

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Ben-Hur Kummer Bittencourt

**ESTRADAS COM REVESTIMENTO PRIMÁRIO: DEFINIÇÃO
DAS DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS PARA O CONTROLE DE
COMPACTAÇÃO ATRAVÉS DE MEDIDAS DE
DESLOCAMENTOS ELÁSTICOS DAS CAMADAS**

Porto Alegre
dezembro 2011

BEN-HUR KUMMER BITTENCOURT

**ESTRADAS COM REVESTIMENTO PRIMÁRIO: DEFINIÇÃO
DAS DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS PARA O CONTROLE DE
COMPACTAÇÃO ATRAVÉS DE MEDIDAS DE
DESLOCAMENTOS ELÁSTICOS DAS CAMADAS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Nuñez
Coorientador: Leandro Olivio Nervis

Porto Alegre
dezembro 2011

BEN-HUR KUMMER BITTENCOURT

**ESTRADAS COM REVESTIMENTO PRIMÁRIO: DEFINIÇÃO
DAS DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS PARA O CONTROLE DE
COMPACTAÇÃO ATRAVÉS DE MEDIDAS DE
DESLOCAMENTOS ELÁSTICOS DAS CAMADAS**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 08 de dezembro de 2011

Prof. Washington Peres Nuñez
Dr. pela UFRGS
Orientador

Leandro Olivio Nervis
MSc. pela UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Nuñez (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Leandro Olivio Nervis
MSc. pela UFRGS

Lélio Antônio Teixeira Brito
PhD. pela University of Nottingham

João Rodrigo Guerreiro Mattos
MSc. pela UFRGS

Dedico este trabalho à Paula Juliana, que tem sido, desde o início do curso de graduação, minha fonte de inspiração e minha motivação para continuar nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Washington Peres Nuñez pelos ensinamentos e pelo tempo despendido na orientação desse trabalho.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pela paciência e dedicação na capacitação para elaboração e apresentação desse Trabalho de Diplomação.

Agradeço ao Eng. Leandro Olívio Nervis, por toda a ajuda e orientação, não só neste trabalho, mas também no âmbito profissional, como colega no Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA, sempre disposto a compartilhar seu conhecimento e suas experiências profissionais.

Agradeço ao INCRA por possibilitar que eu conciliasse meus estudos com minhas atividades profissionais nesse órgão, principalmente pela concessão da licença capacitação para elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Eng. Rodrigo Weber por toda colaboração prestada, principalmente pelos ensinamentos para correta utilização do equipamento de ensaio triaxial de cargas repetidas.

Agradeço a toda equipe do LAPAV pela colaboração para realização dos ensaios, principalmente ao Daniel e à Rebeca.

Agradeço à minha família por compreender a minha ausência em função da dedicação a este trabalho, agradecimento especial ao meu irmão Édipo por me ajudar na secagem ao ar e destorroamento das amostras.

Por último e não menos importante, agradeço à Paula Juliana, minha colega e companheira, por me apoiar sempre e não me deixar desistir quando os problemas pareciam não ter solução.

A diferença entre o possível e o impossível está na
vontade humana.

Louis Pasteur

RESUMO

Este trabalho trata da aplicação das deflexões admissíveis para o controle de compactação em estradas com revestimento primário, realizado através de medidas de deslocamentos elásticos com a utilização da viga Benkelman. As deflexões admissíveis foram obtidas através de uma abordagem mecânica do pavimento com o auxílio do software Everstress 5.0, utilizando os módulos de resiliência do subleito e da camada de revestimento primário. Os módulos de resiliência das camadas foram determinados em laboratório através da aplicação do ensaio triaxial de cargas repetidas em corpos-de-prova compactados na umidade ótima e com desvio de umidade de + ou - 2% em relação ao teor de umidade ótimo. Os resultados dos ensaios confirmam que os valores de módulo variam inversamente com a variação da umidade de compactação em relação à umidade ótima, ou seja, há um aumento do módulo de resiliência quando se diminui a umidade de compactação em relação à ótima e há uma diminuição no valor do módulo quando se aumenta a umidade, tomando como referência o módulo na umidade ótima. Comparando os resultados dos ensaios para o material do revestimento primário com modelos de materiais com classificação pedogenética semelhante a dos solos da região de ocorrência dos materiais em estudo é possível perceber que os valores obtidos nos ensaios são relativamente inferiores aos modelos encontrados na referida base de dados. Com este trabalho foi possível concluir que a adição da camada de revestimento primário, nas estruturas analisadas, contribui para o aumento das deflexões no pavimento, quando comparada com os valores obtidos no topo do subleito sem revestimento. Isso se deve ao fato de que o módulo do revestimento primário é menor que o módulo do subleito, o que faz com que as deflexões sejam comandadas pelo subleito. As deflexões admissíveis calculadas para o controle de compactação através das medidas de deslocamento elástico das camadas, com a utilização da viga Benkelman, não indicaram variação considerável com as condições de compactação avaliadas para o revestimento primário, o que se percebe é que as deflexões variam aparentemente de forma significativa apenas no ponto localizado abaixo da roda, no entanto essa informação não pode ser usada para medições com a viga Benkelman, uma vez que esta mede as deflexões no ponto localizado entre as rodas do semi-eixo padrão. Isso ocorre principalmente devido ao baixo valor do módulo de resiliência do material.

Palavras-chave: Revestimento Primário. Compactação. Deslocamento Elástico. Módulo de Resiliência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	16
Figura 2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica	19
Figura 3 – Esquema do aparelho de Casagrande para determinação do Limite de Liquidez	21
Figura 4 Mapa Especificação de materiais para vias não pavimentada.....	25
Figura 4 – Mapa de Pedologia da região de ocorrência dos solos em estudo	25
Figura 5 – Mapa de Pedologia da região de ocorrência dos solos em estudo, publicado em Solos do Rio Grande do Sul.....	27
Figura 6 – Pedologia da região de ocorrência dos solos em estudo, obtido dos Mapas de Pedologia do IBGE.....	27
Figura 7 – Geologia da região de ocorrência dos solos em estudo, obtido dos Mapas de Geologia da CPRM.....	28
Figura 8 – Exemplo de curva de compactação.....	30
Figura 9 – Influência da energia de compactação.....	31
Figura 10 – Viga Benkelman e prova de carga	34
Figura 11 – Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil	38
Figura 12 – Efeitos dos parâmetros de compactação no módulo de elasticidade	39
Figura 13 – Alguns solos e seus respectivos modelos de módulo de resiliência.....	40
Figura 14 – Montagem e execução do ensaio triaxial de cargas.....	43
Figura 15 – Curva de distribuição granulométrica do solo do subleito.....	46
Figura 16 – Curva de distribuição granulométrica do solo do revestimento primário.....	47
Figura 17 – Curva de compactação do solo do subleito.....	48
Figura 18 – Curva de compactação do solo do revestimento primário.....	48
Figura 19 – Resultados dos ensaios para obtenção dos módulos de resiliência do solo do subleito moldado com diferentes umidades de compactação.....	50
Figura 20 – Resultados dos ensaios para obtenção dos módulos de resiliência do solo do revestimento primário moldado com diferentes umidades de compactação..	50
Figura 21 – Resultados dos ensaios para obtenção dos módulos de resiliência do solo do revestimento primário moldado com diferentes umidades de compactação ensaiado com as tensões da norma da AASHTO	51
Figura 22 – Comparação do MR do revestimento primário com modelos disponíveis na base de dados da COPPE	52
Figura 23 – Afastamento entre rodas e os pontos de avaliação.....	53
Figura 23 – Afastamento entre rodas e os pontos de avaliação.....	53
Figura 24 – Estruturas analisadas.....	54

Figura 25 – Deflexões calculadas para o ponto de avaliação X2.....	56
Figura 23 – – Deflexões calculadas para o ponto de avaliação X1.....;	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de solos pelo sistema da AASHTO.....	22
Quadro 2 – Classificação de solos pelo SUCS	23
Quadro 3 – Características dos materiais de revestimento primário	24
Quadro 4 – Sequência de tensões para a fase de condicionamento	36
Quadro 5 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência	36
Quadro 6 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência de solos de subleito do Tipo 2.....	37
Quadro 7 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização e classificação dos solos.....	46
Quadro 8 – Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação.....	47
Quadro 9 – Características dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio triaxial de cargas repetidas.....	49
Quadro 10 – Deflexões no topo do subleito compactado calculadas para a estrutura sem revestimento primário.....	54
Quadro 11 – Deflexões calculadas para a estrutura com revestimento primário.....	55
Quadro 12 – Deflexões admissíveis no topo da camada de revestimento primário.....	58

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

MR: Módulo de Resiliência

SUCS: Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB: *Transportation Research Board*

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

LISTA DE SÍMBOLOS

v = velocidade (m/s)

D = diâmetro das partículas do solo (m)

ρ_s = massa específica das partículas do solo (kg/m^3)

ρ_w = massa específica da água (kg/m^3)

η = viscosidade da água (kg/m.s)

γ_d = peso específico aparente seco (g/cm^3)

γ = peso específico natural de compactação (g/cm^3)

w = teor de umidade (%)

D_0 = deflexão em centésimos de milímetro (0,01 mm)

L_0 = leitura inicial em centésimos de milímetro (0,01 mm)

L_f = leitura final em centésimos de milímetro (0,01 mm)

a = distância entre a articulação e a ponta de prova da viga (m)

b = distância entre o extensômetro e a articulação da viga (m)

MR = módulo de resiliência (kPa)

σ_d = tensão desvio (kPa)

ϵ_1 = deformação resiliente axial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.2 Objetivo secundário	14
2.3 PRESSUPOSTO	15
2.4 DELIMITAÇÕES	15
2.5 LIMITAÇÕES	15
2.6 DELINEAMENTO	15
3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	18
3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO	18
3.2 ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO	20
3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	21
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARA REVESTIMENTO PRIMÁRIO	24
3.5 CARACTERIZAÇÃO PEDOLÓGICA DA REGIÃO DE ORIGEM DOS SOLOS EM ESTUDO	26
3.6 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DE ORIGEM DOS SOLOS EM ESTUDO	28
4 COMPACTAÇÃO	29
5 PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE SOLOS	33
5.1 VIGA BENKELMAN	33
5.2 ENSAIO TRIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS	35
6 PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	41
6.1 ENSAIOS PARA ESPECIFICAÇÃO EXPEDITA DE MATERIAIS PARA VIAS NÃO PAVIMENTADAS.....	41
6.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	41
6.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	42
6.4 ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA	42
7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	45
7.1 ENSAIOS PARA ESPECIFICAÇÃO EXPEDITA DE MATERIAIS PARA VIAS NÃO PAVIMENTADAS.....	45
7.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	45
7.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	47

7.4 ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA	48
8 CÁLCULOS DAS DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS.....	53
9 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira é composta predominantemente por estradas não pavimentadas, as quais correspondem a 86,5% das vias existentes no País e representam 92% da malha viária do Rio Grande do Sul. Essas vias possuem extensão considerável, com predominância absoluta de rodovias de jurisdição municipal (BRASIL, 2010a, p. 60).

As vias não pavimentadas, ou estradas com revestimento primário, são responsáveis pela ligação entre as comunidades rurais e as rodovias pavimentadas, possibilitando o escoamento da produção primária e o acesso aos grandes centros urbanos. Para tanto, é necessário que essas vias apresentem boas condições de trafegabilidade durante o ano inteiro.

Dentro desse contexto, a compactação das camadas de revestimento primário e subleito são de fundamental importância. Segundo Peraça (2007), a compactação aumenta a durabilidade do revestimento primário e melhora o desempenho do pavimento, na medida em que promove o aumento da resistência e a diminuição da deformabilidade.

Nesse sentido, o controle de compactação visa garantir a execução satisfatória das camadas, utilizando, para tanto, ensaios de laboratório e de campo. Os resultados dos ensaios de campo são correlacionados com dados obtidos em laboratório ou em trechos experimentais, possibilitando assim a verificação da qualidade dos serviços através de indicadores de desempenho definidos em projeto.

Os ensaios convencionais para o controle de compactação necessitam da extração de amostras das camadas compactadas, consistindo em ensaios destrutivos, além de apresentarem limitações na determinação do grau de compactação em camadas que contêm agregados graúdos. Uma alternativa aos métodos convencionais é o controle de compactação a partir da avaliação dos deslocamentos elásticos medidos no topo das camadas. Segundo Soares et al. (2000), esse método, por ser não destrutivo, rápido e por retratar a realidade de campo, possibilita um melhor controle de execução, além de possibilitar a detecção de falhas e permitir a correção de defeitos localizados, liberando as camadas mais rapidamente para os serviços subsequentes.

O controle de compactação, a partir de medidas de deslocamentos elásticos, consiste na determinação dos deslocamentos recuperáveis ou deflexões, medidos durante a construção das camadas, e na comparação desses valores com valores admissíveis. A deflexão admissível pode ser determinada através da análise mecânica do pavimento, utilizando os módulos de elasticidade das camadas, obtidos através de ensaios de laboratório ou estimados através de retroanálise.

Assim, neste trabalho serão definidas as deflexões admissíveis para o controle de compactação em estradas com revestimento primário, realizado através de medidas de deslocamentos elásticos com a utilização da viga Benkelman. As deflexões admissíveis serão obtidas através de uma abordagem mecânica do pavimento com o auxílio do software Everstress 5.0, utilizando os módulos de resiliência do subleito e da camada de revestimento primário. Os módulos de resiliência das camadas serão obtidos em laboratório através do ensaio triaxial de cargas repetidas aplicado em corpos-de-prova compactados na umidade ótima e com desvio de umidade de 2% em relação à ótima. Os resultados deste trabalho servirão de subsídio para o controle de compactação em estradas com revestimento primário a serem construídas em um projeto de assentamento de Reforma Agrária, localizado no município de São Gabriel-RS. As referidas estradas serão construídas em pista simples com uma camada de revestimento primário de 15 cm de espessura assente diretamente sobre o subleito.

O presente trabalho tem por conteúdo uma breve revisão bibliográfica sobre caracterização e classificação de solos, compactação e propriedades elásticas de materiais para pavimentação, bem como sobre os ensaios empregados na determinação dos parâmetros de compactação e comportamento resiliente desses materiais. O trabalho conta também com capítulos nos quais são abordados temas referentes aos procedimentos e técnicas experimentais na condução dos ensaios de laboratório para caracterização e classificação dos solos em estudo, e para compactação e determinação do módulo de resiliência das camadas para diferentes teores de umidade. Por fim, são definidas as deflexões admissíveis para o controle de compactação, considerando as especificações mínimas de umidade e grau de compactação das camadas, através da simulação do pavimento submetido a uma prova de carga padrão no software Everstress 5.0.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Para a elaboração do presente trabalho foram definidas as seguintes diretrizes que determinaram o seu desenvolvimento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

O presente estudo visa responder: quais são os valores admissíveis de deflexões medidas em campo, com a viga Benkelman, para verificar se foram atendidas as exigências mínimas de compactação das camadas em estradas com revestimento primário?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a definição das deflexões admissíveis medidas com a viga Benkelman no topo das camadas compactadas, com a finalidade de verificar a qualidade da compactação em estradas com revestimento primário a serem construídas pelo INCRA/RS, no interior do município de São Gabriel-RS.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a análise da variação do módulo de resiliência para diferentes teores de umidade de compactação do subleito local e do solo que será empregado como revestimento primário.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o subleito estudado tem deformabilidade uniforme e que a jazida de solo para o revestimento primário é homogênea.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a realização do estudo em estradas com revestimento primário situadas no interior do município de São Gabriel-RS.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho a não consideração dos efeitos de sucção, a utilização de amostras de apenas um ponto do subleito e o uso de um único software para o cálculo das deflexões.

