

N. CLASS. M 625.8  
CUTTER P436a  
ANO/EDIÇÃO 2015

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS MG**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JONATHAN PETERSON PEREIRA**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E ANÁLISE COMPARATIVA DE SUB-BASE DE  
PAVIMENTO DE TRÁFEGO PESADO: ESTUDO DE CASO AV. PERIMETRAL DE  
POUSO ALEGRE**

**Varginha/MG  
2015**

**JONATHAN PETERSON PEREIRA**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E ANÁLISE COMPARATIVA DE SUB-BASE DE  
PAVIMENTO DE TRÁFEGO PESADO: ESTUDO DE CASO AV. PERIMETRAL DE  
POUSO ALEGRE**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Centro  
Universitário do Sul de Minas como requisito para  
obtenção de graduação em Engenharia Civil.  
Orientador(a): Armando Belato Pereira.

**Varginha/MG  
2015**

**Grupo Educacional UNTS**

**JONATHAN PETERSON PEREIRA**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E ANÁLISE COMPARATIVA DE SUB-BASE DE  
PAVIMENTO DE TRÁFEGO PESADO: ESTUDO DE CASO AV. PERIMETRAL DE  
POUSO ALEGRE**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Minas (UNIS) como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em    /    /

---

Prof. Esp. Armando Belato Pereira

---

Prof. M. Sc. Antonio de Faria

---

Prof. Leopoldo Freire Bueno

Obs:

## RESUMO

Este trabalho apresenta a avaliação estrutural na camada de sub-base compreendida entre as estacas 240 a 248, contido na Avenida Perimetral, no município de Pouso Alegre – MG. Foram executados testes em campo para a avaliação estrutural da camada com auxílio de uma equipe técnica. O segmento analisado obteve uma alta leitura deflectométrica, sendo conhecida através de ensaio com viga Benkelman, com esses resultados foi possível executar o cálculo da deflexão no trecho. Dessa maneira, foi possível conceituar a camada de estudo como ruim e propor uma alteração de materiais. As análises das avaliações estruturais executadas na camada poderão servir de suporte ao planejamento de obras de pavimentação.

**Palavras-chave:** Avaliação estrutural. Pavimentação. Viga Benkelman. Deflexão.

## **ABSTRACT**

*This paper presents the structural evaluation in the sub – base layer between the posts 240 to 248, contained in the Avenida Perimetral, in the city of Pouso Alegre – MG. Field tests were performed for structural evaluation of the layer with the aid of a technical team. The analyzed segment achieved a high reading deflection and is known through testing with Benkelman beam, with these results it was possible to calculate the deflection in the stretch. That way, it was possible to conceptualize the study layer as bad and propose an amendment materials. The analysis of structural evaluations performed on the layer, can they underpin the planning paving.*

**Keywords:** *Structural Evaluation. Paving. Benkelman beam. Deflection.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Seção transversal típica do pavimento.....	16
Figura 02 – Esquema da viga Benkelman.....	23
Figura 03 – Medida com viga Benkelman em campo.....	25
Figura 04 – Esquema de um defletômetro de impacto.....	26
Figura 05 – Detalhe do sistema de carregamento.....	27
Figura 06 – Detalhe do placa de aplicação de carga e da barra de sensores.....	28
Figura 07 – Deflexões medidas com carga por eixo de 8,2 t.....	30
Figura 08 – Mapa do trecho onde será executada a obra.....	32
Figura 09 – Seções das vias.....	33
Figura 10 – Seções das vias.....	34
Figura 11 – Seções das vias.....	35
Figura 12 – Camada de sub-base com argila.....	36
Figura 13 – Determinação de deflexão através de viga Benkelman.....	37
Figura 14 – Camada de sub-base com pedra de mão.....	42
Figura 15 - Camada de sub-base com pedra de mão e brita 03.....	42
Figura 16 – Determinação de deflexão através de viga Benkelman na camada de pedra de mão e brita 03.....	43
Figura 17 – Camada de sub-base de macadame.....	48
Figura 18– Determinação de deflexão através de viga Benkelman na camada de macadame.....	49
Figura 19 – Distância entre a jazida e o trecho de aplicação .....	56
Figura 20 – Distância entre a pedreira e o trecho de aplicação .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Relação de peneiras para a análise granulométrica.....	19
Tabela 02 – Pontos do pavimento em que devem ser medidas as deflexões.....	25
Tabela 03 – Aspectos relacionados à utilização da viga Benkelman.....	26
Tabela 04 – Fatores de correção sazonal.....	29
Tabela 05 – Critérios para avaliação estrutural.....	31
Tabela 06 – Valores das deflexões no trecho.....	38
Tabela 07 – Valores das deflexões no trecho.....	39
Tabela 08 – Valores das deflexões no trecho.....	41
Tabela 09 – Valores das deflexões no trecho.....	44
Tabela 10 – Valores das deflexões no trecho.....	45
Tabela 11 – Valores das deflexões no trecho.....	47
Tabela 12 – Valores das deflexões no trecho.....	50
Tabela 13 – Valores das deflexões no trecho.....	51
Tabela 14 – Valores das deflexões no trecho.....	53
Tabela 15 – Análise na camada de argila.....	54
Tabela 16 – Análise na camada de macadame sem a camada de enchimento.....	54
Tabela 17 – Análise na camada de macadame com a camada de enchimento.....	55
Tabela 18 – Valores da camada composta por argila.....	57
Tabela 19 – Valores da camada composta por macadame.....	60

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
- FWD – Falling Weight Deflectomete
- CPU – Composição de Preços Unitários
- DCP – Cones Dinâmicos de Penetração



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>12</b>
<b>3 OBJETIVO.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Objetivos geral.....</b>	<b>13</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>14</b>
<b>5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
<b>5.1 Camadas de pavimentos.....</b>	<b>15</b>
5.1.1 Subleito.....	15
5.1.2 Reforço do subleito.....	15
5.1.3 Sub – base .....	15
5.1.4 Base.....	16
5.1.5 Revestimento.....	16
<b>5.2 Classificação dos pavimentos.....</b>	<b>17</b>
5.2.1 Pavimentos flexíveis.....	17
5.2.2 Pavimentos rígidos.....	17
<b>5.3 Caracterização do solo.....</b>	<b>17</b>
5.3.1 Textura ou granulometria.....	17
<b>5.4 Estabilização dos solos.....</b>	<b>20</b>
5.4.1 Tipos de estabilizações.....	20
5.4.1.1 Estabilização granulométrica.....	21
5.4.1.2 Estabilização mecânica.....	21
<b>5.5 Avaliação estrutural.....</b>	<b>21</b>
5.5.1 Métodos de avaliação estrutural.....	21
5.5.1.1 Avaliação estrutural destrutiva.....	22
5.5.1.2 Avaliação estrutural semi-destrutiva.....	22
5.5.1.3 Avaliação estrutural não destrutiva.....	22
5.5.2 Equipamentos de avaliação estrutural não-destrutiva.....	22
5.5.2.1 Viga Benkelman.....	23
5.5.2.2 Deflexões por impacto com Falling Weight Deflectometer (FWD).....	26
5.5.2.3 Comparativo entre Viga Benkelman x Falling Weight Deflectometer (FWD).....	28
5.5.3 Análise estatística das deflexões.....	28
5.5.4 Deflexão admissível (Dadm).....	30
5.5.5 Avaliação estrutural.....	31
<b>6 DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>32</b>
<b>6.1 Avenida Perimetral de Pouso Alegre.....</b>	<b>32</b>
<b>6.2 Geometria e Beneficiação do projeto.....</b>	<b>32</b>
<b>6.3 Sistema viário.....</b>	<b>33</b>
<b>7 RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>36</b>
<b>7.1 Resultado da viga Benkelman na sub-base com argila.....</b>	<b>36</b>
<b>7.2 Diagnóstico da avaliação estrutural na sub-base com argila.....</b>	<b>38</b>
<b>7.3 Resultado da viga Benkelman na sub-base com pedra de mão e brita 03.....</b>	<b>42</b>
<b>7.4 Diagnóstico da avaliação estrutural na sub-base com pedra de mão e brita 03.....</b>	<b>44</b>
<b>7.5 Resultado da viga Benkelman na sub-base com pedra de mão, brita 03 e material de enchimento (macadame).....</b>	<b>48</b>

7.6 Diagnóstico da avaliação estrutural na sub-base de macadame.....	50
7.7 Comparativo dos resultados obtidos na sub – base por meio de viga Benkelman....	54
<b>8 ORÇAMENTO COMPARATIVO ENTRE SUB – BASE DE ARGILA E DE MACADAME.....</b>	<b>56</b>
8.1 Orçamento na camada de sub – base composta com argila.....	56
8.2 Orçamento na camada de sub – base composta com macadame.....	58
8.3 Análise e comparações.....	60
<b>9 CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do dinamismo do crescimento da agricultura e do comércio, surgiram as primeiras estradas com função de facilitar a passagem, melhorar o caminho, o rendimento de viagem e a segurança.

Com o passar dos anos houve uma expansão significativa na tecnologia, economia e comércio. Em função desse crescimento, surgiu a necessidade de transportar maiores volumes e maiores cargas, concomitante a distâncias cada vez maiores e com maior frequência. Em consequência disto foi gerado outro problema que teria de ser resolvido ou minimizado, ou seja, as estradas e os caminhos precisavam ser de boa qualidade em qualquer época do ano. A forma encontrada para resolver esse problema foi revestir o leito carroçável, proporcionando estabilidade em qualquer período do ano, inclusive nos períodos chuvosos.

Para a estabilização do leito carroçável houve a procura de melhores materiais, que são utilizados até os dias atuais, sendo estes revestimentos de concreto de cimento, de pedras ou de misturas betuminosas.

“A estrutura que se constrói sobre o leito de terra pode variar quer no que se refere à espessura, quer no que se refere aos materiais utilizados, em consonância não só com as solicitações, mas também com a própria função que a estrada está exercendo ou deverá exercer. (SENÇO, 2008, p. 05).”

Pavimentos são sistemas de camadas, de espessuras definidas em função das solicitações que irão receber, construídas sobre uma fundação da estrutura denominada subleito. As camadas são destinadas a resistir e distribuir os esforços recebidos.

A natureza proporciona uma grande quantidade de materiais que podem ser utilizados nas camadas do pavimento, mas estes materiais são finitos ou muitas vezes são encontrados a distâncias inviáveis de onde serão utilizados. Em função disso, verifica-se a necessidade de encontrar alternativas de novos materiais que proporcionem resistências similares ou melhores. Também são necessários que os materiais sejam viáveis economicamente para a estabilização de camadas de um pavimento, podendo ser utilizados materiais alternativos, distintos dos utilizados convencionalmente nos pavimentos.

Após a execução da camada de sub-base, composta por argila, na Avenida Perimetral de Pouso Alegre-MG, foi constatado que em alguns segmentos havia uma alta deflexão na camada, não atendendo as especificações de projeto, no que se diz respeito à Medida de

deflexão com Viga Benkelman. Diante disso, análises foram feitas e concluíram que a remoção e a substituição do material seriam necessárias.

Para adequação do projeto, serão necessárias análises para aplicação de outros materiais substitutos, dentre eles o macadame. O macadame é um aglomerado de pedras britadas em que os fragmentos são entrosados entre si, e para o seu travamento é utilizado um material de enchimento, com a função de aglutinante também.

A partir dos estudos serão feitas comparações entre os materiais, através de ensaios em campo, visando analisar o aspecto qualitativo e composições de preços, verificando qual será mais viável.

## 2 JUSTIFICATIVA

Após a execução da camada de sub – base composta por argila no trecho estudado, foi constatado que a mesma não atende as especificações de projeto, no que se refere às medidas de deflexão. A solução será a remoção e substituição desse material. Para a escolha do melhor material a ser colocado na camada de sub-base é fundamental conhecer as vantagens e desvantagens de cada um. Como pré – requisito sabe que o pavimento precisa apresentar baixa manutenção, boa qualidade, ser economicamente viável, ter execução possível, para as condições de obra, e rápida. Diante desta situação, o presente estudo visa auxiliar esta escolha, fornecendo parâmetros teóricos, práticos e comparativos.

### **3 OBJETIVO**

Este estudo tem por objetivo principal, analisar a viabilidade de aplicação de macadame na estabilização de sub – base para pavimentação. Com a finalidade de estabelecer uma avaliação estrutural e qualitativa, e um comparativo de preços entre a camada da sub-base, utilizando macadame e argila, na Avenida Perimetral de Pouso Alegre – MG.

