



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**GUILHERME BARBOSA DE CASTRO**

**CONTRIBUIÇÃO AO ENTENDIMENTO DO USO DO GEOGAUGE H4140 EM  
CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTO**

São Luís  
2016



**GUILHERME BARBOSA DE CASTRO**

**CONTRIBUIÇÃO AO ENTENDIMENTO DO USO DO GEOGAUGE H4140 EM  
CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTO**

Monografia apresentada junto ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant’Ana

São Luis  
2016

Castro, Guilherme Barbosa de.

Contribuição ao entendimento do uso do Geogauge H4140 em camadas granulares de pavimento / Guilherme Barbosa de Castro. – São Luís, 2016.

88 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Walter Canales Sant’Ana.

1.Compactação. 2.Pavimento. 3.Geogauge. 4.Módulo de resiliência. I.Título

CDU: 625.8



**GUIULHERME BARBOSA DE CASTRO**

**CONTRIBUIÇÃO AO ENTENDIMENTO DO USO DO GEOGAUGE H4140 EM  
CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTO**

Monografia apresentada junto ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

Aprovada em: 11/10/2016

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana (Orientador)  
Universidade Estadual do Maranhão

---

Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho  
Universidade Estadual do Maranhão

---

Prof. Msc. Marivaldo Costa Duarte  
Universidade Estadual do Maranhão

*Aos meus queridos pais, Carlos Alberto e  
Rozangela,  
À minha irmã Marcella*

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, todo poderoso, que me proporcionou força na luta diária, dedicação, determinação e saúde para a realização de todas as etapas deste trabalho, pois sem a sua mão guia e protetora de todos os males não teria conseguido concluí-lo.

Ao meu orientador, professor Dr. Walter Canales Sant'Ana, pelo respeito, presença e paciência em todo este período. Pela sua dedicação e total suporte em todas as etapas deste trabalho. Afinal, sem sua experiência presente na minha pesquisa em 2013 e neste TCC, eu não teria adquirido habilidades acadêmicas raras, que irei levar para sempre.

A todos os meus professores do curso de Engenharia Civil, pela total dedicação durante as aulas e fora delas, em momentos de dúvidas.

À CAPES, pela realização do programa Ciência sem Fronteiras, por meio do qual pude encontrar a ideia para este trabalho.

Aos amigos e colegas que fiz durante todo o curso de Engenharia Civil e durante o intercâmbio. Foram vocês que me ajudaram a crescer e amadurecer, tanto pessoalmente quanto profissionalmente, com elogios ou críticas, cada um com sua especial contribuição, afinal sou cada um de vocês.

Ao Laboratório de Solos e Pavimentação da Uema (LSP) que me propiciou o ambiente e equipamentos para que eu pudesse realizar este trabalho e à JM Engenharia, por me proporcionar o equipamento chave para o meu trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse realizado, incluindo minha namorada Glenda e colegas e técnicos de laboratório, Márcia, Letícia, Tales, Bruno, Garoto, Marinho, Samuel, Glauber, Caíque, Francis, Zé Pequeno, Teodoro, Carlos, Seu Zé e Luan, pela dedicação e presteza ao longo deste semestre.

“Tenha a coragem de seguir seu coração e sua intuição. Eles de alguma forma já sabem o que você realmente quer se tornar.”

**(Steve Jobs)**

## RESUMO

A situação rodoviária brasileira, apesar da melhora, ainda apresenta deficiências perceptíveis que podem causar o desconforto e até acidentes para o usuário. As causas para os problemas nos pavimentos brasileiros podem ser resumidas com a falta de um método de dimensionamento mecanístico e um maior controle de qualidade no processo de compactação em campo. Os métodos de dimensionamento no Brasil ainda são baseados no tradicional ensaio CBR, o qual não retrata a real solicitação das cargas móveis repetidas do tráfego. Com relação à compactação em campo, ainda hoje no Brasil os métodos de controle de compactação de camadas granulares do pavimento são baseados ainda na determinação de medidas de densidade *in situ* pelo ensaio tradicional do frasco de areia. Como a rigidez e módulo de resiliência do material são parâmetros de deformabilidade mais variáveis e sensíveis do que a densidade, a uniformidade da camada pode ser facilmente controlada e monitorada durante o processo de compactação em campo, além de serem parâmetros relacionados diretamente aos métodos modernos de dimensionamento. Assim, fica evidente a necessidade de equipamentos mais rápidos, seguros e precisos a fim de se determinar tais parâmetros para o controle de qualidade de compactação em campo. Este trabalho objetivou entender o uso de um equipamento mais moderno, o GeoGauge ou *Soil Stiffness Gauge (SSG)*, que fornece tanto a rigidez quanto o módulo de resiliência do material em campo. Foram acompanhadas compactações em laboratório, por meio de compactador e caixa-molde, desenvolvidos para o trabalho, visando a captar com o Geogauge e os equipamentos tradicionais de verificação de densidade do solo, a evolução da compactação. Verifica-se que o GeoGauge pode ser usado como verificador das condições do solo em termos de deformabilidade e, conseqüentemente, de densidade.

Palavras-chave: Compactação. Pavimento. Geogauge. Módulo de resiliência

## ABSTRACT

Despite the Brazilian roads situation has been improved over time, there are still perceptible shortcomings which can cause discomfort as well as accidents for the users. The reason for these problems on the Brazilian roads can be summarized by the lack of a mechanistic-empirical design method and a better compaction process quality control. The Brazilian design methods are still based on traditional CBR tests which does not reflect the real repeated moving load from the traffic. Considering the compaction process in the field, there are still traditional quality control tests based on density measures in situ such as the sand bottle. As the stiffness and resilient modulus are deformability parameters more variable and sensitives than density, the layer uniformity can be easily controlled and monitored during the compaction process besides they be key input parameters directly related to recent design methods. Thus, it becomes evident the need for faster, safer and more accurate devices so that it can be determined such parameters for the compaction quality control in the field. The main goal of this paper was to understand the use of a more current device well known as GeoGauge or Soil Stiffness Gauge (SSG) which provides the stiffness as well as the resilient modulus from a granular material in the field. It was observed a laboratory compaction of a granular soil by a manual roller into a sample-box developed for this research, aiming to collect and verify dada from the GeoGauge and the sand bottle during the compaction process evolution. It was verified that the Geogauge can be used as a soil situation verifier in terms of deformity.

Key words: Compaction, pavement, geogauge, resilient modulus

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estado de conservação do pavimento Brasil/Maranhão .....	19
Figura 2 - Composição estrutural do pavimento rígido .....	20
Figura 3 - Composição estrutural do pavimento flexível .....	21
Figura 4 - Tensões no interior de um pavimento .....	23
Figura 5 - Resumo dos ensaios de compactação .....	24
Figura 6 - Curva de compactação de solos com diferentes energias .....	25
Figura 7 - Frasco de areia, bandeira e funil .....	28
Figura 8 - Portable Seismic Pavement Analyser (PSPA).....	29
Figura 9 - Cone de penetração dinâmica .....	30
Figura 10 - Deflectômetro de impacto.....	31
Figura 11 - GeoGauge H-4140 em seu primeiro teste dentro da caixa .....	32
Figura 12 - Princípio de operação do GeoGauge .....	33
Figura 13 - Controle estatístico no processo de compactação.....	35
Figura 14 - Correlação Rigidez x Módulo.....	36
Figura 15 - Relação tensão-deformação típica nas camadas dos pavimentos .....	41
Figura 16 - Tensões e deformações no ensaio triaxial dinâmico .....	42
Figura 17 - Esquema da câmara de ensaio triaxial .....	43
Figura 18 - Fase elástica do solo .....	44
Figura 19 - Fase de caracterização por sedimentação .....	49
Figura 20 - Fase de peneiramento das amostras de solo .....	50
Figura 21 - Gráfico dos Limites de Atterberg.....	51
Figura 22 - Ensaio para a determinação da massa específica real dos grãos.....	52
Figura 23 - Compactador Proctor .....	54
Figura 24 - Ensaio de penetração (CBR).....	55
Figura 25 - Corpos de prova imersos por 4 dias (CBR) .....	55
Figura 26 - Material estocado .....	56
Figura 27 - Etapas sequenciais de secagem de material.....	57
Figura 28 - Homogeneização de material.....	58
Figura 29 - Caixa de madeira e rolo compactador.....	59
Figura 30 - Esquema das camadas compactadas .....	59
Figura 31 - Equipamento Geogauge H-4140, nível e espátula.....	60
Figura 32 - Esquema dos pontos de ensaio com o equipamento GeoGauge.....	62
Figura 33 - Execução do ensaio frasco de areia .....	63
Figura 34 - Ferramentas para a realização do ensaio do frasco de areia .....	64
Figura 35 - Aparelho ‘Speedy’ .....	65
Figura 36 - Estufa .....	65
Figura 37- Uso do Geogauge H-4140 em campo .....	66
Figura 38 - Granulometria do solo coletado .....	67
Figura 39 - Curva de compactação do material estudado.....	69
Figura 40 - Curva pressão x penetração do solo.....	70
Figura 41 - Rigidez do solo na caixa medidos pelo Geogauge .....	73
Figura 42 – Módulo do solo na caixa medido pelo Geogauge .....	74
Figura 43 - Esquema dos furos na caixa.....	75
Figura 44- Correlação entre Densidade e Rigidez do solo .....	75
Figura 45 - CBR e módulo de resiliência de laboratório de solos lateríticos da ilha de São Luis	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estado de conservação do pavimento Brasil/Maranhão.....	19
Tabela 2 - Classificação TRB.....	53
Tabela 3 - Limites de consistência.....	68
Tabela 4 - CBR do solo .....	70
Tabela 5 - Densidade aparente seca do solo na caixa.....	71
Tabela 6 - Grau de compactação da camada de 10 cm para 6 pontos .....	71
Tabela 7 - Grau de compactação da camada de 40cm para 6 pontos.....	72
Tabela 8 - Resultados de densidade e rigidez nas camadas de 10 cm e 40 cm .....	72
Tabela 9 - Resultados de CBR e Módulo de amostras coletadas na ilha de São Luis .....	76
Tabela 10 - Comparação entre o módulo de resiliência pelo Geogauge e módulo de resiliência de laboratório .....	78
Tabela 11 - Resultados dos ensaios em campo pelo Geogauge e frasco de areia .....	78
Tabela 12 - Densidades obtidas pelas equações de correlação A, B e C.....	79
Tabela 13 - Dados do solo de campo fornecidos pelo construtor.....	79
Tabela 14 - Correlações entre CBR e módulo de resiliência obtido pelo Geogauge .....	80

## LISTA DE SIGLAS

CNT	Conselho Nacional de Transportes
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
SRMA	Secretaria Regional do Maranhão
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ANTT	Agência Nacional de Transportes
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
%	Porcentagem
km	quilômetro
MR	Módulo de resiliência
cm	centímetro
G	Módulo de cisalhamento
E	Módulo de elasticidade
DCP	<i>Dynamic cone penetrometer</i>
SSG	<i>Soil Stiffness Gauge</i>
Hz	Hertz
°C	Graus Celsius
N	Newton
F	Força
R	Raio
MPa	Mega Pascal
MN/m	Meganewton por metro
Mm	milímetro
Klbf/in	<i>kilopound per inch</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
R <sup>2</sup>	Correlação por regressão linear
K	Rigidez
w	Umidade
Ksi	<i>kilosquare inch</i>
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Título</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
1.2.1	Objetivos gerais	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>16</b>
<b>1.4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>17</b>
<b>1.5</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>SITUAÇÃO RODOVIÁRIA BRASILEIRA</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>O QUE É O PAVIMENTO?</b>	<b>19</b>
2.2.1	Pavimentos rígidos	20
2.2.2	Pavimentos flexíveis	21
<b>2.3</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS</b>	<b>21</b>
2.3.1	Análise empírica de dimensionamento	22
2.3.2	Análise mecânica de dimensionamento	22
<b>2.4</b>	<b>COMPACTAÇÃO DOS SOLOS</b>	<b>23</b>
2.4.1	Compactação em laboratório	24
2.4.2	Compactação em campo	25
2.4.3	Controle de compactação em campo	26
2.4.3.1	Métodos destrutíveis	27
2.4.3.2	Métodos não-destrutíveis	28
<b>2.5</b>	<b>GeoGauge H-4140</b>	<b>31</b>
2.5.1	Estudos já realizados com GeoGauge H-4140	36
<b>2.6</b>	<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SOLO</b>	<b>39</b>
2.6.1	Considerações gerais	39
2.6.2	California Bearing Ratio – CBR	39
2.6.3	Módulo de Resiliência	40
2.6.4	Módulo de elasticidade	43
2.6.5	Rigidez	44
<b>2.7</b>	<b>CORRELAÇÕES ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E CBR</b>	<b>46</b>
<b>2.8</b>	<b>CORRELAÇÃO EXISTENTE ENTRE CBR E RIGIDEZ</b>	<b>46</b>

<b>2.9</b>	<b>CORRELAÇÕES EXISTENTES ENTRE O MÓDULO OBTIDO PELO GEOGAUGE E O MÓDULO DE RESILIÊNCIA OBTIDO EM LABORATÓRIO.....</b>	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>TIPO DE ESTUDO .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>COLETA DO MATERIAL .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS .....</b>	<b>48</b>
3.3.1	Ensaio de caracterização .....	48
3.3.2	Ensaio de compactação Protor Intermediário .....	53
3.3.3	California Bearing Ratio – CBR.....	54
3.3.4	Ensaio na caixa.....	56
3.3.4.1	Compactação .....	56
3.3.4.3	Geogauge ou Soil Stiffness Gauge (SSG).....	60
3.3.4.2	Determinação da densidade “in situ” .....	62
3.3.4.2	Determinação da umidade “in situ” .....	64
3.3.5	Ensaio no campo.....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do solo .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Compactação .....</b>	<b>68</b>
<b>4.2</b>	<b>Índice de Suporte California (CBR) .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio na caixa .....</b>	<b>71</b>
<b>4.4</b>	<b>Ensaio no campo.....</b>	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E DISCUSSÕES.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O estado de conservação do pavimento é um elemento que usuários da rodovia percebem facilmente, pois é responsável pelo conforto da viagem. Quando existem defeitos ou irregularidades, o conforto e a segurança são diretamente afetados, o que aumenta o risco de acidentes.

Segundo dados do CNT (2015, p.15), do total de 100.700 km de rodovias pavimentadas pesquisadas no país, quase a metade (48,6%) apresenta algum tipo de deficiência. No estado do Maranhão, as rodovias consideradas Regular, Ruim e Péssimo somam ainda mais da metade das rodovias avaliadas.

Pode-se destacar que ainda hoje no Brasil, principalmente no Estado do Maranhão, o método empírico de dimensionamento de pavimento mais utilizado é o do DNER, adaptado pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza, que têm como base o trabalho “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume” da autoria de W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U. e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO (Manual DNIT, 2006, p.142).

Este método baseia-se em dois fatores: a resistência do subleito, determinada por meio do ensaio de CBR e pelo tráfego de projeto. Por isso, pode-se afirmar que esse método de dimensionamento apresenta limitações, pois com ele pode-se somente prever uma análise qualitativa, considerando a capacidade de suporte do material (Pesquisa CONCEPA/ANTT 2009, p. 13).

Devido a tal limitação dos métodos empíricos, a abordagem Mecânico-Empírico (análise das causas físicas das tensões através de observações) para o dimensionamento de pavimentos veio à tona, tendo as seguintes vantagens: melhor confiabilidade no projeto, possibilidade de prever defeitos específicos e consequências de novas configurações de carregamento, melhor utilização dos materiais disponíveis, dentre outras (Pesquisa CONCEPA/ANTT 2009, p.16).

Os valores de tensão/deformação nos pavimentos são determinados por abordagens analíticas, que têm como dados de entrada propriedades mecânicas do material, obtidas em laboratório (BASTOS et al., 2014, p.1). Dentre elas, a propriedade mais importante é o módulo de resiliência (MAIA et al., 2015, p.1).

Devido a tal importância, existe hoje uma tendência da pavimentação no mundo inteiro para o lado mecânico de dimensionamento de pavimentos, a qual exige a necessidade pela descoberta dos parâmetros de deformabilidade dos materiais das camadas do pavimento

(BATISTA, 2007, p. 1).

Porém, além dos parâmetros de deformabilidade como foi citado o módulo de resiliência, o controle e fiscalização da compactação das camadas do pavimento também é importante, pois é um dos responsáveis pelo sucesso da construção como a redução de custos para a manutenção, além de garantir a eficiente aplicação dos recursos e o desempenho estrutural previstos na etapa de dimensionamento (Aguiar et al., 2011, apud MAIA et. al., 2015, p.1).

Os métodos atuais de avaliação do controle de qualidade da compactação de camadas do pavimento no Brasil, baseados na determinação de densidade específica aparente do material, são considerados perigosos, de mão de obra intensiva, lentos, de baixa precisão e desapropriados em situações onde há diferença entre materiais no campo (FIELDLER et al. 1998, LIVINEH e GOLDBERG, 2001, apud NAZZAL, 2003, p.1).

O objetivo do controle tecnológico é verificar após a compactação da camada, se ela atingiu as propriedades de engenharia, adequadas para aquela situação específica. Para FLEMING et al. (2001 apud NAZZAL, 2003, p. 2) a propriedade de engenharia funcional chave das camadas de base e subbase é sua rigidez, que é considerada uma medida da qualidade estrutural que suporta as camadas superiores.

Como citado nos parágrafos anteriores, o método mecanicista de dimensionamento de pavimentos é baseado em parâmetros da engenharia de materiais como, por exemplo, sua rigidez e/ou resistência, os quais se encaixam entre o processo de dimensionamento e o controle de qualidade da obra. Por isso, o controle de qualidade de uma obra de pavimentação deve se basear em critérios que proximamente se relacione com os parâmetros de desempenho usado no projeto (NAZZAL, 2003, p.2).

Devido a tal necessidade, surgiram nos últimos anos equipamentos de alta tecnologia, a exemplo do GeoGauge, que buscou estimar a rigidez das camadas do pavimento *in situ*, podendo ser utilizado para o controle tecnológico durante a execução do pavimento (GUDISHALA, 2014 apud MAIA et. al., p.2).

O engenheiro Wallace Alan Blois Lopes, ressaltou que é importante ter o conhecimento de novas técnicas de controle e construção, por meio da modelagem mecanicista, na qual se usa o GeoGauge para determinação do módulo de resiliência dos materiais aplicados em obras de campo, sendo uma alternativa em relação aos métodos originais utilizados no dimensionamento dos pavimentos, que se baseiam apenas em valores do CBR do solo (Palestra “Estado D’Arte das rodovias maranhenses: um caso de engenharia”, 2015).

Para tanto, primeiramente precisa-se de um estudo de entendimento da utilização

do equipamento GeoGauge e da avaliação dos parâmetros mecânicos do solo medidos por tal, visto que ainda existem dúvidas a respeito dos seus resultados. Por isso, este trabalho visa a entender o GeoGauge dentro de laboratório, simulando as camadas de solo confinadas e compactadas em uma caixa de madeira, de forma a comparar e analisar seus resultados com os ensaios de CBR e frasco de areia.

## **1.1 Título**

Contribuição ao entendimento do uso do GeoGauge H-4140 em camadas granulares de pavimento flexível.

## **1.2 Objetivos**

### 1.2.1 Objetivo geral

Entender a manipulação do equipamento GeoGauge H-4140 e dos resultados de ensaios obtidos por meio dele em solo aplicado em camadas granulares de pavimento flexível.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar as características físicas do material utilizado;
- Realizar os ensaios de CBR e compactação;
- Verificar as propriedades mecânicas do solo pelo GeoGauge;
- Verificar a correlação dos resultados obtidos pelo Geogauge com os resultados de densidade do solo avaliados pelos métodos tradicionais;

## **1.3 Justificativa**

Devido à pavimentação maranhense ainda utilizar o método empírico no dimensionamento de pavimentos, que se fundamenta somente pela resistência do subleito (CBR) e pelo tráfego do projeto, fato que pode contribuir para o estado deplorável das rodovias do Estado, é importante conhecer novas técnicas de dimensionamento, controle e construção de pavimentos, relacionadas ao método mecanístico.