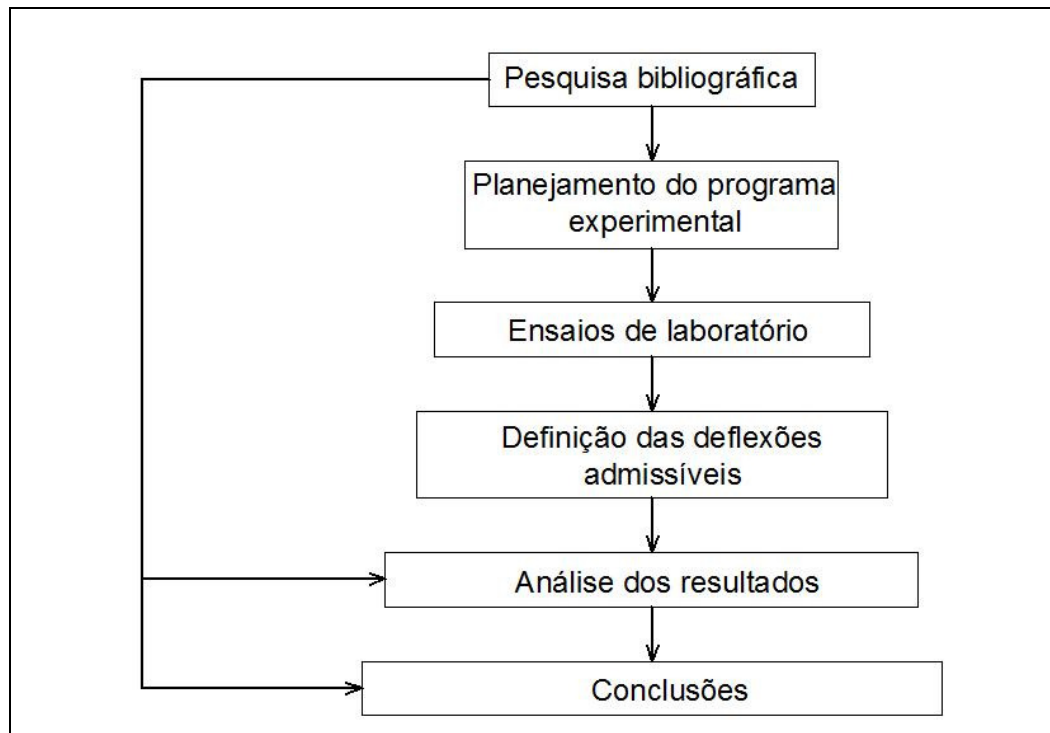
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir e que estão representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) planejamento do programa de pesquisa;
- c) ensaios de laboratório;
- d) definição das deflexões admissíveis;
- e) análise dos resultados;
- f) conclusões.

A pesquisa bibliográfica foi realizada de forma a subsidiar a etapa de planejamento do programa experimental com conhecimentos obtidos na bibliografia consultada, mais especificamente sobre a realização dos ensaios de laboratório e os fatores que influenciam os resultados desses ensaios. A pesquisa bibliográfica também subsidiou a análise dos resultados e as considerações finais do trabalho.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

O planejamento do programa experimental consistiu na determinação das especificações mínimas de moldagem dos corpos-de-prova que foram avaliados, como umidade e grau de compactação, bem como na quantidade de corpos-de-prova que foram submetidos ao ensaio triaxial de cargas repetidas. Nessa etapa foram definidas também as características mínimas dos materiais estudados, necessárias no estudo do comportamento desses materiais, como distribuição granulométrica, índices de consistência e a curva de compactação de cada material. Dessa forma, foram necessários, além dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, os ensaios de peneiramento e sedimentação, limites de liquidez e plasticidade e ensaios de compactação Proctor na energia normal.

Os ensaios de laboratório consistiram em ensaios de caracterização e compactação dos materiais, bem como ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência do subleito e do revestimento primário. Os ensaios triaxiais de cargas repetidas foram realizados em corpos-de-prova compactados na umidade ótima e com desvio de umidade de 2% em relação à ótima, com o objetivo de avaliar a influência do parâmetro umidade na deformabilidade do solo. O desvio de 2% em relação ao teor de umidade ótimo foi escolhido devido a esse valor ser comumente utilizado como especificação mínima aplicada no controle convencional de compactação. Da mesma forma foi adotado um grau de

compactação de 100% do ensaio Proctor Normal na moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio.

As deflexões admissíveis foram definidas a partir da análise mecânica do pavimento, considerando os módulos de resiliência obtidos nos ensaios triaxiais de carga repetida, a configuração das camadas do pavimento e um carregamento causado por uma roda dupla de caminhão com 8,2 toneladas-força de carga distribuída no seu eixo traseiro. A análise mecânica foi realizada no software Everstress 5.0 e forneceu como resultado dados de tensão, deformação e deslocamento elástico. Após análise mecânica do pavimento, foi construído um gráfico no qual as deflexões admissíveis no topo da camada de revestimento primário foram expressas em função da deformabilidade do subleito.

Após a definição das deflexões admissíveis foi feita a análise dos resultados. Nas conclusões foi realizada uma avaliação sobre os limites nos quais os parâmetros de controle são aplicáveis, bem como sobre a validade dos valores de deflexão admissíveis.

3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

A característica principal para diferenciação dos solos é a sua distribuição granulométrica. Os diversos tamanhos de partículas existentes em um solo são agrupados em faixas de variação granulométrica que recebem denominações específicas conforme o sistema de classificação (PINTO, 2002, p. 3). Segundo Pinto (2002, p. 9), “Para identificação de solos a partir das partículas que o constituem, são empregados correntemente dois tipos de ensaio, a análise granulométrica e os índices de consistência.”. Esses ensaios são descritos a seguir.

3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO

Das (2011, p. 22), define a análise granulométrica, que no Brasil tem os ensaios padronizados pela NBR 7181/1984, da seguinte forma:

A análise granulométrica é a determinação da faixa de tamanho das partículas presentes em um solo, expressa como a porcentagem do peso total seco. Dois métodos são utilizados para encontrar a distribuição do tamanho das partículas do solo: [...] o **ensaio de peneiramento** – para tamanhos de partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro e [...] [o] **ensaio de sedimentação** – para tamanhos de partículas menores que 0,0075 mm de diâmetro.

A análise granulométrica por peneiramento consiste em considerar, em relação ao peso seco da amostra, a porcentagem de material que passa em cada peneira. O resultado é representado em um gráfico que relaciona a abertura da peneira com a porcentagem que passa em cada uma delas. A análise por peneiramento está limitada a partículas com diâmetro superior a 0,075 mm, o que corresponde à abertura da malha n. 200 (PINTO, 2002, p. 10).

Segundo Das (2011, p. 23), o ensaio de sedimentação consiste na observação das velocidades de sedimentação das partículas. Assume-se que as partículas são esferas cujo diâmetro pode ser calculado pela Lei de Stokes:

$$v = D^2 \times (\rho_s - \rho_w) / (18 \times \eta) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

v = velocidade;

D = diâmetro das partículas do solo;

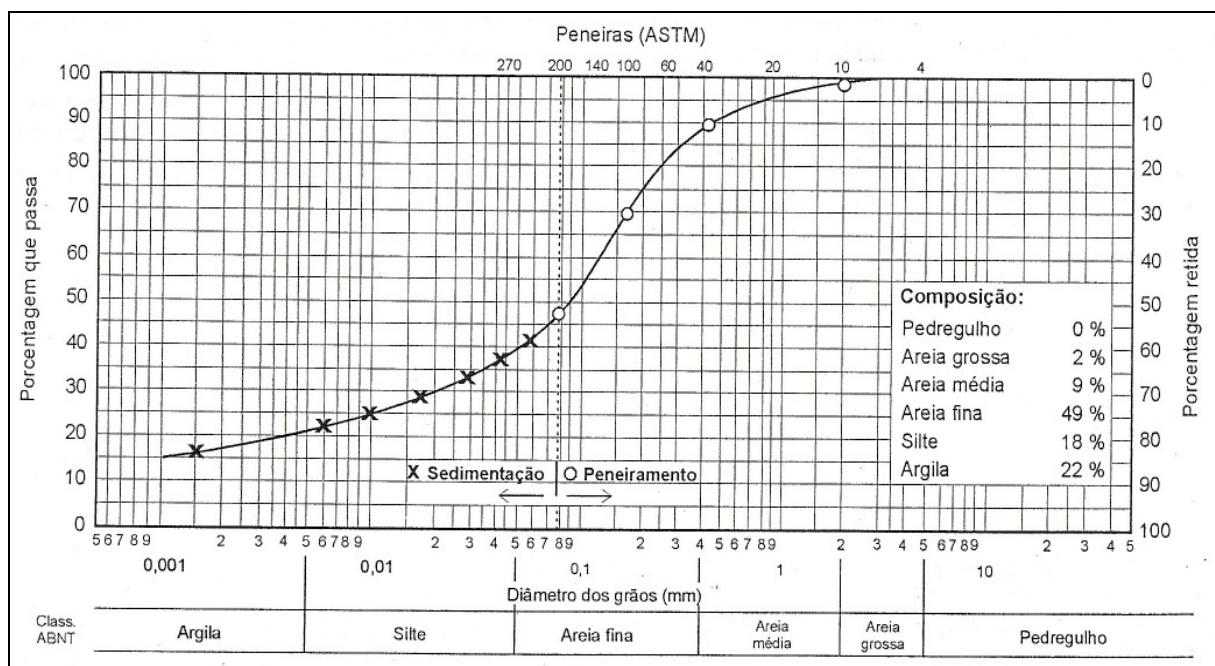
ρ_s = massa específica das partículas do solo;

ρ_w = massa específica da água;

η = viscosidade da água.

A figura 2 apresenta um exemplo de curva de distribuição granulométrica, na qual é possível identificar os resultados obtidos por sedimentação e peneiramento.

Figura 2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica



(fonte: PINTO, 2002, p. 9)

Segundo Pinto (2002, p. 11), a nomenclatura utilizada na distribuição granulométrica também é empregada para denominar os próprios solos:

Diz-se, por exemplo, que um solo é uma argila quando o seu comportamento é o de um solo argiloso, ainda que contenha partículas com diâmetros correspondentes às frações silte e areia. Da mesma forma, uma areia é um solo cujo comportamento é ditado pelos grãos arenosos que ele possui, embora partículas de outras frações possam estar presentes.

No caso de argilas, um terceiro sentido pode estar sendo empregado: os minerais-argila [...]. Estes minerais se apresentam geralmente em formato de placas e em tamanhos reduzidos, predominantemente, mas não exclusivamente, correspondentes a fração argila. São estes minerais que conferem a plasticidade característica aos solos argilosos.

3.2 ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO

Segundo Pinto (2002, p. 12), “Só a distribuição granulométrica não caracteriza bem o comportamento dos solos sob o ponto de vista da Engenharia. A fração fina dos solos tem uma importância muito grande neste comportamento.”. Para complementar a caracterização de solos com fração fina, são determinados os índices de consistência ou limites de Atterberg, que, segundo Das (2011, p. 51), são definidos como o Limite de Plasticidade, que é o teor de umidade na transição do estado semi-sólido para o estado plástico, e o Limite de Liquidez, que é o teor de umidade na transição do estado plástico para o estado líquido.

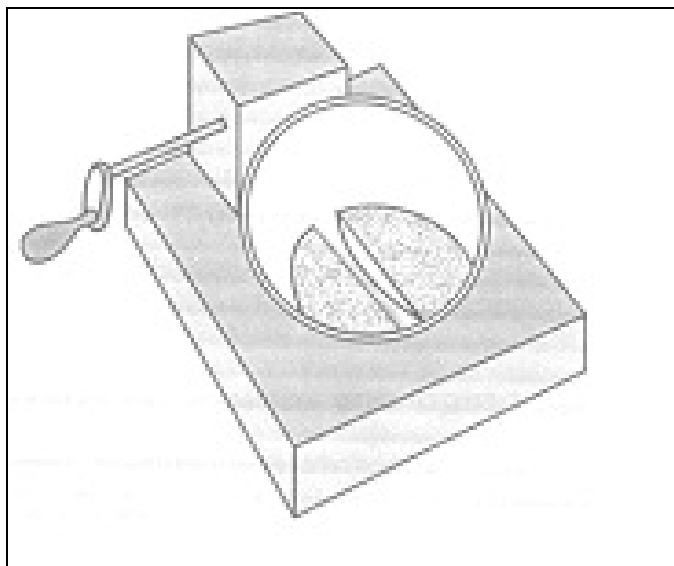
Pinto (2002, p. 13), descreve como são feitos os ensaios para determinação dos índices de consistência:

O Limite de Liquidez é definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar, numa concha, como ilustrado na figura [...] [3]. Diversas tentativas são realizadas, com o solo em diferentes umidades, anotando-se o número de golpes para fechar a ranhura, obtendo-se o limite pela interpolação dos resultados.

O Limite de Plasticidade é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se o solo com a palma da mão.

Segundo Pinto (2002, p. 15), os índices de consistência representam bem os solos em que as partículas ocorrem isoladamente, como é o caso dos solos transportados, no entanto os procedimentos empregados para realização dos ensaios de limites de consistência, como o destorroamento, amassamento e secagem da amostra, alteram a estrutura original do solo. Desta forma as correlações estabelecidas para solos transportados, utilizando os limites de consistência, não se aplicam adequadamente a solos saprolíticos e lateríticos. Isso por que os solos saprolíticos tem a estrutura fortemente influenciada pela estrutura da rocha matriz que lhe deu origem, enquanto os solos lateríticos tem a estrutura formada por aglomerações de partículas envoltas por deposições de sais de ferro e alumínio, formando torrões (PINTO, 2002, p. 15).

Figura 3 – Esquema do aparelho de Casagrande para determinação do Limite de Liquidez



(fonte: PINTO, 2002, p. 13)

3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Segundo Pinto (2002, 51-52), “O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é [...] estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, [...] orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.”. Os dois sistemas mais empregados universalmente são o Sistema Rodoviário de Classificação e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Esses sistemas se baseiam na composição granulométrica e nos índices de consistência dos solos e buscam definir grupos que apresentem comportamento semelhante.

O Sistema Rodoviário de Classificação ou sistema de classificação do *Transportation Research Board* (TRB), atualmente conhecido como sistema da AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials* –, é descrito como (BRASIL, 2006a, p. 55):

Nesta classificação, os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. [...] [no quadro 1] a seguir é mostrado o quadro de classificação dos solos, segundo o TRB. Determina-se o grupo do solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta.

