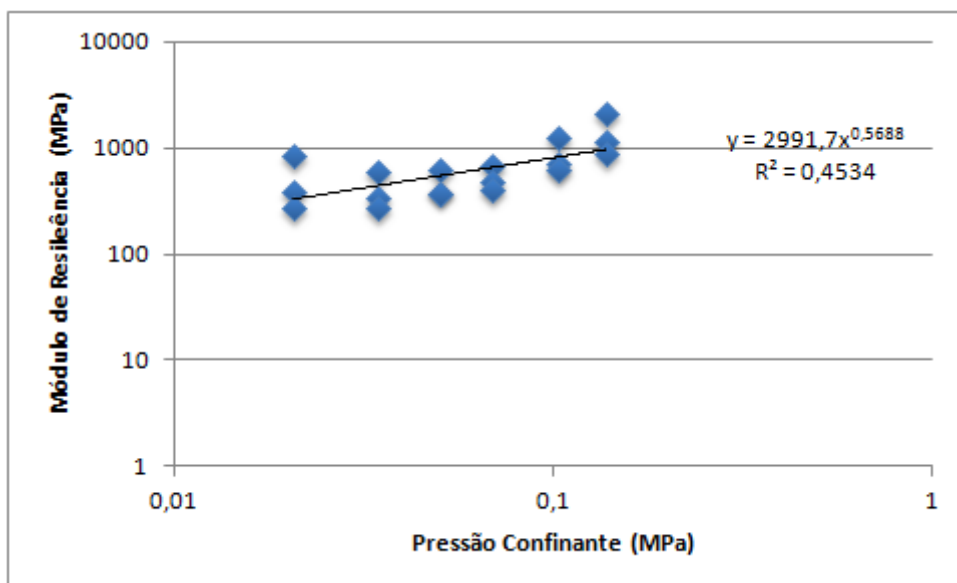
(a)



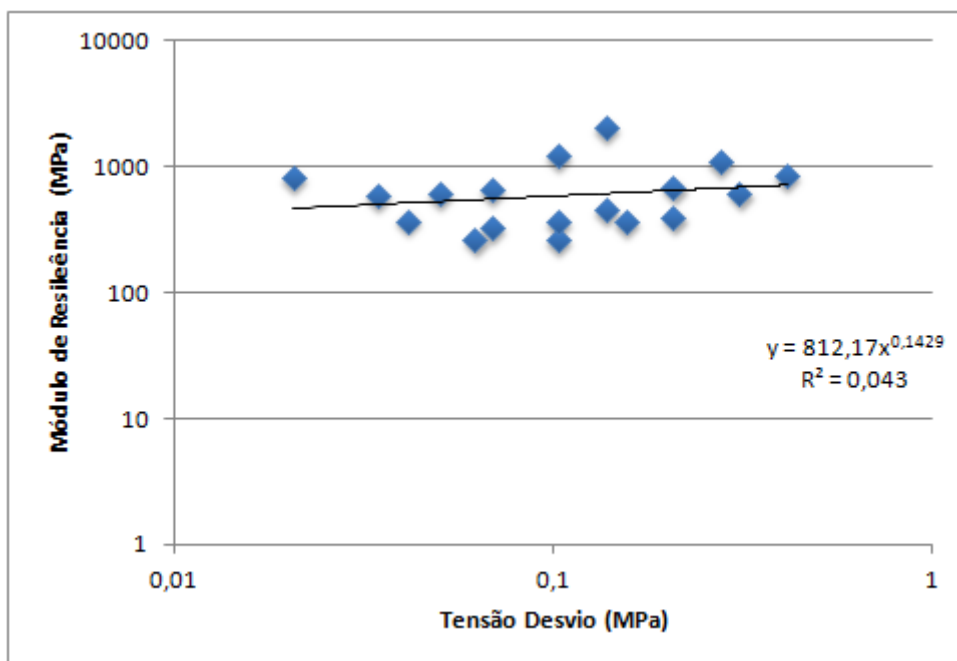
(b)



**APÊNDICE E – Módulo de Resiliência do Solo + 10% Lodo + 5% Estabilizante em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio**