A oportunidade do uso de um equipamento de alta tecnologia (GeoGauge) que

determina o módulo de resiliência dos materiais aplicados em obras de campo (modelo mecanístico), traz consigo a necessidade de estudo do equipamento, tendo como foco o entendimento da sua utilização na verificação de propriedades mecânicas de materiais para base de pavimentos flexíveis do Estado do Maranhão e se há alguma correlação entre essas propriedades (Rigidez e Módulo de Resiliência) emitidas pelo aparelho com o CBR e a compactação do material.

Alguns estudantes e pesquisadores que tiveram acesso ao GeoGauge, apesar de evidenciarem diversas correlações entre valores de ensaios, deixaram claro em suas pesquisas que existem variações tanto na medição dos seus resultados quanto quando comparados com outros ensaios como por exemplo o ensaio triaxial cíclico. Por isso, fica evidente que o GeoGauge precisa ser mais estudado e compreendido.

#### **1.4 Metodologia**

O desenvolvimento deste estudo fundamenta-se em pesquisas de informações técnicas obtidas por meio de artigos, apostilas, dissertações, teses, normas técnicas, manuais e sites que discorrem sobre os mesmos tópicos. Além disso, será utilizada uma caixa de madeira de dimensões 1,00mx1,00mx0,60m onde o solo objeto de ensaio será compactado em laboratório.

Sobre o solo compactado serão realizadas as medições com o Geogauge e o ensaio convencional de frasco de areia. As propriedades físicas e mecânicas (CBR) serão obtidas em laboratório. O solo foi coletado a partir de jazida utilizada em obra de pavimentação.

## **1.5 Organização do trabalho**

Este trabalho foi organizado da seguinte forma:

No primeiro capítulo, foi abordada a introdução do estudo, apresentando os objetivos, a justificativa e metodologia.

No segundo capítulo, foi colocada toda a revisão bibliográfica adquirida durante o estudo, incluindo tabelas e figuras de artigos acadêmicos.

No terceiro capítulo, foi apresentada a metodologia utilizada no trabalho, tal como os detalhes dos ensaios laboratoriais e de campo, realizados a fim de se chegar aos resultados.

No quarto capítulo, foram apresentados todos os resultados, tanto de campo quanto de laboratório, dando ênfase aos resultados e correlações entre densidade e rigidez.

No quinto capítulo, foram apresentadas as conclusões e algumas discussões a respeito do trabalho e dos resultados obtidos.

Para a finalização do trabalho, foram apresentadas todas as referências bibliográficas que serviram como base para a sua elaboração.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Situação rodoviária brasileira

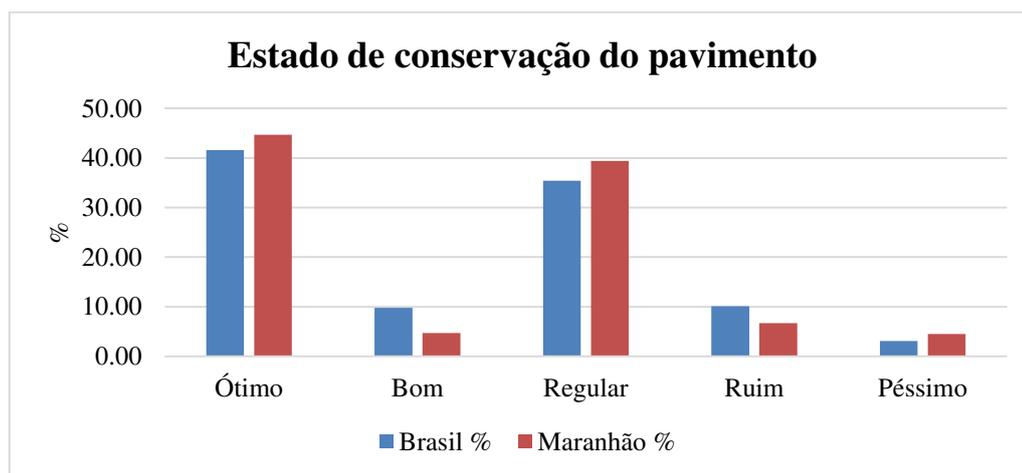
De acordo com a Tabela 1, dentre o total de rodovias pavimentadas avaliadas no país, 49.000 km apresentam algum tipo de deficiência; dessas, 17.000 km foram classificadas como Regular, 5.000 km como Ruim e 1500 mil km como Péssimo. Já no Estado do Maranhão, as rodovias consideradas Regular, Ruim e Péssimo somam ainda mais da metade do total de 4.577 km de rodovias do estado (Figura 1) (Pesquisa CNT de rodovias 2015, pp. 66-187).

Tabela 1 - Estado de conservação do pavimento Brasil/Maranhão

Pavimento	Brasil	Maranhão
Ótimo	41.60%	44.70%
Bom	9.80%	4.70%
Regular	35.40%	39.40%
Ruim	10.10%	6.70%
Péssimo	3.10%	4.50%

Fonte: Pesquisa CNT (2015).

Figura 1 - Estado de conservação do pavimento no Brasil



Fonte: Pesquisa CNT (2015).

### 2.2 O que é o pavimento?

O pavimento é considerado uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construído sobre uma camada de solo conhecida por subleito, e têm como principal

função resistir aos esforços e cargas oriundas do tráfego, aos efeitos do clima e a fornecer uma melhoria nas condições de rolamento, com conforto e segurança ao usuário (BERNUCCI, 2007, p.9).

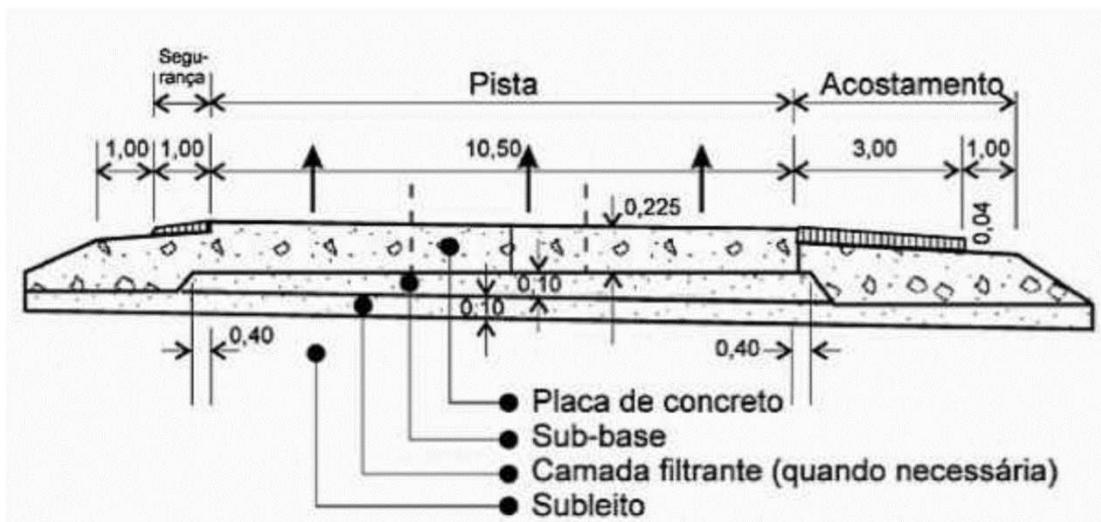
Uma seção típica de um pavimento consiste basicamente em uma fundação e em camadas com espessuras pré-definidas de acordo com seu dimensionamento. Dentre eles, dois merecem destaque: pavimentos rígidos e flexíveis.

### 2.2.1 Pavimentos rígidos

Os pavimentos rígidos (Figura 2) são aqueles que apresentam uma camada superficial de concreto de cimento Portland (podendo ser armada ou não), que é suportada geralmente por camadas de materiais granulares ou material de solo estabilizado por cimento, conhecida por sub-base, assentada em um subleito ou sobre um reforço de subleito quando necessário.

Dentre suas principais características, pode ser destacada a sua elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, por isso, absorve praticamente quase toda a carga proveniente dos veículos (Manual do DNIT, 2006).

Figura 2 - Composição estrutural do pavimento rígido



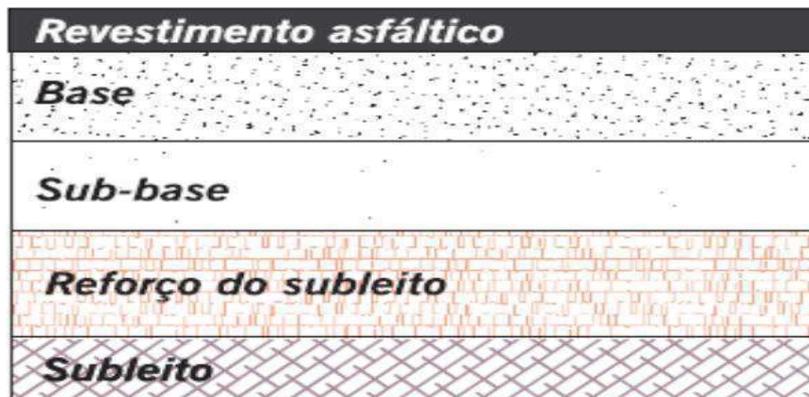
Fonte: SENÇO (2007).

### 2.2.2 Pavimentos flexíveis

No pavimento flexível, diferentemente do tipo anterior, todas as suas camadas sofrem deformações elásticas significativas sob o carregamento aplicado e, portanto, todas elas recebem parcelas de carga praticamente equivalentes (Manual do DNIT, 2006). Esse tipo de pavimento é composto por camada superficial asfáltica (revestimento), que é suportada por camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, que são constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, podendo ou não ser acrescentado aos agentes estabilizadores.

O revestimento tem a função de impermeabilizar e oferecer um acabamento final, proporcionando conforto e segurança (resistência à derrapagem). A base é receptora dos esforços no revestimento, transferindo-os e aliviando as tensões para as camadas inferiores. A sub-base tem a mesma função, mas contém uma espessura de tamanho menor. Todas elas repousam sobre o subleito, que é a plataforma da estrada concluída após os devidos cortes e aterros (Figura 3) (SENÇO, 2007).

Figura 3 - Composição estrutural do pavimento flexível



Fonte: BERNUCCI et al (2007, p.338)

### 2.3 Dimensionamento de pavimentos

Cabe notar que antigamente, quando não existia um método de dimensionamento de pavimentos avaliado e aprovado, empregava-se a mesma espessura de pavimento sobre qualquer solo de fundação. Por intermédio de observações dos pavimentos construídos, percebeu-se que uma parte estava em boas condições; já outras, apresentavam rupturas precocemente (NETO, 2004, p.1).

Baseando nisso, concluiu-se que era necessária a existência e utilização de um método de dimensionamento, e órgãos do mundo inteiro começaram a se preocupar em criar esses modelos. Tal necessidade resultou em dois tipos de modelos: por meio de experiências e observações de campo (métodos empíricos) ou a partir da interpretação do comportamento mecânico (causas físicas de tensões) da estrutura pavimento/subleito (NETO, 2004, p.2)

Após a descoberta e utilização dos métodos empíricos, percebeu-se que o modelo tinha algumas limitações, levando a mais uma necessidade: descoberta de um modelo empírico-mecânico que não se baseava somente em observações, mas sim na análise das respostas do pavimento, tais como tensões e deformações (Pesquisa CONCEPA, 2009, p.12).

### 2.3.1 Análise empírica de dimensionamento

No Brasil ainda se usa o método empírico de dimensionamento de pavimentos, conhecido como método do DNER. Segundo Pinto (1991 apud NETO, 2004, p.2) esse método se baseia fundamentalmente no valor do ensaio de capacidade dos materiais de subleito e das outras camadas de solo constituintes do pavimento (CBR). Contudo, a propriedade de deformações recuperáveis ou resilientes (parcela de deformação total que é recuperada em função do tempo causada pela repetição da ação do tráfego que provoca ruptura dos revestimentos asfálticos) não é abordada.

O método do DNER se fundamenta pelas características de suporte do solo de fundação e dos materiais que constituem a estrutura do pavimento, assim como pelos parâmetros de tráfego (NETO, 2004, p. 2). Esse método baseia-se somente em dois fatores: a resistência do subleito, que é determinada pelo ensaio de CBR e do tráfego de projeto. Por isso, pode-se afirmar que esse método de dimensionamento apresenta limitações, pois somente prevê uma análise qualitativa acerca da capacidade de suporte do material (Pesquisa CONCEPA/ANTT, 2009, p. 13).

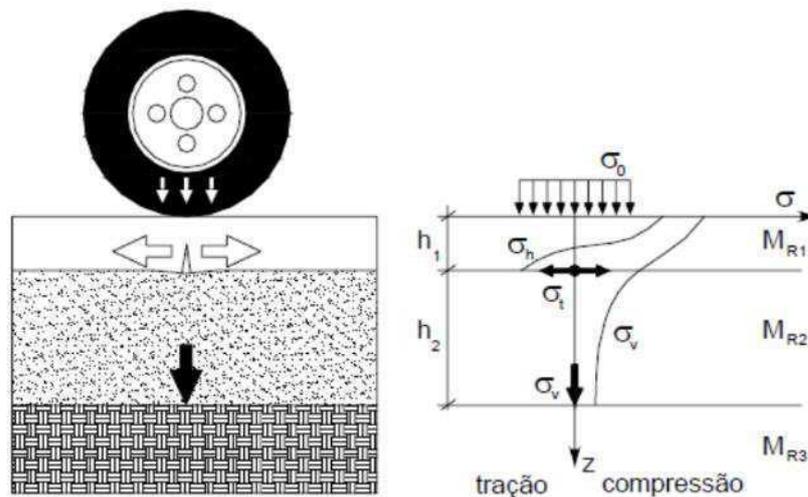
### 2.3.2 Análise mecânica de dimensionamento

O objetivo do método mecânico de dimensionamento de pavimento é analisar as respostas do pavimento, como tensões, deformações e deflexões causadas pela carga do tráfego e pelo clima, sendo acumulado o dano causado ao pavimento ao longo do tempo (RODEZNO e KALOUSH, 2011).

Após isso, deve-se compará-las às tensões e deformações admissíveis dos materiais a serem empregados por meio de ensaios laboratoriais ou de equações mecanístico-empíricas (MOTTA, 1991).

O módulo de resiliência é uma característica mecânica muito importante, largamente utilizada para a análise e dimensionamento de pavimentos. Portanto, a determinação dessa propriedade é considerada de extrema importância na utilização de análises mecanísticos de dimensionamento (JI et al, 2014, p.1). As tensões no interior do pavimento se comportam como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Tensões no interior de um pavimento



Fonte: MEDINA e MOTTA (2005)

## 2.4 Compactação dos solos

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNER (DNER, 2006), a compactação é uma operação da construção dos pavimentos da qual resulta no aumento da massa específica aparente de camadas de solo e materiais de pavimentação, aplicando-se pressão e umidade, impacto ou vibração, fazendo com que as partículas constitutivas do material sejam cada vez mais unidas, pela expulsão do ar.

Segundo Preussler (2007), o objetivo da compactação dos solos é aumentar a resistência à ruptura por cisalhamento, fadiga ou deformação permanente, diminuir a deformabilidade, ou seja, aumentar o módulo de elasticidade e garantir condições mínimas de estabilidade. Além disso, a compactação dos solos reduz possíveis variações volumétricas, quer pela ação das cargas, quer pela ação das águas e também impermeabiliza o solo pela redução

do seu coeficiente de permeabilidade, resultando em menor índice de vazios.

Deste modo, ocorre a necessidade de obter a compactação nas camadas do pavimento a níveis próximos ou iguais ao máximo obtido pelo ensaio de compactação em laboratório.

Cabe notar que quando o solo está seco, ele oferece alta resistência à compactação ou consolidação. O solo úmido ajuda a interlocação das partículas do solo pelo aumento da lubrificação, o que facilita sua consolidação. Portanto, em uma determinada energia e método de compactação, os solos adquirem peso específico aparente máximo quando compactados com determinado teor de umidade, conhecido por ‘teor ótimo de umidade’ (PREUSSLER, 2007).

Segundo Pinto (2000 apud PREUSSLER, 2007 p.9), os índices que correlacionam peso e volume são:

- Umidade;
- Peso específico dos solos;
- Peso específico natural;
- Peso específico aparente seco.

#### 2.4.1 Compactação em laboratório

O teor de umidade ótimo é determinado por meio do ensaio de compactação realizado em laboratório, sendo o mais usado no Brasil o ensaio de Proctor. As energias de compactação do ensaio variam de acordo com o soquete ou proctor, podendo ser: Normal, Intermediária e Modificada (Figura 5). A escolha da energia de compactação varia com a natureza do solo (PREUSSLER, 2007).

Figura 5 - Resumo dos ensaios de compactação

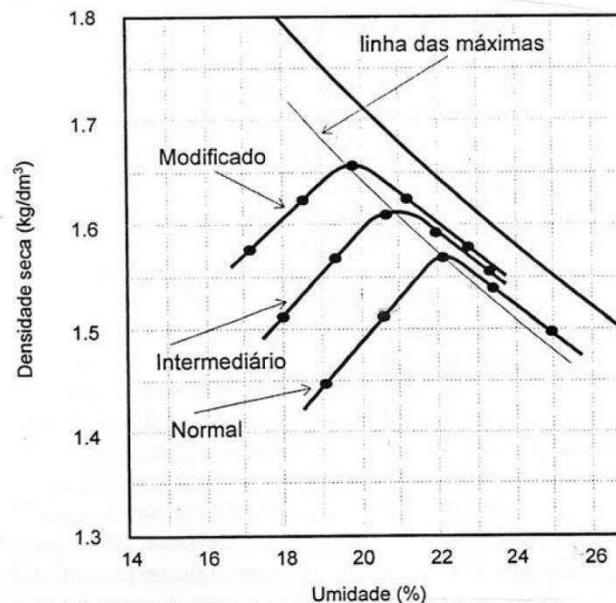
Nº	Nº de camadas	Golpes por camada	Peso do soquete	Altura de queda	Energia
1	5	55	4.54 kg	457 mm	Modificada
2	5	26	4.54 kg	457 mm	Intermediária
3	5	12	4.54 kg	457 mm	Normal
4	3	25	2.50 kg	305 mm	-

Fonte: LAMBE e WHITMAN (1970)

A densidade ou massa específica seca do material, como já havia comentado

anteriormente, varia com a umidade. Se a umidade estiver abaixo da umidade ótima, a massa específica aparentemente seca diminui. Caso a umidade esteja acima da umidade ótima, provoca a diminuição da densidade, pois não consegue expelir o ar dos vazios, como é mostrado na Figura 6 (PINTO, 2000 apud PREUSSLER, 2007, p.10).

Figura 6 - Curva de compactação de solos com diferentes energias



Fonte: PINTO (2000).

#### 2.4.2 Compactação em campo

A técnica de compactação em campo se baseia em dois tipos de serviço (BASTOS, 2008):

- Coleta e lançamento de material de empréstimo vindo de jazida ou do próprio local;
- Passadas de equipamentos que transmitam energia de compactação ao solo, podendo ser por pressão, impacto ou vibração.

O solo deve ser analisado geotecnicamente e então transportado da jazida onde foi coletado, para que possa ser espalhado em camadas soltas com espessura final, geralmente estabelecida entre 15 a 20 cm, pois o efeito dos equipamentos compactadores não atinge maiores profundidades. Para que o solo resulte em uma espessura compactada de 15 cm, deve ser lançado o solo solto entre 22 a 23 cm (PINTO, 2000).

Os equipamentos devem ser escolhidos para cada tipo de solo. Os rolos pé de carneiro, diferentemente dos rolos lisos, são adequados para solos argilosos, pela sua

capacidade de penetração nas primeiras passadas, alcançando a parte inferior da camada, evitando que uma placa superficial seja formada, reduzindo assim a transmissão da energia de compactação, por meio de toda a camada. Os rolos pneumáticos são classificados pela sua eficiência em uma grande variedade de solos, por ter seu peso e pressão dos pneus aplicados em cada caso. Rolos vibratórios são especialmente aplicados para solos granulares, pelo fato de conterem um vibrador acoplado no rolo (PINTO, 2000).

De acordo com o manual do DNIT (2006), a energia ou esforço de compactação em campo pode ser definida como o produto da força exercida na barra de tração pelo caminho percorrido, dividido pelo volume de solo compactado. Essa força ou resistência ao rolamento decresce à medida que o solo vai se densificando, ou seja, a capacidade de compactação diminui na medida em que o equipamento executa as passadas. O manual simplifica, explicando que a energia de compactação é diretamente proporcional ao número de passadas e inversamente proporcional à espessura da camada:

- Quanto maior a camada, menor é a energia transmitida para atingir toda aquela espessura de solo;
- Quanto mais passadas um equipamento compactador em campo realizar naquela camada, maior será a energia que o mesmo transmitirá ao solo.