Quadro 1 – Classificação de solos pelo sistema da AASHTO

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira n. 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Granulometria - % passando na peneira											
n. 10	50 máx.										
n. 40	30 máx.	30 máx.	51 mín.								
n. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira n. 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			
* O IP do grupo A-7-5 é igual ou menor do que o LL menos 30.											

(fonte: BRASIL, 2006a, p. 56)

No Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), mostrado no quadro 2, o primeiro aspecto considerado é a porcentagem de finos presentes no solo. Se a quantidade de finos for inferior a 50%, o solo é dito como de graduação grosseira, se for superior a 50%, então o solo é classificado inicialmente como de graduação fina. Em seguida, são avaliados dados complementares dos solos como a distribuição granulométrica e os índices de consistência (PINTO, 2002, p. 53).

Quadro 2 – Classificação de solos pelo SUCS

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mal graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mal graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
	SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	Siltes e Argilas com $LL \leq 50$	ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade – Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
OL			Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
Siltes e Argilas com $LL > 50$		MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.	

(fonte: BRASIL, 2006a, p. 59)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARA REVESTIMENTO PRIMÁRIO

Brasil (2005, p. 49), define revestimento primário como “[...] uma camada de solo, com características adequadas, capaz de oferecer uma superfície de rolamento que assegure o tráfego em qualquer época do ano.”. Segundo o autor, o material deve possuir algumas características mínimas, as quais estão dispostas no quadro 3.

Quadro 3 – Características dos materiais de revestimento primário

Descrição	Classificação AASHTO	D máx mm	% Passando			IP	Comportamento como revestimento primário
			n. 10	n. 40	n. 200		
			2,0 mm	0,425 mm	0,075 mm		
Cascalho de origem vulcânica	A-2-6	25	49	38	24	17	Bom
Cascalho quartzoso	A-2-4	24	58	45	24	9	Bom
Cascalho laterítico	A-2-4	22	51	42	26	10	Bom

(fonte: BRASIL, 2005, p. 49)

D’Ávila et al (2008), propõe uma classificação expedita de materiais para vias não pavimentadas. Tal especificação prevê que um material de revestimento deve apresentar algumas características essenciais, quais sejam, dimensão dos agregados menor ou igual a 35 mm, de modo a evitar uma acentuada irregularidade da plataforma; capacidade de suporte, de forma a não sofrer ruptura pela ação do tráfego; aderência, de forma a manter atrito adequado com os pneus dos veículos; resistência a abrasão, de forma a não sofrer desgaste devido ao atrito com os pneus dos veículos; não erodível; e que seja resistente ao processo de intemperismo, relacionado a ciclos de molhagem e secagem. Essa especificação se fundamenta na análise granulométrica, no método expedito de classificação MCT (método das pastilhas) e num ensaio de resistência a seco (resistência a abrasão na condição seca). A resistência a seco consiste na resistência ao esmagamento de uma esfera de solo seca (material passado na peneira n. 4), sendo a mesma classificada do seguinte modo:

- a) baixa, quando a esfera rompe entre o dedo polegar e o indicador;

- b) média, quando rompe, entre o dedo polegar e uma superfície plana dura, com esforço apenas da mão;
- c) alta, quando rompe, entre o dedo polegar e uma superfície plana dura, com esforço do braço;
- d) Muito alta, quando não rompe em nenhuma das situações acima.

A seleção de materiais para vias não pavimentadas preconizada na referida especificação é efetuada seguindo o prescrito na figura 4.

Figura 4 – Especificação de materiais para vias não pavimentadas

AVALIAR A ESTABILIDADE GRANULOMÉTRICA						
°	FAIXAS GRANULOMÉTRICAS					
	"B"	"C"	"D"	"E"	"F"	"TL"
2" (50,8)	0					
1" (25,4)	---	0	0	0	0	0
3/8" (9,5)	25 – 60	15 – 50	0 – 40			0 – 10
4 (4,8)	40 – 70	35 – 65	15 – 50	0 – 45	0 – 30	0 – 26
10 (2,0)	55 – 80	50 – 75	30 – 60	0 – 60	0 – 45	0 – 46
40 (0,42)	70 – 85	70 – 85	55 – 75	50 – 80	30 – 70	30 – 68
200 (0,075)	80 – 92	85 – 92	80 – 92	80 – 92	75 – 92	64 – 82
O material não deve conter mais de 5% de partículas maiores do que 38 mm, a não ser que seja colocado como camada a ser cravada em solo de baixo suporte.						
Os materiais que se enquadrem em uma das faixas granulométricas indicadas – materiais estabilizados granulometricamente – serão avaliados pelos quadros 2b, 2c, 2d, 2e e 2f.						
Os materiais não estabilizados granulometricamente com mais de 70 % maior do que a peneira nº 200 serão avaliados pelos quadros 2g e 2h.						
Os materiais não estabilizados granulometricamente com 70 % ou menos maior do que a peneira nº 200 serão avaliados pelos quadros 2i, 2j e 2k.						
MATERIAL ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE RESISTÊNCIA A SECO BAIXA A ALTA						
MATERIAL INADEQUADO. Pode ser utilizado desde que misturado, em proporções adequadas, com fração fina de boa qualidade. O resultado da mistura deve ser avaliado pela especificação. Ver Quadro 2g.						
MATERIAL ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE, RESISTÊNCIA A SECO MUITO ALTA E PENETRAÇÃO ≤ 2 mm (24 HORAS DE REABSORÇÃO)						
MATERIAL ADEQUADO. É um dos materiais mais resistentes a processos erosivos e ao desgaste por abrasão na condição seca. Ver Quadro 2g. HIERARQUIA 1°						
MATERIAL ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE, RESISTÊNCIA A SECO MUITO ALTA E PENETRAÇÃO > 2 mm (24 HORAS DE REABSORÇÃO) E PENETRAÇÃO ≤ 5 mm (5 MINUTOS DE REABSORÇÃO)						
MATERIAL ADEQUADO. Ver Quadro 2g. Penetração > 5 mm (15 minutos) – HIERARQUIA 4E Penetração ≤ 5 mm (15 minutos) – HIERARQUIA 4D Penetração ≤ 5 mm (30 minutos) – HIERARQUIA 4C Penetração ≤ 5 mm (2 horas) – HIERARQUIA 4B Penetração ≤ 5 mm (24 Horas) – HIERARQUIA 4A						
MATERIAL ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE, RESISTÊNCIA A SECO MUITO ALTA E PENETRAÇÃO > 5 mm (5 MINUTOS DE REABSORÇÃO)						
MATERIAL ADEQUADO, desde que a percentagem menor do que a peneira 200 seja menor do que 18%. No caso de deficiência de abaulamento ocorre um intenso desenvolvimento de panelas. Deve ser aventada a possibilidade da utilização de materiais mais resistentes à erosão. Ver Quadro 2g. HIERARQUIA 5°						
MATERIAL ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE Também podem ser usados nas seguintes condições (desde que as partículas da fração grossa não quebrem com esforço mecânico humano): • como camada corretiva em solos que apresentem falta de aderência; • como camada a ser cravada para aumentar o suporte (estabilizar granulometricamente) de um solo expansivo cujo comportamento é definido pela fração fina.						
MATERIAL NÃO ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE, FRAÇÃO GROSSEIRA PREDOMINANTE (MAIS DE 70 % MAIOR DO QUE A PENEIRA 200) – BEM GRADUADO						
MATERIAL INADEQUADO. Pode ser utilizado desde que misturado, em proporções adequadas, com fração fina de boa qualidade. O resultado da mistura deve ser avaliado pela especificação. Também pode ser usado: • como camada corretiva em solos que apresentem falta de aderência; • como camada a ser cravada para aumentar o suporte de um solo expansivo (estabilizar granulometricamente) cujo comportamento é definido pela fração fina.						
MATERIAL NÃO ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE, FRAÇÃO GROSSEIRA PREDOMINANTE (MAIS DE 70 % MAIOR DO QUE A PENEIRA 200) – MAL GRADUADO						
MATERIAL INADEQUADO.						
MATERIAL NÃO ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE (70 % OU MENOS É MAIOR DO QUE A PENEIRA 200) MATERIAL CUJO COMPORTAMENTO É DEFINIDO PELA FRAÇÃO FINA						
PENETRAÇÃO ≤ 2 mm (24 HORAS DE REABSORÇÃO), PERCENTAGEM MAIOR DO QUE A PENEIRA 200 (0,075 mm) = 60 %						
MATERIAL ADEQUADO DESDE QUE NÃO SEJA UM SOLO TRANSPORTADO OU ORGÂNICO E A RESISTÊNCIA A SECO SEJA MUITO ALTA. Apresenta aderência deficiente – sabão – em dias chuvosos. É um fino excelente para ser misturado com materiais com boa distribuição granulométrica que apresentem carência de fração fina. Trata-se de um dos materiais mais resistentes a processos erosivos. Quando a resistência a seco não for muito alta deve ser cogitada a mistura com fração fina de boa qualidade. HIERARQUIA 3°						
MATERIAL NÃO ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE (70 % OU MENOS É MAIOR DO QUE A PENEIRA 200) MATERIAL CUJO COMPORTAMENTO É DEFINIDO PELA FRAÇÃO FINA						
PENETRAÇÃO ≤ 2 mm (24 HORAS DE REABSORÇÃO), PERCENTAGEM MAIOR DO QUE A PENEIRA 200 (0,075 mm) > 60 %						
MATERIAL ADEQUADO DESDE QUE NÃO SEJA SOLO TRANSPORTADO OU ORGÂNICO E A RESISTÊNCIA A SECO SEJA MUITO ALTA. É um dos materiais mais resistentes a processos erosivos. Quando a resistência a seco não for muito alta pode ser cogitada a mistura com fração fina de boa qualidade. HIERARQUIA 2°						
MATERIAL NÃO ESTABILIZADO GRANULOMETRICAMENTE (70 % OU MENOS É MAIOR DO QUE A PENEIRA 200) MATERIAL CUJO COMPORTAMENTO É DEFINIDO PELA FRAÇÃO FINA						
PENETRAÇÃO > 2 mm (24 HORAS DE REABSORÇÃO)						
MATERIAL INADEQUADO.						

(fonte: adaptado de d'Ávila et al., 2008)

O revestimento primário com características adequadas, segundo Baesso e Gonçalves (2003, p. 38), é aquele composto por materiais com agregado graúdo, areia e finos. Sem uma adequada composição destes materiais, o revestimento primário apresentará um desempenho deficiente. Quando o material se mostra inadequado perante a composição ideal de materiais, uma prática comum é a adição de finos. Os finos preenchem os vazios formados pelos agregados graúdos, promovendo a estabilidade da mistura, enquanto os agregados graúdos, por sua vez, promovem a capacidade de suporte da via. Dentro desse contexto de melhoria da composição dos materiais utilizados como revestimento primário, as argilas exercem um papel muito importante. Devido às propriedades aglutinantes das argilas, elas promovem a cimentação dos agregados, produzindo assim, uma camada mais compacta e densa, possibilitando a redução das perdas de finos na forma de pó.

3.5 CARACTERIZAÇÃO PEDOLÓGICA DA REGIÃO DE ORIGEM DOS SOLOS EM ESTUDO

Segundo Streck et al. (2008, p. 162), a área de ocorrência dos solos em estudo, representada na figura 5, está situada na classe denominada de argissolo vermelho-amarelo distrófico úmbrico, unidade Alto das Canas, cujo código de classificação pedológica é o PVAd8.

Segundo Streck et al. (2008) o termo argissolo deriva da presença de um horizonte subsuperficial mais argiloso no perfil. Os argissolos são geralmente profundos a muito profundos variando de bem drenados a imperfeitamente drenados, apresentando um perfil com um sequência de horizontes A-Bt-C ou A-E-Bt-C, sendo o horizonte Bt do tipo B textural. Esse horizonte é significativamente mais argiloso do que os horizontes A e E. Segundo os autores, os solos podem ser originados de diversos tipos de materiais, tais como basaltos, granitos, arenitos, argilitos e silitos, sendo que no caso em questão os solos são originários do argilito. As cores vermelhas e vermelho-amarelas indicam ambientes de boa drenagem.

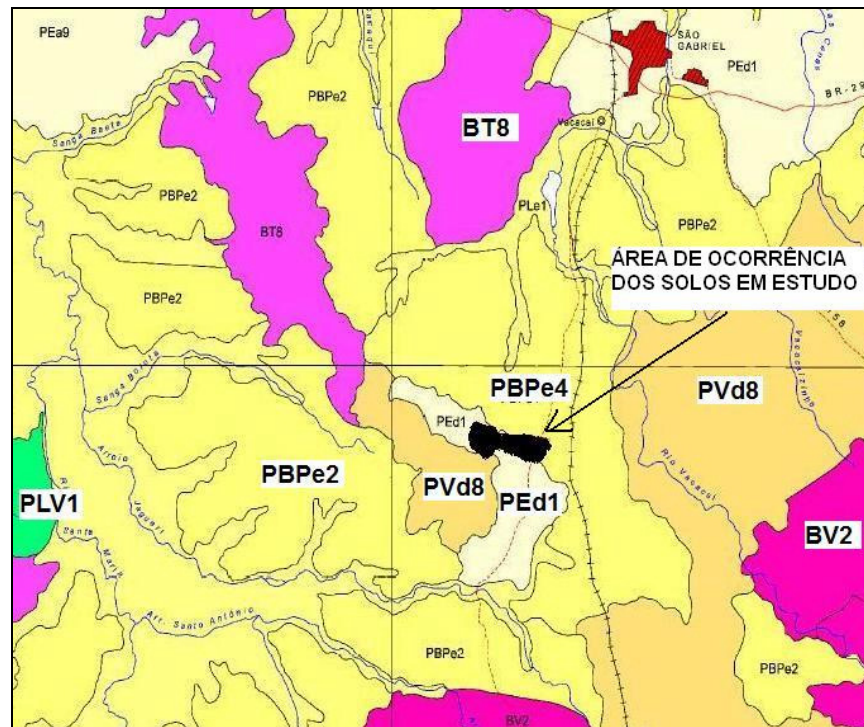
Brasil (2003) classifica o solo da área de ocorrência dos materiais em estudo, representada na figura 6, como Podzólico Vermelho-Escuro distrófico, cujo código é o PEd1. O horizonte A desses solos possui textura média, enquanto o horizonte B é argiloso.

Figura 5 – Pedologia da região de ocorrência dos solos em estudo, publicado em Solos do Rio Grande do Sul



(fonte: adaptado de STRECK et al., 2008, p. 162)

Figura 6 – Pedologia da região de ocorrência dos solos em estudo, obtido dos Mapas de Pedologia do IBGE



(fonte: adaptado de BRASIL, 2003)

4 COMPACTAÇÃO

Através da utilização de energia mecânica, a compactação aumenta a densidade dos solos através da expulsão de ar dos vazios. Nesse sentido, a umidade de compactação possibilita que o solo adquira uma estrutura mais densa após a compactação, devido a água agir como um lubrificante das partículas, permitindo uma formação mais compacta (DAS, 2011, p. 84).