#### **3.1 Objetivos geral**

- ✓ Realizar medidas para determinar a deflexão no trecho, por meio de Viga Benkelman;
- ✓ Realizar uma avaliação estrutural na camada;
- ✓ Realizar estabilização da sub – base com Macadame;
- ✓ Realizar uma planilha orçamentária para cada uma das camadas;
- ✓ Comparar o orçamento entre as duas camadas.

#### 4 METODOLOGIA

Para serem obtidos os conceitos básicos que envolvem o tema, foi necessária a utilização de livros técnicos, apostilas, catálogos, além de muitas discussões com profissionais que são envolvidos na área de terraplenagem e pavimentação. Também foram realizados estágios na obra e em laboratórios, verificando-se procedimentos e resultados.

O estudo aplicado tem por objetivo determinar os resultados, compará-los entre si e identificar o que terá melhor aplicação.

Serão analisados os registros obtidos com viga Benkelman para a camada de sub-base com argila. Após esse ensaio, será feito outro de deflexões com viga Benkelman de sub-base com a camada de macadame, mas sem a camada de enchimento. Também serão feitos os mesmos ensaios na camada de macadame, porém, preenchido com camada de enchimento. Para ser liberada a camada, a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) deve ser maior ou igual à deflexão de projeto ( $D_p$ ), e o raio de curvatura ( $R$ ) tem que ter um valor maior ou igual a 100, pois são os valores propostos pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), por meio da norma rodoviária DNER-PRO 011/79, para que tenha uma qualidade estrutural boa.

Para ser feita uma análise comparativa, quantitativa e qualitativa foi necessário seguir algumas etapas, que são:

- ✓ Revisão bibliográfica, onde foi possível obter os principais conceitos sobre pavimentação;
- ✓ Avaliação estrutural do pavimento por meio de viga Benkelman, seguindo as normas vigentes para tal método;
- ✓ Realização dos orçamentos dos projetos elaborados;
- ✓ Desenvolvimento de planilhas orçamentárias utilizando o *software* Excel 2007, a fim de estabelecer um estudo comparativo dos orçamentos obtidos.

## **5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **5.1 Camadas de pavimentos**

Pavimento é um sistema de múltiplas camadas de espessuras finitas, destinadas a resistir e distribuir os esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores. Esse sistema possui várias camadas, sendo elas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento (capa de rolamento) (Figura 01).

“Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplenagem e destinada, técnica e economicamente, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança; resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los; resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento. (SENÇO, 2008, p. 06).”

#### **5.1.1 Subleito**

Segundo Senço (2008), subleito é a fundação do pavimento. A partir do aprofundamento no maciço, as pressões exercidas pelo tráfego são reduzidas a ponto de serem consideradas desprezíveis, em função disso é considerado subleito apenas as camadas próximas da superfície.

#### **5.1.2 Reforço do subleito**

Perante Balbo (2007), o material utilizado no reforço de subleito obrigatoriamente deve apresentar maior resistência que o material encontrado no subleito, pois se fosse diferente a camada não teria função. A utilização desta parte da estrutura é facultativa, haja vista que outras camadas superiores poderiam suprir sua necessidade, porém pelo ponto de vista econômico, reforçar o subleito é uma opção mais viável que aumentar a espessura das demais camadas.

#### **5.1.3 Sub-base**

Segundo Balbo (2007) Além da função de resistir e repassar os esforços aplicados sobre as camadas superiores às inferiores, esta camada também atua na drenagem do pavimento.



### 5.1.4 Base

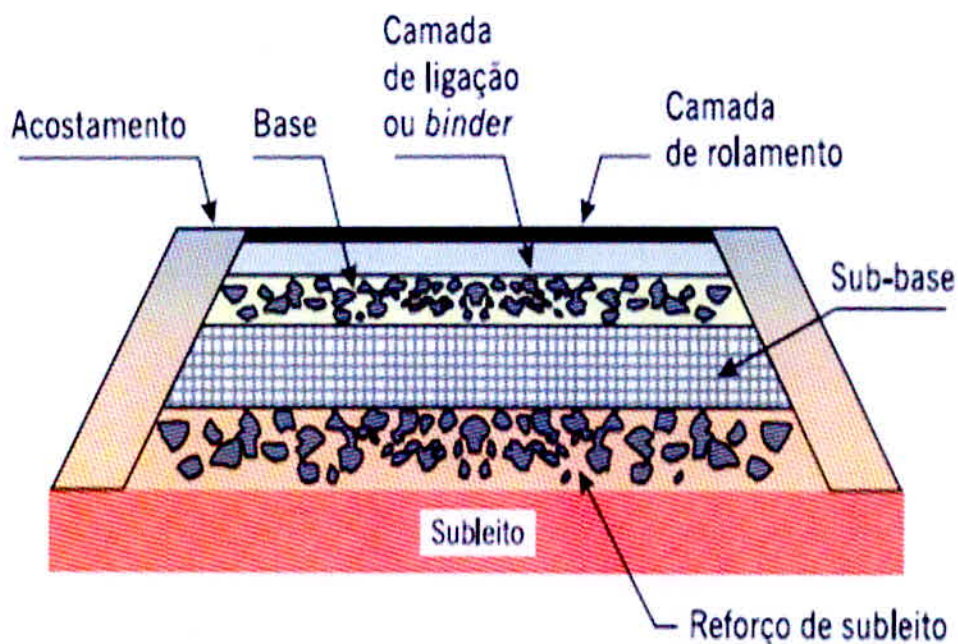
Para Senço (2008), base tem a função de resistir e distribuir os esforços verticais ocasionados pelo tráfego. O pavimento pode ser composto apenas de base e revestimento, muitas vezes a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

### 5.1.5 Revestimento

Refere-se à camada mais nobre do pavimento, ou seja, a de maior custo para construção. De acordo com Senço (2008), o revestimento recebe diretamente os esforços causados pelo tráfego, e é destinado a melhorar a superfície de rolamento aumentando o conforto, a segurança e a durabilidade da estrutura.

“A camada de revestimento tem espessura adotada, seja em função de critérios próprios, seja em função do tráfego previsto. Para vias simples – duas faixas de tráfego e duas mãos de direção – espessuras de 3 a 5 cm são habituais. Para auto-estradas, chega-se a revestimento mais espessos, entre 7,5 e 10,0 cm. (SENÇO, 2008, p. 20).”

Figura 01 – Seção transversal típica do pavimento



(Fonte: Bernucci, 2006)

## **5.2 Classificação dos pavimentos**

Perante os conceitos de Bernucci (2006), os pavimentos rodoviários podem ser classificados como flexível, semi-rígido e rígido. Porém, recentemente há uma tendência de nomear da seguinte maneira: pavimentos asfálticos (flexíveis) e pavimentos de concreto-cimento (rígidos), indicando o tipo de revestimento do pavimento.

### **5.2.1 Pavimentos flexíveis**

Para o DNIT (2006), pavimento flexível pode ser definido como aquele em que todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas, em função do carregamento aplicado. Portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. É um pavimento constituído por quatro camadas principais, que são elas: reforço de subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico.

### **5.2.2 Pavimentos rígidos**

Segundo Baptista (1978), pavimentos rígidos são aqueles em que a espessura é determinada de acordo com a resistência à flexão das lajes de concreto. Seu revestimento é constituído por ligantes de cimento.

Seu revestimento e base são feitos de concreto, que é constituído uma mistura relativamente rica de cimento Portland, areia, agregado graúdo e água.

## **5.3 Caracterização do solo**

Segundo Craig (2013), pode-se dizer que o solo se trata de qualquer reunião de partículas minerais soltas ou cimentadas, decorrentes da decomposição das rochas por ação do intemperismo. O espaço entre as partículas é ocupado por água e/ou ar.

### **5.3.1 Textura ou granulometria**

Para Baptista (1978), a granulometria independe da umidade, composição mineralógica, densidade e forma dos grãos, sendo importante neste estudo apenas a dimensão

das partículas e a distribuição em porcentagem do tamanho em massa de solo. Esta análise, determina a graduação das partículas constituintes do solo, e é feita em amostras secas ao ar. Ainda segundo Baptista (1978), afirma que o material retido acima da peneira nº 10 constitui – se o material grosso, o que fica retido da peneira nº 10 à nº 200 é o material fino, já o retido abaixo da peneira nº 200 é o material semi fino (siltes, argilas, areia fina).

São divididas em duas grandes classes, a mecânica dos solos. (BAPTISTA, 1978):

- ✓ Solos coesivos (argilas);
- ✓ Solos não coesivos ou incoerentes (areias).

Na natureza não existem solos exclusivamente argilosos ou arenosos, desta forma são classificados de acordo com suas características químicas, físicas e geológicas.

De acordo com o DNIT (2006), os grãos apresentam a seguinte classificação para fim de terminologia:

- ✓ Siltes: Um tipo de solos cujas partículas possui diâmetro aparente máximo maior que 0,005 mm e menor que 0,05 mm, tendo coesão suficiente para, quando secas, formarem torrões que desagregam facilmente por pressão dos dedos. O silte possui características físicas e químicas semelhantes à areia, sendo a principal diferença, os diâmetros menores.
- ✓ Pedregulhos: solos cujas partículas ou grãos minerais tem diâmetro aparente máximo, na maioria superior a 2 mm e inferior a 76 mm; 22 mm.
- ✓ Argilas: solos cujas partículas têm diâmetro aparente menor que 0,005 mm, apresentando plasticidade e consistência em seu estado de umidade natural, quando secas tem coesão suficiente para formar torrões difíceis de serem desagregados pela pressão dos dedos, quando úmidas podem ser facilmente moldadas. De acordo com a consistência podem ser classificadas em:
  - Muito moles: cujo índice de consistência é menor que zero;
  - Moles: cujo índice de consistência esta entre 0 e 0,5;
  - Médias: cujo índice de consistência esta entre 0,5 e 0,75;
  - Rígidas: cujo índice de consistência esta entre 0,75 e 1.

- ✓ Areias: solos cujas partículas ou grãos minerais tem diâmetro aparente máximo, na maioria superior a 0,075 mm e inferior a 2 mm. De acordo com a textura podem ser subdivididas em:
- Areia grossa: a maioria de seus grãos apresentam diâmetro maior que 0,42 mm e menor que 2 mm;
  - Areia fina: os grãos apresentam diâmetro maior que 0,075 mm e menor que 0,42 mm. De acordo com a compactidade as areias podem ser:
    - Fofas ou soltas: quando o grau de compactidade esta entre 0 e 1/3;
    - Medianamente compactas: quando o grau de compactidade esta entre 1/3 e 2/3; o
    - Compactas: quando o grau de compactidade esta entre 2/3 e 1.

Para Baptista (1978), os solos são encontrados misturados a natureza, com isso, nem um solo é puro, sendo denominados pelo nome do qual as características são predominantes. E para separá-los é usado peneiras para determinar as suas composições. Na tabela 01, serão mostrados os tipos usuais de peneiras para determinar a sua granulometria.

Tabela 01 – Relação de peneiras para a análise granulométrica

<b>Designação Americana (pol)</b>	<b>Designação Brasileira (mm)</b>
3"	76,2
2 ½"	63,5
2"	50,8
1 ½"	38,1
1"	25,4
¾"	19,1
½"	12,7
3/8"	9,52
Nº 3	6,68
Nº 4	4,8
Nº 8	2,4
Nº 10	2,0
Nº 16	1,2
Nº 30	0,6
Nº 40	0,42
Nº 50	0,3
Nº 100	0,15
Nº 200	0,075

Fonte: (BAPTISTA; 1978)

## 5.4 Estabilização dos solos

De acordo com Baptista (1979), estabilizar um solo para os limites de sua utilização e ainda fazer com que esta estabilidade continue sob a ação das cargas exteriores e ações climáticas variáveis, é necessário empregar um processo qualquer de natureza física, físico-química, química ou mecânica.