Como foi comentado logo no início deste tópico, a aplicação da energia de compactação em campo, que pode ser feita por pressão, impacto e vibração (rolo compactadores ou placas vibratórias). Quanto à utilização dos rolos, pode-se concluir que a compactação em campo depende de quatro variáveis: número de passadas do rolo, frequência de vibração, espessura da camada e velocidade de compactação.

#### 2.4.3 Controle de compactação em campo

A compactação do solo é um dos fatores mais críticos na construção de pavimento de rodovias (NAZZAL, 2003). Os métodos atuais de avaliação do controle *in situ* de compactação das camadas do pavimento ainda são baseados na determinação de medidas do peso específico seco ou densidade seca de campo, comparadas com o peso específico máximo obtido nos ensaios de compactação conduzidos no laboratório. Para FIELDLER et al. (1998, apud NAZZAL, 2003, p.1) esses métodos de densidade são considerados perigosos, de mão de obra intensiva, lentos, de precisão baixa e desapropriados em situações onde há diferença entre materiais no campo. Podem ser citados como principais exemplos de equipamentos de medição da densidade em campo o frasco de areia e o densímetro nuclear.

Além disso, desde que os métodos de dimensionamento tenderam à análise mecânica na qual se utiliza o módulo de resiliência como o parâmetro de entrada chave, a medição do módulo de resiliência em campo deve ser logicamente um parâmetro de controle de qualidade da compactação e não mais a densidade, pelo fato de nem sempre se correlacionar com propriedades fundamentais dos materiais (HOSSAIN; APEAGYEI, 2010).

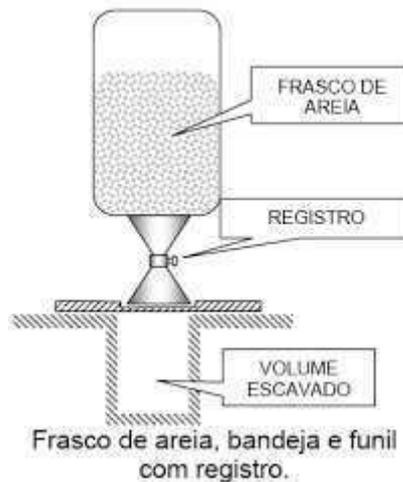
O método do frasco de areia citado nos parágrafos anteriores se refere ao método tradicional utilizado ainda hoje no Brasil para a determinação de parâmetros de compactação. Porém, já existem novos métodos de controle de qualidade da compactação de camadas de pavimento, podendo ser classificados em dois tipos: destrutíveis e não destrutíveis.

#### 2.4.3.1 Métodos destrutíveis

Os métodos destrutíveis, como o nome já está dizendo, são aqueles nos quais é necessária a escavação ou destruição de uma porção de material já compactado em campo para a verificação das suas propriedades. Dentre eles, se destaca o ensaio convencional do “frasco de areia”, regido pela norma DNER-ME 092/94 (Figura 7).

O ensaio se baseia na busca pela densidade aparente seca e teor de umidade em campo para quando forem identificados, possam ser comparados com o ensaio previamente realizado em laboratório: ensaio de compactação. Como já foi dito nos tópicos acima, o ensaio de compactação identifica, por meio de uma curva, o ponto onde a densidade aparente seca do material atinge a máxima e o teor de umidade é ótimo. Com essas características, de acordo com o princípio fundamental da compactação, apesar de não implicar ao solo uma resistência máxima, apresenta uma maior estabilidade sob adversidades climáticas (BASTOS, 2008).

Figura 7 - Frasco de areia, bandeira e funil



Fonte: <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2012/11/controle-de-compactac3a7c3a3o-cbr.pdf> (acesso em 25/05/2016)

#### 2.4.3.2 Métodos não destrutíveis

Os métodos não destrutíveis são aqueles que utilizam procedimentos indiretos de verificação das características de compactação (PREUSSLER, 2007).

Dentre os métodos não destrutivos existentes para controle de compactação, podem ser destacados (FERRI, 2013 apud MAIA, 2016):

- *Portable Seismic Property Analyser* (PSPA)
- *Soil Stiffness Gauge* (GeoGauge);
- Cone de penetração dinâmica ou cone sul-africano (DCP);
- Deflectômetros de impacto (LWD e FWD).

O PSPA é um ensaio ultrassônico que determina as propriedades elásticas do solo (módulos de elasticidade e cisalhamento) além da espessura das camadas do pavimento (Figura 8). O equipamento consiste em dois receptores de ondas (geophones), uma fonte de produção de ondas ultrassônicas superficiais e um sistema computacional de aquisição de dados. A fonte objetiva gerar ondas de alta frequência, as quais são recebidas horizontalmente pelos dois receptores. A análise dos dados computa as velocidades de ondas sísmicas superficiais (Rayleigh waves) em determinadas frequências e assim pode ser relacionada com o módulo cisalhante (G) e elástico (E) (RATHJE et al, 2006).

Figura 8 - Portable Seismic Pavement Analyser (PSPA)

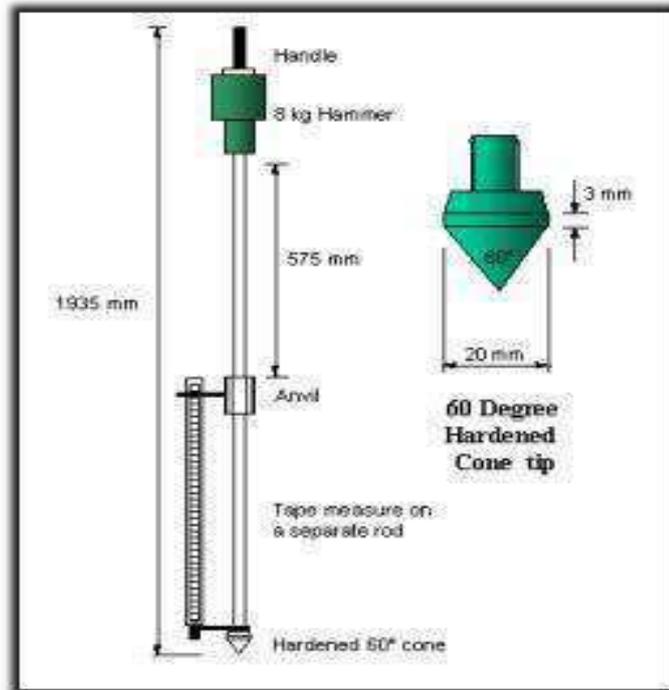


Fonte: (CELAYA; YOUNG; NAZARIAN, 2009).

O DCP é largamente usado na avaliação *in situ* da resistência de materiais de pavimento e subleito. Preussler (2007) afirma que o equipamento foi projetado para uma medição rápida das propriedades estruturais do pavimento, construído com materiais heterogêneos a partir da relação de golpes necessários para penetração de um cone com dimensões especificadas, de acordo com a camada em estudo.

O ensaio DCP (Figura 9) objetiva verificar a espessura, o grau e a uniformidade da compactação das camadas do pavimento, sendo uma ótima ferramenta para o controle de compactação durante a construção do pavimento. Livneh (1989, apud PREUSSLER, 2007) relata que os ensaios com o DCP obtiveram boas correlações com o ensaio de CBR.

Figura 9 - Cone de penetração dinâmica



Fonte: Pavement Interactive (2009).

Segundo SCULLION (1999, apud PREUSSLER, 2007) o FWD é um equipamento que consiste na medição de deslocamentos verticais recuperáveis na superfície do pavimento, quando este é submetido à aplicação de cargas, auxiliando na avaliação da capacidade das camadas do pavimento em resistir esforços decorrentes da carga do tráfego.

O equipamento é um defletômetro de impacto projetado para simular o efeito de cargas de roda em movimento. Isto é percebido na queda de um conjunto de massas, proveniente de uma altura fixada sobre um sistema de amortecedores de borracha, que transmitem a força aplicada a uma placa circular apoiada no pavimento. Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento são medidos por 7 geophones (transdutores de velocidade) instalados na placa de carga e ao longe de uma barra metálica (DYNATEST, 1995).

Já o equipamento LWD (Figura 10), constitui um sistema de ensaio dinâmico em placa de carga, empregado para também medir deformabilidade das camadas do pavimento, sendo utilizado especificamente para o controle de qualidade do subleito, sub-base e base. O LWD apresenta geophones adicionais, célula de carga para medir força de impacto e um software específico para coleta de informações (PREUSSLER, 2007). As deflexões encontradas pelo ensaio permitem o cálculo do módulo de elasticidade (E) e resiliência (MR) do material.

Figura 10- Deflectômetro de impacto



Fonte: <http://www.asfalt-advies.nl/light-weight-deflectometer/> (acesso em 25/05/2016)

## 2.5 GeoGauge H-4140

Segundo Fiedler et all (1998 apud GUDISHALA, 2004, p.23), com a necessidade de obtenção de um aparelho de controle de compactação mais rápido, mais barato, mais seguro e mais preciso, a Administração de Rodovias Federais dos Estados Unidos (FHWA) se uniu com o Departamento de Administração de Programas de Pesquisas Avançadas de Defesa (ARPA) para copatrocinar um estudo investigativo do uso possível de uma tecnologia militar. O produto resultante é chamado de Soil Stiffness Gauge (SSG) ou Geogauge, produzido pela Humboldt Manufacturing Company em Chicago (US) (Figura 11).

Figura 11 - GeoGauge H-4140 em seu primeiro teste dentro da caixa



Fonte: O AUTOR (2016).

Este ensaio de campo de medida de rigidez e módulo de elasticidade, conhecido como GeoGauge (Soil Stiffness Gauge – SSG) é rápido e prático na medição de propriedades dos estruturais das camadas dos pavimentos. O dispositivo pode ser utilizado no controle de qualidade das camadas do pavimento durante sua execução em campo, com o objetivo de atingir os critérios adotados no dimensionamento (BATISTA, 2007).

De acordo com o H-4140 Manual Geogauge (2014), o Geogauge pode ser usado em campo para estimar CBR e Módulo de Resiliência. Além disso, pode ser usado para avaliar a resistência a mais que o material ganhou por algum tipo de estabilização e também para o controle de compactação de bases e subbases compactadas.

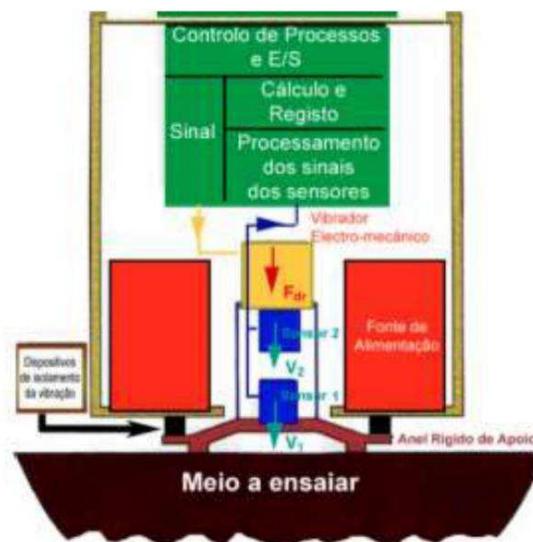
O GeoGauge mede a impedância mecânica do material na superfície do solo. Em outras palavras, ele mede a força lançada para o solo e a deflexão resultante da superfície como uma função de frequência. A rigidez, força sobre deflexão, resulta diretamente da impedância. O ensaio se realiza quando o equipamento impõe ao solo pequenos deslocamentos ( $<1,27 \times 10^{-6}$  m) a 25 frequências fixas entre 100 e 196 Hz. Para cada um dos 25 estágios de frequência é determinada uma rigidez, e no final do ensaio, a média entre os valores de rigidez é exibida na tela no aparelho (Manual H-4140 GeoGauge, 2014).

É um ensaio extremamente rápido com duração de 75 s. Além disso, sob frequências baixas, a rigidez é correspondente à impedância e proporcional ao módulo de cisalhamento do solo. O usuário precisa somente entrar com o valor do módulo de Poisson do material, e a partir

disso, os módulos de cisalhamento e de elasticidade são determinados pelo equipamento (BATISTA 2007). Para cada faixa é calculado o desvio padrão, sendo a precisão das medidas de mais ou menos 5%. O equipamento funciona com 6 pilhas D-cell descartáveis e alcalinas, com duração de 500 até 1500 medidas e sua temperatura de operação é em torno de 0 até 38 °C.

Fiedler et al (1998 apud GUDISHALA, 2004) citou que o Geogauge é um instrumento cilíndrico de 28 cm de diâmetro, 25,4 cm de altura, com 88 mm de diâmetro interno e 114 mm de diâmetro externo, pesando em torno de 10 kg. Geogauge utiliza tecnologia da indústria de defesa dos Estados Unidos, que tem capacidade para medir pequenas deformações sob pequenas cargas. Sawangsuriya et al. (2002) mediu a força gerada pelo Geogauge, a qual resultou em 9 N. Essa força é transmitida para o solo, por meio do anel metálico, que pode ser encontrado na parte inferior do aparelho (Figura 12).

Figura 12 - Princípio de operação do GeoGauge



Fonte: MENDES (2013, apud MAIA, 2016).

A pequena vibração vertical causada pelo eletromecânico vibrador produz uma pequena e harmônica excitação vertical no anel, resultando em uma pequena harmônica deflexão na interface solo-anel. A medida da deflexão do solo  $\delta$  e a força aplicada  $F$  podem ser por sua vez usadas para calcular a rigidez do meio granular subjacente. A rigidez obtida pelo Geogauge pode ser utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade, baseando-se na equação de EGOROV (1965)

$$K = \frac{F}{\delta} = \frac{ER}{(1 - \nu^2)\omega(n)} \quad (1)$$

Onde  $E$  e  $\nu$  são módulos de elasticidade e Poisson do meio elástico, respectivamente,  $R$  é o raio externo no anel anular e  $\omega(n)$  é a razão entre o raio interno e raio externo do anel anular (LENKE et al., 1999). Pelo parâmetro da geometria do anel  $\omega(n) = 0,565$  e conseqüentemente a equação se reduz a

$$K = \frac{1,77ER}{(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

Para Batista (2007), o módulo de elasticidade e rigidez são duas propriedades diferentes. O módulo refere-se a uma propriedade do material; já a rigidez é uma propriedade da estrutura. O módulo não apresenta nenhum limite físico; enquanto a rigidez é influenciada pela sua estrutura, condições limites e pelo módulo dos materiais que a constituem. A rigidez varia de acordo com a espessura da camada.

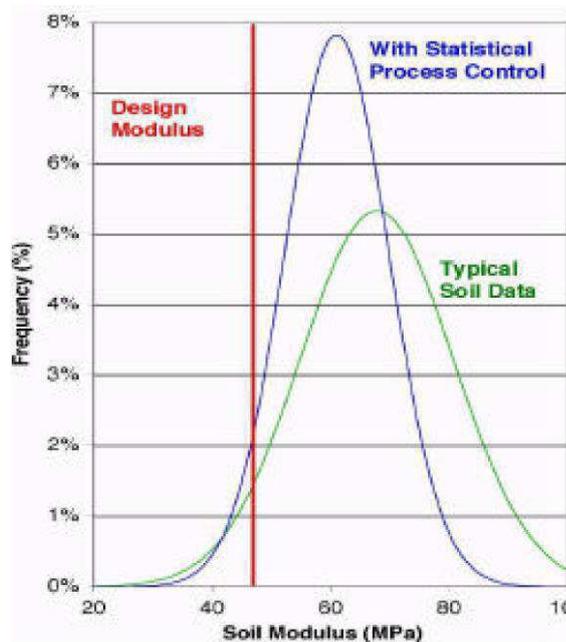
Sendo a deflexão um parâmetro a ser controlado em obras de pavimentação, a possibilidade de imediata verificação de variações de propriedades de cada camada e de exibição de regiões menos rígidas que outras (falta de uniformidade), torna-se uma oportunidade para melhorar o controle tecnológico do processo de compactação e de construção de pavimentos, melhorando assim a durabilidade da construção, diminuindo assim gastos futuros com a manutenção dessas obras (CAVALCANTE; FERNANDES, 2010).

O uso do Geogauge no controle estatístico na compactação de aterros em pavimentos é capaz de evitar uma compactação insuficiente ou super compactação. O benefício disso pode ser explicado pela Figura 13. A curva normal de distribuição em verde, que está marcada como dados típicos do solo, foi criada para 140 medições feitas em solo arenoso, para assentamento de bueiro circular do projeto de um interceptor de esgoto no estado de Minnestota,

EUA.

O módulo principal é 67,7 MPa, e o desvio padrão é de 12,9 MPa, resultando em um coeficiente de variação de 19%. Pode-se assim dizer que em 95% das medições, o módulo encontrado foi superior ao módulo utilizado no projeto, que é de 46.5 MPa (linha vermelha).

Figura 13 - Controle estatístico no processo de compactação



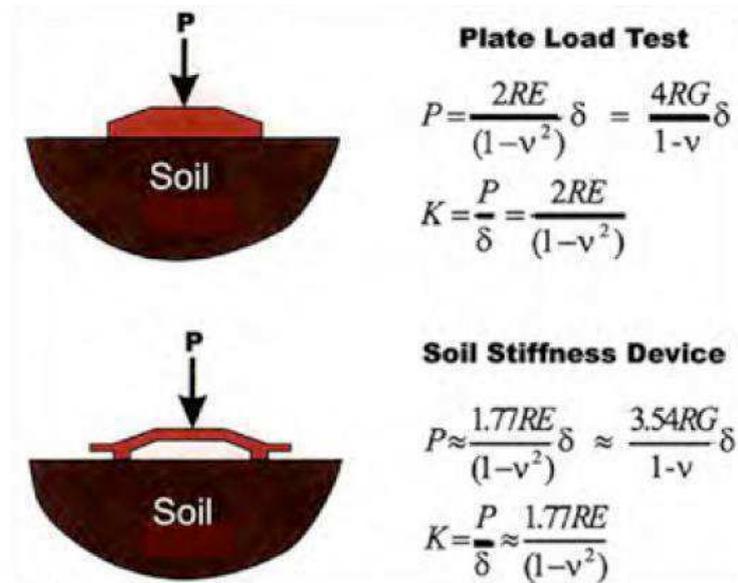
Fonte: White Paper Humboldt Mfg. Co (2010).

Assume-se que instituir um programa de controle estatístico usando o Geogauge, o processo de compactação pode ser interrompido assim que for atingida a rigidez de projeto ao invés de completá-la pelo método especificado de compactação (número de passadas pelo rolo com um determinado peso, frequência e velocidade). Dessa forma, é possível que a construtora utilize um menor esforço de compactação (número de passadas), reduzindo a média entre os módulos, como mostra na curva em azul (*with statistical process control*), uma redução de 30% no esforço de compactação.

Cavalcante (2010) ainda mostra que a vantagem da utilização do GeoGauge no campo comparado a outros equipamentos é que ele impõe tensões que se encontram dentro da fase elástica do solo, retratando valores reais e precisos de módulos de elasticidade para o solo.

As medidas mostradas pelo Geogauge intencionalmente se correlacionam às medidas de módulo de elasticidade até o máximo permitido pelas condições típicas do local. Isso permite que as medidas do Geogauge sejam relacionadas às medidas de módulo de resiliência, como mostra a Figura 14 (Manual H-4140 Geogauge, 2014).

Figura 14 - Correlação Rigidez x Módulo



Fonte: H-4140 Manual GeoGauge, 2014.

Conforme a norma ASTM D6758, o alcance de medição do GeoGauge é:

	De	Para
→ <b>Rigidez:</b>	MN/m (klbf/in) 3 (17)	MN/m (klbf/in) (399)
→ <b>Módulo de Young:</b>	MPa (kpsi) 26.2 (3.8)	MPa (kpsi) 610 (89)
→ <b>Precisão de medição (coeficiente de variação):</b> < 10%		
→ <b>Profundidade de medição (da superfície):</b> 220 to 310 mm (9 to 12 in.)		
→ <b>Calibração (precisão % da massa atual):</b> < +1% (Laboratório)		

### 2.5.1 Estudos já realizados com GeoGauge H-4140

Podem ser destacados abaixo alguns estudos sobre Geogauge no Brasil e no mundo.