Pinto (2002, p. 65), descreve a influência da umidade na compactação:

[...] aplicando-se uma certa energia de compactação [...], a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Quando se compacta com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução dos vazios. Para umidades mais elevadas, a água provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto.

Na compactação, as quantidades de partículas e de água permanecem constantes; o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios. [...] A partir de um certo teor de umidade, entretanto, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios pois o grau de saturação já é elevado e o ar está ocluso (envolto por água). Há, portanto, para a energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica seca máxima, ou uma densidade seca máxima.

Segundo Das (2011, p. 85), a determinação do peso específico seco máximo é realizada em laboratório pelo chamado ensaio de compactação Proctor. No ensaio de compactação Proctor Normal, ou seja, com energia de compactação normal, o solo é disposto em três camadas em um molde de volume conhecido. A compactação de cada camada é feita através da aplicação de 25 golpes de um soquete de massa padronizada e que cai de uma altura pré-definida. O ensaio é realizado para várias quantidades de água misturadas ao solo seco e em cada ensaio o peso específico natural de compactação é determinado pela relação entre o peso do solo compactado e o volume do molde. Segundo Pinto (2002, p. 26), o peso específico aparente seco é calculado a partir do peso específico natural e da umidade conforme a fórmula 2:

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w) \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

γ_d = peso específico aparente seco;

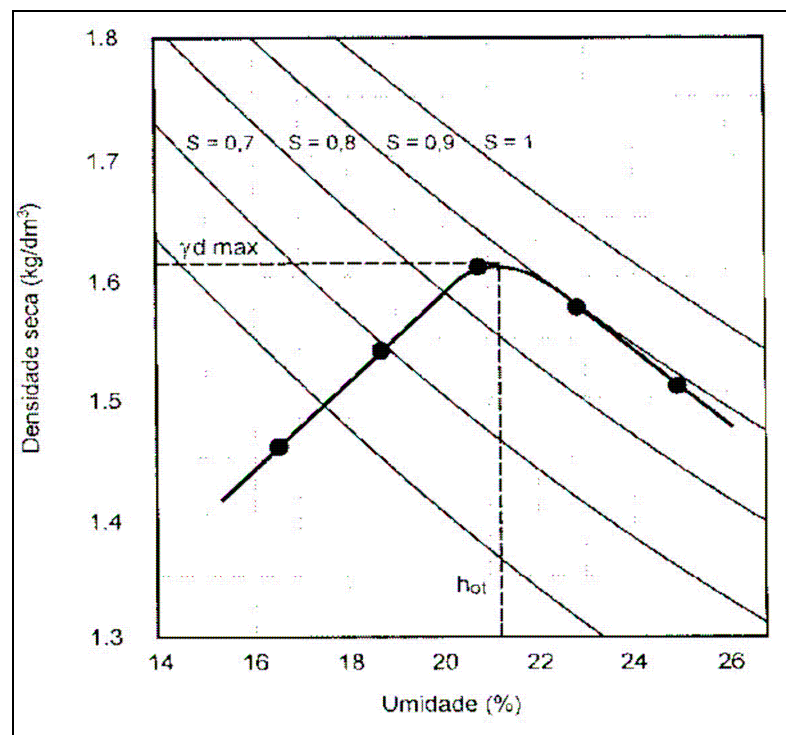
γ = peso específico natural de compactação;

w = teor de umidade (%).

Segundo Pinto (2002, p. 66), no Brasil o ensaio de compactação Proctor Normal, padronizado pela NBR 7.182/1986, é realizado com 26 golpes do soquete, devido ao fato que o cilindro padronizado no País possui dimensões diferentes das utilizadas em normas internacionais. O aumento no número de golpes possibilita então, o ajuste da energia de compactação da norma brasileira em relação às demais normas.

A densidade seca e a umidade de cada amostra são relacionadas em um gráfico, no qual se obtém uma curva denominada curva de compactação. Com a curva, exemplificada na figura 8, é possível definir uma densidade seca máxima, que corresponde a uma umidade dita ótima (PINTO, 2002, p. 67).

Figura 8 – Exemplo de curva de compactação

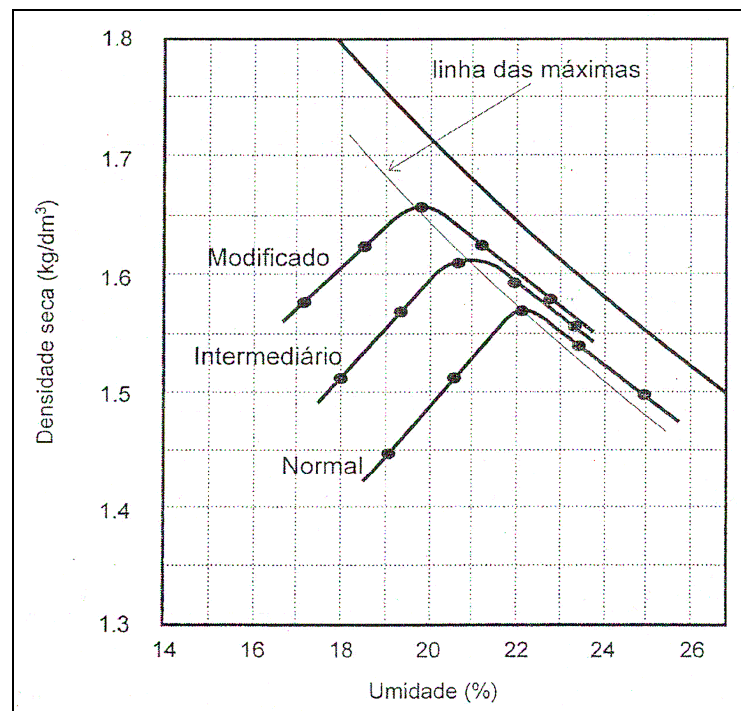


(fonte: PINTO, 2002, p. 67)

O peso específico seco máximo e a umidade ótima, não são índices físicos do solo, pois dependem da energia de compactação aplicada. A energia adotada nos ensaios de compactação procura corresponder ao efeito de compactação causado pelos equipamentos de campo. Assim como equipamentos mais pesados podem ser utilizados em campo, outras energias de compactação são utilizadas em laboratório. Além da energia normal são aplicadas as energias de compactação intermediária e modificada nos ensaios de compactação de laboratório (PINTO, 2002, p. 70).

Segundo Das (2011, p. 87), os fatores que influenciam a compactação, além do teor de umidade, são o tipo de solo e a energia de compactação. A influência do tipo de solo é devida a sua distribuição granulométrica, a forma e peso específico dos grãos e a quantidade e o tipo de minerais argila presentes no solo. Para um mesmo material, a alteração da energia de compactação modifica a curva de compactação, uma vez que o aumento da energia de compactação eleva o peso específico seco máximo e causa redução no teor de umidade ótimo, como pode ser visto na figura 9.

Figura 9 – Influência da energia de compactação



(fonte: PINTO, 2002, p. 71)

Pinto (2002, p. 74), descreve a influência das condições de compactação na estrutura do solo:

Estradas com revestimento primário: definição das deflexões admissíveis para o controle de compactação através de medidas de deslocamentos elásticos das camadas

O solo compactado fica com uma estrutura que depende da energia aplicada e da umidade do solo por ocasião da compactação. [...] Quando com baixa umidade, a atração face-aresta das partículas não é vencida pela energia aplicada e o solo fica com estrutura denominada **estrutura floculada**. Para maiores umidades, a repulsão entre partículas aumenta, e a compactação as orienta, posicionando-as paralelamente, ficando com estrutura dita **dispersa**. Para a mesma umidade, quanto maior a energia, maior o grau de dispersão. Este modelo, [...] permite justificar as diferenças de comportamento dos solos compactados [...].

Segundo Pinto (2002, p. 342), uma maneira de analisar a influência da umidade de compactação do solo e do processo de compactação nas diversas propriedades mecânicas dos solos compactados é através do ensaio de diversas amostras com diferentes valores de umidade e de densidade. A representação no gráfico da curva de compactação, dos resultados da característica estudada, possibilita a visualização da influência dos parâmetros de compactação.

O ensaio de compactação de solos com quantidade elevada de pedregulhos é prejudicado devido à diferença na quantidade de pedregulhos em cada ponto avaliado, o que leva à determinação de diferentes teores de umidade e pesos específicos secos, o que compromete a comparação dos resultados. Isso ocorre porque o volume ocupado por um pedregulho necessita de uma menor umidade de compactação e pesa mais quando comparado com o mesmo volume ocupado pela fração fina do solo. O ensaio de compactação só se aplica quando a porcentagem da fração pedregulho não ultrapassa 45%, pois para valores maiores a fração fina não consegue envolver o material mais grosseiro e há contato entre os grãos de pedregulho que acabam por absorver toda a energia de compactação e, dessa forma, impossibilitam a compactação da fração fina (PINTO, 2002, p. 70).

O controle de compactação no campo é feito através da determinação do grau de compactação que é definido como a relação em porcentagem do peso específico seco obtido no campo e o peso específico máximo determinado em laboratório. O grau de compactação especificado geralmente é de 90% a 95% do peso específico seco máximo obtido em laboratório (DAS, 2011, p. 102). Segundo Pinto (2002, p. 75), além da exigência de um grau de compactação mínimo a ser atingido, o controle de compactação é feito também através de especificações de desvios aceitáveis no teor de umidade ótimo. Esta prática é devida à heterogeneidade existente na jazida do material a ser compactado, que faz com que duas amostras do mesmo local apresentem curvas de compactação distintas, com a umidade ótima diferindo de 2 a 4%.

5 PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE SOLOS

As cargas de tráfego nos pavimentos provocam deformações de caráter residual, que permanecem depois de cessado o carregamento, bem como deformações recuperáveis ou deflexões que deixam de existir alguns momentos após a retirada da carga. As deflexões recuperáveis representam o comportamento elástico das diversas camadas do pavimento e do próprio subleito sob carregamento (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 69). A seguir são descritos os ensaios de campo e laboratório prescritos pelas normas brasileiras para determinação do comportamento resiliente dos materiais utilizados em pavimentação.

5.1 VIGA BENKELMAN

No Brasil, o equipamento mais utilizado para o levantamento de deflexões em pavimentos é a chamada viga Benkelman. Esse equipamento mede a resposta do pavimento submetido a um carregamento quase-estático e é constituído por uma viga metálica rotulada provida de um extensômetro no qual são realizadas as leituras de deflexão (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 73).

As deflexões elásticas dependem da geometria e do valor do carregamento, da pressão de inflação do pneu, bem como também da distância do ponto de aplicação da carga em relação ao ponto no qual são efetuadas as medições. A área de influência do carregamento na deformação elástica do pavimento é denominada bacia de deformação (BRASIL, 2006b, p. 80).

A execução do ensaio para determinação das deflexões pela viga Benkelman consiste em posicionar a ponta de prova da viga entre os pneus da roda dupla de um caminhão com 8,2 toneladas-força de carga distribuída no seu eixo traseiro e em seguida fazer uma leitura inicial (L_0) no extensômetro. Após a leitura inicial, o caminhão é deslocado lentamente por pelo menos 10 m para frente e após 3 minutos ou quando o extensômetro indicar movimento inferior a 0,01 mm/minuto, é realizada a leitura final (L_f) (BRASIL, 1994, p. 3).

A deflexão do pavimento no ponto ensaiado é determinado pela fórmula:

$$D_0 = (L_0 - L_f) \times a / b \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

D_0 = deflexão em centésimos de milímetro;

L_0 = leitura inicial;

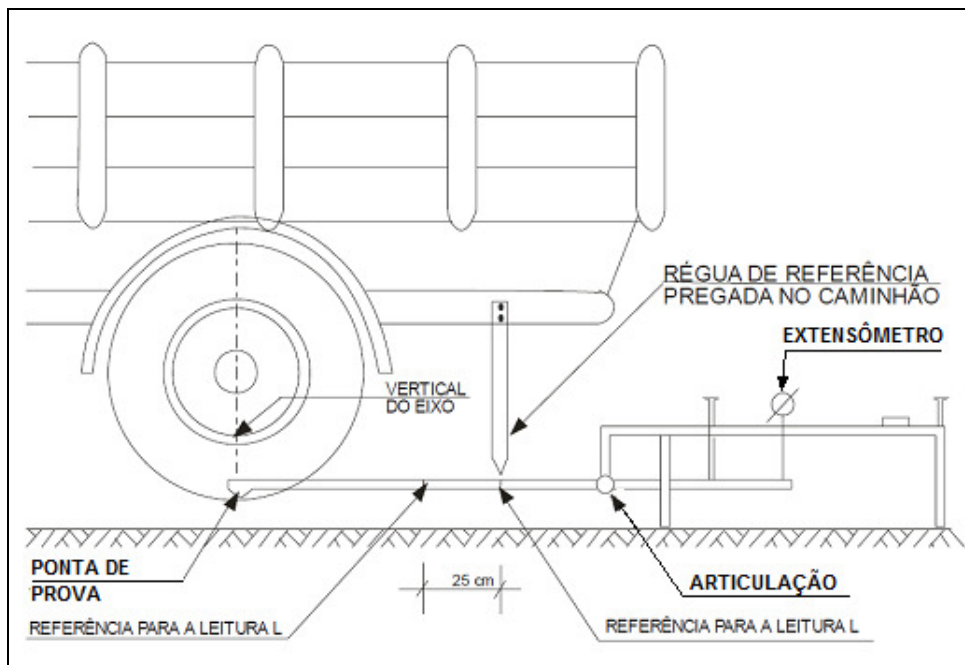
L_f = leitura final;

a = distância entre a articulação e a ponta de prova da viga;

b = distância entre o extensômetro e a articulação da viga.

Na figura 10 é possível identificar alguns elementos da viga Benkelman anteriormente citados, bem como visualizar o posicionamento da viga em relação à prova de carga.

Figura 10 – Viga Benkelman e prova de carga



(fonte: adaptado de BRASIL, 2006a, p. 84)

A representação gráfica dos resultados dos levantamentos deflectométricos de um trecho, possibilita a definição de segmentos nos quais a estrutura apresenta desempenho homogêneo,

podendo ser obtida a deflexão representativa do trecho analisado (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 73). Pinto e Preussler (2002, p. 78), descrevem o uso dessas deflexões na retroanálise de módulos de resiliência das camadas:

O procedimento consiste inicialmente em levantar as deformadas representativas de um certo segmento homogêneo [...]. Buscam-se adicionalmente informações a respeito das espessuras das camadas integrantes da estrutura, por meio de pesquisa histórico-cadastral ou, preferencialmente, sondagens diretas.

A seguir procura-se determinar por tentativas sucessivas, o conjunto de valores de módulos das camadas que reproduza a deformada levantada no campo, com o auxílio de um programa computacional que permita o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos. Os valores encontrados são assumidos como os módulos para as condições de campo de cada camada, podendo ser utilizados em análise mecânica da estrutura existente.