“A estabilização de um solo envolve as propriedades de resistência do solo e da suplementação necessária desta resistência para um determinado uso, em termos físicos, físico-químicos, químicos e mecânicos; escolha de um método em bases econômicas e práticas, para o estudo dos materiais necessários à suplementação desejada; construção, que consiste normalmente em pulverização, mistura dos materiais e compactação e considerações de ordem econômica com relação a custo de cada material, custo total, custo de construção e manutenção durante a vida útil do pavimento. (Baptista, 1979, p. 85)”

### 5.4.1 Tipos de estabilizações

Perante Baptista (1978) podem se estabilizar o solo de várias formas, utilizando apenas o solo, e combinando-o com outros materiais, sempre visando à melhora das suas propriedades iniciais, permitindo sua utilização para fins de pavimentação. Tais métodos podem ser divididos em:

- ✓ Estabilização Química, é quando é adicionado cimento, cal ou betume, de maneira que estes venham a interagir com o solo. Na maioria das vezes os processos físicos e químicos se complementam. Daí o termo estabilização físico-química, objeto desta pesquisa;
- ✓ Estabilização Física é quando ocorre a mudança de temperatura (decréscimo de temperatura e solidificação de betume quente misturado com o solo), a hidratação (cimentação e endurecimento devido à hidratação de cimento Portland), a evaporação (secagem de solos reforçados com betume emulsionado) e absorção;
- ✓ Estabilização Mecânica pode ser através da correção da granulometria ou da compactação, sem adição de nenhum outro material estranho ao solo.

#### **5.4.1.1 Estabilização granulométrica**

Para Gondim (2008), a estabilização granulométrica consiste no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais que estejam dentro de uma determinada especificação, de tal modo que implique em mistura na qual a resistência seja garantida pelo contato entre as partículas maiores e os vazios sejam preenchidos pelas partículas mais finas, de maneira que proporcione menor permeabilidade e maior densidade.

#### **5.4.1.2 Estabilização mecânica**

Segundo Baptista (1979), a estabilização mecânica é aquela que se adicionam apenas materiais compatíveis com o solo, esses materiais adicionados aumentam a densidade do solo, e com isso melhora sua resistência mecânica e durabilidade. Através da energia imposta ocorre a redução de volume de vazios in situ do solo; preenchimento de vazios reduzindo os poros e inibindo a percolação da água e a erosão provocada por ela, aumentando a durabilidade; aumento da compactidade, tendo-se o acréscimo da resistência mecânica. Em geral estas técnicas são combinadas com a compactação.

### **5.5 Avaliação Estrutural**

Para Balbo (2011), avaliação estrutural envolve a caracterização completa dos elementos e variáveis estruturais dos pavimentos, que possibilite uma descrição objetiva de seu modo de comportamento em função das cargas do tráfego e ambientais.

“A avaliação estrutural permite emitir conclusões sobre a integridade de camadas de materiais subjacentes ao revestimento, cujos defeitos, muitas vezes, não são detectados pela avaliação visual superficial, como no caso de intensas deformações plásticas, rupturas e contaminação em camadas granulares, ou mesmo fissuras de retração e fadiga em bases cimentadas (que ainda não se propagaram para a superfície do revestimento asfáltico). (BALBO, 2011, p. 403).”

#### **5.5.1 Métodos de avaliação estrutural**

Segundo Balbo (2011), são utilizados alguns métodos para ser feita a avaliação estrutural do pavimento, sendo eles: métodos destrutivos, métodos semi-destrutivos e métodos não-destrutivos.

### **5.5.1.1 Avaliação estrutural destrutiva**

Segundo Balbo (2011), a avaliação estrutural destrutiva tem por objetivo a completa caracterização física da estrutura do pavimento, como a determinação das camadas existentes, definição dos materiais que as compõem e suas espessuras, bem como indicação do estado de degradação presente em todas as camadas.

Ainda para Balbo (2011), a avaliação destrutiva pode ser realizada por meio de procedimentos mecânicos ou manuais. Os processos mais utilizados são: aberturas de furos a trado, helicoidal ou concha; aberturas de cavas à pá e picareta; aberturas de trincheiras transversais à pista; extração de amostra de revestimento e bases com sondagens rotativas.

### **5.5.1.2 Avaliação estrutural semi-destrutiva**

Segundo Balbo (2011), a avaliação estrutural semi-destrutiva pode ser definida como aquela que se vale de aberturas menores de janelas no pavimento, que permitam empregar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, tal como o uso de cones dinâmicos de penetração – DCP. Estes ensaios não são muito comuns, mas tendem a melhorar no quesito tecnológico.

### **5.5.1.3 Avaliação estrutural não destrutiva**

De acordo com Balbo (2011), a avaliação estrutural não destrutiva é a mais utilizada em função da sua funcionalidade e praticidade. A medição é feita a fim de acompanhar a variação da capacidade de carga com o tempo. A cada passagem de roda o pavimento sofre um deslocamento total que tem duas componentes: deformação permanente, que resulta no afundamento de trilha de roda cuja medida é um critério de definição de vida útil estrutural e funcional, pois a partir de determinado período, pode interferir na condição de conforto e segurança do tráfego, e deformação elástica, cuja medida de deflexão é a principal forma de avaliação estrutural de um pavimento em uso.

## **5.5.2 Equipamentos de avaliação estrutural não-destrutiva**

Perante Balbo (2011), dois tipos de equipamentos são amplamente utilizados no Brasil (e no mundo) para a determinação da capacidade estrutural do pavimento, o que se faz por

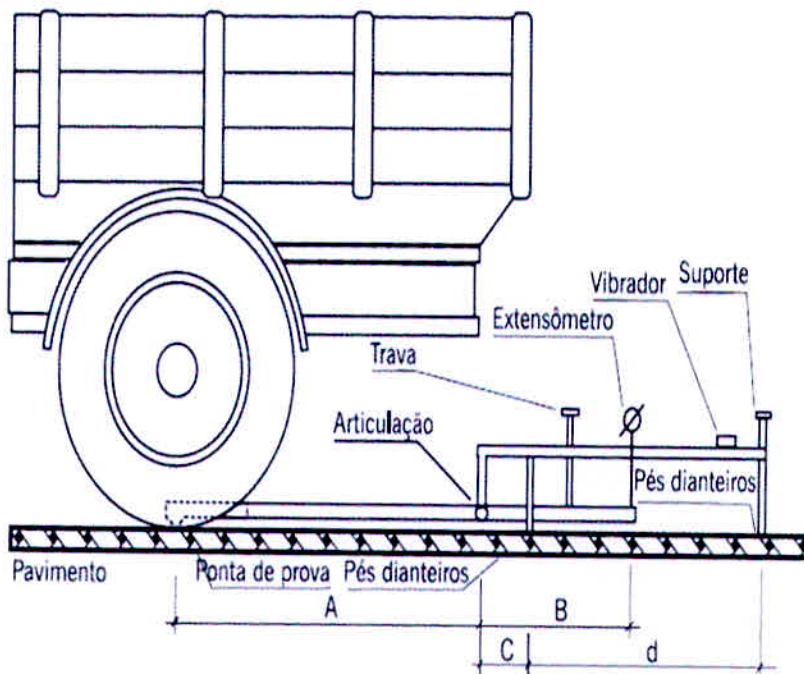
meio de provas de carga. Nesse caso, a estrutura é submetida a uma carga conhecida e realiza-se uma medição das deformações que lhe são impostas. Esses equipamentos são: a viga Benkelman e o defletômetro de impacto Falling Weight Deflectometer (FWD). Os equipamentos medem os deslocamentos verticais sofridos na superfície de um pavimento quando submetido a um carregamento.

### 5.5.2.1 Viga Benkelman

A viga Benkelman é o equipamento mais utilizado para medir deflexões em pavimentos no Brasil (Figura 02).

“O princípio de funcionamento do equipamento é simplesmente aquele de um braço de alavanca. Uma haste rígida encontra-se com a ponta de prova entre um par de rodas do eixo traseiro de um caminhão tipo toco, carregado com carga padrão (80 kN) e 100 psi de pressão nos pneumáticos de aro 10 x 20, com ranhuras dos pneus em boas condições. Tal haste está articulada em um corpo de apoio para esta viga, e, na outra extremidade da viga, há um extensômetro (relógio comparador), analógico ou digital, com precisão mínima de centésimos de milímetros. (BALBO, 2011, p.407).”

Figura 02- Esquema da viga Benkelman



(Fonte: DNER ME 24/94)



De acordo com DNER (ME 24/94), para se realizar o ensaio completo da viga Benkelman deve seguir algumas etapas:

- ✓ Colocar a ponta de prova da viga Benkelman entre os pneus da roda traseira do caminhão, colocando-a exatamente sob o seu eixo;
- ✓ Fazer uma leitura inicial do extensômetro que se situa a uma distância segura para o operador sobre o braço móvel da viga – leitura  $L_i$ ;
- ✓ Fazer o caminhão se afastar lentamente até 10m de distância da ponta de prova ou até que o extensômetro não acuse mais variação da leitura;
- ✓ Ler o extensômetro.

A leitura final corresponde ao descarregamento do pavimento e todo o deslocamento recuperado é associado à deformação elástica do pavimento (deflexão). Calcula-se a deflexão  $d_0$  pela expressão à seguir:

$$d_0 = (L_o - L_f) \cdot K \quad (1)$$

Sendo:

$d_0$  – Deflexão real ou verdadeira, em centésimo de milímetro;

$L_o$  – Leitura inicial, em centésimo de milímetro;

$L_f$  – Leitura final, em centésimo de milímetro;

$K$  – A constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor, articulados.

O parâmetro mais utilizado para a determinação da bacia de deformação no ponto de prova é o raio de curvatura, sendo obtido por meio da fórmula:

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (d_0 - d_{25})} \quad (2)$$

Onde:

$R$  – Raio de curvatura em metros;

$d_0$  – Deflexão real ou verdadeira, em centésimo de milímetro;

$d_{25}$  – Deflexão a 25 cm do ponto de prova, em centésimo de milímetro.

Figura 03- Medida com viga Benkelman em campo



(Fonte: autor)

Para efetuar a leitura, a viga Benkelman deve ser posicionada de acordo com as áreas delimitadas para avaliação funcional, conforme a recomendação e respeitando a distância exigida pela norma DNER 024/94 do bordo do pavimento, como o listado na tabela 02.

Tabela 02 – Pontos do pavimento em que devem ser medidas as deflexões.

**Tabela-Localização dos pontos**

Largura da faixa de tráfego (m)	Distância da borda do revestimento (m)
2,70	0,45
3,00	0,60
3,30	0,75
3,50 ou mais	0,90

(Fonte: DNER-ME 024/94)

Tabela 03 – Aspectos relacionados à utilização da viga Benkelman.

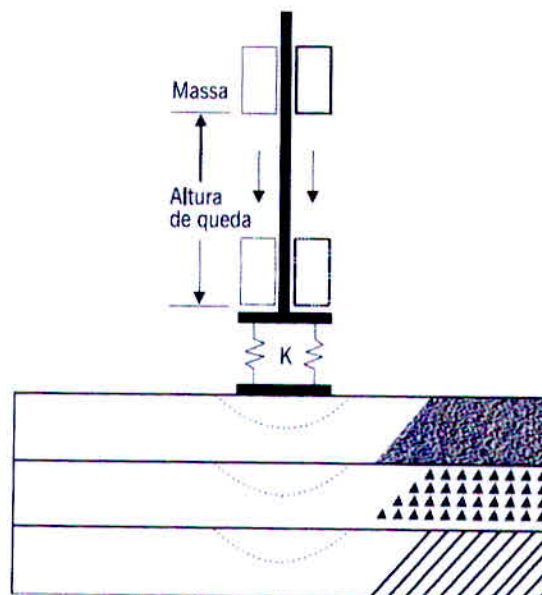
ASPECTO LIMITANTE	PROBLEMAS	SOLUÇÕES POSSÍVEIS
Precisão de leitura no extensômetro	Erros sistemáticos (acuidade visual) ou grosseiros (posição de leitura, anotações); precisão de leitura estimada em dez centésimos de milímetros	Emprego de relógio comparador digital possivelmente com precisão de milésimos de milímetro
Posicionamento da ponta de prova	<b>Não centralizado (longitudinalmente) entre as rodas é um erro grosseiro</b>	<b>Verificação precisa do posicionamento</b>
Temperatura	Medidas realizadas manualmente	Evitar óleos e furos no revestimento; dar preferência a termômetro digital com haste medidora ou a termômetro infravermelho
Emissão de gases pelo caminhão	<b>De saúde para operador em trabalho constante</b>	<b>Máscara</b>
Tráfego	Segurança para o tráfego e operadores do equipamento	Apoio policial intensivo
Pavimentos com elevada rigidez	<b>Pés de apoio da viga posicionados dentro da área de influência da carga</b>	<b>Emprego de vigas com relação de braços de no mínimo 3:1</b>
Produção	Dependente de fatores humanos, apoio e tráfego	Automatização Buscar produção de 4 km a 5 km diários para medidas a cada 40 m
Repetibilidade das leituras	Dependente de fatores humanos e operacionais	Trabalhar com médias ajustadas por métodos estatísticos

(Fonte: Balbo, 2011, p. 410)

### 5.5.2.2 Deflexões por impacto com Falling Weight Deflectometer (FWD)

Segundo Bernucci (2006), os equipamentos de impacto por queda de um peso suspenso a certa altura, sobre amortecedores que comunicam o choque a uma placa metálica apoiada sobre o pavimento, no ponto de leitura da deflexão máxima são equipamentos mais atuais de medida dos deslocamentos elásticos de um pavimento (Figura 04).