Hossain e Apeagyei (2010) estudaram o uso do *lightweight deflectometer (LWD)*, do *Geogauge* e do *dynamic cone penetrometer (DCP)* para a avaliação da qualidade de subleitos e bases compactadas. Foi encontrada uma grande variabilidade dos resultados de rigidez, porém nenhuma correlação significativa foi identificada entre os resultados dos dispositivos. O efeito da variação da densidade aparente seca com a rigidez medida pelos aparelhos não foi

considerável, apresentando fracas correlações. Investigações laboratoriais indicaram um aumento na rigidez pelo LWD em baixo grau de saturação do solo, por causa da sucção do solo e em alto grau de saturação pela ação da poropressão, além da carga natural do ensaio LWD. O Geogauge e o DCP não apresentaram mudanças significativas da rigidez, devido ao grau de saturação.

Batista (2007) objetivou descobrir e analisar diferentes metodologias para a determinação de parâmetros de deformabilidade das camadas constituintes de um pavimento do Distrito Federal (duplicação da via L3 Norte) visto que nas últimas décadas tem crescido a necessidade por uma análise mecânica dos pavimentos. Dentre os ensaios de campo utilizados no subleito, sub-base e base foram a viga Benkelman, GeoGauge, penetrômetro PANDA e o pressiômetro Pencil. Além disso, foram encontrados a densidade aparente seca e teores de umidade. Concluiu-se que o GeoGauge é uma alternativa bastante eficaz na avaliação estrutural dos pavimentos, pois determina os módulos de deformabilidade dos materiais do pavimento e, além disso, é um equipamento de baixo custo de aquisição, fácil manuseio e ágil na execução dos ensaios e, por fim, possibilita o controle de qualidade da compactação, evitando assim futuras manutenções.

Scullion (2001) abordou em sua pesquisa um simples e econômico método de construção desenvolvido na Europa e implementado nos Estados Unidos-Texas, que minimiza as fissuras por contração em bases de solo com aditivos de cimento.

O estudo se baseia na tentativa de diminuir o problema das fissuras por retração, avaliando a possibilidade de induzir microfissuras na base, uma vez que elas previnem o desenvolvimento de largas fissuras sem significativamente afetar a rigidez da base. Após dois dias da finalização da compactação da base cimentada, um rolo compactador vibratório passou 4 vezes, a fim de induzir microfissuras na base de solo-cimento e reduzir a rigidez em 40%. A rigidez foi medida em tempo real pelo equipamento GeoGauge, escolhido por executar medições rapidamente e não necessitar de nenhuma licença de segurança e pelo *Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Como esse processo ocorreu poucos dias depois da compactação da base, não gerou uma diminuição na capacidade de carga do pavimento, pelo contrário, à medida que as microfissuras foram se curando, proporcionaram a base um ganho de resistência com o tempo. Concluiu-se que os locais que passaram pelo método das microfissuras, apresentaram uma redução em 50% de trincas em relação àqueles que não passaram por tal método.

Maia (2016) objetivou fazer uma análise comparativa dos parâmetros de deformabilidade em camadas granulares, por meio de resultados de teste em campo e em laboratório. O foco da sua pesquisa foi fazer uma comparação do módulo de resiliência

encontrado pelo Geogauge em campo, com o módulo encontrado pelo ensaio Triaxial Cíclico em laboratório.

Nesse processo, o módulo de resiliência foi medido em duas condições: na densidade seca máxima e umidade ótima encontrada em laboratório e na densidade seca e umidade ótima que o material se encontrava em campo. Concluiu-se que foi possível observar uma similaridade em relação aos módulos obtidos em campo pelo equipamento Geogauge e os módulos médios encontrados em laboratório. Módulos baixos encontrados pelo Geogauge também resultaram em módulos médios baixos encontrados em laboratório e módulos elevados encontrados pelo Geogauge resultaram em módulos médios elevados encontrados em laboratório.

Nazzal (2003) objetivou avaliar o uso de três equipamentos não destrutíveis para medir características de rigidez de materiais para pavimentação, controle e garantia de qualidade da compactação: Geogauge, *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* e o *Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)*. Além disso, os ensaios *California Bearing Ratio (CBR)*, *Plate Load Test (PLT)* e *Falling Weight Deflectometer (FWD)* foram realizados também durante o trabalho. Boas correlações foram encontradas entre o Geogauge, DCP e LFWD e os testes padrões FWD, PLT e CBR.

Gudishala (2004) desenvolveu modelos para estimar o módulo da base e subleito de solos por meio do equipamento Geogauge. Dentre os solos considerados, dois tipos de solos coesivos e três tipos de solos granulares foram usados na pesquisa. Foram encontradas correlações entre o módulo de resiliência e os resultados obtidos pelo Geogauge, além de propriedades básicas do solo.

Alshibli et al. (2005) avaliou o potencial do Geogauge no controle e garantia de qualidade de subleitos e camadas de base granulares compactadas. Concluiu-se que o Geogauge pode ser usado para calcular o módulo e rigidez de camadas de solo compactadas.

Simmons (2000) relatou em seus estudos com o Geogauge que é muito difícil se obter uma área de contato do equipamento com o solo em mais de 60%, como recomendando em norma, o que interfere nos resultados. Miller e Mallick (2003) evidenciaram a preocupação com o mau funcionamento do GeoGauge, causado por vibrações de equipamentos de compactação ou trens.

## 2.6 Propriedades mecânicas do solo

### 2.6.1 Considerações gerais

Como já foi mencionado nos tópicos anteriores, a tendência ao método mecanicista de dimensionamento de pavimentos constitui a prática de técnicas que permitam a verificação da resiliência e do comportamento resiliente dos solos para camadas de pavimentos. No caso do módulo de resiliência, o ensaio triaxial de cargas dinâmicas é geralmente empregado. Porém, no Brasil, ainda se utiliza muito na prática o ensaio de California Bearing Ratio (CBR) para determinação da capacidade de suporte dos materiais de subleito, sub-base e base.

Lenke et al. (1999) disse que a rigidez é uma propriedade fundamental na habilidade de resistir a cargas superficiais do que medições de densidade obtidas por métodos de compactação. Métodos de dimensionamento de pavimentos mais racionais utilizam a rigidez ou o módulo de elasticidade para a determinação da espessura de cada camada do pavimento.

Pode-se afirmar que o módulo de resiliência do material é uma estimativa do módulo de elasticidade. Enquanto o módulo de elasticidade é a razão da tensão pela deformação para cargas aplicadas lentamente, o módulo de resiliência é a razão da tensão pela deformação para cargas aplicadas rapidamente, como aquelas que agem no pavimento pelo tráfego (PAVEMENT INTERACTIVE, 2007).

É de extrema importância entender sobre cada propriedade citada acima.

### 2.6.2 California Bearing Ratio – CBR

O ensaio California Bearing Ratio (CBR) é considerado um ensaio simples e utilizado como um indicador de suporte ou resistência dos solos e materiais granulares ou solos de subleito, sub-base e base na pavimentação. Seu nome veio com base no seu desenvolvimento pela Divisão de Estradas do Estado da Califórnia – EUA, e o seu valor encontrado por meio do ensaio CBR em laboratório é utilizado no dimensionamento de pavimentos na etapa de seleção de materiais e também no controle tecnológico de terraplenos e subleito. O ensaio de CBR se baseia na resistência à penetração do solo a ser ensaiado, comparado à resistência de um material pétreo padrão classificado para emprego em base (PREUSSLER, 2007, p.18).

### 2.6.3 Módulo de Resiliência

O termo ‘resiliência’ foi adotado por Francis Hveem (1955), que analisou o pavimento como uma estrutura de multicamadas, com a finalidade de compreender que as deformações ocorridas no pavimento são maiores que as deformações ocorridas em outros materiais, tais como o concreto, a madeira e o aço. Resiliência pode ser considerada a energia absorvida por um material quando se deforma elasticamente, sendo retirada imediatamente após cessar por completo as tensões causadoras das deformações.

Para Seed (1962 apud GUDISHALA, 2004, p.7), módulo de resiliência significa a razão entre a tensão desvio e a deformação recuperada sob ação de cargas dinâmicas transientes (Figura 15). Pelo fato de ser geralmente referido como uma medida ou parâmetro de rigidez de materiais granulares do pavimento, o módulo de resiliência ganhou popularidade pelas comunidades do pavimento, ao ser descoberto que a deformação resiliente tinha melhores correlações com o desempenho do pavimento do que a deformação total. Em consequência disso, foi reconhecido como o modo de caracterização para todas as camadas do pavimento (GUDISHALA, 2004, p.7).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3)$$

Onde:

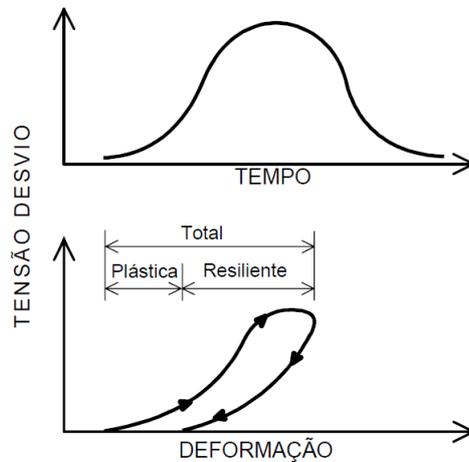
$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2$  = tensão desvio aplicada repetidamente no eixo central, MPa;

$\sigma_1$  = tensão principal maior, MPa;

$\sigma_3$  = tensão principal menor ou tensão de confinamento, MPa;

$\varepsilon_r$  = deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm;

Figura 15 - Relação tensão-deformação típica nas camadas dos pavimentos



Fonte: ELLIOT e THORNTON (1988).

Medina e Motta (2005 apud BATISTA, 2007, p.25), citaram que as deformações resilientes são responsáveis pela fadiga das camadas mais superficiais, como o revestimento de concreto asfáltico e a base, pois elas sofrem mais o efeito da flexão. Para Batista (2007), a fadiga é a última fase da vida útil do pavimento que, devido às deflexões constantes, traz como consequência o aparecimento de trincas e/ou deformações permanentes no pavimento.

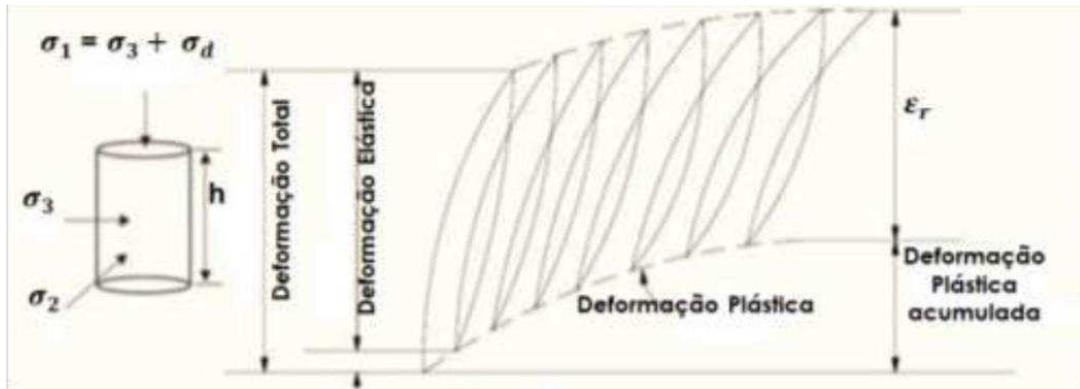
Para isso, foi necessário simular essa condição na qual as cargas repetitivas provenientes do tráfego atingissem a estrutura das camadas do pavimento. Para tanto, foram desenvolvidos ensaios em laboratório, dentre eles o ensaio triaxial de cargas repetidas (BATISTA, 2007).

O ensaio triaxial de carga repetida se baseia em uma força axial aplicada na amostra sempre no mesmo sentido de compressão, de zero até um valor máximo e depois ocorre a redução do esforço até a sua anulação, simulando exatamente a condição de um pneu passando sobre o pavimento. A frequência de pulso (amplitude e tempo) é representada pelo fluxo dos veículos (Medina e Motta 2005, apud BATISTA, 2007, p.25).

Para Pinto e Preussler (2002 apud PREUSSLER 2007, p.21), a força axial é aplicada a partir de um pistão, que ao pressionar o corpo de prova, gera uma pressão que é transmitida a uma válvula de pressão, que é aberta e fechada por um comando computadorizado. Quando aberta, a pressão é transmitida para o corpo de prova por uma borracha envoltória. Ao ser fechada, a transferência de pressão do ar é cessada até chegar a zero. Os deslocamentos resilientes são medidos por dois transdutores mecano-eletromagnéticos conhecidos por LVDT's (linear variable differential transducers) acoplados ao corpo de prova.

A norma responsável pela metodologia de ensaio para a determinação do módulo de resiliência de solos, para várias cargas, a partir de uma câmara triaxial de cargas repetidas é a DNER –ME 131/94. A representação gráfica das tensões e deformações causadas pelo ensaio triaxial dinâmico está indicada na Figura 16.

Figura 16 - Tensões e deformações no ensaio triaxial dinâmico



Fonte: BASTOS (2013, apud MAIA, 2016).

$$MR = \sigma_d / \epsilon_r \quad (4)$$

$$\epsilon_r = \Delta h / h_0 \quad (5)$$

Onde:

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2 =$  tensão desvio aplicada repetidamente no eixo central, MPa;

$\sigma_1 =$  tensão principal maior, MPa;

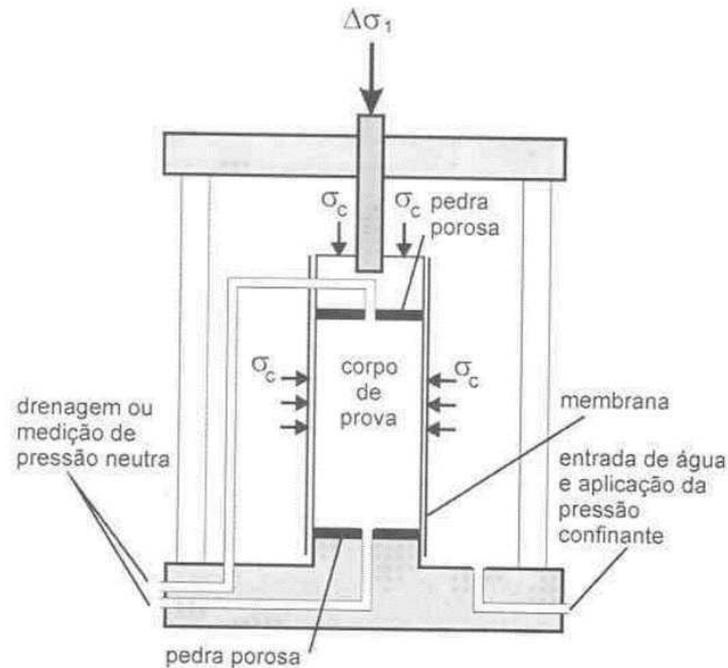
$\sigma_3 =$  tensão principal menor ou tensão de confinamento, MPa;

$\epsilon_r =$  deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm;

$\Delta h =$  deslocamento vertical máximo;

$h_0 =$  comprimento inicial de referência do corpo de prova

Figura 17 - Esquema da câmara de ensaio triaxial



Fonte: PINTO (2000)

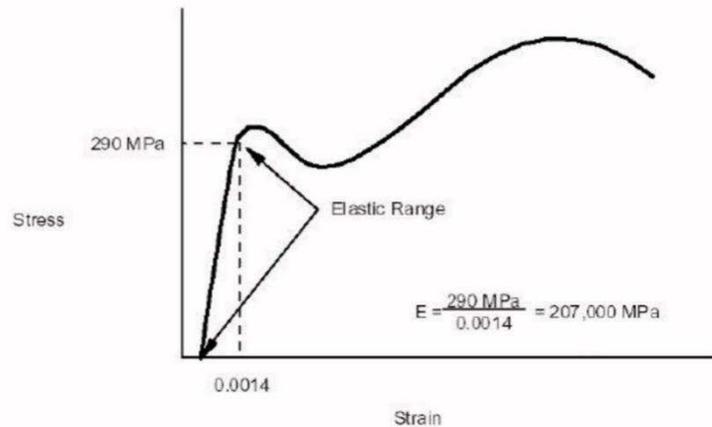
#### 2.6.4 Módulo de elasticidade

Módulo de Young do solo, geralmente chamado de módulo de elasticidade, é um parâmetro elástico e uma medida de rigidez do solo. É definido como a razão entre a tensão e deformação no intervalo, onde o comportamento do solo é elástico ou a mudança do comprimento do material da sua forma original sob uma tensão como mostra a Figura 18.

O módulo de elasticidade é frequentemente utilizado para estimar adensamento dos solos e análise da deformação elástica (<http://www.geotechdata.info/parameter/soil-young's-modulus.html>, acesso em 28/05/2016). Além disso, o módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida de rigidez e depende da composição química, microestrutura e defeitos do material.

$$E = \frac{\textit{tensão}}{\textit{deformação}} \quad (6)$$

Figura 18-Fase elástica do solo



Fonte: PAVEMENT INTERACTIVE (2007)

### 2.6.5 Rigidez

Rigidez é uma propriedade da engenharia de uma estrutura e uma medida de resistência à deflexão. Ela leva em conta todas as propriedades físicas, tais como a largura, espessura e comprimento, o módulo do material e a tensão, carga ou suporte em um determinado componente, ou seja, a rigidez altera se qualquer uma dessas características forem alteradas.

Em outras palavras, para os projetistas é conhecido como a força máxima para uma determinada deflexão, sem que ocorra a deformação permanente. Valores altos de rigidez correspondem a uma menor deflexão, o que corresponde a uma maior vida útil do pavimento que evita uma maior quantidade de manutenção e ao mesmo tempo gera uma maior economia de capital. Além disso, a rigidez é mais sensível e mais variável que densidade, e por isso pode-se mais facilmente monitorar e controlar a uniformidade com o Geogauge durante o processo de compactação (White Paper Geogauge, 2000).

Saber somente o módulo não é suficiente, pois se torna crítico estabelecer a espessura no local de construção. Empresários são duramente pressionados a ter certeza de que a espessura especificada em projeto foi alcançada em campo, pois, o fato de ela ser desconhecida, contribui para a não uniformidade que impacta a vida do pavimento. Logo, não é aceitável falar sobre algum trabalho de terraplanagem em termos de módulo sem alguma referência de suas condições limites. O módulo de um material é o mesmo se esse material medir 0,1 m ou 1,0 m de espessura. Porém, sua rigidez é muito diferente (Geogauge white paper Rev. 072600, 2000).

## 2.7 Correlações entre módulo de resiliência e CBR

Medina, Pinto e Preussler (1979) desenvolveram a equação apresentada abaixo para solos argilosos, deixando claro que o CBR é obtido em condições padronizadas de ensaio, diferentemente do Módulo de Resiliência, o qual é obtido por meio de tensões de confinamento e de desvio no corpo de prova.

$$M_r = 326 + 67 (CBR) \quad (\text{Kgf/cm}^2) \quad (7)$$

Onde:

$M_r$  = Módulo de resiliência de solo argiloso compactado na umidade ótima e determinado a tensão-desvio de 0,2 MPa (2kgf/cm<sup>2</sup>);

CBR = Índice de Suporte Califórnia de amostras "saturadas" mergulhadas na água por 4 dias (%).

Segundo Nazzal (2003), a equação de correlação de módulo de resiliência e CBR proposta por Heukelom e Klomp (1962), foi adotada pelo manual da AASHTO (1993) para o dimensionamento de pavimentos:

$$M_r(\text{psi}) = 1500 * (CBR) \quad \text{ou} \quad M_r(\text{MPa}) = 10,34 * (CBR) \quad (8)$$

Outra correlação entre o módulo de resiliência do subleito e (CBR) foi sugerida por POWELL et al (1984) (NAZZAL, 2003) mostrada em seguida:

$$M_r(\text{psi}) = 2250 * (CBR)^{0,64} \quad \text{ou} \quad M_r(\text{MPa}) = 17,58 * (CBR)^{0,64} \quad (9)$$

De maneira geral, nota-se que não existe unanimidade quanto ao coeficiente de correlação entre as formulações supracitadas, ocorrendo uma expressiva variação dos valores adotados. Percebe-se ainda que as equações listadas anteriormente não expõem de forma clara a metodologia para encontrar esses fatores de correlação, tornando duvidosa essa metodologia para aplicação nos cálculos de dimensionamento de pavimentos ferroviários (GOMES et al., 2015).