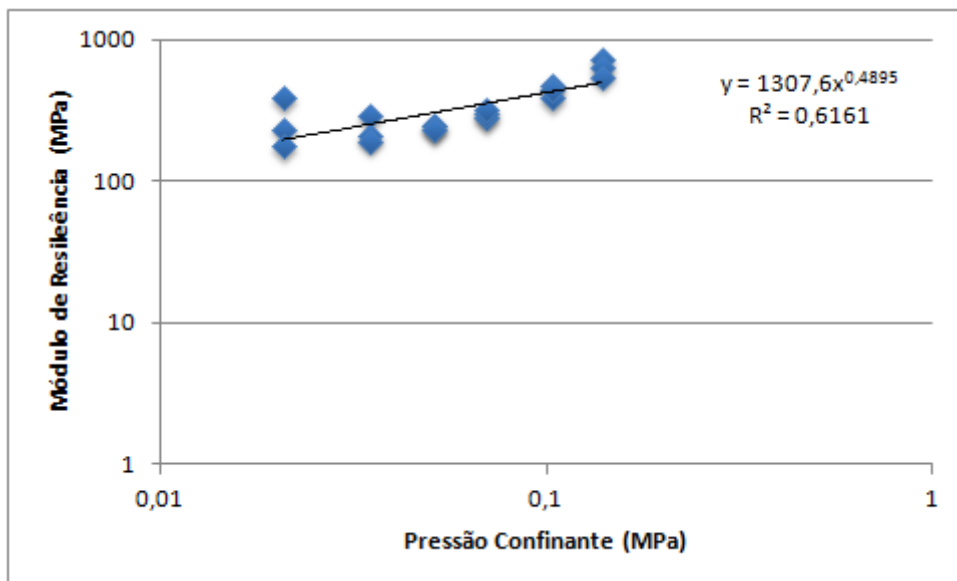


(a)

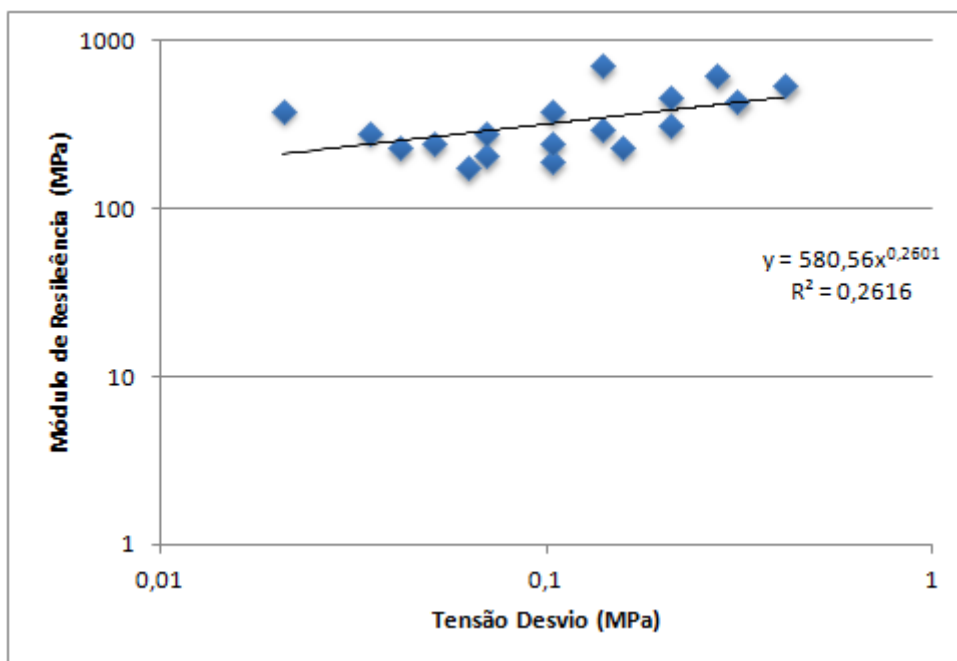


(b)

**APÊNDICE F – Módulo de Resiliência do Solo + 10% Lodo + 7% Estabilizante em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio**



(a)



(b)