Figura 04 - Esquema de um defletômetro de impacto

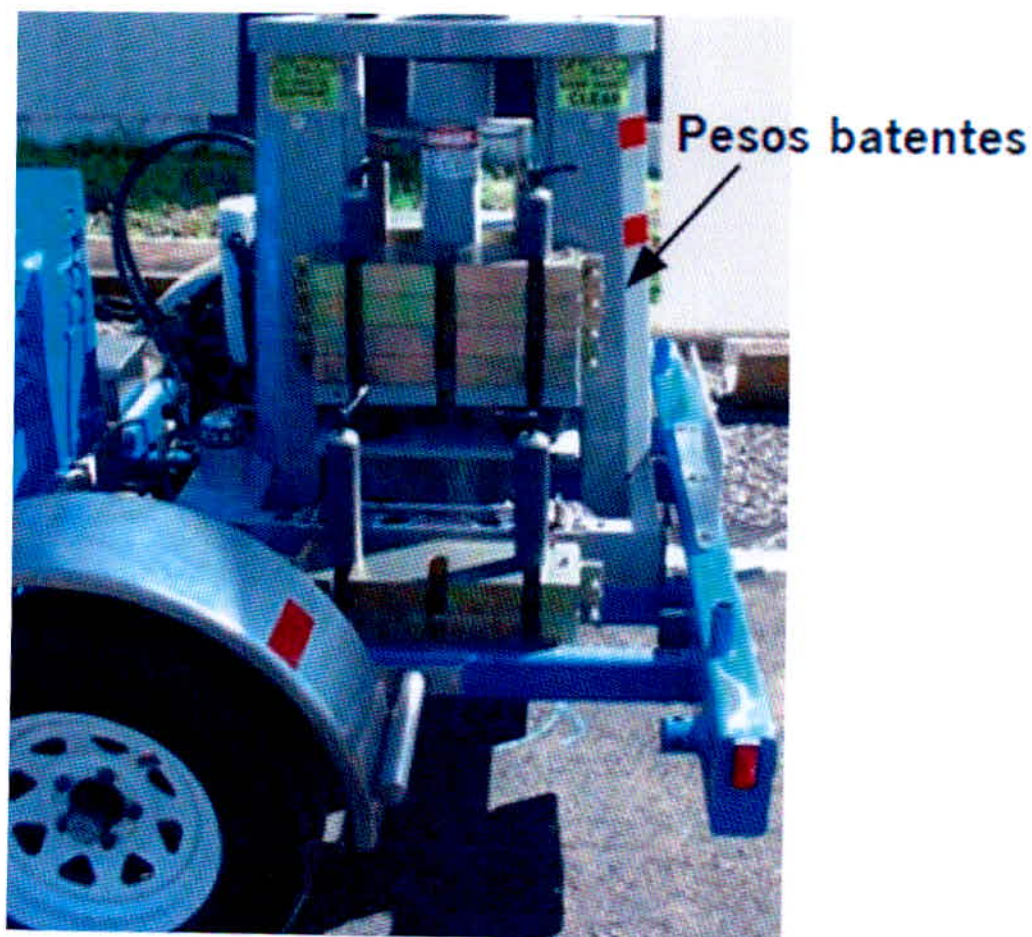


(Fonte: Bernucci, 2006, p.450)

“O FWD é um equipamento concebido a partir de conceitos anteriormente desenvolvidos para teste geofísicos, tratando-se de um ensaio no qual uma carga dinâmica, aplicada instantaneamente por impacto (pulso de carga) sobre uma placa de dimensões conhecidas, procura simular a aplicação de carga de um par de rodas do caminhão. (BALBO, 2011, p.410).”

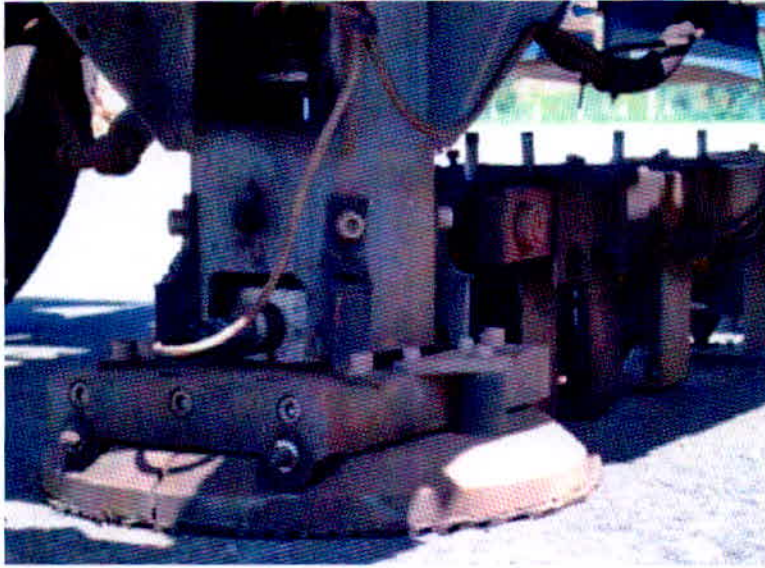
Ainda segundo Balbo (2011), depois da aplicação da carga, sete (este número pode ser menor) transdutores de velocidade (ou geofones) dispositivos longitudinalmente capturam as ondas de resposta ao impacto, estando um desses geofones localizado no centro da placa de aplicação da carga. O último geofone está em geral localizado até 2,25 m desse ponto de aplicação de carga. No método de análise, as ondas resultantes dos deslocamentos da superfície nos vários pontos são captadas e suas acelerações associadas para definição da distancia percorrida, o que fornece a deflexão em cada geofone. Dessa maneira, rapidamente são determinadas e registradas de maneira digital as bacias de deformação em cada ponto analisado, o que permite ao equipamento uma alta produção (de até 40 km por dia).

Figura 05 - Detalhe do sistema de carregamento



(Fonte: Bernucci, 2006, p.451)

Figura 06 - Detalhe da placa de aplicação de carga e da barra de sensores



(Fonte: Bernucci, 2006, p.451)

### 5.5.2.3 Comparativo entre Viga Benkelman x Falling Weight Deflectometer (FWD)

O FWD leva vantagem sobre a viga Benkelman na precisão dos resultados. Também leva no quesito produtividade, onde consegue uma produtividade de até 40 km por dia. E para a fiscalização é melhor que a viga, isto pelo fato do resultado não poder ser alterado pelo operador.

O FWD tem uma precisão maior do que a viga Belkelman por conta de possuir vários sensores ao longo do suporte em posições convenientes escolhidas, isso faz com que, ao ser aplicada a carga de impacto se obtenha uma leitura automatizada da linha de deslocamento. Enquanto que na viga a leitura é feita uma a uma, o que faz com que a viga seja quase estática, ao contrário do dinamismo do FWD.

Porém o FWD possui um custo mais alto, necessita de calibração mais sofisticada e apresenta resultados diferentes (menores em geral) de leitura para diferentes marcas. Pela praticidade e pelo custo a viga Benkelman é mais empregada em trechos menores.

### 5.5.3 Análise estatística das deflexões

Perante o DNER-(PRO 011/79) para ser feita a avaliação do pavimento são necessário o uso de cálculos estatísticos da deflexão característica correspondente, adotando-se os seguintes procedimentos:

- Calcular a média aritmética, dos valores de deflexões obtidos, pela seguinte equação:

$$D = \frac{\sum D_i}{n} \quad (3)$$

- Determina-se o valor do desvio-padrão da amostra,  $\bar{\sigma}$ , através da equação:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (D_i - D)^2}{n-1}} \quad (4)$$

- Determina-se o valor de deflexão característica para cada uma das distribuições, através da equação que segue:

$$D_c = D + \bar{\sigma} \quad (5)$$

- Para a realização das medidas de deflexões a melhor época é imediatamente após a estação chuvosa, quando o subleito está com o máximo de umidade. Porém, nem sempre é possível ser realizado isso com frequência, costuma-se utilizar fatores de correção sazonal para as deflexões, obtidas pela tabela 04.

Tabela 04 – Fatores de correção sazonal

Natureza do Subleito	Fator de Correção Sazonal - $F_s$	
	Estação Seca	Estação Chuvosa
Arenoso e Permeável	1,10 - 1,30	1,00
Argiloso e Sensível à Umidade	1,20 - 1,40	1,00

(Fonte: DNER – PRO 011/79)

- A deflexão característica corrigida ou deflexão de projeto ( $D_p$ ) é calculada pela fórmula:

$$D_p = D_c \times F_s \quad (6)$$

Onde:

$D_p$  = Deflexão característica corrigida ou deflexão de projeto de projeto;

$D_c$  = Deflexão característica obtida para época do levantamento deflectométrico;

$F_s$  = Fator de correção sazonal.

#### 5.5.4 Deflexão admissível ( $D_{adm}$ )

De acordo com o DNER-(PRO 011/79) é indispensável manter a deflexão do pavimento abaixo da deflexão admissível, para que não haja deformações.

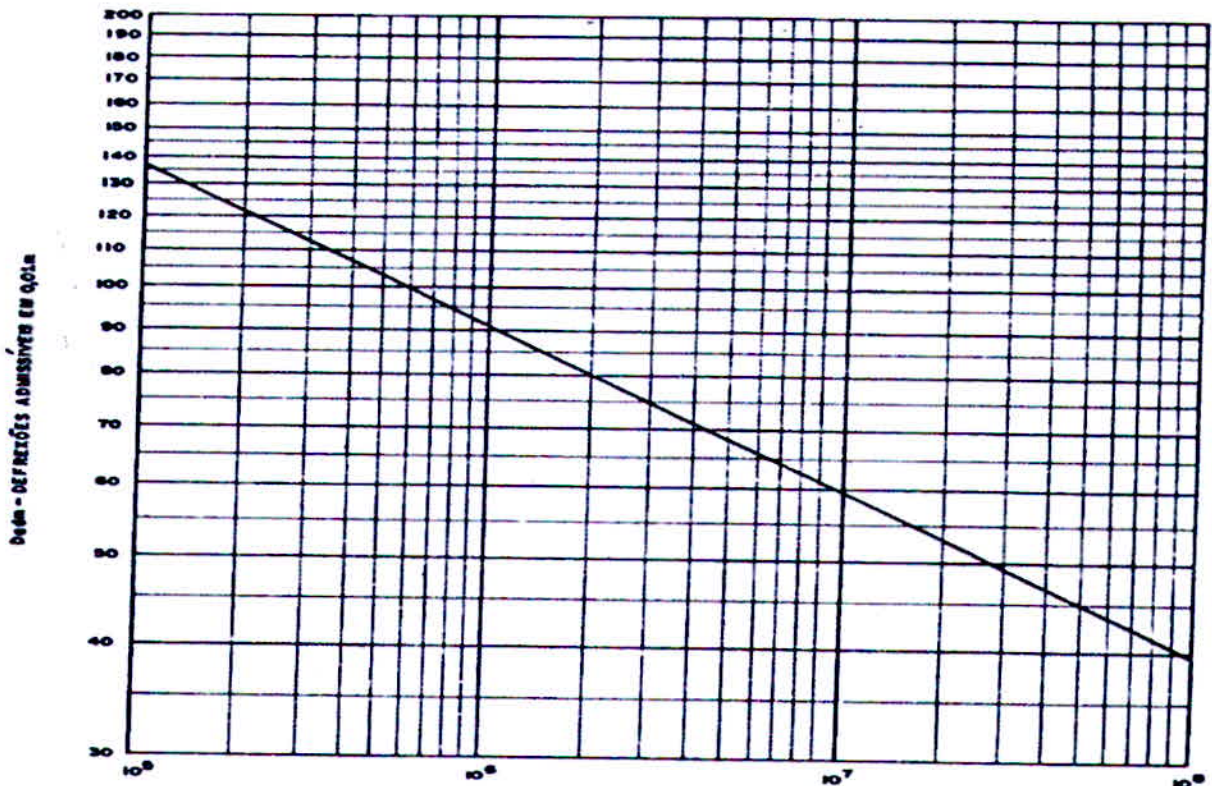
Para ser obtido o valor da deflexão admissível é necessário o conhecimento dos materiais constituintes do pavimento, e do número  $N$  de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t.