Medina (2005 apud GOMES et al., 2015, p.15) critica correlações entre o módulo de resiliência  $E$  (kgf/cm<sup>2</sup>), e o CBR do solo, relatando que são estabelecidas de modo grosseiro ou aproximado e ainda cita que a penetração CBR submete a amostra a deformações plásticas

elevadas, ao passo que o módulo se determina a pequenas deformações após grande número de ciclos de carregamento e descarregamentos.

É notório que o Módulo de Resiliência e o CBR determinam diferentes propriedades do solo, e a correlação direta entre esses ensaios não relaciona variáveis com as mesmas características. Por esse motivo, identificar um coeficiente de correlação entre esses ensaios não reproduz a realidade dos nossos solos e que sob o aspecto de deformabilidade, as metodologias convencionais para determinar a tensão admissível do pavimento também não são adequadas para a realidade dos nossos solos (GOMES et al., 2015).

Gomes et al (2015), em sua pesquisa, concluiu que se pode afirmar que o método empírico baseado nos valores de CBR está ultrapassado, apresentando resultados que não revelam a real capacidade de suporte de um pavimento; e o grande agravante é o fato de ocorrerem casos em que o solo apresenta baixo valor de CBR, sendo dessa forma descartado, embora possa ter alta resistência à deformação permanente. Como consequência, oneramos nossas obras, pelo fato de não conhecermos intimamente nossos materiais.

## 2.8 Correlação existente entre CBR e rigidez

O CBR pode ser estimado de medições do GeoGauge, usando a equação na qual o CBR está em porcentagem (%) e o  $K_{GEO}$  é a rigidez obtida pelo Geogauge em MN/m. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para todas as medidas enquadradas nesta equação é 0.84.

$$CBR = 0,0039 (8.672K_{GEO})^2 - 5,75 \quad R^2 = 0.84 \quad (10)$$

Esta correlação foi estabelecida pelo Louisiana Department of Transportation (2004) de Louisiana, utilizando medidas obtidas pelo Geogauge em locais compactados e medidas de CBR com amostras coletadas do mesmo local onde foi utilizado o Geogauge. A relação pode ser usada para solos com adição de cimento e cal, solos coesivos e granulares.

## 2.9 Correlações existentes entre o módulo obtido pelo Geogauge e o módulo de resiliência obtido em laboratório

Mohammad et al. (2008), desenvolveu um estudo, com o objetivo de desenvolver modelos de identificação do módulo de resiliência, para possíveis aplicações nos procedimentos de controle e garantia de qualidade da compactação em camadas de pavimento. Os testes de

campo se basearam na utilização do *Geogauge, Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)* e *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*. Em laboratório, foi utilizado o ensaio triaxial cíclico para a determinação do módulo de resiliência.

Com uma simples regressão linear, consegue-se desenvolver uma correlação entre o módulo de resiliência obtido pelo Geogauge em campo e o módulo obtido em laboratório para solos coesivos.

$$M_r = 6,74 + 0,03E_{GEO} \quad R^2 = 0.59 \quad (11)$$

$$M_r = -2,023 + 0,027 (E_{GEO})^{0,8} + 87,24 \frac{1}{w^{0,78}} \quad R^2 = 0.72 \quad (12)$$

Onde,

$M_r$  = módulo de resiliência (ksi),

$E_{GEO}$  = módulo obtido pelo Geogauge (ksi), e

$w$  = water content (%).

Gudishala (2004) em sua pesquisa, como dito anteriormente, avaliou três aparelhos de campo incluindo o Geogauge para tentar descobrir modelos estatísticos de correlações do módulo de resiliência obtido em campo e em laboratório.

$$M_r = 20.3(E_{GEO})^{0.54} \quad R^2 = 0.83 \quad (13)$$

$$M_r = 86,7 \frac{E_{GEO}^{0,3}}{w\%} 2,2\gamma_d \quad R^2 = 0.67 \quad (14)$$

Onde,

$M_r$  = módulo de resiliência (Mpa),

$E_{GEO}$  = módulo obtido pelo Geogauge (Mpa),

$w$  = umidade (%) e

$\gamma_d$  = densidade aparente seca ( $g/cm^3$ )

### **3 MATERIAIS E METODOLOGIA**

#### **3.1 Tipo de estudo**

Este trabalho foi caracterizado por um estudo monográfico experimental qualitativo, no qual foram realizadas revisões bibliográficas de teorias e por ensaios laboratoriais e de campo.

#### **3.2 Coleta do material**

O material foi coletado por meio de uma escavadeira hidráulica em jazida no bairro da Mata, na zona rural de São Luis do Maranhão e colocado em caminhão transportador até as proximidades do Laboratório de Solos e Pavimentação da UEMA (LSP).

#### **3.3 Ensaio realizados**

##### **3.3.1 Ensaio de caracterização**

Os ensaios de caracterização do solo coletado foram desenvolvidos no Laboratório de Solos e Pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão. A caracterização física do solo de base se deu por meio dos ensaios de análise granulométrica e de determinação dos índices de consistência ou Limites de Atterberg enquanto a caracterização mecânica se deu por meio dos ensaios de CBR e compactação.

A norma brasileira utilizada neste trabalho para o ensaio de granulometria no solo foi a DNER-ME 051-94. (Para a preparação das amostras, foi utilizada a norma DNER-ME 041-94 Amostra de solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização).

A preparação do solo para o ensaio se baseou nos processos de secagem, desmanche de torrões, repartição da amostra, homogeneização e peneiramento. Após o processo de preparação, iniciou-se o ensaio de granulometria, passando na peneira da malha de 2,0 mm a amostra. Desse material, lavou-se o que estava retido e colocou-se para secar em estufa até atingir constância de peso para realizar o peneiramento grosso.

Da fração de solo que passou na peneira de 2,0 mm, seguiu para os processos de sedimentação e peneiramento fino. Para a realização da sedimentação, foi necessário misturar uma solução de hexametáfosfato de sódio como defloculante, com a quantia de solo pré-

determinada em norma. Após ter ficado em repouso por 12 horas, esse material foi transferido para o aparelho dispersor, sendo logo depois transferido para uma proveta, preenchido com água destilada e agitado em movimentos de rotações. Durante a realização do ensaio, um densímetro foi colocado no interior da proveta para a medição das leituras, de acordo com o tempo de sedimentação das partículas de solo. A duração do ensaio de sedimentação é de 24 horas, o que corresponde à última leitura. O peneiramento fino é realizado com o material proveniente da sedimentação, o qual deve ser seco em estufa até constância de peso e então peneirado em todas as peneiras após a de 2,0 mm (Figura 19).

Figura 19 - Fase de caracterização por sedimentação



Fonte: O AUTOR (2016).

Para a realização do peneiramento grosso e fino foi utilizado o agitador de peneiras do Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Fase de peneiramento das amostras de solo



Fonte: o AUTOR (2016).

O ensaio de Limite de Liquidez (LL) é preconizado pela norma DNER-ME 122-94 (Solos – Determinação do Limite de Liquidez), na qual se pode encontrar o valor da umidade que determina a passagem da fase plástica para a fase líquida do solo. Por outro lado, qualquer diminuição no teor de umidade caracteriza o seu estado como plástico, podendo ser facilmente moldado.

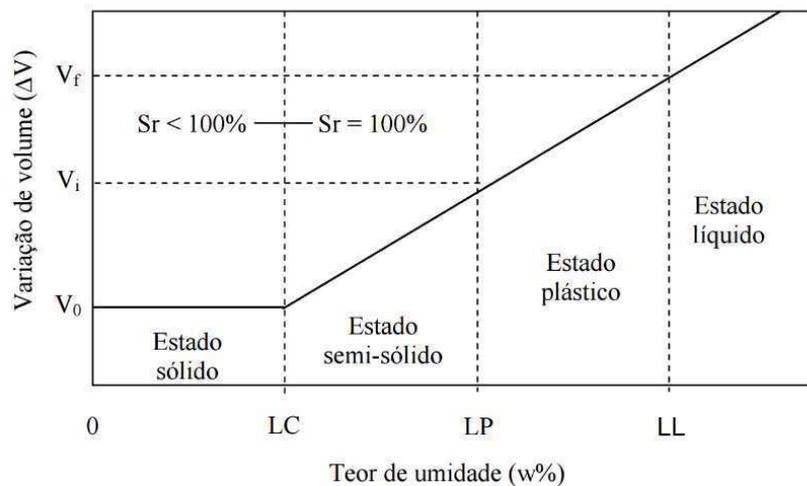
A norma utilizada para a preparação das amostras para o ensaio de Limite de Liquidez é a DNER 041-94. Passa-se na peneira de 0,42 mm uma amostra do solo para que, em seguida, possa ser coletado 70 g desse material para a realização do ensaio. Iniciou-se o ensaio na aplicação crescente do teor de umidade no solo seco ao ar e coloca-se em seguida no Aparelho de Casagrande, aplicando-se golpes consecutivos até que o solo se feche no espaço vazio criado por instrumento padrão do ensaio. Repetiu-se o ensaio várias vezes para possibilitar a construção de gráfico (golpes x umidade) onde será interpolada a umidade correspondente a 25 golpes.

Além do Limite de Liquidez, o Limite de Plasticidade (LP) também caracteriza a consistência do solo. O LP determina a umidade correspondente ao ponto no qual o solo passa da sua fase plástica para fase sólida. A Norma responsável por esse ensaio é a DNER 082-94 (Solos – determinação do Limite de Plasticidade) que permite determinar tanto o Limite de Plasticidade quanto o Índice de Plasticidade do solo (Figura 21).

Para a preparação da amostra, usou-se a norma DNER 041-94. Do material passante na peneira de 0,42 mm e previamente seco, coletou-se 50 g para a realização do ensaio. Segundo a norma, o ensaio se baseia na moldagem de um cilindro de solo, realizada com a mão e o solo

sobre uma base plana, de tal forma que o diâmetro deve se aproximar de 3 mm de diâmetro, e o comprimento de 100 mm. O Limite de Plasticidade é a umidade que o solo começa a se fragmentar quando moldado.

Figura 21 - Gráfico dos Limites de Atterberg



Fonte: (CEFET, Curso de Transportes prof. Celio Davilla, 2008).

Para a caracterização do solo quanto a sua densidade real, foi utilizada a norma DNER 093-94. Primeiramente, foi necessário passar o material seco ao ar na peneira de 2,0, secá-lo e coletar 10 g do material passante para a realização do ensaio. Pesou-se o picnômetro vazio e logo após, com a amostra e água destilada, aqueceu-se o conjunto fazendo com que partículas de ar fossem expulsas das partículas do solo (Figura 22). Após esse procedimento, retirou-se todo o conteúdo do picnômetro, que foi cheio com água destilada, pesando-o novamente. O cálculo da densidade real do solo vem da relação entre os pesos do picnômetro vazio, com amostra, com água e amostra e somente com água.

Figura 22 - Ensaio para a determinação da massa específica real dos grãos



Fonte: O AUTOR (2016).

A classificação do solo foi feita pelo sistema Transportation Research Board (TRB) recomendado pela AASHTO, o qual se baseia na realização de ensaios simples e corriqueiros: a análise granulométrica por peneiramento e a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade. Além disso, utiliza o fator Índice de Grupo (IG) que se calculou pela seguinte fórmula:

$$\mathbf{IG = (0,2 * a) + (0,005 * a * c) + (0,01 * b * d)} \quad (15)$$

onde:

**a** - % do material que passa na peneira de nº 200, menos 35;

caso esta % for >75, adota-se a = 40; caso esta % seja <35, adota-se a = 0;

**b** - % do material que passa na peneira de nº 200, menos 15;

caso esta % for >55, adota-se b = 40; caso esta % seja <15, adota-se b = 0;

**c** – valor de limite de liquidez (LL) menos 40;

caso o LL >60%, adota-se c = 20; se o LL <40%, adota-se c = 0;

**d** – valor de índice de plasticidade (IP) menos 10;

caso o IP >30%, adota-se d = 20; se o IP <10%, adota-se d = 0;

Por meio de uma tabela de classificação (Tabela 2), os solos são separados em grupos e subgrupos, pelo processo de eliminação, começando pelo lado esquerdo da referida tabela.

Tabela 2 - Classificação TRB

<u>CLASSIFICAÇÃO GERAL</u>	MATERIAIS GRANULARES (35% OU MENOS PASSANDO NA PENEIRA Nº. 200)							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS (MAIS DE 35% PASSANDO NA PENEIRA Nº. 200)			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Classificação em Grupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 5
<b>Granulometria:</b> % passando na peneira: Nº. 10 (2,0 mm.) Nº. 40 (0,42 mm.) Nº. 200 (0,074mm.)	50 máx.		51 mín.								
Característica da fração passando na peneira no. 40: Limite de Liquidez (%) Índice de Plasticidade (%)			NP	40 máx. 10máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.
<b>Índice de Grupo (IG)</b>	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
<b>Materiais constituintes</b>	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia		Areia fina	Pedregulhos ou areia siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
<b>Comportamento como subleito</b>	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: AASHTO (DNER, 1996)

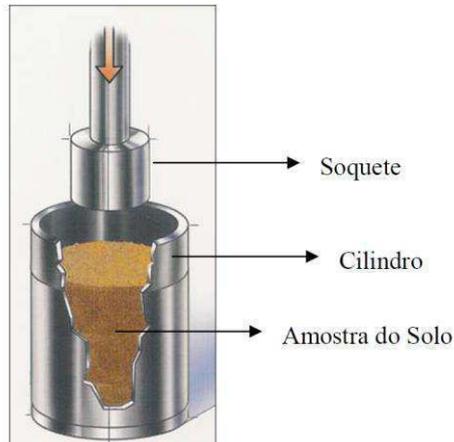
### 3.3.2 Ensaio de compactação Protor Intermediário

O ensaio de compactação realizado no Laboratório de Solos e Pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão seguiu a norma DNER 162/94 (Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas). O ensaio visa à obtenção da curva de compactação do solo (densidade x umidade) de tal forma que seja determinada a umidade ótima referente ao ponto de massa específica aparente seca máxima. Para a preparação da amostra, foi utilizada a Norma NBR 6457/84 (Solos – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização).

De acordo com a norma DNER 162/94 de execução do ensaio, a amostra foi separada e secada ao ar, sendo previamente repartida pelo repartidor de amostras até se obter 7 kg. Essa amostra foi passada na peneira de 19 mm. O material retido nessa peneira foi substituído por igual quantidade de peso do material, passando a 19 mm e retido na 4.8 mm. Após a separação da amostra para a execução do ensaio, fixou-se o molde à base metálica e ajustou-se o cilindro complementar, apoiando-se o conjunto sobre uma base plana. A amostra foi compactada dentro do molde, sobre o disco espaçador e papel filtro em cinco camadas

iguais, de forma que se obteve a altura total do corpo de prova de 12,5 cm após compactação (Figura 23). A energia usada na compactação foi a intermediária com adoção de 26 golpes.

Figura 23 - Compactador Proctor



Fonte: Dynapac (2000).

### 3.3.3 California Bearing Ratio – CBR

De acordo com a norma DNER 049/94, a qual rege todos os procedimentos do CBR no Brasil, deve-se prosseguir da seguinte maneira:

a. Compacta-se a amostra de solo em um cilindro de 150 mm de diâmetro e de 170 mm de altura, com distintos teores de umidade, até alcançar o valor da massa específica aparente seca, correspondente a uma determinada energia de compactação, ou seja, energia fornecida pelo Proctor Normal, Intermediário ou Modificado.

b. Após a compactação, o corpo de prova deve ser imerso em água durante 4 dias, a fim de saturá-lo. Durante esse processo, a amostra deve ser submetida a uma sobrecarga de 5 kg para simular os efeitos do peso da estrutura do pavimento sobrejacente ao subleito e as consequências dessa pressão na medida da expansão do solo.

Um pistão cilíndrico deve ser preparado para que, a uma velocidade constante de 1,27mm/min, aplique uma pressão na amostra além da penetração. O valor do Índice de Suporte California é determinado pelo seguinte fórmula:

$$CBR = 100 \times \frac{\text{Pressão Aplicada}}{\text{Pressão Padrão}} \quad (16)$$

A pressão aplicada corresponde a uma penetração do pistão de 2,5 mm ou de 5,0

mm (Figura 24). A pressão padrão é  $70 \text{ kgf/cm}^2$  (7 MPa) para 2,5mm (0,1 pol) de penetração do pistão, ou  $105 \text{ kgf/cm}^2$  (10,5 MPa) para 5,0 mm (0,2 pol) de penetração. O valor do índice CBR é o maior valor dentro os obtidos pelas duas relações (DNER 1994).

Figura 24 - Ensaio de penetração (CBR)



Fonte: O AUTOR (2016).

O extensômetro é utilizado a fim de medir a expansão axial da amostra ao “saturar-se”, sendo essa expansão utilizada para o cálculo em relação a sua altura inicial (Figura 25).

Figura 25 - Corpos de prova imersos por 4 dias (CBR)



Fonte: O AUTOR (2016).

### 3.3.4 Ensaio na caixa

#### 3.3.4.1 Compactação

Primeiramente, após o solo ter sido coletado em jazida e disposto ao lado do Laboratório de Solos e Pavimentação da Uema (LSP) como mostra a Figura 26, apresentava-se úmido, sendo necessário o espalhamento do material em três lonas de 4 x 1 m para a secagem ao ar (Figura 27). Esperou-se 01 semana até o material ficar completamente seco. Após esse serviço, alocou-se uma caixa de madeira dentro do laboratório com dimensões de 1,00 x 1,00 x 0,60 m .

Figura 26 - Material estocado



Fonte: O AUTOR (2016).

Figura 27 - Etapas sequenciais de secagem de material (a, b, c)



Fonte: O AUTOR (2016)

Após a secagem do material na lona, planejou-se quantas camadas de solo iriam ser compactadas e quais as espessuras, de tal forma que alcançasse uma camada total de 40 cm, a fim de que as medições do GeoGauge não sofressem interferências. Foi determinado que a espessura de cada camada compactada fosse 5 cm baseado em duas condicionantes: o peso do rolo utilizado no trabalho e o tamanho da maior partícula da granulometria exigida na

especificação de serviço de bases estabilizadas granulometricamente (DNIT 098/2007).

No item 5.3.f da norma, são citadas duas faixas granulométricas, sendo que a faixa A determina que 100% de todo o material passe na peneira de 50.8 mm ou 5 cm. Rolos compactadores de campo pesam entre 15 a 30 t, diferentemente do rolo compactador liso não vibratório, utilizado no laboratório, o qual pesa 74 kg e mede 0,40 x 0,46 m.

Vale ressaltar que antes que começasse o lançamento das 8 camadas, teve-se que realizar 2 camadas experimentais de 5 cm, totalizando 10 cm afim de avaliar quantas passadas do rolo seriam necessárias para que o solo atingisse a densidade máxima encontrada em laboratório. Para isso, foi utilizado o ensaio de frasco de areia.

Dando continuidade à execução da camada, a fim de homogeneizar o material na umidade ótima foi necessário espalhar cerca de 90 kg de solo no chão do laboratório, nas proximidades da caixa, para que logo em seguida o material fosse lançado no seu interior e depois compactado (Figura 28).

Figura 28 - Homogeneização de material



Fonte: O AUTOR (2016)

A compactação das camadas foram feitas com um rolo compactador manual de laboratório conforme a Figura 29. Os procedimentos de homogeneização e compactação das camadas foram realizados 8 vezes, ou seja, uma para cada camada (Figura 30).

Figura 29 - Caixa de madeira e rolo compactador



Fonte: O AUTOR (2016)

Figura 30 - Esquema das camadas compactadas

<b>Camada 8 (5 cm)</b>
<b>Camada 7 (5 cm)</b>
<b>Camada 6 (5 cm)</b>
<b>Camada 5 (5 cm)</b>
<b>Camada 4 (5 cm)</b>
<b>Camada 3 (5 cm)</b>
<b>Camada 2 (5 cm)</b>
<b>Camada 1 (5 cm)</b>

Fonte: O AUTOR (2016).

O número de passadas foi aumentado gradativamente, à medida que ocorria a compactação das próximas camadas superiores, com a finalidade de tentar obter um maior grau de compactação.