5.2 ENSAIO TRIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS

Segundo Pinto e Preussler (2002, p. 83), o ensaio triaxial de cargas repetidas permite determinar o módulo de elasticidade ou resiliente das camadas do pavimento sob condições de carregamento similares às situações de campo. Dessa forma é possível prever o estado de tensões e as deformações que poderão ocorrer no pavimento através da Teoria da Elasticidade.

Pinto e Preussler (2002, p. 86), descrevem o equipamento de ensaio triaxial:

O equipamento de ensaio triaxial é constituído de uma célula triaxial, sistema de controle e registro das deformações, e um sistema pneumático de carregamento. A força vertical axial é aplicada alternada e rapidamente no topo da amostra por um pistão, para que o ar comprimido ao passar por um regulador de pressão, atue diretamente sobre uma válvula ligada a um cilindro de pressão. Ao abrir a válvula, transmite-se a pressão do ar ao corpo-de-prova envolto em uma membrana de borracha; ao fechar, a pressão do ar deixa de atuar. O tempo de abertura da válvula e a frequência desta operação são controlados por um dispositivo mecânico digital. As deformações resilientes são medidas por um par de transdutores mecano-eletromagnéticos conhecidos por LVDT's (*linear variable differential transducers*) acoplados ao corpo-de-prova. Dessa forma, procura-se simular a passagem de uma roda de um veículo por um ponto na superfície e no interior do pavimento.

Segundo Medina e Motta (2005, p. 202), no início do ensaio triaxial de cargas repetidas é feito o chamado condicionamento do corpo-de-prova para reduzir as deformações permanentes. Somente após esse condicionamento é que são feitas as medições das deformações resilientes.

Brasil (2010b, p. 3), estabelece que para a fase de condicionamento deve-se aplicar a sequência de tensões do quadro 4, com 200 repetições para cada tensão desvio. Para determinação do módulo de resiliência deve-se aplicar os 18 pares de tensão constantes no quadro 5.

Quadro 4 – Sequência de tensões para a fase de condicionamento

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1 / σ_3
20,7	20,7	2
68,9	68,9	2
102,9	309	4

(fonte: BRASIL, 2010b, p. 3)

Quadro 5 – Sequência de tensões para a fase de ensaio para determinação do módulo de resiliência

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1 / σ_3
20,7	20,7	2
	41,4	3
	62,1	4
34,5	34,5	2
	68,9	3
	102,9	4
50,4	50,4	2
	102,9	3
	155,2	4
68,9	68,9	2
	137,9	3
	206,8	4
102,9	102,9	2
	206,8	3
	309	4
137,9	137,9	2
	274,7	3
	412	4

(fonte: BRASIL, 2010b, p. 4)

Segundo Medina e Motta (2005, p. 211), a norma de ensaio AASHTO T 307-99, utiliza duas sequências de tensões diferentes para determinação do módulo de resiliência dos materiais. Os materiais destinados a camadas de bases e sub-bases e os de subleito granular são classificados como Tipo 1 e os pares de tensão utilizados no ensaio são praticamente iguais ao pares de tensão prescritos pela norma brasileira, com exceção de 1 ciclo que não é utilizado na norma da AASHTO. Os solos de subleito que não se enquadram nos critérios de classificação como Tipo 1 são classificados como Tipo 2 e devem ser ensaiados com a aplicação da sequência de tensões constante no quadro 6 e condicionados com a aplicação de 500 a 1000 ciclos do par de tensões com tensão confinante de 41,4 kPa e tensão desvio de 27,6 kPa.

Quadro 6 – Sequência de tensões da norma AASHTO T 307-99 para determinação do módulo de resiliência de solos de subleito do Tipo 2

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1 / σ_3
41,4	13,8	1,3
	27,6	1,7
	41,4	2
	55,2	2,3
	68,9	2,7
27,6	13,8	1,5
	27,6	2
	41,4	2,5
	55,2	3
	68,9	3,1
13,8	13,8	2
	24,8	2,8
	37,3	3,7
	49,7	4,6
	62,0	5,4

(fonte: MEDINA; MOTTA, 2005, p. 212)

Medina e Motta (2005, p. 204) definem o módulo de resiliência obtido no ensaio triaxial de cargas repetidas na fórmula 4:

$$MR = \sigma_d / \varepsilon_1 \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

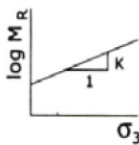
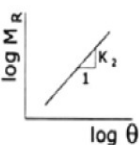
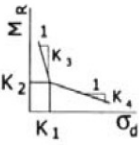
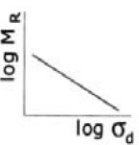
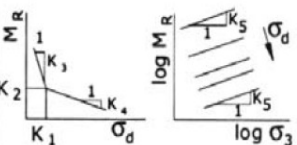
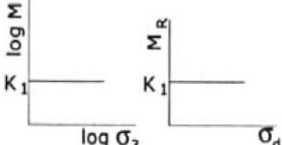
MR = módulo de resiliência;

σ_d = tensão desvio;

ε_1 = deformação resiliente axial.

Medina e Motta (2005, p. 232) relatam que se fixando para cada solo a umidade, a densidade, o estado de tensões aplicado e as características de ensaio, o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensões através de modelagem matemática. A figura 11 apresenta os primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil.

Figura 11 – Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil

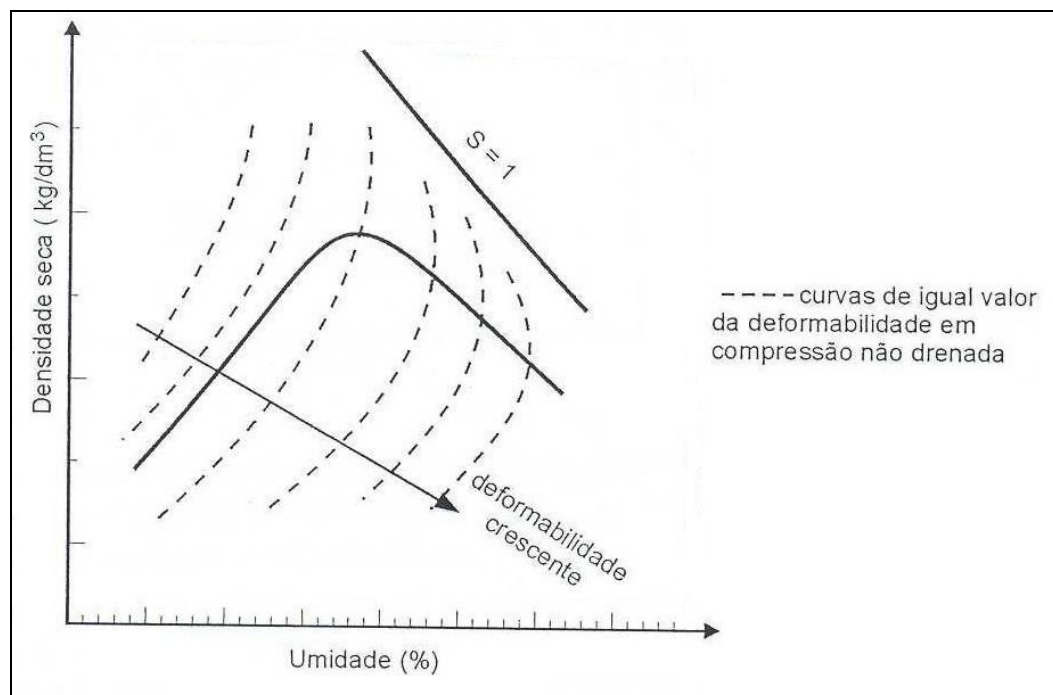
MODELO	EQUAÇÃO	MODELO	EQUAÇÃO
<p>arenoso</p> 	$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	<p>areno-argiloso</p> 	$M_R = K_1 \theta^{K_2}$ $K_2 > 0$
<p>argiloso</p> 	$M_R = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d)$ $\sigma_d < K_1$ $M_R = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1)$ $\sigma_d > K_1$	<p>areno-argiloso</p> 	$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$ $K_2 < 0$
<p>combinado</p> 	$M_1 = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d)$ $\sigma_d < K_1$ $M_1 = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1)$ $\sigma_d > K_1$ $M_R = M_1 \sigma_3^{K_5}$	<p>constante</p> 	$M_R = K_1 = \text{constante}$

(fonte: MEDINA; MOTTA, 2005, p. 232)

Segundo Medina e Motta (2005, p. 62), os ensaios triaxiais de cargas repetidas “[...] mostram a sensibilidade do módulo de resiliência com as condições de compactação (densidade e umidade) [...]”. Pinto (2002, p. 345), descreve a influência das condições de compactação na deformabilidade dos solos:

Os efeitos dos parâmetros de compactação no módulo de elasticidade, [...] em solitação triaxial não drenada, [...] [são mostrados na figura 12], onde estão apresentados módulos de elasticidade para uma estabelecida deformação específica. A deformabilidade cresce [...] sempre com o aumento do teor de umidade de compactação. Em torno da umidade ótima, ela aumenta para o dobro para um aumento de umidade de 2%. Por outro lado, a deformabilidade decresce continuamente com a densidade, quando a umidade é inferior à ótima, mas, para umidades acima da ótima, ela diminui até um certo valor, passando depois a aumentar. As variações do módulo estão associadas à estrutura dos solos, sendo que, para umidades elevadas, o excesso de compactação cria uma estrutura mais dispersa, responsável pela maior deformabilidade.

Figura 12 – Efeitos dos parâmetros de compactação no módulo de elasticidade



(fonte: adaptado de PINTO, 2002, p. 345)

Segundo Medina e Motta (2005, p. 239) a densidade e a umidade de compactação e de equilíbrio dos solos são determinantes na deformabilidade:

[...] se repete com o módulo de resiliência o comportamento esperado quanto ao efeito da umidade de moldagem ao longo da curva de compactação: alto valor do módulo no ramo seco, valor intermediário do MR na umidade ótima e valores inferiores no ramo úmido. O princípio da umidade ótima como aquele teor de umidade que garante um índice de vazios menor e portanto menor variação de ‘resistência’ do que no ramo seco, embora neste se tenha valor maior de resistência inicialmente, também se observa no MR. Com a entrada de água pós compactação há grande perda de sucção nos pontos de umidade abaixo da ótima e o MR tem queda acentuada, no teor de umidade ótimo o MR menor inicial já corresponde a um grau de saturação maior e portanto há menos diferença de sucção com a entrada de água. No ramo úmido tanto o valor inicial de MR quanto o final após a embebição já são baixos em relação aos dos outros pontos de umidade de moldagem [...].

Alguns modelos de módulo de resiliência são mostrados na figura 13. Segundo Ferreira (2008), essas informações fazem parte de uma base de dados na qual constam 463 amostras de solos de diversas granulometrias e procedências, cujos ensaios triaxiais de cargas repetidas foram executados no laboratório de geotecnia do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE –, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ –, no período de 1996 a 2007.

Figura 13 – Alguns solos e seus respectivos modelos de módulo de resiliência

No. da Amostra	CLASSIFICAÇÃO VISUAL TÁCTIL - GENÉTICA	Granulometria						Físico		Compactação		K1 (MPa)	K2	K3	T.R.B
		9.5mm	4.8mm	2.0mm	0.42mm	0.075mm	LL (%)	IP (%)	h _{mo} ld (%)	γ _{smo} ld (g/cm ³)					
		#1"	#3/8"	4	10	40	200								
279	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	100	97	77	79	49	28,5	1,49	68	0,086	-0,669	A-7-6
282	Latossolo vermelho amarelo	100	100	100	97	83	67	68	36	25	1,466	102	0,081	-0,472	A-7-5
290	Latossolo bruno	100	100	100	99	94	81	66	38	25,9	1,482	129	0,069	-0,472	A-7-6
293	Latossolo roxo	100	100	99	98	96	91	78	45	31,1	1,326	142	0,143	-0,488	A-7-5
298	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	99	98	90	64	31	28,4	1,465	32	0,029	-0,708	A-7-5
299	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	99	95	82	50	19	29,8	1,355	196	0,255	-0,38	A-7-5
303	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	99	96	85	65	34	29	1,381	83	0,11	-0,518	A-7-5
305	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	99	96	77	51	27	25,6	1,497	104	0,087	-0,506	A-7-5
316	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	99	95	82	50	19	27	1,388	242	0,112	-0,363	A-7-5
319	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	99	96	77	51	27	21,6	1,548	199	0,011	-0,53	A-7-5
324	Podzólico vermelho amarelo	100	100	100	99	96	75	49	15	22,8	1,676	84	0,25	-0,673	A-7-5
326	Latossolo vermelho escuro	100	100	100	99	96	90	54	16	24,8	1,531	98	0,063	-0,625	A-7-5
327	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	100	98	73	48	17	19	1,75	284	0,003	-0,258	A-7-5
330	Podzólico vermelho escuro	100	100	100	99	87	61	59	21	23,6	1,526	311	0,004	-0,318	A-7-5
334	Podzólico vermelho amarelo	100	100	100	99	96	79	83	34	28	1,54	35	0,027	-0,794	A-7-5
335	Latossolo ferrífero	100	100	100	99	93	75	52	15	21,1	1,84	130	0,156	-0,591	A-7-5
339	Latossolo	100	100	100	100	92	77	69	38	25,6	1,548	292	0,266	-0,609	A-7-5
341	Podzólico	100	100	100	100	91	54	55	29	18,7	1,748	167	0,186	-0,653	A-7-6
347	Areia argilosa	100	100	100	100	97	65	39	13	25,8	1,304	203	0,133	-0,34	A-7-6
364	Argila siltosa marrom	100	100	99	96	73	50	63	39	15,6	1,857	267	0,236	-0,475	A-7-6
391	Podzólico vermelho amarelo	100	100	100	99	91	68	32	8	18,1	1,758	229	0,189	-0,494	A-4
392	Podzólico vermelho amarelo	100	100	100	97	88	55	33	13	14,3	1,882	182	0,272	-0,583	A-6
393	Podzólico vermelho amarelo	100	100	99	94	81	49	26	9	12,7	1,953	141	0,237	-0,768	A-4

(fonte: FERREIRA, 2008)

6 PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

De maneira prévia a realização dos ensaios foram definidas as características mínimas dos materiais estudados, necessárias no estudo do comportamento desses materiais, como distribuição granulométrica, índices de consistência e a curva de compactação de cada material. Dessa forma, além dos ensaios triaxiais de cargas repetidas para avaliar as propriedades elásticas dos materiais estudados, foram necessários os ensaios de peneiramento e sedimentação, limites de liquidez e plasticidade e ensaios de compactação Proctor na energia normal para os materiais constituintes do subleito e do revestimento primário. Os materiais também foram submetidos aos ensaios para especificação expedita de materiais para vias não pavimentadas, proposta por d'Ávila et al (2008). A execução desses ensaios é descrita a seguir.

6.1 ENSAIOS PARA ESPECIFICAÇÃO EXPEDITA DE MATERIAIS PARA VIAS NÃO PAVIMENTADAS

Os materiais do subleito e do revestimento primário foram submetidos aos ensaios para especificação expedita de materiais para vias não pavimentadas, proposta por d'Ávila et al (2008), que consistiram na análise granulométrica (estabilidade granulométrica), na aplicação do método das pastilhas (expansão e velocidade de expansão da fração fina) e no ensaio de resistência a seco (resistência à abrasão na condição seca).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Pelotas – UFPEL.