Para pavimentos flexíveis, o valor da deflexão admissível é dado pela seguinte expressão correspondente a deflexões medidas com a carga padrão de 8,2 t por eixo:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad (7)$$

A expressão também pode ser representada no ábaco mostrado na figura 07.

Figura 07 – Deflexões medidas com carga por eixo de 8,2 t



(Fonte: DNER - PRO 011/79)

### 5.5.5 Avaliação estrutural

Segundo o DNER-(PRO 011/79) ainda não temos normas rígidas que permitam uma fácil tomada de decisão com respeito à avaliação estrutural dos pavimentos.

Em função das dificuldades procura-se formular alguns casos típicos, na suposição que ocorrem na maioria das vezes nos subtrechos. Para isto, são considerados os seguintes parâmetros:

- N – Número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t;
- Dp – Deflexão de projeto, em 0,01 mm;
- R – Raio de curvatura, em m;
- Dadm – Deflexão admissível, em 0,01 mm.

Na tabela 05 enquadram em função dos casos típicos citados acima:

Tabela 05 – Critérios para avaliação estrutural

Hipótese	Dados Deflectométricos obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de Reforço	Medidas Corretivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	NÃO		Apenas correções de superfície
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $D_p \leq 3 D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	–	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG>180).	SIM	Resistência	Reconstrução

(Fonte: DNER – PRO 011/79)



## 6 DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

### 6.1 Avenida Perimetral de Pouso Alegre

A Avenida Perimetral está localizada na cidade de Pouso Alegre-MG, em uma região que margeia o Rio Sapucaí, sendo, portanto, uma região com possibilidades de alagamentos.

Serão executados trabalhos de restauração e duplicação, nas pistas direitas e esquerdas, como também, interseções e acessos pela empresa Constran S/A construções e comercio.

### 6.2 Geometria e Beneficiação do projeto

A Avenida Perimetral de Pouso Alegre é uma via chave da cidade, o trecho que será executado compreende uma distância de 3560 metros, que se inicia na rotatória do terminal rodoviário e termina no início da MG-290, sentido Borda da Mata – MG, compreendido entre as estacas 155 a 333 (Figura 08).

A obra tem como função melhorar a fluidez do tráfego, aumentar a segurança e proteger a região adjacente a obra de enchentes, isso através da elevação de sua base, que será utilizado como um sistema de contenção de enchentes.

Figura 08 – Mapa do trecho onde será executada a obra



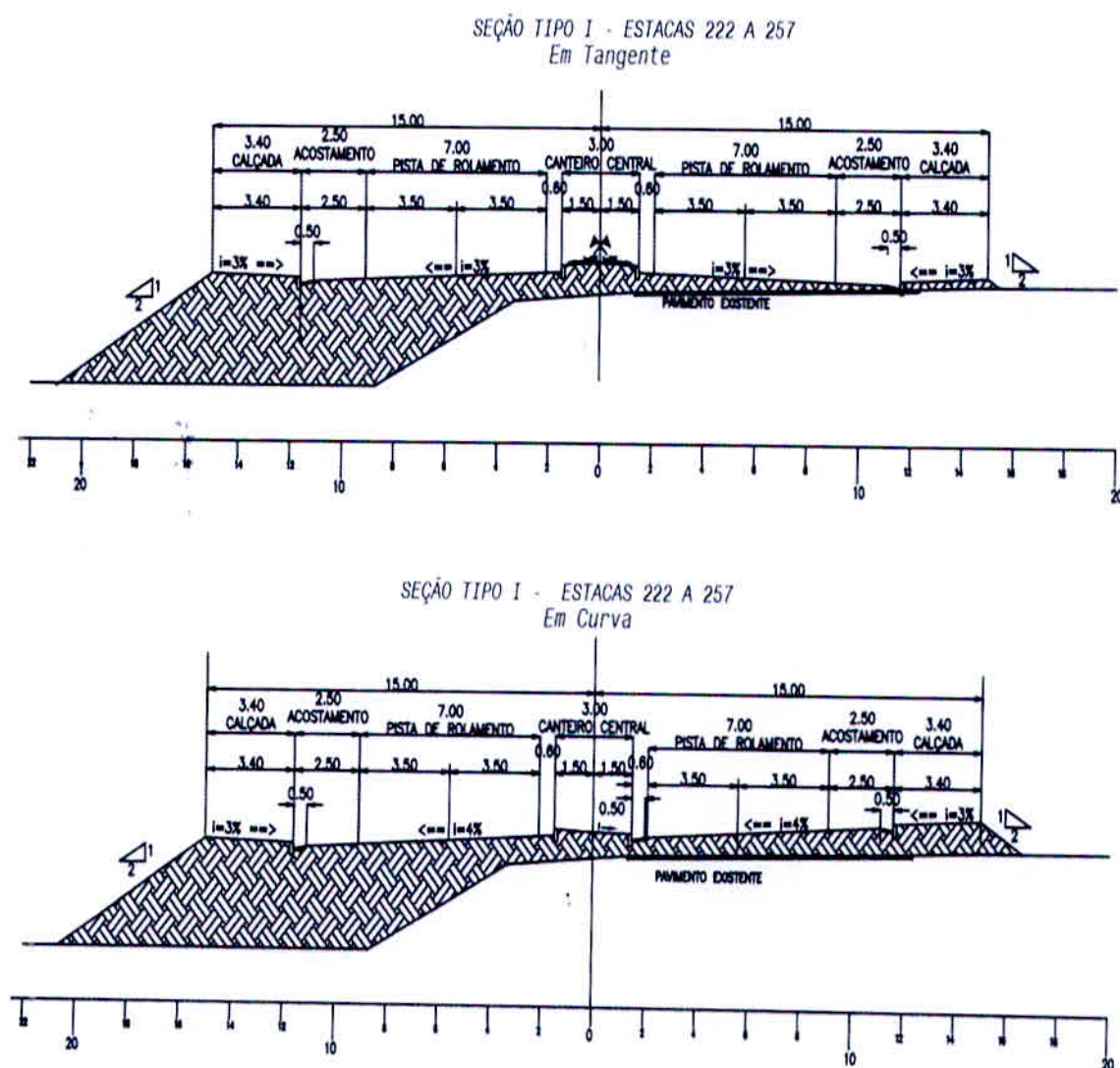
(Fonte: Google earth)

### 6.3 Sistema viário

A obra constitui de um sistema viário com as seguintes características: pista de rolamento com 7 metros de largura, calçadas que variam de acordo com trechos, contendo 2,40 e 3,40 metros de largura, trechos em tangentes e curvas que possuem inclinação de 3% e 4% respectivamente. Em alguns pontos haverá canteiro central, já em outros serão utilizadas barreiras de concreto armado tipo New Jersey. A obra também terá rotatórias urbanizadas e acessos para bairros adjacentes.

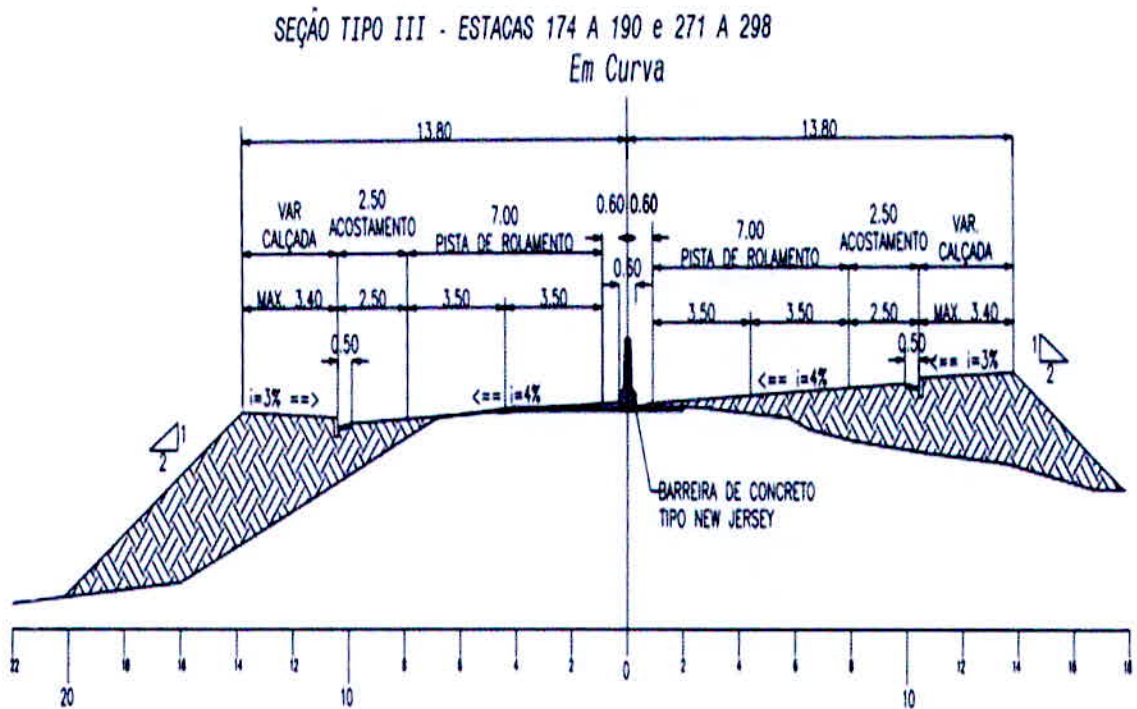
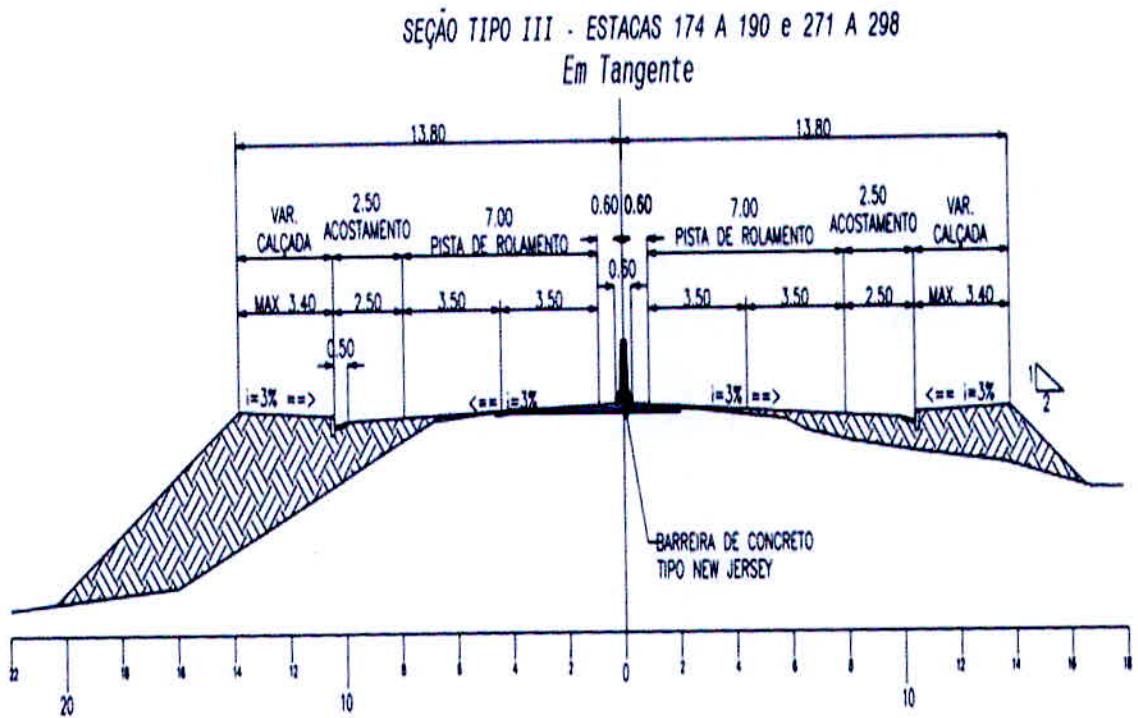
De acordo com as figuras 09, 10 e 11 apresentadas observam – se as seções das vias contidas no projeto, ilustrando o que foi explicado no texto anteriormente.