- 1ª camada → 45 passadas
- 2ª camada → 75 passadas
- 3ª camada → 75 passadas
- 4ª camada → 75 passadas

- 5ª camada → 125 passadas
- 6ª camada → 125 passadas
- 7ª camada → 125 passadas
- 8ª camada → 125 passadas

### 3.3.4.3 Geogauge ou Soil Stiffness Gauge (SSG)

O equipamento de medida de rigidez do solo (Soil Stiffness Gauge – SSG), comercialmente conhecido como GeoGauge, pertence à construtora JM Engenharia (Figura 31).

Os procedimentos de ensaio com o GeoGauge devem ser considerados de acordo com a norma ASTM D6758 – 08 (Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil Aggregate in-Place by an Electro-Mechanical Method).

Figura 31 - Equipamento Geogauge H-4140, nível e espátula



Fonte: O AUTOR (2016).

Antes de posicionar o aparelho na superfície da camada, deve-se limpar o local de ensaio com uma escova ou vassoura, pois, em alguns casos, a superfície contém detritos, o que pode interferir nos resultados das medições. Caso haja a necessidade de nivelar a superfície, deve-se raspá-la com uma pá quadrada. Seguindo as recomendações da norma, a fim de fornecer tensões consistentes no solo para cada medição, no mínimo 60% da base anelar, deve estar em contato com o solo. Pode ser observado o nível de contato do anel após a medição, verificando

se há a marca da sua base anelar.

Podem existir casos que a superfície do solo compactado é muito dura ou rugosa, impedindo que se consiga uma marcação e exigindo a aplicação de uma fina camada de areia limpa úmida, de 3,0 a 6,0 mm no local do teste. Após esse procedimento, deve-se bater para amaciar a areia e logo em seguida posicionar o anel da base do aparelho no local. A prática de posicionamento da base anelar, como foi descrito acima, é recomendado além das recomendações do produtor do aparelho.

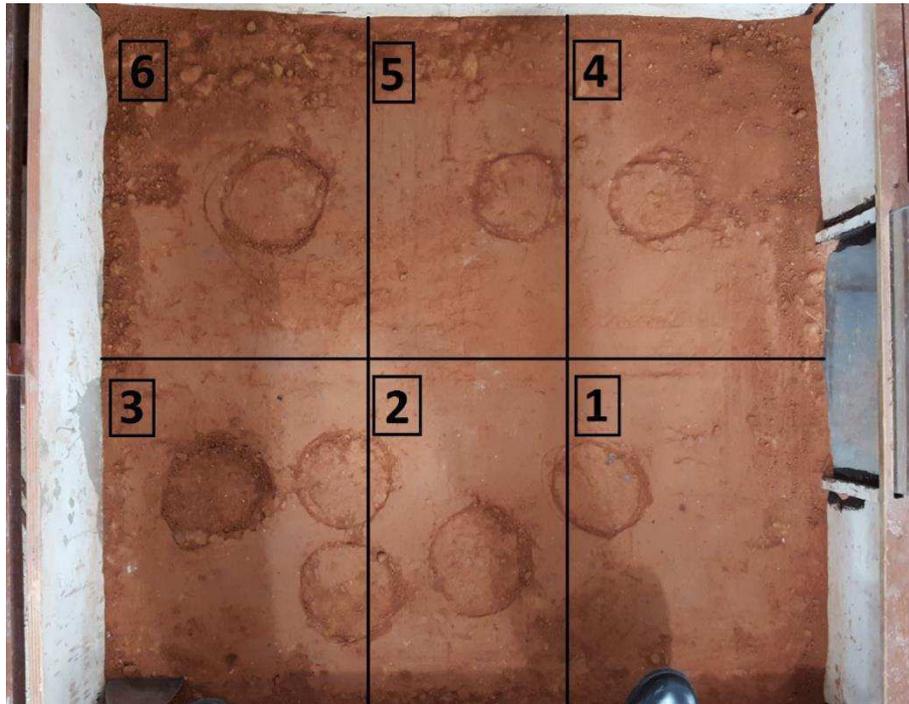
Para a medição da rigidez ou *Stiffness* deve-se primeiramente checar o solo no local do teste se está limpo e regularizado. Logo em seguida, o aparelho deve ser posicionado no solo e girado de forma que consiga o contato necessário com o solo. O aparelho deve estar livre de contato com paredes, canos etc. Ao iniciar a medição, o ensaio dura aproximadamente 75 segundos.

Após a medição, deve-se retirar o aparelho do local e inspecionar a marca do anel no solo. Se o contato não estiver adequado, deve-se repetir a medição. Se o contato for adequado, os resultados de rigidez devem ser guardados ou então os módulos de Poisson e Elasticidade que aparecerão no display.

Os ensaios com o equipamento GeoGauge, acompanharam a formação da estrutura da camada, determinando módulos e rigidez para cada camada de 5 cm colocada.

Os ensaios com o equipamento GeoGauge foram realizados em 6 subdivisões, espaçados em 25 cm, propostos para a área da caixa em estudo. Os pontos de localização dos ensaios com o equipamento GeoGauge foram demarcados respeitando-se a área efetiva de compactação do rolo na caixa (Figura 32).

Figura 32 - Esquema dos pontos de ensaio com o equipamento GeoGauge



Fonte: O AUTOR (2016).

Cada ensaio foi repetido três vezes, deslocando o equipamento dentro de cada subdivisão em cada um dos ensaios.

#### 3.3.4.2 Determinação da densidade “in situ”

De acordo com a norma DNER-ME 092/94, o ensaio se baseia na colocação de uma bandeja com cavidade circular na superfície limpa do solo, que será usada para a escavação de 15 cm de profundidade, com o mesmo diâmetro da cavidade da bandeja. Retira-se o material de dentro do cilindro escavado para a pesagem ( $P_w$ ). Após isso, retira-se uma amostra do solo para a determinação da umidade ( $W$ ) pelo método Speedy ou estufa. Pesa-se o conjunto frasco de areia com funil ( $P_1$ ) e logo em seguida, coloca-se a boca do funil na entrada da cavidade circular da bandeja, deixando que a areia do interior do frasco preencha o vazio do cilindro escavado até completar seu volume (Figura 33). Para concluir, fecha-se o registro e pesa-se novamente o conjunto frasco com funil ( $P_3$ ). Os seguintes cálculos devem ser feitos para a obtenção da densidade:

- Peso da areia que enche a cavidade no solo + funil + rebaixo:  $P_4 = P_1 - P_3$
- Peso da areia que enche a cavidade no solo:  $P_5 = P_4 - P_2$
- Fator de correção:  $F_C$
- Peso do solo seco:  $P_S = P_W \times F_C$
- Volume do furo (cavidade):  $V_{Furo}$
- Massa específica aparente de campo:  $\delta_S$
- Grau de compactação:  $G_C$

$$\gamma_h = \gamma_a \times \frac{P_h}{P_a} \gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100 + w} G_C = \frac{\gamma_s}{P_{sl}} \times 100 \quad (17)$$

Onde:

$P_h$ : massa do solo úmido (g);

$P_a$ : massa da areia (g);

$\gamma_h$ : massa específica aparente do solo úmido ( $g/cm^3$ );

$\gamma_a$ : massa específica aparente da areia ( $g/cm^3$ );

$\gamma_s$ : massa específica aparente seca do solo (%);

$w$ : teor de umidade do solo (%);

$G_C$ : grau de compactação (%);

$\gamma_{sl}$ : massa específica aparente seca máxima do solo obtida em laboratório ( $g/cm^3$ ).

Figura 33 - Execução do ensaio frasco de areia



Fonte: O AUTOR (2016)

A determinação da densidade aparente seca do solo, a partir do ensaio do frasco de areia, possibilita controlar no campo a execução do processo de compactação das camadas de solo e fazer uma avaliação dos parâmetros de compactação previamente especificados, para atender as necessidades de uma obra.

Foram realizados ensaios de frasco de areia na caixa após a compactação da segunda e da última camada, em cada local pré-definido de medição com GeoGauge, visto que o equipamento precisa de uma certa profundidade de camada para não sofrer interferência em suas medições (Figura 34).

Figura 34 - Ferramentas para a realização do ensaio do frasco de areia



Fonte: O AUTOR (2016).

#### 3.3.4.2 Determinação da umidade “in situ”

A norma DNER-ME 052/94 ainda cita que a determinação da umidade para agregados miúdos e solos arenosos geralmente é realizada com o emprego do “speedy” (Figura 35). Os procedimentos se baseiam nas seguintes etapas resumidas (DNER, 1994):

- a. Coloca-se o material no interior do equipamento speedy junto com ampolas de carbureto de cálcio;
- b. Agita-se o aparelho de tal forma que as ampolas no seu interior quebrem e reagem com a água aumentando-se assim a pressão;
- c. Encontra-se a umidade com o valor da pressão e o peso do material.

Figura 35 - Aparelho ‘Speedy’



Fonte: O AUTOR (2016).

Figura 36 - Estufa



Fonte: O AUTOR (2016).

### 3.3.5 Ensaio no campo

Como já foi visto, o Geogauge H-4140 é um equipamento utilizado em campo para a medição de rigidez e módulo do solo compactado, com a finalidade de controlar a qualidade da compactação de camadas de pavimento flexíveis.

Com base nisso, houve a necessidade do uso do equipamento em campo, com a finalidade de entender um pouco mais na prática, como funcionaria no dia a dia de uma obra. A visita ao campo foi oportunizada pela empresa Ducol Engenharia, na obra de duplicação da estrada do Araçagy e ligação desta com a MA-204 (estrada da Maioba) e estrada da Raposa. O primeiro objetivo foi constatar levantar os resultados do ensaio do frasco de areia e o das medições com o Geogauge, e buscando um relacionamento entre eles ou trabalho realizado em laboratório e mesmo, da revisão bibliográfica (Figura 37).

Figura 37 - Uso do Geogauge H-4140 em campo (a, b)



Fonte: O AUTOR (2016)

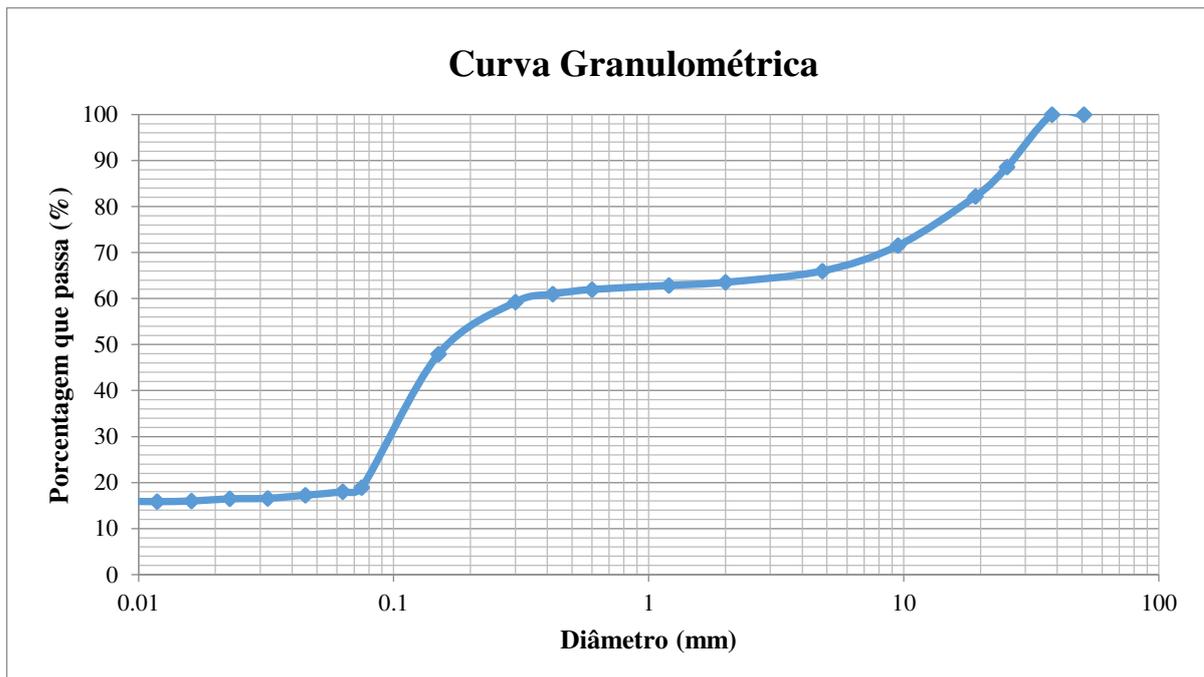
Foram realizados os ensaios com o GeoGauge em 6 pontos diferentes, porém próximos (4 metros), sendo dois deles utilizados para realização do ensaio de densidade *in situ* e umidade a fim de tentar entender alguma relação entre os valores.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do solo

Os resultados do ensaio de granulometria encontram-se representados pela Figura 38.

Figura 38 - Granulometria do solo coletado



Fonte: O AUTOR (2016)

Pode-se constatar que existem 36,5% de pedregulho (porcentagem de solo retido na peneira 2,00 mm), 2,59% de areia grossa (porcentagem de solo passante na peneira 2,0 mm e retido na peneira de 0,42 mm), 42% de areia fina (porcentagem de solo passante na peneira de 0,42 mm e retido na peneira 0,075 mm) e 18,9% de partículas menores que 0,075 mm. Pode-se ainda dizer que o solo coletado é classificado como solo mal graduado ou com granulometria descontínua.

De acordo com a especificação de serviço do DNIT (098/2007) para base estabilizada granulometricamente, o material não satisfaz completamente nenhuma das faixas porém se aproximou mais da faixa A, onde falhou na peneira de N° 40.

Os resultados do ensaio dos limites de Atterberg encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de consistência

<b>Limite de Liquidez (LL):</b>	17%
<b>Limite de Plasticidade (LP):</b>	13%
<b>Índice de Plasticidade (IP):</b>	4

Fonte: O AUTOR (2016)

O solo apresenta índice de plasticidade maior que 1 e menor que 7 que indica fraca plasticidade, o que caracteriza que o solo absorve uma baixa quantidade de água e sofre baixa contração na perda de umidade.

Pelos resultados da granulometria e índices de consistência, o índice de grupo do solo ensaiado é 0. Quanto mais próximo de 0 for o IG, melhor será a qualidade do solo. Com esses três valores classificou-se o solo pelo sistema *Transportation Research Board (TRB)* como A-2-4 ou solo com pedregulhos e areia siltosa ou argilosa de boa qualidade para a pavimentação.

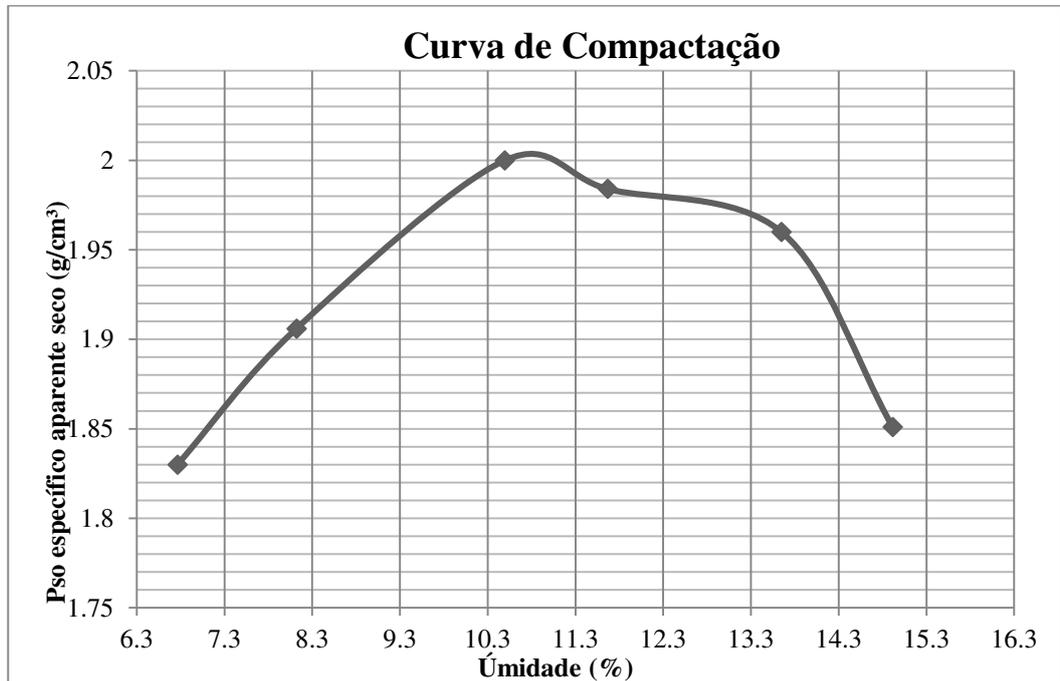
A densidade real dos grãos foi determinada pela norma DNER 093-94 e seu valor é de 2,794 g/cm<sup>3</sup>.

## 4.2 Compactação

Foram realizados ensaios laboratoriais de compactação que permitiram a construção da curva que correlaciona os parâmetros teor de umidade e massa específica aparente seca. Também foi possível a partir dessa curva determinar a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo do solo os quais são classificados como parâmetros desejáveis para assegurar que o processo de compactação do solo faça-o atingir situação de rigidez suficiente para resistir aos esforços transmitidos pelo tráfego (Figura 39).

O ensaio de compactação foi realizado com energia do Proctor intermediário, que simulou as condições de compactação de uma camada de sub-base.

Figura 39 - Curva de compactação do material estudado



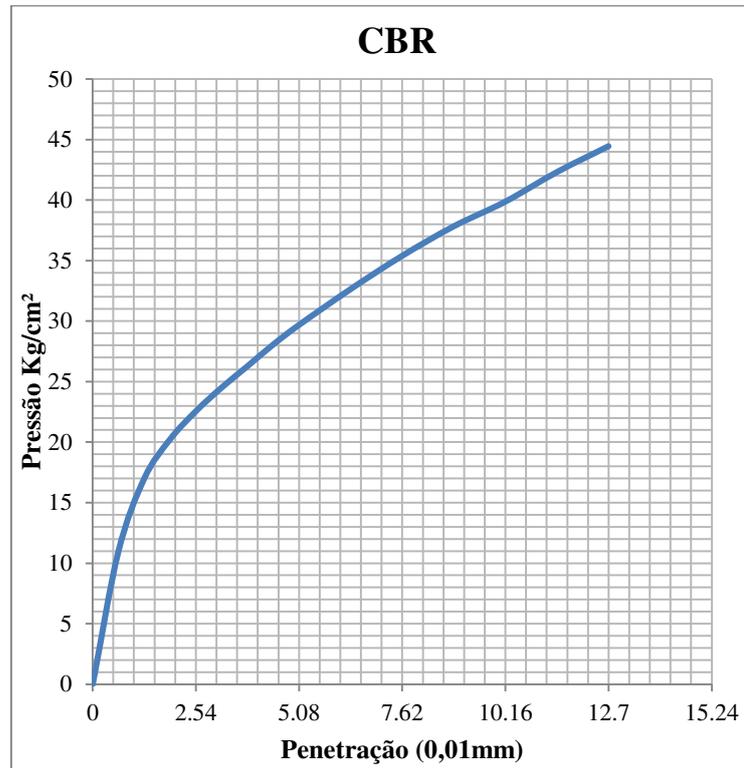
Fonte: O AUTOR (2016)

O gráfico acima mostra que a umidade ótima e a densidade aparente seca máxima do solo são 10,85% e 2,004 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Os valores de umidade e densidade aparente seca obtidos em laboratório, foram posteriormente comparados aos valores obtidos na caixa utilizada para simular uma camada de pavimento flexível compactada em campo como será explicado no item 4.3.

### 4.3 Índice de Suporte California (CBR)

A Figura 40 indica a curva pressão x penetração do solo para obtenção do CBR. Paralelamente, os valores obtidos de expansão resultaram em média inferior a 1%. As pressões e penetrações encontradas no ensaio foram calculadas de acordo com a Tabela 4.