6.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os materiais do subleito e do revestimento primário foram submetidos a ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica desses materiais. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS –, com amostras

preparadas com a adição de defloculante. Foram realizados também ensaios para determinação dos índices de consistência dos materiais, como os limites de liquidez e de plasticidade.

Os ensaios foram realizados obedecendo-se as normas brasileiras NBR 6457/1986 – para preparação de amostras para ensaios, NBR 6459/1984 – para determinação do limite de plasticidade –, NBR 7180/1984 – para determinação do limite de liquidez – e NBR 7181/1984 – para análise granulométrica por peneiramento e sedimentação.

6.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados em laboratório, com a finalidade de determinar a curva de compactação do solo do subleito e do revestimento primário. A partir da curva de compactação foram definidos os parâmetros de compactação desses materiais, como o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima. Foi empregado o ensaio de compactação Proctor com aplicação da energia normal.

Os ensaios foram realizados pela empresa Bassani Engenharia e as amostras foram preparadas de acordo com as recomendações da norma brasileira NBR 6457/1986 e a moldagem dos corpos de prova e a execução dos ensaios de compactação foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 7182/1986.

6.4 ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA

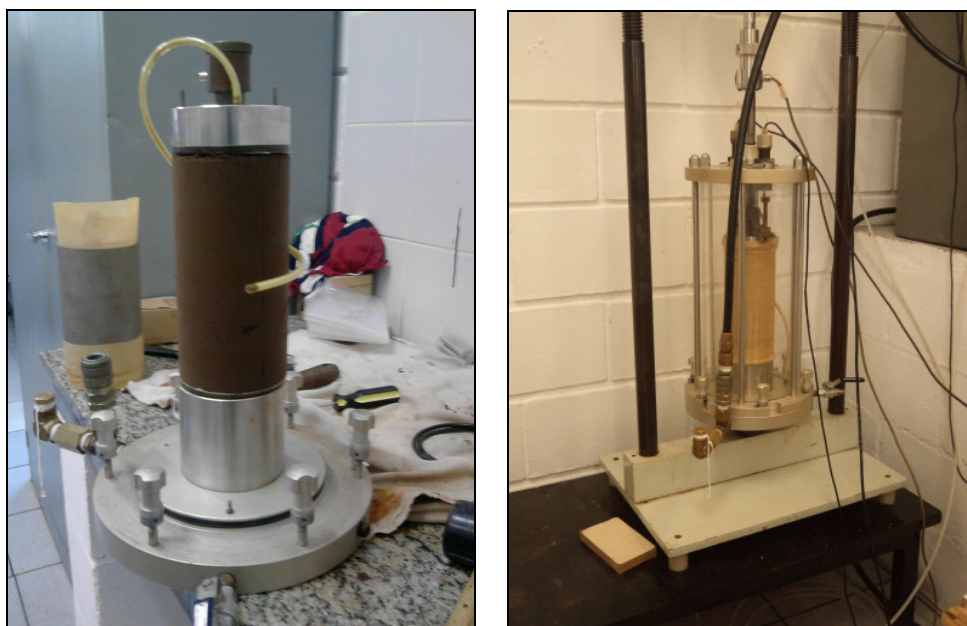
Os ensaios triaxiais de carga repetida foram realizados com a finalidade de determinar o módulo de resiliência do solo do subleito e do revestimento primário. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação – LAPAV – da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS –, obedecendo inicialmente ao prescrito na norma DNIT 134/2010 ME.

Primeiramente foi definida a necessidade de avaliar pelo menos três pontos de cada curva de compactação dos materiais em estudo. Dessa forma foram escolhidos os teores de umidade ótima e com desvios de 2% em relação à umidade ótima. Esses valores foram escolhidos em função de representarem as especificações comumente utilizadas no controle de compactação

convencional. A influência do grau de compactação não foi objeto de avaliação, pois segundo Peraça (2007, p. 139), o condicionamento aplicado antes do início da fase de medições de deformações elásticas altera o grau de compactação dos corpos-de-prova. Dessa forma os corpos-de-prova foram moldados procurando atingir um grau de compactação mínimo de 100%.

Definidos os pontos de avaliação, iniciou-se a moldagem dos corpos-de-prova com as características estabelecidas. Os primeiros corpos-de-prova moldados foram na umidade ótima, para tanto foi utilizado um molde de metal tripartido com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com braçadeiras de aço. A compactação do material no molde foi realizada em 5 camadas com controle de altura, da qual dependia o número de golpes a ser aplicado com o soquete pequeno. Após a moldagem, os corpos de prova foram transportados e devidamente posicionados na base da câmara triaxial. A figura 14 ilustra a montagem e a execução do ensaio respectivamente.

Figura 14 – Montagem e execução do ensaio triaxial de cargas repetidas



(fonte: acervo do autor)

Dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Diferencial Transformer*) foram instalados no interior da câmara apoiados em parafusos extensores fixados no cabeçote (*top cap*) com a finalidade de medir as deformações elásticas. Na sequência foi efetuada a

aplicação dos carregamentos, sendo que a mesma era feita através de um sistema pneumático de ar comprimido. As pressões aplicadas foram controladas automaticamente por um sistema ligado a um microcomputador gerenciado pelo programa SEEPAV 8200 (Sistema de Ensaio Especiais de Pavimentação). A aquisição dos dados de tensão desvio aplicada e deformação elástica foi realizada automaticamente pelo programa, o qual também calculava os módulos de resiliência para cada estado de tensão. Para a realização dos ensaios seguiram-se inicialmente as recomendações, inclusive quanto aos pares de tensão desvio e tensão confinante, da norma DNIT 134/2010 ME.

O material proveniente do subleito e moldado na umidade ótima resistiu ao condicionamento e à aplicação de todos os pares de tensão do ensaio. No entanto, os corpos-de-prova moldados com desvio de umidade de + ou - 2% em relação à umidade ótima, não resistiram à aplicação de todas as tensões do condicionamento. Dessa forma optou-se por realizar os ensaios para esses materiais com a aplicação dos dois primeiros pares de tensão do condicionamento apenas.

Os corpos-de-prova moldados com material do revestimento primário rompiam durante a fase de condicionamento. Após diversas tentativas frustradas e diversos corpos-de-prova perdidos, optou-se por não realizar a aplicação de todos os pares de tensão recomendados pela norma DNIT 134/2010 ME para o condicionamento. Dessa forma, foi aplicado apenas o primeiro par de tensões do condicionamento. Isso possibilitou a realização de parte do ensaio, uma vez que os corpos-de-prova não resistiram à aplicação de toda a sequência de tensões prescrita pela referida norma, apresentando deformações permanentes consideráveis.

Devido aos problemas na execução dos ensaios com o material do revestimento primário, causados pela pouca resistência do material aos estados de tensão prescritos pela norma DNIT 134/2010 ME, optou-se por realizar também ensaios com as tensões da norma AASHTO T 307-99 para subleitos classificados como Tipo 2, com a aplicação de 600 ciclos do par de tensões do condicionamento. Essas tensões, por serem menos severas, não causaram a ruptura dos corpos-de-prova, o que possibilitou a aplicação de toda a sequência de tensões prescritas pela referida norma.

7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios, bem como é feita a análise desses valores.

7.1 ENSAIOS PARA ESPECIFICAÇÃO EXPEDITA DE MATERIAIS PARA VIAS NÃO PAVIMENTADAS

De acordo com a especificação proposta por d'Àvila et al (2008), para a escolha de materiais para revestimento de vias não-pavimentadas, o material proveniente do subleito foi considerado inadequado para uso como revestimento primário. Já o material proposto para revestimento primário foi considerado adequado, mas apresenta aderência deficiente (sabão) em dias chuvosos, necessitando de correção dessa deficiência. Na concepção do projeto elaborado pelo INCRA/RS, foi prevista a execução de uma camada complementar de material granular de 2 cm de espessura para melhorar as condições de aderência do revestimento primário.

7.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização, bem como a classificação dos materiais estão demonstrados no quadro 7. As figuras 15 e 16 apresentam as curvas de distribuição granulométrica do solo do subleito e do revestimento primário respectivamente.

De acordo com a análise granulométrica dos materiais, o solo do subleito pode ser denominado de areia fina siltosa, uma vez que predomina a fração areia fina seguida da fração silte. Da mesma maneira o revestimento primário pode ser denominado de areia fina argilosa.

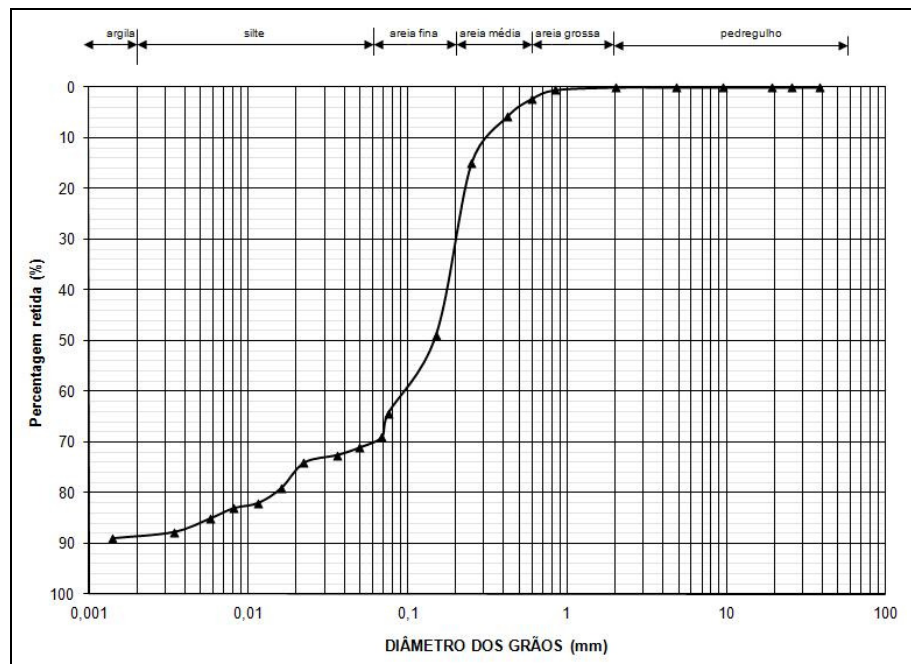
Com a distribuição granulométrica e com os índices de consistência de cada material, foi possível classifica-los segundo os sistemas da AASHTO e SUCS, conforme disposto no quadro 7.

Quadro 7 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização e classificação dos solos

Propriedades		Materiais	
		Solo do Subleito	Revestimento Primário
Granulometria	% Pedregulho (>2mm)	0	0
	% Areia Grossa (2mm a 0,6mm)	3	2
	% Areia Média (0,6mm a 0,2mm)	23	16
	% Areia Fina (0,2mm a 0,06mm)	42	38
	% Silte (0,06mm a 0,002mm)	20	13
	% Argila (<0,002mm)	12	31
Plasticidade	Limite de Liquidez – LL (%)	----	22,3
	Limite de Plasticidade – LP (%)	----	15,6
	Índice de Plasticidade – IP (%)	NP	6,7
Classificação SUCS		SM	CL
Classificação AASHTO		A-2-4	A-4

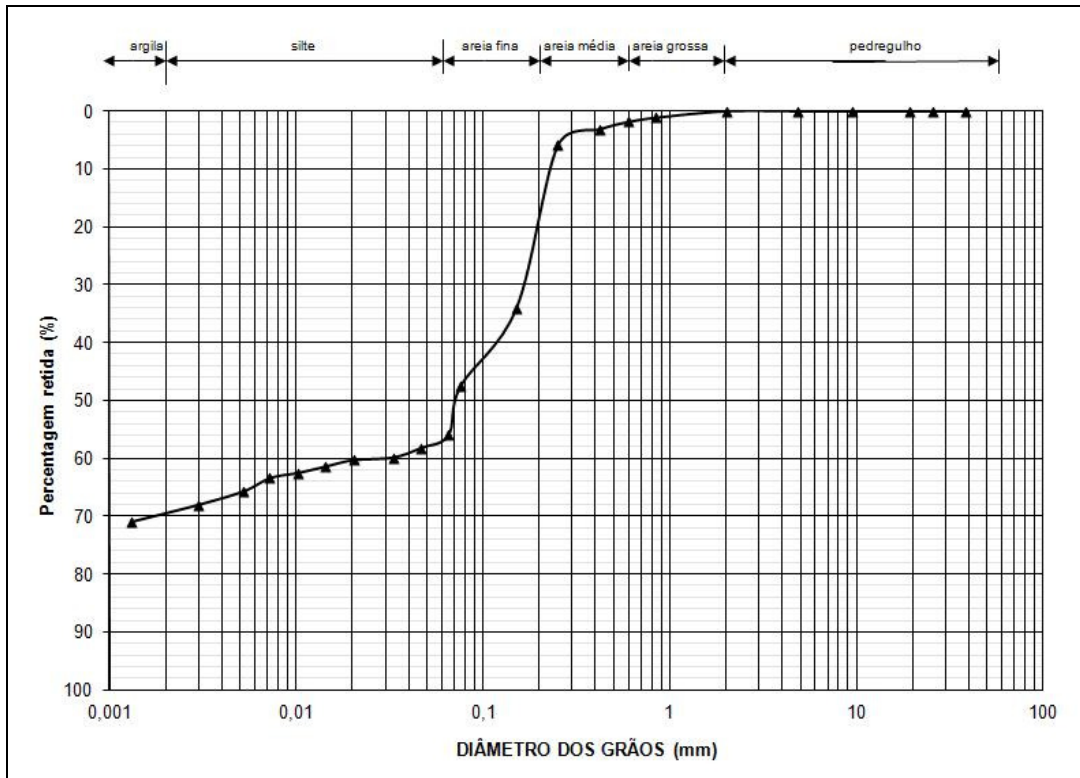
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Curva de distribuição granulométrica do solo do subleito



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 – Curva de distribuição granulométrica do solo do revestimento primário



(fonte: elaborado pelo autor)

7.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

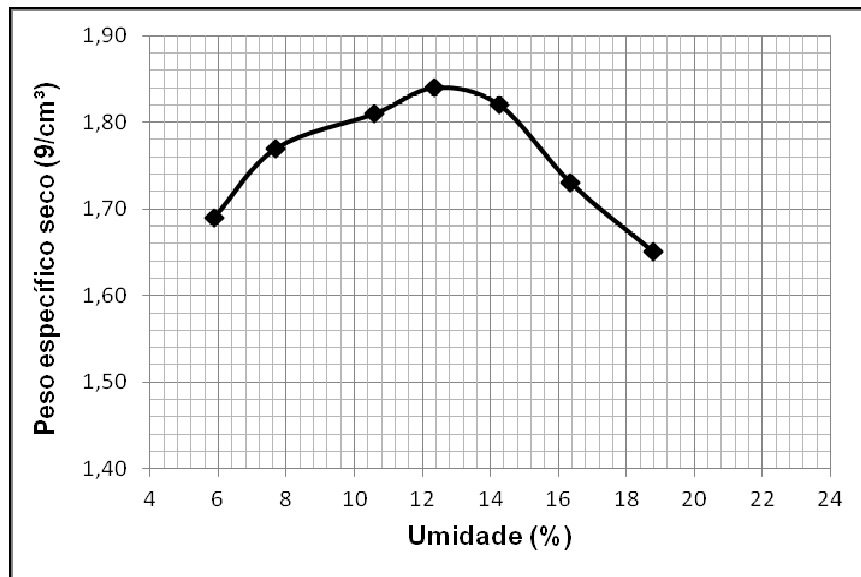
Os resultados dos ensaios de compactação estão demonstrados no quadro 8, sendo possível verificar os parâmetros de compactação para cada material. Nas figuras 17 e 18 estão ilustradas as curvas de compactação obtidas nos ensaios.