Figura 09 – Seções das vias



(Fonte: autor)

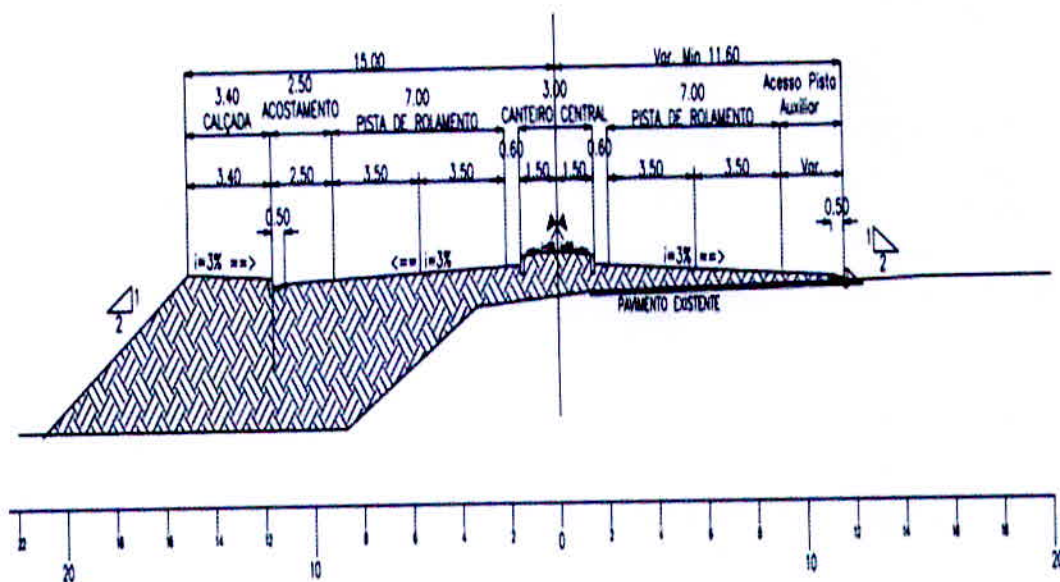
Figura 10 – Seções das vias



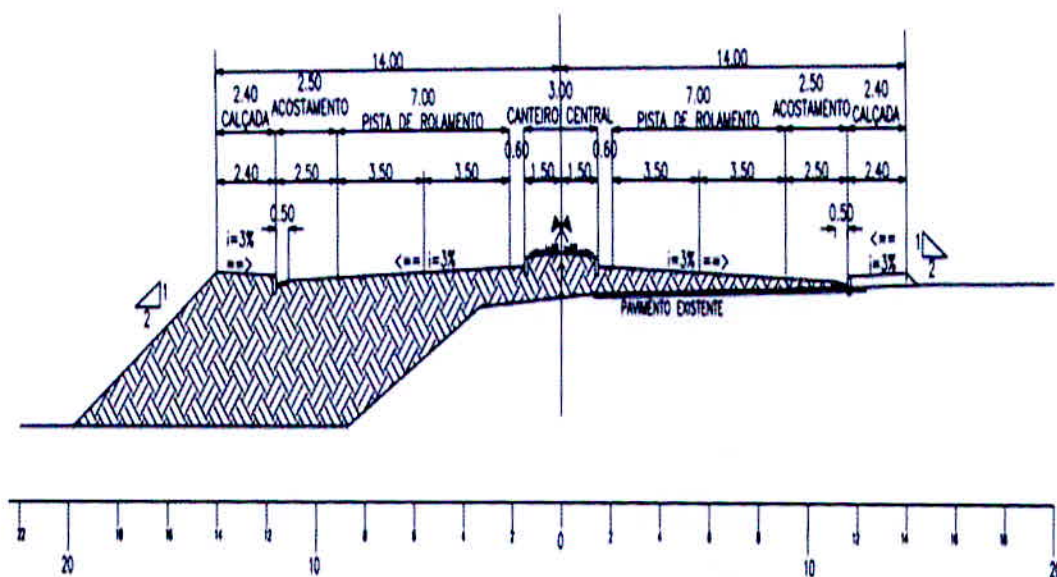
(Fonte: autor)

Figura 11 – Seções das vias

SEÇÃO TIPO VI - ESTACAS 219 a 222  
Em Tangente



SEÇÃO TIPO VII - ESTACAS 320 A 322  
Em Tangente



(Fonte: autor)

## 7 RESULTADOS OBTIDOS

Para se obter o conhecimento da qualidade estrutural do pavimento conforme relacionado na tabela 05, é necessário levar em conta alguns casos típicos como o número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t (N); a deflexão de projeto ( $D_p$ ); o raio de curvatura (R) e a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ). Esses resultados são obtidos por meio de avaliação estatísticas, como indicado no capítulo 4.5.3.

### 7.1 Resultado da viga Benkelman na sub-base com argila

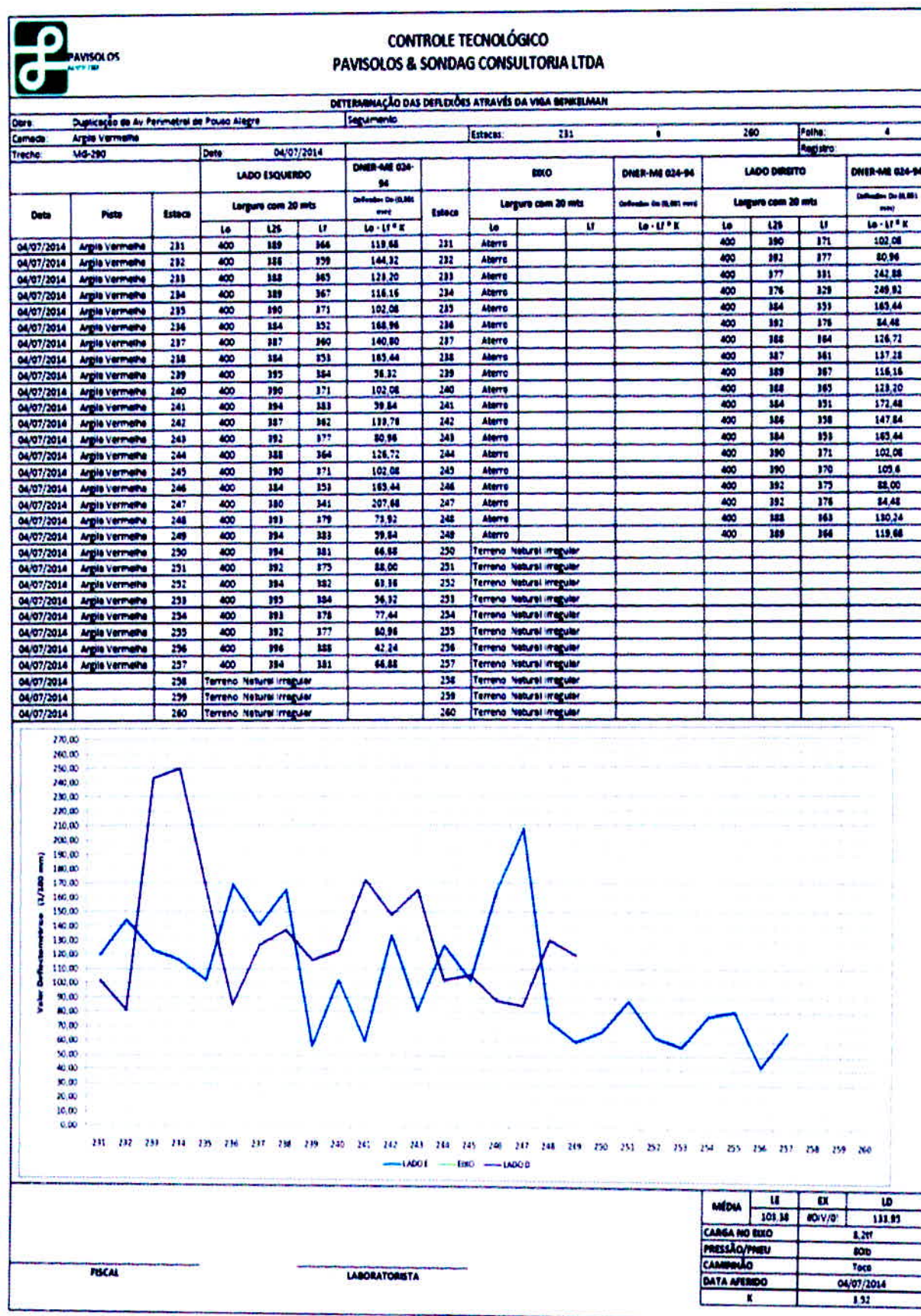
A camada de sub-base analisada é composta por quarenta centímetros de argila, que é um material de fácil acesso na região de onde foi implantada a obra (Figura 12).

Figura 12 – Camada de sub-base com argila



(Fonte: o autor)

Figura 13 – Determinação de deflexão através de viga Benkelman



(Fonte: o autor)

Em função da avaliação estrutural feita com viga Benkelman (Figura 13), foi detectada uma alta leitura deflectométrica, sendo necessária a redução da deflexão no trecho.

## 7.2 Diagnóstico da avaliação estrutural na sub-base com argila

- Cálculo da média aritmética dos valores de deflexões obtidos, pela seguinte equação. Os valores estão representados na tabela 06.

$$D = \frac{\sum Di}{n}$$

Tabela 06 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm
1	240	123,20
2	241	172,48
3	242	147,84
4	243	165,44
5	244	102,08
6	245	105,6
7	246	88
8	247	84,48
9	248	130,24

(Fonte: o autor)

$$D = \frac{(123,20 + 172,48 + 147,84 + 165,44 + 102,08 + 105,06 + 88 + 84,48 + 130,24)}{9}$$

$$D = 124,37, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

- Determinação do valor do desvio-padrão da amostra,  $\sigma$ , através da equação seguinte, valores obtidos estão inseridos na tabela 07.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(D_i - D)^2}{n - 1}}$$

Tabela 07 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm	Do-D	(Do-D) <sup>2</sup>
1	240	123,2	-1,17	1,36
2	241	172,48	48,11	2314,57
3	242	147,84	23,47	550,84
4	243	165,44	41,07	1686,74
5	244	102,08	-22,29	496,84
6	245	105,6	-18,77	352,31
7	246	88	-36,37	1322,77
8	247	84,48	-39,89	1591,21
9	248	130,24	5,87	34,45

(Fonte: o autor)

$$\sigma = \sqrt{\frac{8351,1297}{8}}$$

$$\sigma = 32,31$$



- Determinação do valor de deflexão característica para cada uma das distribuições, através da equação:

$$Dc = D + \delta$$

$$Dc = 124,37 + 32,31$$

$$Dc = 156,68, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

- Cálculo da deflexão característica corrigida ou deflexão de projeto ( $Dp$ ), pela seguinte expressão:

$$Dp = Dc \times Fs$$

Por ser um subleito de origem argiloso e sensível a umidade, estando em uma estação seca o momento da medida, o  $Fs$  a utilizar será de 1,40 de acordo com a tabela 04.

$$Dp = 156,68 \times 1,40$$

$$Dp = 219,35, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

Perante PMSP (IP – 05/2004) o número característico de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t (N), para tráfego pesado se considera  $N = 2 \times 10^7$ . Podendo assim definir de acordo com a figura 07 que a deflexão admissível ( $Dadm$ ) é igual a 60, em 0,01mm.

- Cálculo do raio de curvatura da bacia de deformação é utilizado à seguinte fórmula:

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (d_o - d_{25})}$$

As deflexões obtidas por calculos no trecho serão mostradas na tabela 08.

Tabela 08 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do	D25
1	240	123,2	82
2	241	172,48	115
3	242	147,84	98,56
4	243	165,44	110,29
5	244	102,08	68
6	245	105,6	70,4
7	246	88	58,67
8	247	84,48	56,32
9	248	130,24	86,83

(Fonte: o autor)

Para ser conhecido o raio de curvatura da bacia de deformação no trecho, foi utilizado à média da deflexão real ou verdadeira (Do) e da deflexão a 25 cm do ponto de prova (D25). Assim sendo Do = 124,37, em 0,01 mm e D25 = 83, em 0,01 mm.