Figura 40 - Curva pressão x penetração do solo



Fonte: O AUTOR (2016)

Tabela 4 – CBR do solo

Constante do anel			0.05093
Tempo (min)	Penet. (mm)	Leitura (0,001)	Pressão (kg/cm²)
0	0	0	0
0.5	0.63	71	3.62
1	1.27	165	8.4
1.5	1.9	273	13.9
2	2.54	382	19.46
3	3.17	480	24.45
4	3.81	567	28.88
6	4.44	650	33.1
8	5.08	731	37.23
10	6.35	882	44.92
CÁLCULO DO I.S.C.			
Penet. (mm)	Pressão		I.S.C. (%)
	Aplic.	Corrigida	
2.54	19.46		27.68
5.08	37.23		35.4
<b>I.S.C.(%):</b>			<b>35</b>

Fonte: O AUTOR (2016)

#### 4.4 Ensaios na caixa

Como já foi dito no capítulo 3, após a compactação do solo pelo rolo manual no interior da caixa em oito camadas de 5 cm, foram seleccionados 6 pontos da mesma a fim de realizar as medições tanto com o GeoGauge, primeiramente, quanto com o Frasco de Areia. Os resultados de densidade, umidade e grau de compactação das camadas de 10 cm e de 40 cm estão presentes nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 - Densidade aparente seca do solo na caixa

	Camada (cm)							
	Local	5	10	20	25	30	35	40
<b>Densidade aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1	-	1.59	-	-	-	-	1.75
	2	-	1.61	-	-	-	-	1.61
	3	-	1.69	-	-	-	-	1.57
	4	-	1.53	-	-	-	-	1.68
	5	-	1.61	-	-	-	-	1.65
	6	-	1.61	-	-	-	-	1.66

Fonte: O AUTOR (2016)

Tabela 6 - Grau de compactação da camada de 10 cm para os 6 pontos

Pontos		1	2	3
<b>Densidade do Solo Seco (<math>\gamma_{scampo}</math>):</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>1.59</b>	<b>1.61</b>	<b>1.69</b>
$\gamma_{sm\acute{a}x}$ :	g/cm <sup>3</sup>	2.004	2.004	2.004
Hot:	(%)	10.7	10.7	10.7
Umidade do Solo (Speed):	(%)	10.2	10.2	9.5
<b>Grau de Compactação:</b>	<b>(%)</b>	<b>79.34</b>	<b>80.34</b>	<b>84.33</b>

Pontos		4	5	6
<b>Densidade do Solo Seco (<math>\gamma_{scampo}</math>):</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>1.53</b>	<b>1.61</b>	<b>1.61</b>
$\gamma_{sm\acute{a}x}$ :	g/cm <sup>3</sup>	2.004	2.004	2.004
Hot:	(%)	10.7	10.7	10.7
Umidade do Solo (Speed):	(%)	10.2	9.5	9.5
<b>Grau de Compactação:</b>	<b>(%)</b>	<b>76.35</b>	<b>80.339</b>	<b>80.34</b>

Fonte: O AUTOR (2016)

Tabela 7-Grau de compactação da camada de 40 cm para os 6 pontos

<b>Pontos</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Densidade do Solo Seco (<math>\gamma_{scampo}</math>):</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>1.75</b>	<b>1.62</b>	<b>1.57</b>
$\gamma_{sm\acute{a}x}$ :	g/cm <sup>3</sup>	2.004	2.004	2.004
Hot:	(%)	10.7	10.7	10.7
Umidade do Solo (Speed):	(%)	9.5	9.2	9.3
<b>Grau de Compactação:</b>	<b>(%)</b>	<b>87.33</b>	<b>80.838</b>	<b>78.34</b>
<b>Pontos</b>		<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Densidade do Solo Seco (<math>\gamma_{scampo}</math>):</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>1.68</b>	<b>1.65</b>	<b>1.66</b>
$\gamma_{sm\acute{a}x}$ :	g/cm <sup>3</sup>	2.004	2.004	2.004
Hot:	(%)	10.7	10.7	10.7
Umidade do Solo (Speed):	(%)	9.9	10.2	9.3
<b>Grau de Compactação:</b>	<b>(%)</b>	<b>83.83</b>	<b>82.335</b>	<b>82.83</b>

Fonte: O AUTOR (2016)

A Tabela 5 mostra que densidade *in situ* foi obtida somente após a compactação da segunda e da última camada. A escolha de uma camada intermediária, além da camada final foi baseada na necessidade de verificar uma eventual evolução da densidade do material e se haveria alguma influencia do fundo da caixa na medição do Geogauge pelo fato de que o equipamento necessita de uma profundidade mínima para que seus resultados sejam os mais precisos.

Todos os resultados de grau de compactação ficaram abaixo da norma (100%) provavelmente pelas condições do compactador sem peso adequado (Tabela 7 e 8).

A Tabela 8 mostra os resultados de rigidez e módulo obtidos pelo Geogauge assim como os respectivos valores de densidade aparente seca obtidos pelo frasco de areia.

Tabela 8 – Resultados de densidade e rigidez nas camadas de 10 cm e 40 cm

<b>Altura</b>	<b>10 cm</b>			<b>40 cm</b>		
	<b>Rigidez (MN/m)</b>	<b>Módulo (MPa)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Rigidez (MN/m)</b>	<b>Módulo (MPa)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	9.55	82.85	1.59	25.92	224.87	1.75
2	11.73	101.79	1.61	38	329.68	1.61
3	10.34	89.63	1.69	28.68	248.81	1.57
4	5.26	45.84	1.53	31.11	269.91	1.68
5	10.04	63.02	1.61	33.26	291.16	1.65
6	8.02	69.55	1.61	29.14	252.82	1.66
Média	9.157	75.447	1.607	31.018	269.54	1.653
Desvio Padrão	2.059	18.329	0.047	3.8463	33.638	0.056174
Coefficiente de Variação	22.485	24.294	2.912	12.400	12.48	3.398

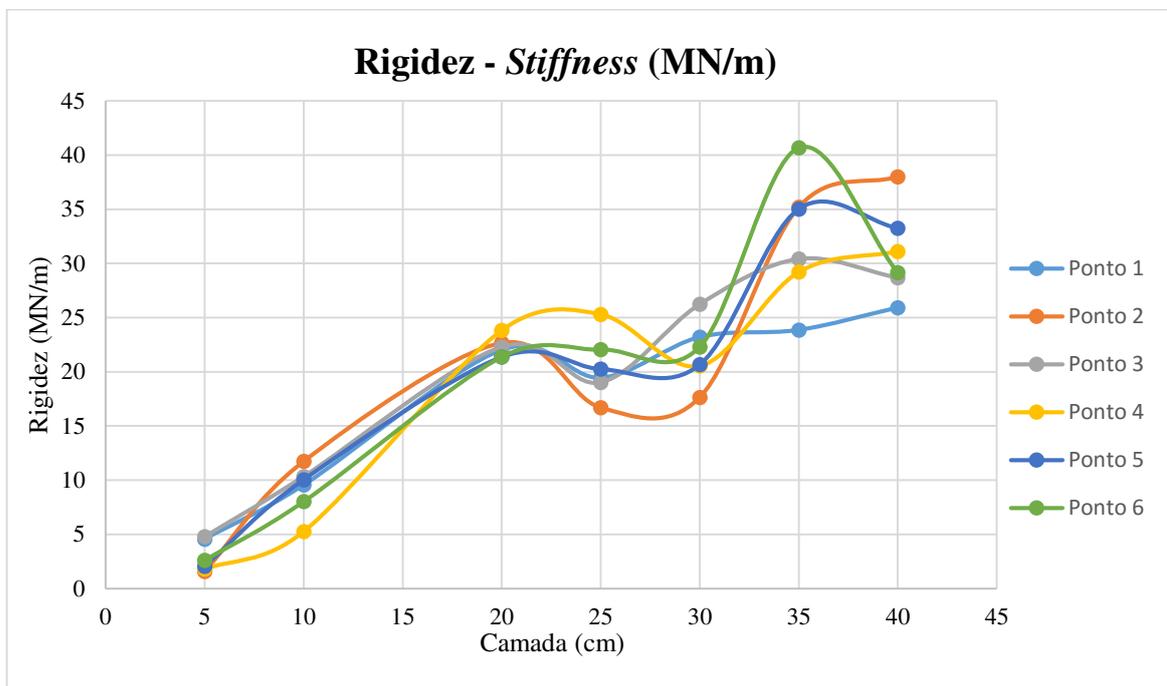
Fonte: O AUTOR (2016)

Percebe-se pela Tabela 8 que as medições do Geogauge são mais sensíveis às variações de rigidez do que de densidade das camadas alertando os executores e possibilitando correções. Essa variação da rigidez e módulo podem ter sido causadas pelo fato de a compactação ter sido manual ou seja pode ter sido exercida uma sobrecarga variável no rolo.

Comparando os resultados de densidade pelo frasco de areia e de rigidez e módulo pelo Geogauge, não foi percebido uma mudança significativa do valor da densidade aparente seca "in situ" nos diversos pontos de medição, enquanto com o GeoGauge foram percebidas maiores variações de módulo e rigidez do solo. Isso comprova que a rigidez ou o módulo são mais sensíveis do que a densidade e assim a uniformidade do solo pode ser monitorada com mais rigor e controlada durante o processo de compactação pelo Geogauge.

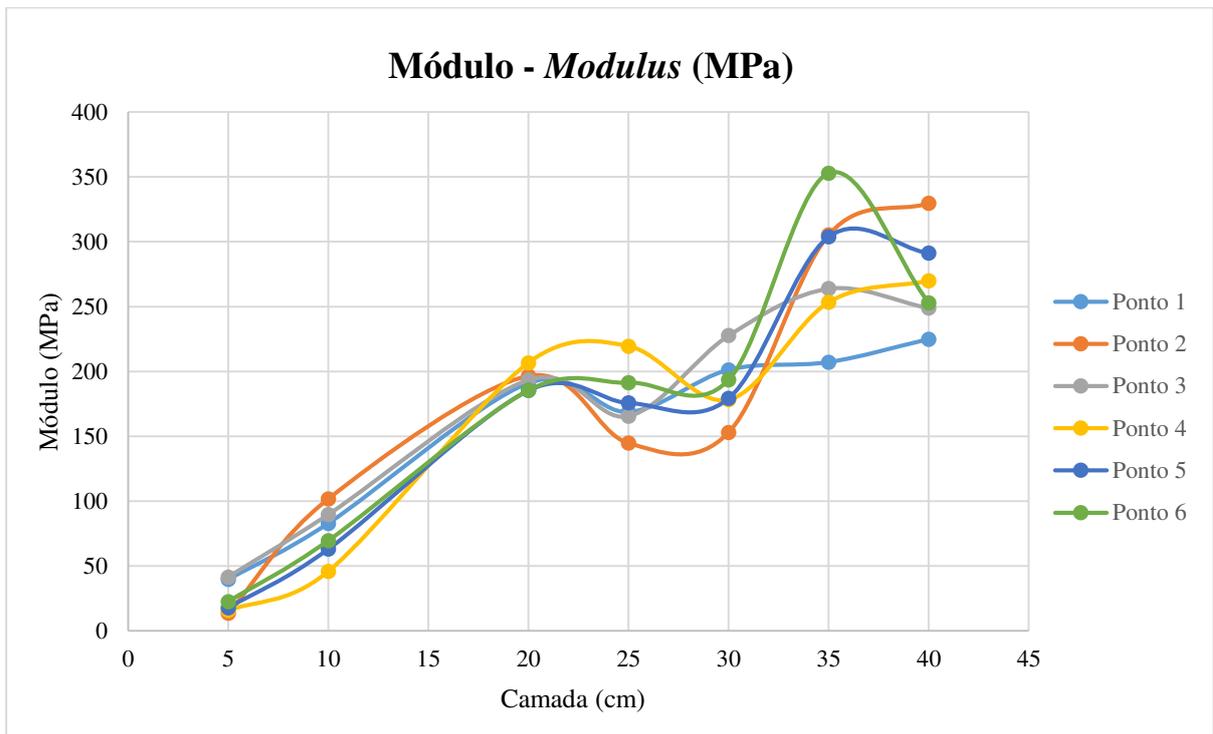
As Figura 41 e 42 mostram o comportamento mecânico do solo à medida que a altura da camada de solo no interior da caixa aumentava. A tendência é que a rigidez e o módulo do solo se aproximem cada vez mais dos seus valores reais a medida que a altura da camada vai se aproximando da altura mínima de alcance do aparelho (22 cm).

Figura 41 - Rigidez do solo na caixa medidos pelo Geogauge



Fonte: O AUTOR (2016)

Figura 42 – Módulo do solo na caixa medidos pelo Geogauge



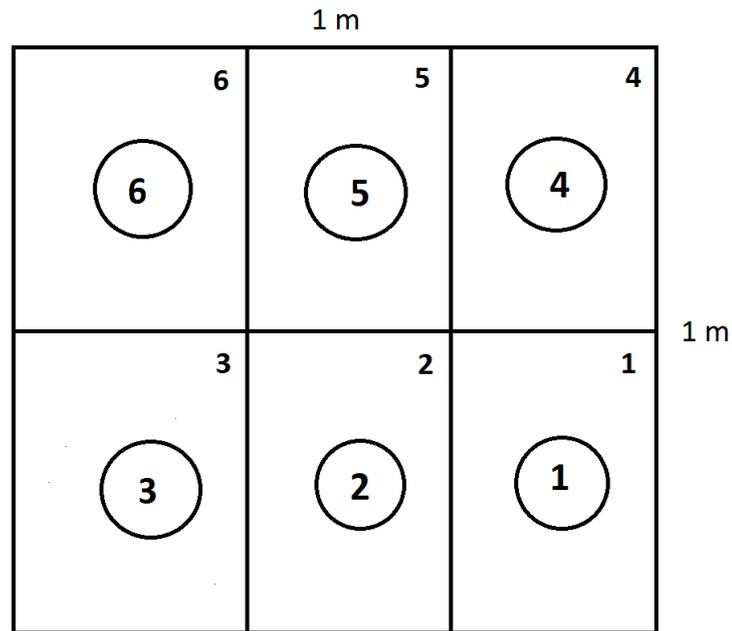
Fonte: O AUTOR (2016)

Nota-se que a altura da camada de maior uniformidade dos parâmetros de deformabilidade foi 20 cm onde os valores são muito próximos e verificou-se também que o módulo de resiliência máximo que o material alcançou dentro da caixa foi de 350 MPa, segundo a medição do Geogauge.

Na análise da Figura 41 percebeu-se também uma tendência similar dos pontos de cada espessura de camada. Apesar dos valores diferentes por ponto em cada camada, eles se comportam da mesma forma, ou aumentam ou diminuem. Pelo fato de o equipamento utilizar uma fórmula de correlação entre módulo e rigidez, as curvas se comportaram da mesma forma para ambos os parâmetros.

Foram realizados ensaios com o frasco de areia e Geogauge para obtenção de valores de densidade e rigidez em cada ponto 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (Figura 43).

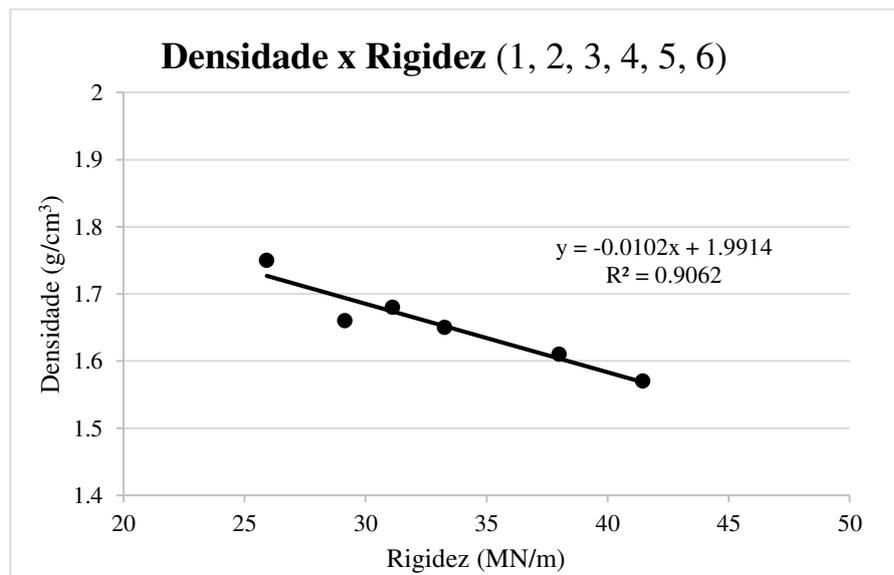
Figura 43 - Esquema dos furos na caixa



Fonte: O AUTOR (2016)

Foi obtida uma correlação entre a rigidez (geogauge) e densidade (frasco de areia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 como mostra a Figura 44.

Figura 44 - Correlação entre Densidade e Rigidez do solo (Camada de 40 cm)



Fonte: O AUTOR (2016)

Verificou-se que a correlação entre a rigidez e a densidade foi satisfatória ( $R^2= 0.9$ ).

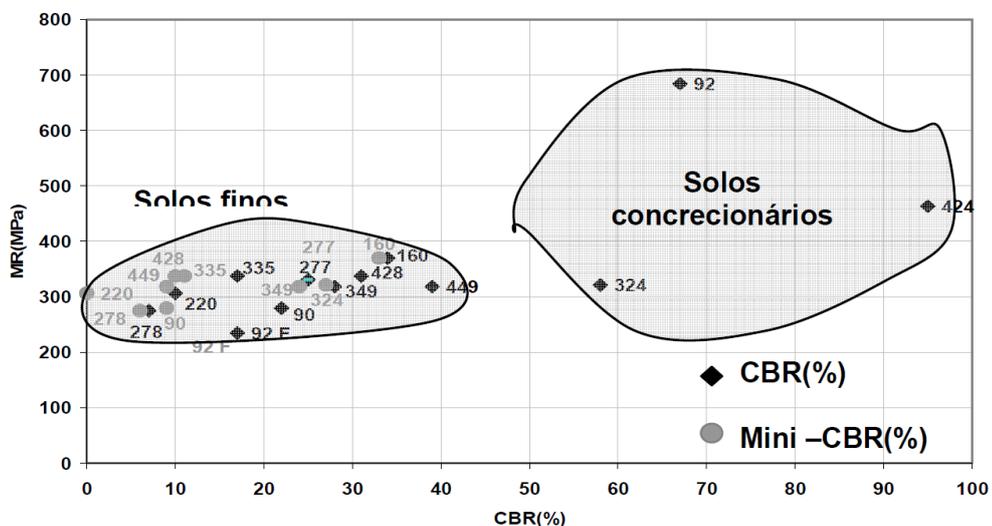
Como não foi possível realizar o ensaio do módulo de resiliência em laboratório para comparar com o módulo de resiliência obtido pelo Geogauge, foi necessário coletar resultados do módulo de resiliência e CBR de estudos já realizados com solos da ilha de São Luis, os quais alguns foram classificados pela TRB como A-2-4, o mesmo tipo de solo utilizado neste trabalho (Tabela 9). A Figura 46 mostra os resultados em gráfico do módulo de resiliência e CBR para cada tipo de solo estudado por SANTANA (2009). Foram estudados solos do tipo A-2-4 e solos lateríticos.

Tabela 9 – Resultados de CBR e Módulo de Resiliência de amostras coletadas na ilha de São Luis

Amostra	Class. TRB	CBR (%)	MR (MPa)
90	A-2-4	22	279
92	A-1-b	67	685
92F	A-4	17	230
160	A-2-4	34	370
220	A-3	10	306
277	A-2-4	25	331
278	A-2-4	7	275
324	A-1-b	58	321
349	A-4	28	290
424	A-1-a	95	463
428	A-2-4	31	337
449	A-2-4	39	318

Fonte: SANTANA (2009).

Figura 45 – CBR e módulo de resiliência de laboratório de solos lateríticos da ilha de São Luis



Fonte: SANTANA (2009)

Desta forma, foram comparados os módulos de resiliência do solo do tipo A-2-4

obtidos pelo aparelho Geogauge e os módulos de solo lateríticos encontrados em laboratório por SANTANA (2009) (Tabela 10).

Tabela 10 – Comparação entre o módulo de resiliência pelo Geogauge e módulo de resiliência de laboratório

Módulo de resiliência (MPa)							
<b>Solos concrecionários lateríticos (A-1-a e A-1-b) SANTANA (2009)</b>	321		463		685		
<b>Solos A-2-4 SANTANA (2009)</b>	275	279	318	331	337	337	370
<b>Solo A-2-4 pelo Geogauge neste trabalho (Média)</b>	<b>270</b>	<b>285</b>	<b>247</b>	<b>248</b>	<b>225</b>	<b>330</b>	

Fonte: O AUTOR (2016)

Verificou-se que os solos do tipo A-2-4 em SANTANA (2009) apresentaram módulo de resiliência de laboratório entre 230 e 370 MPa que se aproxima da média dos valores dos módulos obtidos pelo aparelho Geogauge deste presente trabalho a partir da camada de 40 cm. No caso dos solos concrecionários lateríticos, do tipo A-1-a e A-1-b do mesmo trabalho, os módulos variaram de 300 a 700 MPa. Além disso o CBR para os solos A-2-4 variaram de 7 a 40%, intervalo compatível com o resultado de CBR do solo deste trabalho (35%).