Quadro 8 – Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação

Material	Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)
Solo do Subleito	12,3	18,4
Revestimento Primário	18,5	16,7

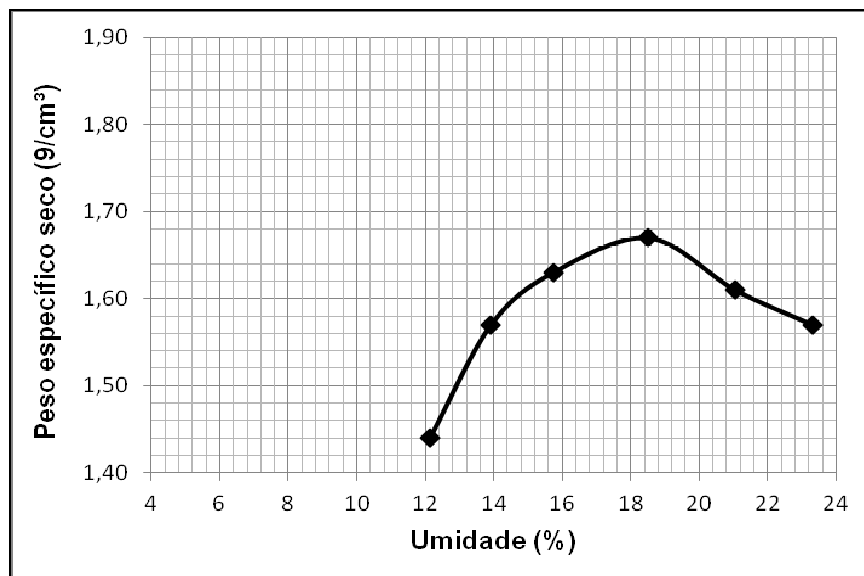
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Curva de compactação do solo do subleito



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Curva de compactação do solo do revestimento primário



(fonte: elaborado pelo autor)

7.4 ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA

Os resultados dos ensaios para determinação dos módulos de resiliência são demonstrados na forma de modelos ajustados. Devido ao software Everstress 5.0 exigir para a entrada de dados no sistema, que as tensões dos modelos sejam divididas pela pressão atmosférica, foi

necessária a adequação dos dados. Outra particularidade do software é a possibilidade de entrada de apenas três modelos de módulo de resiliência das camadas, o modelo constante, o modelo dependente da tensão desvio e o modelo dependente do somatório das tensões principais. Dessa forma foi necessário obter os modelos para essas tensões.

As características dos corpos-de prova submetidos aos ensaios triaxiais de cargas repetidas estão demonstradas no quadro 9. O erro máximo, em relação às condições de compactação inicialmente estabelecidas, é de 0,35% na umidade de compactação e 5,7% no grau de compactação.

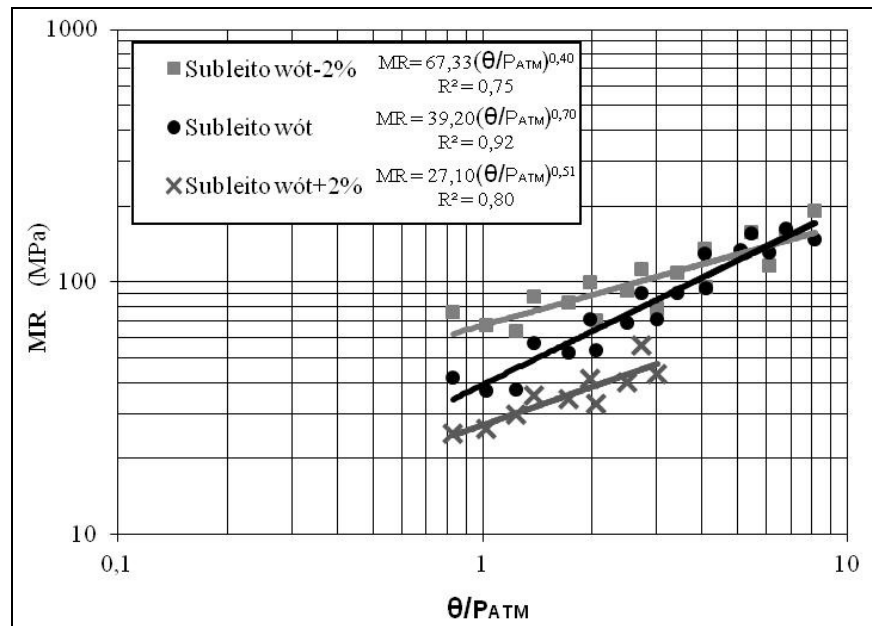
Os ensaios realizados para os corpos-de-prova moldados com o solo do subleito nas condições de umidade ótima e com desvio de aproximadamente 2% em relação à umidade ótima apresentaram melhor correlação com o somatório de tensões principais (θ) como pode ser visto na figura 19. Já os resultados dos ensaios para o material do revestimento primário submetido às tensões da norma DNIT 134/2010 ME, apresentaram baixa correlação com o somatório de tensões principais, outra alternativa seria tentar o ajuste em função da tensão desvio (σ_d), mas os modelos obtidos tiveram correlação ainda menor. Dessa forma optou-se por representar os resultados em função de θ , conforme ilustrado na figura 20.

Quadro 9 – Características dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio triaxial de cargas repetidas

Material	Corpo-de-prova	Tensões de Ensaio	Características dos corpos-de-prova		
			Peso específico aparente seco γ_d (kN/m ³)	Desvio de umidade em relação à w _{ót} (%)	Grau de compactação GC (%)
Solo do Subleito	SB _{w_{ót}}	DNIT	18,5	-0,21	100,5
	SB _{w_{ót}+2%}		17,9	+2,35	97,3
	SB _{w_{ót}-2%}		18,6	-1,75	101,1
Revestimento Primário	RP _{w_{ót}}	DNIT	17,3	-0,23	103,4
	RP _{w_{ót}+2%}		16,9	+1,84	101,1
	RP _{w_{ót}-2%}		17,7	-1,81	105,7
Revestimento Primário	RP _{w_{ót}}	AASHTO	17,3	-0,25	103,7
	RP _{w_{ót}+2%}		17,0	+2,22	101,8
	RP _{w_{ót}-2%}		17,4	-1,71	104,4

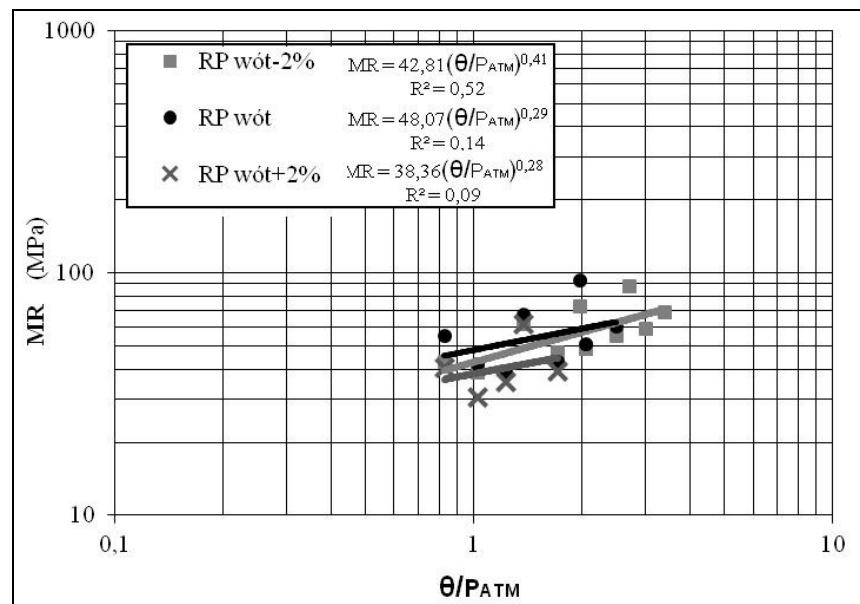
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Resultados dos ensaios para obtenção dos módulos de resiliência do solo do subleito moldado com diferentes umidades de compactação



(fonte: elaborado pelo autor)

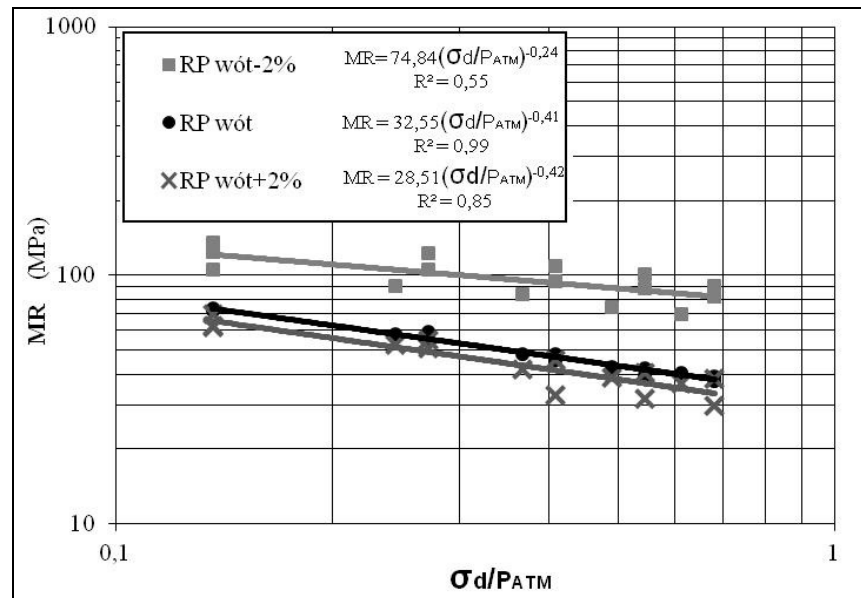
Figura 20 – Resultados dos ensaios para obtenção dos módulos de resiliência do solo do revestimento primário moldado com diferentes umidades de compactação



(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados dos ensaios para o material do revestimento primário submetido às tensões da norma da AASHTO apresentaram melhor correlação com a tensão desvio (σ_d), conforme pode ser visto na figura 21.

Figura 21 – Resultados dos ensaios para obtenção dos módulos de resiliência do solo do revestimento primário moldado com diferentes umidades de compactação ensaiado com as tensões da norma da AASHTO

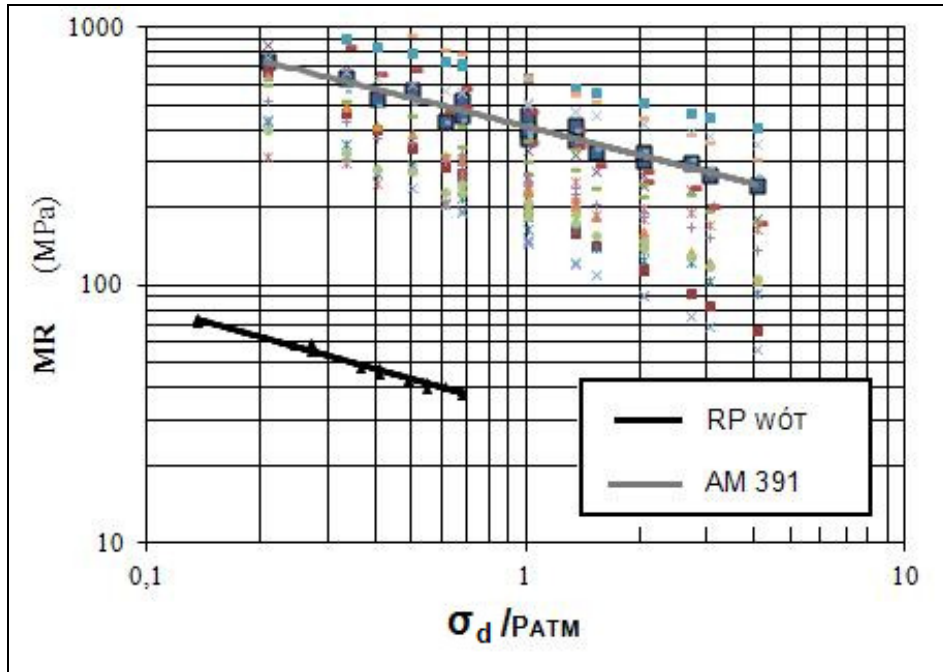


(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme resultados dos ensaios para obtenção do módulo de resiliência dos materiais, os valores de módulo variam inversamente com a variação da umidade de compactação em relação à umidade ótima, ou seja, há um aumento do módulo de resiliência quando se diminui a umidade de compactação em relação à ótima e há uma diminuição no valor do módulo quando se aumenta a umidade, tomando como referência o módulo na umidade ótima.

Comparando os resultados do ensaio triaxial para o material do revestimento primário com as tensões da AASHTO, com modelos de materiais com classificação pedogenética semelhante a dos solos da região de ocorrência dos materiais em estudo, quais sejam podzólico vermelho escuro e podzólico vermelho amarelo, obtidos na base de dados da COPPE, é possível perceber que os valores obtidos nos ensaios são muito inferiores aos modelos encontrados na referida base de dados. A amostra de n. 391 (figura 13) possui além, da classificação pedogenética semelhante, possui também distribuição granulométrica, índices de consistência e condições de compactação semelhantes ao material do revestimento primário moldado na umidade ótima. Comparando os módulos do revestimento primário na umidade ótima com essa amostra, verifica-se que o módulo da amostra é cerca de dez vezes maior que o módulo do material do revestimento primário, conforme pode ser visto na figura 22.

Figura 22 – Comparação do MR do revestimento primário com modelos disponíveis na base de dados da COPPE



(fonte: elaborado pelo autor)

A diferença entre os equipamentos utilizados na UFRGS e no laboratório da COPPE, para determinação do módulo de resiliência de solos, pode contribuir para que exista uma diferença nos valores obtidos com cada equipamento. No entanto a magnitude da diferença entre o módulo de resiliência do material de revestimento primário estudado e os materiais da base de dados da COPPE, enseja a realização de mais ensaios para confirmação dos valores obtidos no presente trabalho, bem como a verificação da homogeneidade da jazida do material para revestimento primário, uma vez que foram utilizadas amostras diferentes para determinação da curva de compactação e do módulo de resiliência do material.