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (124,37 - 83)}$$

$$R = 75,53 \text{ m}$$

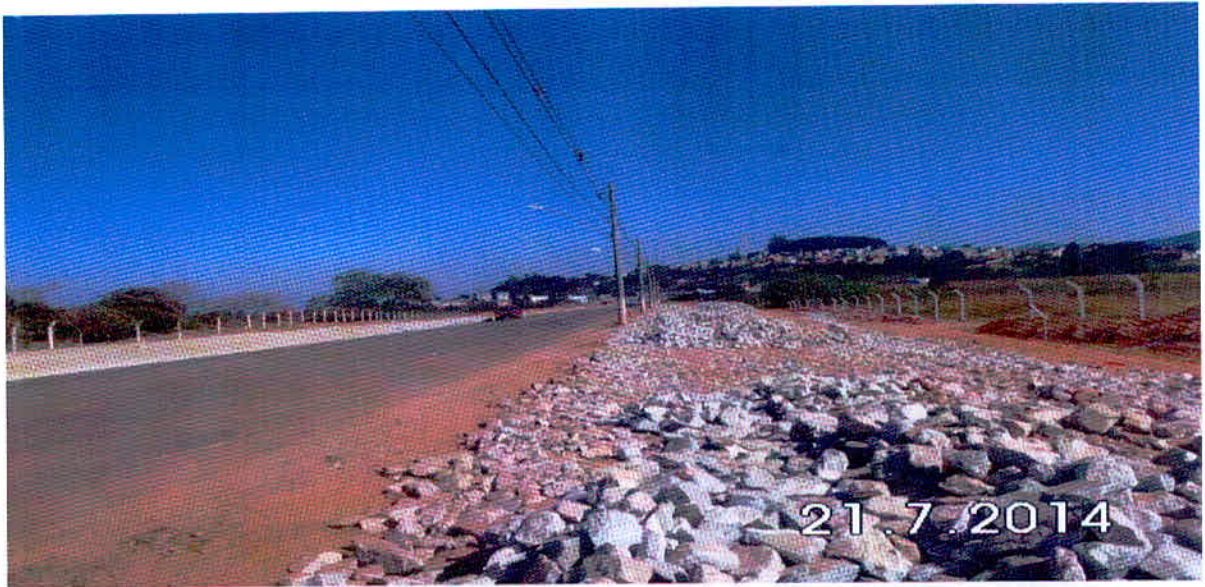
Após a execução dos cálculos chegou-se aos seguintes valores:

- Dadm = 60, em 0,01mm
- Dp = 219,35, em 0,01 mm
- R = 75,53 m

### 7.3 Resultado da viga Benkelman na sub-base com pedra de mão e brita 03

A camada de sub-base analisada é composta por trinta e cinco centímetros de pedra de mão e brita 03, divididos em trinta centímetros de pedra de mão e cinco de brita 03 (Figura 14 e 15).

Figura 14 – Camada de sub-base com pedra de mão



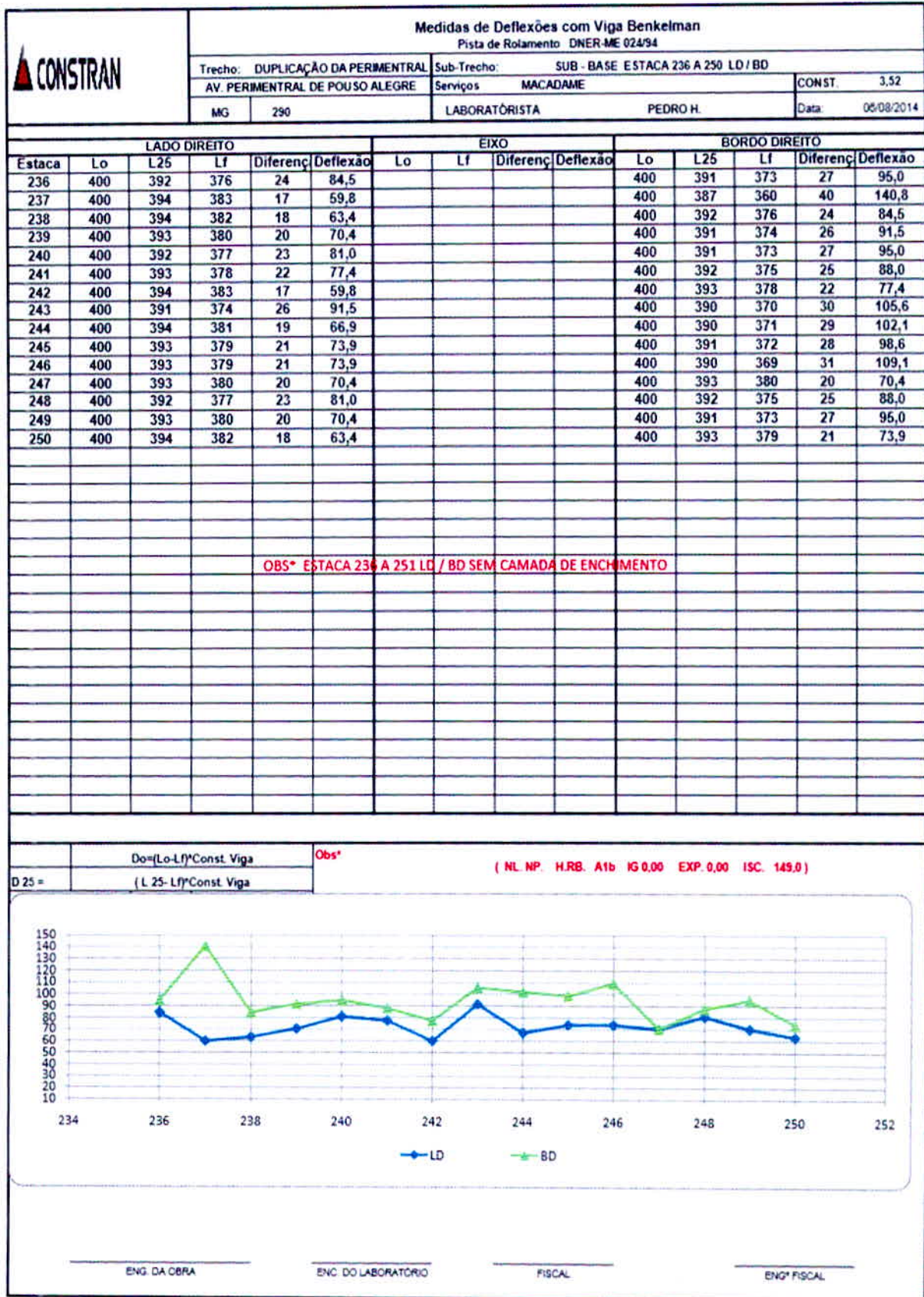
(Fonte: o autor)

Figura 15 - Camada de sub-base com pedra de mão e brita 03



(Fonte: o autor)

Figura 16 – Determinação de deflexão através de viga Benkelman na camada de pedra de mão e brita



(Fonte: o autor)

Em função da avaliação estrutural feita com viga Benkelman (Figura 16), foi detectada uma leitura deflectométrica considerada regular, porém há necessidade de reduzir da deflexão no trecho.

#### 7.4 Diagnóstico da avaliação estrutural na sub-base com pedra de mão e brita 03

- Cálculo da média aritmética dos valores de deflexões obtidos, pela seguinte equação. Os valores estão representados na tabela 09.

$$D = \frac{\sum Di}{n}$$

Tabela 09 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm
1	240	81,0
2	241	77,4
3	242	59,8
4	243	91,5
5	244	66,9
6	245	73,9
7	246	73,9
8	247	70,4
9	248	81,0

(Fonte: o autor)

$$D = \frac{(81,0 + 77,4 + 59,8 + 91,5 + 66,9 + 73,9 + 73,9 + 70,4 + 81,0)}{9}$$

$$D = 75,09, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

- Determinação do valor do desvio-padrão da amostra,  $\sigma$ , através da equação seguinte, valores obtidos estão inseridos na tabela 10.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(D_i - D)^2}{n - 1}}$$

Tabela 10 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm	Do-D	(Do-D) <sup>2</sup>
1	240	81,0	5,9	34,81
2	241	77,4	2,3	5,29
3	242	59,8	-15,3	234,09
4	243	91,5	16,4	268,96
5	244	66,9	-8,2	67,24
6	245	73,9	-1,2	1,44
7	246	73,9	-1,2	1,44
8	247	70,4	-4,7	22,09
9	248	81,0	5,9	34,81

(Fonte: o autor)

$$\delta = \sqrt{\frac{670,17}{8}}$$

$$\delta = 9,15$$

- Determinação do valor de deflexão característica para cada uma das distribuições, através da equação:

$$D_c = D + \delta$$

$$D_c = 75,09 + 9,15$$

$$D_c = 84,24, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

- Cálculo da deflexão característica corrigida ou deflexão de projeto ( $D_p$ ), pela seguinte expressão:

$$D_p = D_c \times F_s$$

Por ser um subleito de origem argiloso e sensível a umidade, estando em uma estação seca o momento da medida, o  $F_s$  a utilizar será de 1,40 de acordo com a tabela 04.

$$D_p = 84,24 \times 1,40$$

$$D_p = 117,94, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

Perante PMSP (IP – 05/2004) o número característico de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t (N), para tráfego pesado se considera  $N = 2 \times 10^7$ . Podendo assim definir de acordo com a figura 07 que a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) é igual a 60, em 0,01 mm.

- Cálculo do raio de curvatura da bacia de deformação é utilizado à seguinte fórmula:

$$R = \frac{6250}{2.(do - d25)}$$

As deflexões calculadas no trecho serão mostradas na tabela 11.

Tabela 11 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm	D25, em 0,01 mm
1	240	81,0	54,0
2	241	77,4	51,6
3	242	59,8	39,9
4	243	91,5	61,0
5	244	66,9	44,6
6	245	73,9	49,3
7	246	73,9	49,3
8	247	70,4	46,9
9	248	81,0	54,0

(Fonte: o autor)

Para ser conhecido o raio de curvatura da bacia de deformação no trecho, foi utilizado à média da deflexão real ou verdadeira (Do) e da deflexão a 25 cm do ponto de prova (D25). Assim sendo Do = 75,10, em 0,01 mm e D25 = 50,10, em 0,01 mm.

$$R = \frac{6250}{2.(75,10 - 50,10)}$$

$$R = 125 \text{ m}$$



Após a execução dos cálculos chegou-se aos seguintes valores:

- $D_{adm} = 60$ , em 0,01 mm
- $D_p = 117,94$ , em 0,01 mm
- $R = 125$  m

### 7.5 Resultado da viga Benkelman na sub-base com pedra de mão, brita 03 e material de enchimento (macadame).

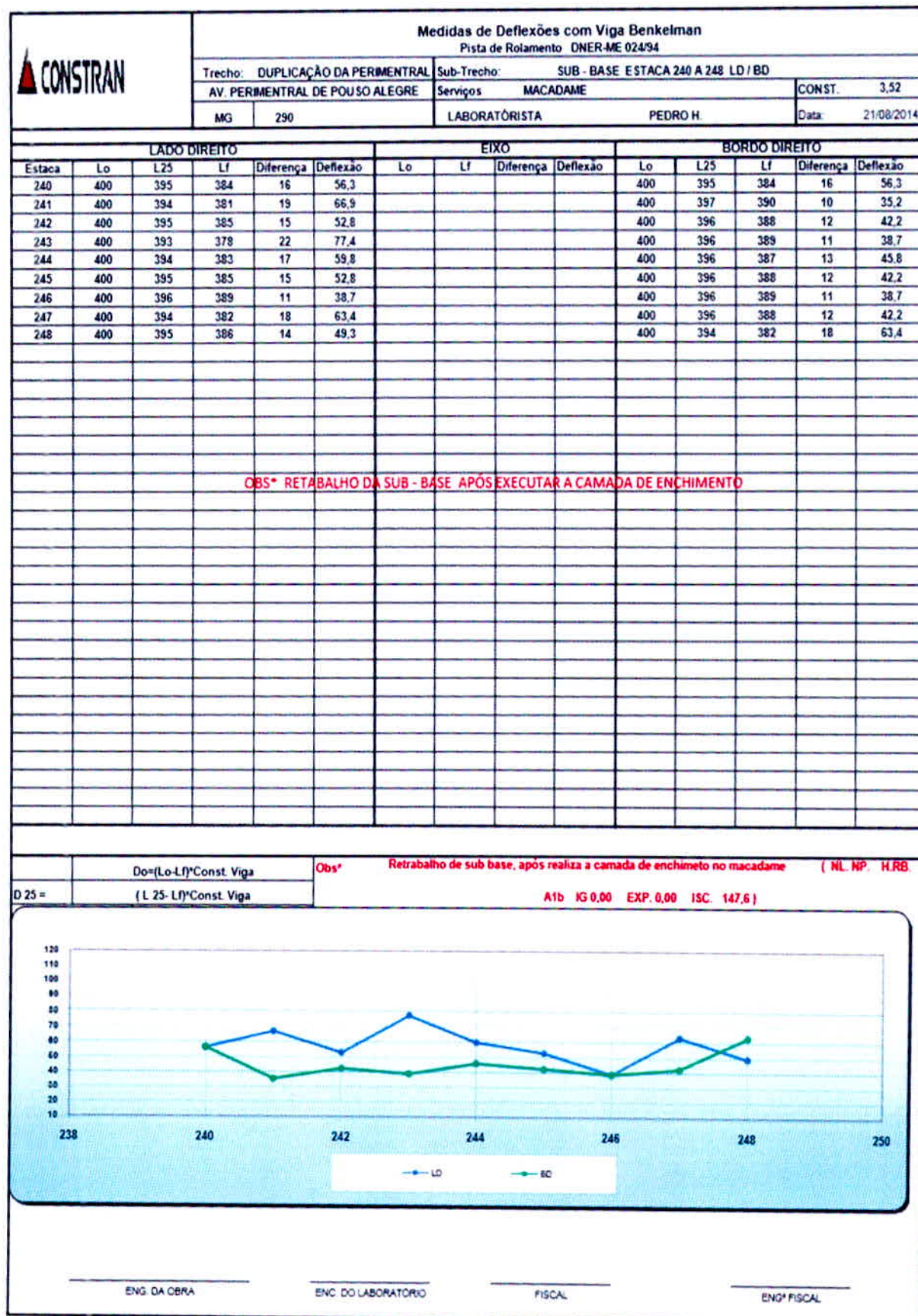
A camada de sub-base analisada é composta por quarenta centímetros, divididos em trinta centímetros de pedra de mão, cinco de brita 03 e cinco de pódrisco, que é um material misturado em usina composto por 50% de pó de pedra e 50% de pedrisco. (Figura 17).