#### 4.5 Ensaio no campo

Foi realizada uma visita a uma obra de pavimentação no município de São Luis logo após a compactação de uma camada de base laterítica. Aproveitando-se dessa oportunidade, foi possível realizar somente 2 ensaios com o frasco de areia e utilizou-se o Geogauge tanto nesses dois pontos do ensaio de densidade, quanto nos pontos das proximidades (5 a 20 metros) para tentar entender o funcionamento do aparelho em campo e as propriedades do material da base. Os resultados estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios em campo pelo Geogauge e frasco de areia

Ponto	E (MPa)	S (MN/m)	SD	SNR	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1 (estaca 5)	261.07	30.09	1.18	13.06	2.274
	205.52	23.69	2.47	16.17	
	291	33.55	1.28	12.06	
	<b>378.96</b>	43.68	1.36	10.32	
	<b>326.06</b>	37.59	1.3	10.26	
	<b>311.35</b>	35.89	1.22	11.16	
2	<b>440.48</b>	50.78	3.37	10.3	-
	<b>418.64</b>	48.26	3.27	10.35	
	<b>442.49</b>	51.01	3.92	12.44	
	<b>407.01</b>	46.92	3.46	10.35	
	<b>429.72</b>	49.54	2.87	10.19	
3	<b>527.79</b>	60.84	3.94	11.4	-
	<b>550.81</b>	63.5	4.76	11.05	
	<b>565.02</b>	65.13	2.58	10.88	
	<b>579.81</b>	66.84	6.88	10.36	
4 (estaca 6)	<b>448.94</b>	51.75	1.73	13.36	2.18
	<b>473.73</b>	54.61	1.98	12.52	
	<b>487.05</b>	56.15	1.37	12.3	
	<b>473.74</b>	54.62	1.79	12.37	
	<b>493.75</b>	56.92	2.35	11.99	
	<b>468.16</b>	53.97	1.9	12.84	
5	<b>314.06</b>	36.17	3.12	11.41	-
	<b>321.67</b>	37.08	3.17	11.56	
	<b>329.1</b>	37.94	3.09	10.32	
6	265.34	30.59	1.5	11.69	-
	301.7	34.78	2.11	11.56	
	319.6	36.84	5.43	11.62	
7	199.64	23.01	2.75	15.27	-
8	<b>510.9</b>	58.89	2.89	11.9	-
	<b>554.12</b>	63.88	1.78	11.25	
	<b>534.93</b>	61.66	3.16	11.02	

Fonte: O AUTOR (2016)

Após a obtenção dos resultados encontrados pelo Geogauge em campo, foi possível verificar que houve uma aproximação entre os valores de alguns pontos, como por exemplo os pontos 3 e 8. Isso demonstra que se o módulo de resiliência determinado em projeto for em média 540 MPa, a camada compactada nesses dois pontos além de se mostrarem uniformes, também alcançaram a altura e as propriedades utilizadas no dimensionamento. Porém, analisando todos os pontos medidos, percebe-se que existe uma falta de uniformidade na camada compactada, que pode gerar futuros problemas na estrutura do pavimento.

Utilizando os dados de rigidez em campo na equação de correlação entre densidade e rigidez (laboratório) mencionada no item 4.3, foram obtidos os valores de densidade mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Densidades obtidas pelas equações de correlação

	Equação	Densidades encontradas pela correlação (g/cm <sup>3</sup> )	Densidades obtidas em campo (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Correlação</b>	<b>D = -0,0102R + 1,9914</b>	1,31-1,63	2,182 e 2,274

Fonte: O AUTOR (2016)

Verificou-se que não foram atingidos os resultados de densidade em campo (2.182 e 2.274 g/cm<sup>3</sup>).

Com relação ao valor do CBR do solo de base, valores bem elevados coerentes com os valores de módulo, conforme aponta a Tabela 13, alcançando 579 MPa, lembrando que o valor máximo possível de medição pelo Geogauge é 610 MPa.

Tabela 13 - Dados do solo de campo fornecidos pelo construtor

	CBR (%)	Umidade ótima (%)	Densidade máx. (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade em campo g/cm <sup>3</sup> )
<b>Base</b>	106	9.5	2.13	2.27
	106	9.5	2.13	2.18
<b>Sub-base</b>	104	8.8	2.16	2.16

Fonte: O AUTOR (2016)

Foram utilizadas equações de correlações existentes, obtidas de trabalhos de pesquisadores, entre o CBR e o módulo de resiliência. Estas equações foram aplicadas aos solos da caixa (laboratório, ponto 6) e do campo (ponto 3) a fim de verificar se o valor de módulo encontrado pelas equações de correlação equivalem ao valor de módulo encontrado pelo aparelho Geogauge (Tabela 14).

Tabela 14 – Correlações entre CBR e módulo de resiliência obtido pelo Geogauge

			CBR x Módulo (MPa)	CBR x Módulo (MPa)	CBR x Módulo (MPa)
	<b>CBR (%)</b>	<b>Módulo Geogauge (MPa)</b>	$Mr = (326 + 67 * CBR) * 0.098$ (MOTTA, PINTO E PREUSSLER, 1979)	$Mr = 10.34 * CBR$ (HEUKELOM e KLOMP, 1962)	$Mr = (5 \text{ a } 10) CBR$ (SANTANA, 2009)
<b>Ponto 3 (campo)</b>	106	527.79	727.94	1096.04	530 a 1060
		550.81			
		565.02			
		579.81			
<b>Ponto 6 (caixa)</b>	35	236.41	261.76	361.9	175 a 350
		249.6			
		253.96			
		290.42			
		300.35			
		222.86			
		230.79			
		238.2			

Fonte: O AUTOR (2016)

Verificou-se que com relação aos valores de módulo de resiliência encontrados com valores de CBR dos materiais da caixa e de campo por correlações CBR x Módulo, já existentes, foram obtidos valores satisfatórios comparados aos módulos medidos pelo Geogauge na caixa, em laboratório.

Para o campo, apenas a equação de SANTANA (2009) se aproximou dos valores de módulo de resiliência medidos pelo Geogauge, talvez por conta dos solos pesquisados, igualmente ao do campo, serem coletados na ilha de São Luis.

Vale comentar também que como a camada de base foi executada com 20 cm de espessura, é possível que o Geogauge tenha medido as propriedades da camada de sub-base pois como foi mostrado no capítulo 2, o limite mínimo de medição do Geogauge sem qualquer interferência é de 22 cm.

Por fim, quanto aos valores de *Standard Deviation (SD)* e *Signal Noise Ratio (SNR)* fornecidos também pelo Geogauge os quais foram mostrados na Tabela 9 significa que quanto

mais o SNR for próximo de 10, mais rígido será o material, indicando que deve-se ter mais cautela no assentamento do aparelho. O SD será menor para materiais macios ( $\sim 1$  MN/m) e maior para materiais duros ( $\sim 5$  MN/m). Uma variação grande desse valor entre locais de teste para um dado material, indica assentamento impróprio, por exemplo (1,5 para 3,0 MN/m). Uma medição deve ser repetida em cada local para garantia de um bom assentamento. Caso o valor não se altere expressivamente, indica então uma representação verdadeira do material.

Com relação aos dados de campo apresentados, percebeu-se que para a maioria dos pontos medidos, o material apresentou o SD mais próximo de 1 MN/m do que 5 MN/m, sendo considerado macio. O SNR se aproximou de 10 na maior parte dos pontos, demonstrando um material rígido de difícil assentamento. Em cada um dos locais medidos percebeu uma proximidade entre os valores do SD, indicando precisão na medição daquele ponto.

## 5 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A partir dos resultados dos ensaios de campo e de laboratório é possível apresentar neste capítulo algumas conclusões e observações acerca dos resultados obtidos tanto para os ensaios efetuados em laboratório a partir de amostras de solo coletados na zona rural da ilha de São Luis.

Utilizando-se dos ensaios realizados a partir de amostras do solo deste trabalho pode-se concluir que:

- O solo coletado para este trabalho foi classificado, seguindo a metodologia de caracterização da TRB (*Transportation Research Board*), como solo do tipo A-2-4.
- A camada de pavimento simulada em laboratório no interior da caixa apresentou compactação ineficiente pois devido ao peso do rolo, não se conseguiu transmitir energia de compactação suficiente, chegando a um grau de compactação máximo de 87% mesmo aumentando o número de passadas.
- O material apresentou um CBR de 35% não adequado para utilização em camadas de base mas sim em camadas de sub-base.
- O ar condicionado presente no laboratório pode ter influenciado a umidade do solo no processo de lançamento e compactação das camadas na caixa.
- A compactação em camadas de 5 cm de espessura, pode ter apresentado, de um dia para outro, perda de umidade, alterando a densidade do material.
- O material ensaiado é um material granular classificado como excelente a bom para ser utilizado em sub-base.
- Em relação aos métodos de controle de compactação em campo, Geogauge e frasco de areia, percebeu-se que os ensaios realizados com o Geogauge foram consideravelmente mais rápidos em relação ao frasco de areia e que a variação de módulo e rigidez é significativamente maior do que a densidade *in situ* o que demonstra a maior sensibilidade do método Geogauge.
- A adoção desse equipamento em substituição ao frasco de areia permite a determinação de parâmetros utilizados nos métodos de dimensionamento mecanístico-empírico.
- Apesar da proximidade dos pontos de ensaio na caixa, o que não acontece em campo, obtiveram-se resultados de rigidez e módulo consideravelmente diferentes.
- A correlação encontrada entre a rigidez e a densidade foi considerada satisfatória.

Porém, verificou-se que usando os dados de rigidez em campo na mesma correlação, não foi encontrada a densidade medida em campo pelo frasco de areia.

- O Geogauge é um equipamento portátil que fornece simples e rapidamente medidas de rigidez e módulo em campo de materiais compactados. Pode ser usado para construir curvas de módulo crescente a medida que o rolo compactador passa sobre o solo. Além disso, é interessante utilizar o Geogauge intercalado com as passadas do rolo a fim de evitar uma fraca ou super compactação do solo e alcançar valores pré definidos de dimensionamento.

- Verificou-se que os resultados de módulo de resiliência obtido pelo Geogauge se aproximam do módulo de resiliência obtido em laboratório, conforme equações de correlação de pesquisadores, o que nos dá certa segurança na utilização do equipamento no controle de compactação.

- Os resultados de rigidez obtidas pelo Geogauge no campo quando utilizados nas correlações de densidade e rigidez, não resultaram nas densidades obtidas pelo frasco de areia no campo, o que pode estar relacionado com os diferentes graus de compactação (campo x laboratório).

- Com relação aos valores de módulo de resiliência encontrados com valores de CBR dos materiais da caixa e de campo por correlações CBR x Módulo, foram obtidos valores satisfatórios comparados aos módulos medidos pelo Geogauge na caixa, em laboratório. No campo, apenas uma equação de correlação foi próxima.

- O assentamento do Geogauge em solos duros é difícil e requer prática pois um mau assentamento pode causar uma imprecisão dos resultados obtidos pelo equipamento. .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 307 (American Association of State Highway and Transportation Officials). **Standard method of test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials**. American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington, DC, USA. 1999.

ASTM D6758 (American Society for Testing and Materials). **Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil Aggregate in-Place by an Electro-Mechanical Method**. ASTM International, USA. 2006.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Design Guide of Pavement Structures, USA. 1993.

ALSHIBLI, K.A.; ABU-FARSAKH, M.; and SEYMAN, E., ‘**Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools**. ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17. 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2007). AASHTO Designation T 307-99 – **Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials**. Washington, DC.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457 – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 1986.

BASTOS, C. **Apostila de Mecânica dos Solos**, Instituto Federal do Espírito Santo, 2008.

BASTOS, J. B. S; SOARES, J. B.; BARROSO, S. H. A. (2014). **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanísticoempírico a partir de ensaios acelerados e instrumentação em campo**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anpet. Curitiba, PR. 4 p.

BATISTA, L.C. M.; MUNIZ, M.; FORTES, R. M. **Determinação de Parâmetros de Deformabilidade de Camadas de um pavimento a partir de ensaios de campo**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília. Brasília. 2007.

BEZERRA NETO, R. S. ; PARREIRA, A. B. ; MOTTA, L. M. G. **Avaliação comparativa de estruturas de pavimentos dimensionadas através dos métodos empírico (DNER) e mecanístico para a região de Campo Grande- MS**. XVII Congresso de Ensino e Pesquisa Em Transportes, Anais de Congresso. São Paulo. 2003.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Vol. 6ª edição. Rio de Janeiro. 1988.

CAVALCANTE, J. H. F. ; FERNANDES, G. . **Determinação da Rigidez e Módulo de Elasticidade de Solos Compactados de Pavimentos Rodoviários e Ferroviários Utilizado Geogauge H4140**. In: XV Congresso Nacional de Mecânica dos Solos e Geotecnia - XV COBRAMSEG, 2010. Gramado, RS. 2010.

CHEN, D. H., WU, W., HE, R., BILYEU, J., & ARRELANO, M. **Evaluation of In-Situ Resilient Modulus Testing Techniques**. Texas DOTD Report. Austin, TX. 2000.

CONCEPA. **Método de Dimensionamento de Pavimentos – Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações**. Porto Alegre. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 122/94 – Solos – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 129/94 – Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 082/94 – Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 131/94 – Solos – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 049/94 – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 092/94 – Solos – Determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 093/94 – Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME - 052/94 – Solos e agregados miúdos – Determinação da umidade com o emprego do “Speedy”. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 162/94 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 041/94 – Solos – Preparação de amostras para caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER- ME 051/94 – Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006- ES – Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Manual de Pavimentação, Publicação IPR-719, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT 139/2010 – ES – Sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT 098/2007 – ES – Base laterítica estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro. 2007.

DYNATEST INC. **Dynatest 8000 FWD test system owner’s manual technical description.** Starke: 1995.

Headquarters Department of the Army. Field Manual No. 5-410. Washington, DC. 1992.

EGOROV, K. E., “**Calculation of Bed for Foundation with Ring Footing**”, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2. 1965

ELLIOT, R.P., THORNTON, S.I., “**Resilient Modulus and AASHTO Pavement Design**”, Transportation Research Record, 1196, TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1988.

FLEMING, P. R. **Field Measurement of Stiffness Modulus for Pavement Foundations.** Transportation Research Record 1755. 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board for Presentation and Publication, pp 69-77. Washington DC. 2001.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV.** Rio de Janeiro. 2007.

SARAIVA, S. L. C **Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFOP. Ouro Preto. 2006.

SCULLION, T., **Field Investigation: Pre-Cracking of Soil-Cement bases to Reduce Reflection Cracking.** College Station, Texas A&M University. 2001.

GOMES, M. S.; HELAL, A. M. P; FILHO, J. C. **Análise do Comportamento Mecânico de um Pavimento Ferroviário Através de um Estudo Comparativo entre os Ensaios de CBR e Módulo de Resiliência.** São Luis. 2015.

GUDISHALA, R. **Development of resilient modulus prediction models for base and subgrade pavement layers from in situ device test results.** 133f. Thesis of Master of Science in Civil Engineering in the Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University. Louisiana. 2004.

HEUKELOM, W. e KLOMP, A. J. G., 1962, **Dynamic testing means of controlling pavements during and after construction.** University of Michigan. 1962.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An Introduction to Geotechnical Engineering,** Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.1981

HUMBOLDT Mfg. Co. GeoGauge User Guide. Version 4.1. 2007.

HUMBOLDT Mfg. Co. (2007). *A Practical Field Gauge for Compaction Process Control Via Mechanistic Parameters – In-Place Stiffness & Modulus.* 2007.

HUMBOLDT Mfg. Co. (2000c). “Geogauge User Guide: Version 3.8” Norridge, IL.

HOSSAIN, M. S.; APEAGYEI, A. K. **Evaluation of the Lightweight Deflectometer for In-Situ Determination of Pavement Layer Moduli**. Virginia Transportation Research Council. Research Report. Final Report VTRC 10-R6. 2010.

KALOUSH, K. E.; RODEZNO, M. C. **Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a concessionária NovaDutra**. Arizona State University. 2011.

LIMA, M. C.; FERNANDES, G. **Estudo Comparativo de Determinação do Módulo de Resiliência Utilizando os Métodos GeoGauge H4140 e California Bearing Ratio (CBR) de Campo e Laboratório**. Ouro Preto, MG. 2015.

Louisiana Department of Transportation. Louisiana. 2004.

LENKE, L. R. **Evaluation of the Humboldt GeoGauge on Dry Cohesionless Silica Sand in a Cubical Test Bin**. ATR Institute. University of New Mexico. 1999.

Manual H-4140 GeoGauge, 2014.

MAIA, C. L. **Análise comparativa de parâmetros de deformabilidade em camadas granulares: testes ‘in situ’ e ensaios de laboratório**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2016.

MOHHAMED L.N.; HERATH A.; GUDISHALA R.; NAZZAL M. D.; ABU-FARSAKH M. Y.; ALSHIBLI K. **Development of Models to Estimate the Subgrade and Subbase layers’ Resilient Modulus from In situ Devices Test Results for Construction Control**. Louisiana Transportation Center. Louisiana. 2008.

NETO, R. S. B. **Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados Através dos Métodos Empírico do DNER e Mecânico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos para a Região de Campo Grande (MS)**. São Carlos. 2004.

NAZZAL, M. D. **Field Evaluation of in-situ Tests Technology for QC/QA During Construction of Pavement Layers and Embankments**. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. 2003.

Pavement Interactive. **Dynamic Cone Penetrometer**. 2009.

Pavement Interactive, “<http://www.pavementinteractive.org/article/resilient-modulus/> (acesso em 15/04/2016)”. 2007.

Pavement Interactive, “<http://www.pavementinteractive.org/article/elastic-modulus/> (acesso em 15/04/2016)”. 2007.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**, 2000, São Paulo.

PINTO & PREUSSLER. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro. 2002.

POWELL, W. D.; POTTER, J. F.; MAYHEW, H. C. and Nunn, M. E., **The structural design**

**of bituminous roads.** TRRL Report LR 1132. 1984.

PREUSSLER, L. A., **Contribuição ao Estudo da Deformabilidade de Camadas de Pavimento.** 129f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo. 2007.

RATHJE, E.M.; WRIGHT, S. G.; STOKOE II, K. H.; ADAMS, A.; TOBIN, R.; SALEM, M. **Evaluation of Non-Nuclear Methods for Compaction Control.** Texas Department of Transportation. Austin. 2006.

SAWANGSURIYA, A; EDIL, T. B.; BOSSCHER, P. J. (2002). **Laboratory evaluation of the soil stiffness gauge (SSG).** Transportation Research Board 81<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington, D.C.

SANTANA, W. C., **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado de Maranhão.** São Paulo. 2009.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação. Volume 1.** 2<sup>a</sup> Edição. São Paulo. 2007.

SILVA FILHO, J. C.; GUIMARAES, A. C. R.. **Um Estudo sobre a Influência da Infraestrutura Ferroviária na Manutenção da Integridade Estrutural de uma Via Férrea Tipo Heavy Haul.** Revista do CEDS. São Luis. 2014.

SIMMONS, C. **“Letter of Finding: Memorandum to the Missouri Department of Transportation Research, Development and Technology Division”**, July 25, 2000.

SWIFT Conference, M. Main. **CBR Index Measurements for Gravel Runway Assessment.** 2010.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NCHRP NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. NCHRP REPORT 626: **NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction.** Project 10-65. ISSN 0077-5614. ISBN: 978-0-309-11777-7. Washington, D.C., 2009.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NCHRP NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. NCHRP PROJECT 10-84: **Modulus-Based Construction Specification for Compaction of Earthwork and Unbound Aggregate: Appendices, Draft final report.** The University of Texas at El Paso. Center for Transportation Infrastructure Systems. Texas. EUA. 2014.

White Paper Humboldt Mfg. Co (2010).