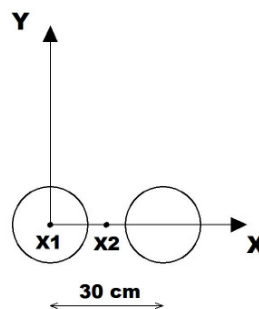
8 CÁLCULOS DAS DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS

As deflexões admissíveis foram definidas a partir da análise mecânica do pavimento, considerando os módulos de resiliência obtidos nos ensaios triaxiais de carga repetida, a configuração das camadas do pavimento e um carregamento causado por uma roda dupla de caminhão com 8,2 toneladas-força de carga distribuída no seu eixo traseiro. A análise mecânica foi realizada no software Everstress 5.0 que fornece como resultado dados de tensão, deformação e deslocamento elástico.

O carregamento adotado possui as seguintes características:

- pressão de inflação dos pneus considerada constante e igual a 0,56 MPa;
- carga por roda igual a 2050 kgf, que corresponde à divisão da carga do eixo padrão pelo número de rodas;
- duas cargas uniformemente distribuídas considerando apenas o efeito do semi-eixo padrão e dois pontos de avaliação, X1 e X2, conforme representado na figura 23.

Figura 23 – Afastamento entre rodas e os pontos de avaliação

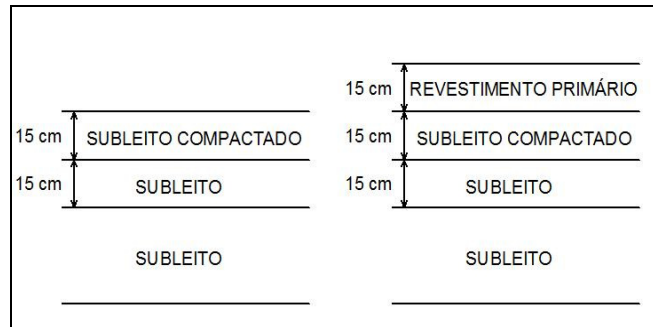


(fonte: elaborado pelo autor)

Na análise mecânica foram consideradas duas estruturas diferentes, representadas na figura 24, primeiramente foi analisada a estrutura composta apenas pelo solo do subleito e em seguida foi analisada a estrutura composta pelo subleito com a adição da camada de revestimento primário. Segundo Peraça (2007, p. 125), o software Everstress 5.0 exige a utilização de no mínimo 3 camadas, dessa forma para avaliação do subleito sem o revestimento primário foram consideradas duas camadas de subleito e uma camada

denominada de subleito compactado, que se refere à camada superficial do subleito, com espessura considerada igual a 15 cm, que sofre os efeitos da compactação quando da preparação da plataforma. Essa configuração foi mantida para a avaliação da estrutura com revestimento primário, ficando esta última com 4 camadas.

Figura 24 – Estruturas analisadas



(fonte: elaborado pelo autor)

As deflexões para a estrutura composta apenas pelo solo do subleito foram determinadas no topo da camada mais próxima da superfície, na camada denominada subleito compactado e consideraram combinações diferentes dos módulos de resiliência obtidos para o solo do subleito com as condições de compactação estudadas, conforme o disposto no quadro 10.

Quadro 10 – Deflexões no topo do subleito compactado calculadas para a estrutura sem revestimento primário

Umidade de compactação da Camada		Deflexão (10^{-2} mm)	
Subleito	Subleito compactado	X1	X2
-2%	-2%	136	97
	wót	143	98
	+2%	172	102
wót	-2%	194	148
	wót	203	149
	+2%	228	151
+2%	-2%	285	226
	wót	298	228
	+2%	320	230

(fonte: elaborado pelo autor)

Como os valores de deflexão não apresentaram diferença considerável, quando se utilizou um módulo diferente na camada superficial para a estrutura composta pelo solo do subleito apenas, foram considerados para o cálculo da estrutura com revestimento primário apenas as combinações de subleito com módulo igual nas 3 camadas. Os resultados dos cálculos de deflexão estão demonstrados no quadro 11.

Quadro 11 – Deflexões calculadas para a estrutura com revestimento primário

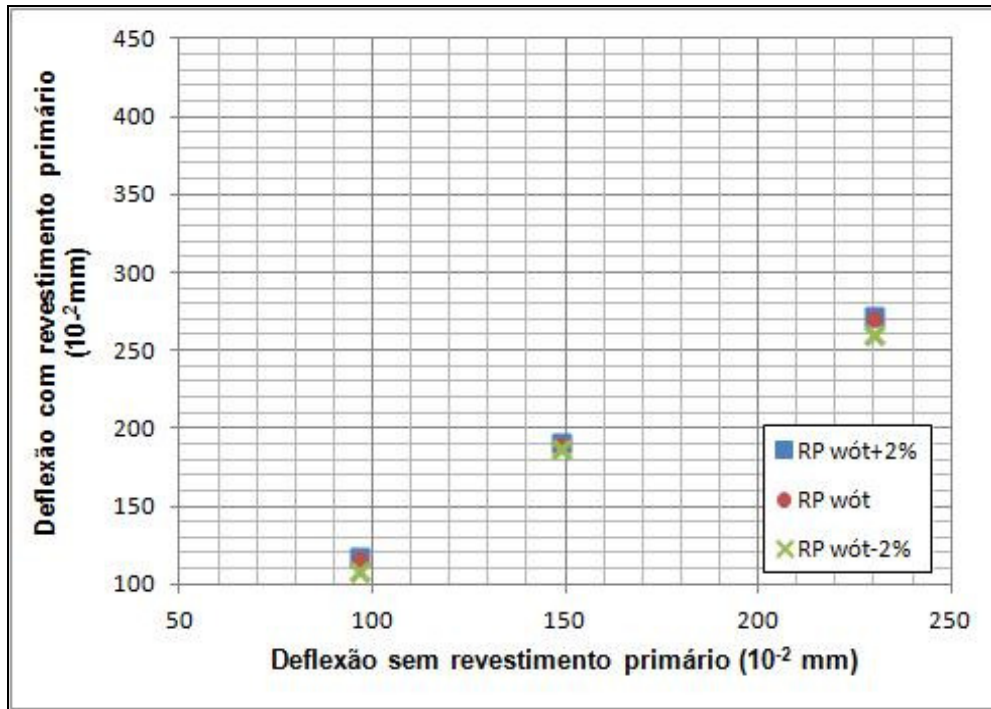
Umidade de compactação da Camada		Deflexão (10^{-2} mm) X1		Deflexão (10^{-2} mm) X2	
Subleito	Revestimento primário	No topo do subleito (sem pista)	No topo do revestimento primário	No topo do subleito (sem pista)	No topo do revestimento primário
-2%	-2%	136	170	97	109
	wót	136	253	97	116
	+2%	136	270	97	117
wót	-2%	203	248	149	186
	wót	203	333	149	190
	+2%	203	351	149	191
+2%	-2%	320	322	230	261
	wót	320	425	230	271
	+2%	320	446	230	272

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nos valores de deflexão calculados é possível verificar que as deflexões no ponto de avaliação X2, que corresponde ao ponto situado entre as rodas do semi-eixo, aparentemente não variam de forma significativa com as diferentes condições de compactação do revestimento primário, como pode ser visto na figura 25. Já no ponto de avaliação X1, que corresponde ao ponto imediatamente inferior a uma das rodas do semi-eixo, a variação é considerável, principalmente quando se comparam os valores para a condição de revestimento primário compactados na umidade ótima e com desvio de -2% em relação à umidade ótima, como ser visto na figura 26.

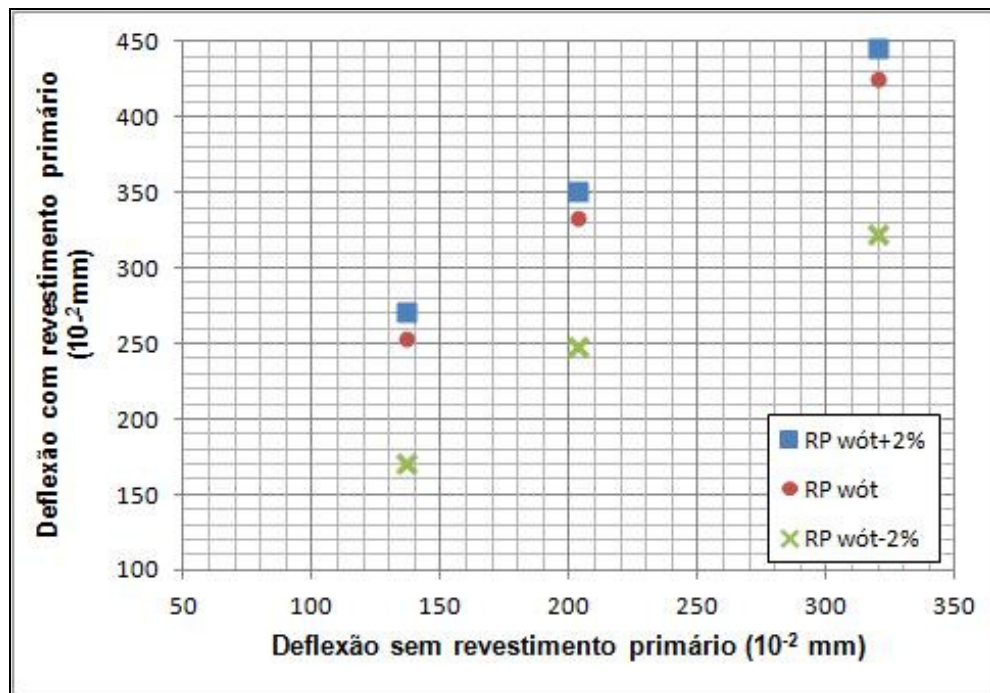
É importante salientar, que as medidas de deflexão com a viga Benkelman, segundo a norma DNER-ME 024/94, devem ser realizadas com a ponta da viga colocada entre as rodas do semi-eixo padrão, o que corresponde ao ponto de avaliação X2.

Figura 25 – Deflexões calculadas para o ponto de avaliação X2



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Deflexões calculadas para o ponto de avaliação X1



(fonte: elaborado pelo autor)

9 CONCLUSÕES

A adição da camada de revestimento primário, considerando o material estudado aplicado nas estruturas analisadas, causa o aumento das deflexões no pavimento, quando comparada com os valores obtidos no topo do subleito sem o revestimento. Isso se deve ao fato de que o módulo do revestimento primário é menor que o módulo do subleito.

O módulo de resiliência do revestimento primário apresentou valores muito baixos se comparados com amostras da base de dados da COPPE com características semelhantes às dos materiais estudados. O que evidencia a necessidade da realização de mais ensaios para confirmação dos valores obtidos no presente trabalho.

Considerando o grau de compactação do material do subleito, situado na faixa de 100% e combinações de variação de umidade de compactação da camada superficial do subleito de 15 cm, compactada durante a preparação da plataforma, tem-se que as deflexões calculadas sofrem pouca influência dessa camada. O mesmo é observado com adição da camada de revestimento primário, denotando que as deflexões são comandadas pelo subleito.

As deflexões admissíveis calculadas para o controle de compactação através das medidas de deslocamento elástico das camadas, com a utilização da viga Benkelman, não apresentam variação considerável com as condições de compactação avaliadas para o revestimento primário estudado, o que se percebe é que as deflexões variam de forma significativa apenas no ponto localizado abaixo da roda, no entanto essa informação não pode ser usada para medições com a viga Benkelman, uma vez que esta mede as deflexões no ponto localizado entre as rodas do semi-eixo padrão. Isso ocorre principalmente devido ao baixo valor do módulo de resiliência do material.

Os valores admissíveis de deflexão no topo da camada de revestimento primário com grau de compactação de 100% e com umidade de compactação na faixa de -2% a +2% em torno da umidade ótima, medidos com a viga Benkelman, dependem das condições de compactação do subleito, uma vez que a camada de revestimento primário é delgada, além de possuir um baixo módulo de resiliência, não contribuindo de forma significativa para a resposta estrutural do pavimento.

Dessa forma, os valores admissíveis de deflexão no topo da camada de revestimento primário, considerando as três condições diferentes de compactação do subleito estudadas, são os constantes no quadro 12.

Quadro 12 – Deflexões admissíveis no topo da camada de revestimento primário

Condições de compactação do subleito	Deflexão admissível no topo da camada de revestimento primário (10-2 mm)	
	Mínima	Máxima
-2%	109	117
wót	186	191
2%	261	272

(fonte: elaborado pelo autor)

O subleito pode apresentar comportamento elástico diferente das condições de compactação estudadas, principalmente em função do grau de saturação em que se encontra o solo do subleito em campo, dessa maneira os valores de deflexão determinados no presente trabalho tem aplicação restrita às condições de compactação estudadas para o subleito.

A deflexão mínima admissível para o controle de compactação pode indicar que a compactação foi realizada com umidade abaixo do limite mínimo, o que acarreta a necessidade de rejeição do serviço executado, mas também pode indicar que o grau de compactação da camada é maior do que o mínimo estabelecido. Dessa maneira, é necessário verificar também a umidade de compactação da camada.

REFERÊNCIAS

BAESSO, D. P.; GONCALVES, F. L. R.. **Estradas Rurais**: técnicas adequadas de manutenção. Florianópolis: DER/SC, 2003.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 024/94 Pavimento**: determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME024-94.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2011.

_____. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas de Pedologia**. Brasília, 2003. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/sistematizacao/pedologia/sh21zb_ped.pdf>. Acesso em: 25 out. 2011.

_____. Ministério de Minas e Energia. Serviço Geológico do Brasil. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**: Uruguaina – Folha SH. 21. Brasília, 2004. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.documents.download?usuario=&file=sh21.zip>>. Acesso em: 01 dez. 2011.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Conservação Rodoviária**. Brasília, 2005. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/manuais/manual_de_conservacao_rodoviaria.pdf>. Acesso em: 23 out. 2011.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Brasília, 2006a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/manuais/manual_de_pavimentacao_05_12_06.pdf>. Acesso em: 23 out. 2011.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Brasília, 2006b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/manuais/manual_de_restauracao.pdf>. Acesso em: 23 out. 2011.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Rede rodoviária do PNV**: divisão em trechos 2010. Brasília, 2010a. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/pnv-2010-relacao-de-trechos-xls/PNV%202011%20-%20Versao%202010.pdf/view>>. Acesso em: 18 maio 2011.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNER-ME 134/2010 Pavimentação**: solos, determinação do módulo de resiliência, método de ensaio. Brasília, 2010b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT134_2010_ME.pdf>. Acesso em: 23 out. 2011.

D'AVILA, A.; HAX, S.; FREITAS, P. C. **Especificação expedita de materiais para vias não pavimentadas - 4a Aproximação**. In: XI CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA E IV CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 2008, Coimbra.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

FERREIRA, J. G. H. M. **Tratamento de Dados Geotécnicos Para Predição de Módulos de Resiliência de Solos e Britas Utilizando Ferramentas de Data Mining**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2005.

PERAÇA, V. **Qualificando Solos para Revestimento Primário de Rodovias: uma abordagem baseada na mecânica dos solos e dos pavimentos**. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2002.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M.; SOARES, R. F. **Análise de bacias deflectométricas para o controle de construção de pavimentos asfálticos**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 14., 2000, Gramado. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2000.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLANT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008.