Figura 17 – Camada de sub-base de macadame



(Fonte: o autor)

Figura 18 – Determinação de deflexão através de viga Benkelman na camada de macadame



(Fonte: o autor)

Em função da avaliação estrutural feita com viga Benkelman (Figura 18), foi detectada uma leitura deflectométrica considerável, assim sendo aceita para o tráfego no trecho.

### 7.6 Diagnóstico da avaliação estrutural na sub-base de macadame

- Cálculo da média aritmética dos valores de deflexões obtidos, pela seguinte equação. Os valores estão representados na tabela 12.

$$D = \frac{\sum Di}{n}$$

Tabela 12 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm
1	240	56,3
2	241	66,9
3	242	52,8
4	243	77,4
5	244	59,8
6	245	52,8
7	246	38,7
8	247	63,4
9	248	49,3

(Fonte: o autor)

$$D = \frac{(56,3 + 66,9 + 52,8 + 77,4 + 59,8 + 52,8 + 38,7 + 63,4 + 49,3)}{9}$$

$$D = 57,50, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

- Determinação do valor do desvio-padrão da amostra,  $\sigma$ , através da equação seguinte, valores obtidos estão inseridos na tabela 13.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Di - D)^2}{n - 1}}$$

Tabela 13 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm	Do-D	(Do-D) <sup>2</sup>
1	240	56,3	-1,18	1,44
2	241	66,9	9,38	88,36
3	242	52,8	-4,7	22,09
4	243	77,4	19,94	396,01
5	244	59,8	2,34	5,29
6	245	52,8	-4,7	22,09
7	246	38,7	-18,78	353,44
8	247	63,4	5,86	34,81
9	248	49,3	-8,22	67,24

(Fonte: o autor)

$$\sigma = \sqrt{\frac{990,77}{8}}$$

$$\sigma = 11,12$$

- Determinação do valor de deflexão característica para cada uma das distribuições, através da equação:

$$D_c = D + \sigma$$

$$D_c = 57,5 + 11,12$$

$$D_c = 68,62, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

- Cálculo da deflexão característica corrigida ou deflexão de projeto ( $D_p$ ), pela seguinte expressão:

$$D_p = D_c \times F_s$$

Por ser um subleito de origem argiloso e sensível a umidade, estando em uma estação seca o momento da medida, o  $F_s$  a utilizar será de 1,40 de acordo com a tabela 04.

$$D_p = 68,62 \times 1,40$$

$$D_p = 96,068, \text{ em } 0,01 \text{ mm}$$

Perante PMSP (IP – 05/2004) o número característico de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t (N), para tráfego pesado se considera  $N = 2 \times 10^7$ . Podendo assim definir de acordo com a figura 07 que a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) é igual a 60, em 0,01 mm.

- Cálculo do raio de curvatura da bacia de deformação é utilizado à seguinte fórmula:

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (d_o - d_{25})}$$

As deflexões calculadas no trecho serão mostradas na tabela 14.

Tabela 14 – Valores das deflexões no trecho

N	ESTACA	Do, em 0,01 mm	D25
1	240	56,3	37,5
2	241	66,9	44,6
3	242	52,8	35,2
4	243	77,4	51,6
5	244	59,8	39,9
6	245	52,8	35,2
7	246	38,7	25,8
8	247	63,4	42,2
9	248	49,3	32,9

(Fonte: o autor)

Para ser conhecido o raio de curvatura da bacia de deformação no trecho, foi utilizado a média da deflexão real ou verdadeira (Do) e da deflexão a 25 cm do ponto de prova (D25). Assim sendo  $D_o = 57,50$ , em 0,01 mm e  $D_{25} = 38,33$ , em 0,01 mm.

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (57,50 - 38,33)}$$

$$R = 163,01 \text{ m}$$

Após a execução dos cálculos chegou-se aos seguintes valores:

- $D_{adm} = 60$ , em 0,01 mm
- $D_p = 96,068$ , em 0,01 mm
- $R = 163,01 \text{ m}$

### 7.7 Comparativo dos resultados obtidos na sub – base por meio de viga Benkelman

Após a execução das camadas de sub – base no trecho entre as estacas 240 a 248 da Avenida Perimetral da cidade de Pouso Alegre – MG, chegou – se por meio de cálculos estatísticos da deflexão característica correspondente a resultados que, assim pode – se classificar por meio da tabela 05, a qualidade estrutural das camadas.

Na camada de argila obteve os seguintes resultados (Tabela 15):

Tabela 15 – Análise na camada de argila

R	Dp	Dadm
75,53 m	219,35, em 0,01 mm	60, em 0,01 mm

(Fonte: o autor)

Com os resultados obtidos para a camada de argila (tabela 15) pode – se constatar por meio da tabela 05, que a qualidade estrutural é má, que há necessidade de estudos complementares e a medida corretiva é o reforço ou a reconstrução por meio de outros materiais.

Na camada de macadame sem a camada de enchimento obteve os seguintes resultados (tabela 16):

Tabela 16 – Análise na camada de macadame sem a camada de enchimento

R	Dp	Dadm
125 m	117,94, em 0,01 mm	60, em 0,01 mm

(Fonte: o autor)

Com os resultados obtidos para a camada de macadame, porém sem enchimento (tabela 16) pode – se constatar por meio da tabela 05, que a qualidade estrutural é regular, não há necessidade de estudos complementares e a medida é o reforço.

Na camada de macadame com a camada de enchimento obteve os seguintes resultados (tabela 17):

Tabela 17 – Análise na camada de macadame com a camada de enchimento

R	Dp	Dadm
163,01 m	96,068, em 0,01 mm	60, em 0,01 mm

(Fonte: o autor)

Com os resultados obtidos para a camada de macadame com enchimento (tabela 17) pode – se constatar por meio da tabela 05, que a qualidade estrutural é regular, não há necessidade de estudos complementares e a medida é o reforço. Podendo assim notar que obteve o mesmo diagnostico para a camada de macadame com ou sem enchimento, porém a camada com enchimento tem uma deflexão de projeto bem menor e um raio de curvatura bem maior do que a camada sem enchimento, com isso se conclui que a mesma terá uma estabilidade melhor do que a sem enchimento.



## 8 ORÇAMENTO COMPARATIVO ENTRE SUB – BASE DE ARGILA E DE MACADAME

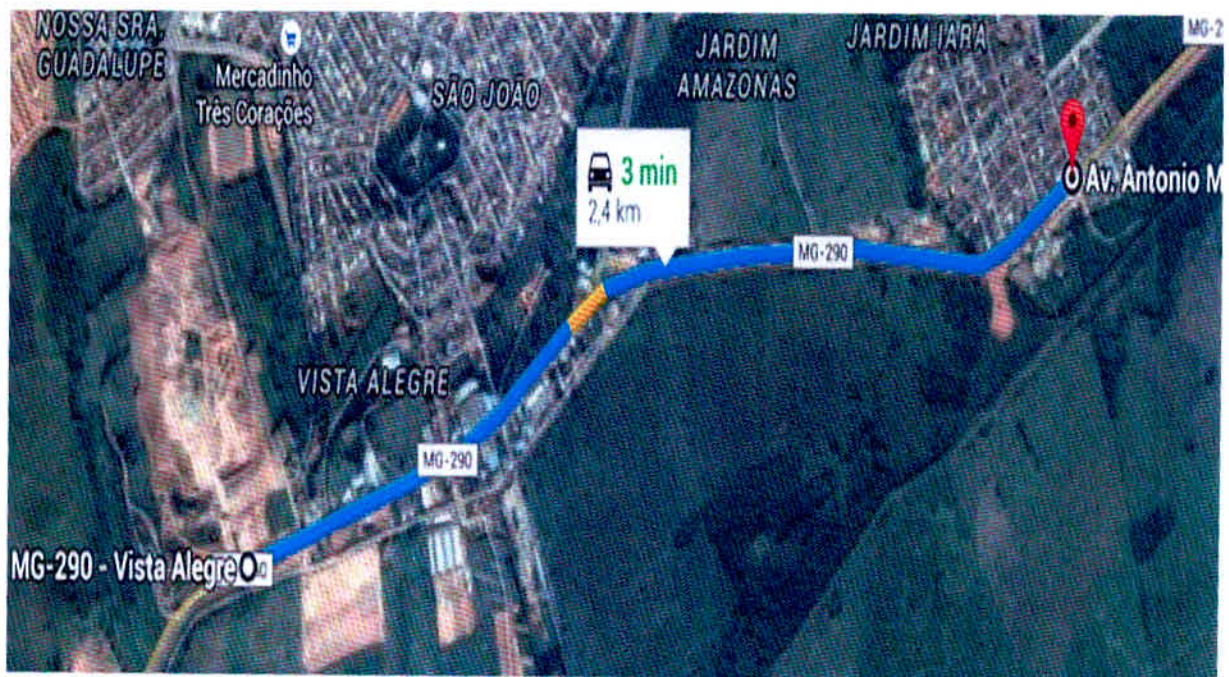
Para obtenção dos valores a serem gastos com cada camada, foi necessária a utilização da tabela referencial de preços para obras rodoviárias, sendo esta, do departamento de estradas de rodagens do estado de Minas Gerais (DER – MG). A tabela utilizada teve vigência a partir de 31/01/2015 e possui algumas observações, que são:

- ✓ Os preços constantes desta lista não incluem B. D. I
- ✓ Os preços incluem a desoneração fiscal – Lei 12.844/2013
- ✓ Esta lista foi elaborada com preços médios de insumos coletados no mercado de preços para pagamento a vista.

### 8.1 Orçamento na camada de sub – base composta com argila

A argila utilizada na camada de sub – base foi retirada da jazida que está localizada a 2,4 km de onde será aplicada, como mostra a figura 19.

Figura 19 – Distância entre a jazida e o trecho de aplicação



(Fonte: Google maps)

O trecho que será aplicado o material está compreendido entre as estacas 240 a 248, totalizando em 160m de comprimento, com 7 metros de pista de rolamento, mais 2,5 metros de acostamento e, 3,4 metros de calçada, no que totaliza em 12,9 metros de largura, com uma espessura de 0,40 metros. Com isso, chega-se a um volume de 825,6 m<sup>3</sup>.

A argila utilizada foi negociada com o proprietário da jazida por R\$ 19,00 o metro cúbico.

Para saber o quanto de argila será necessário cortar para fazer o aterro de 825,6 m<sup>3</sup>, foi considerado uma redução volumétrica de 10%, e houve a utilização da seguinte equação:

$$V_c = \frac{V_a}{c} \quad (8)$$

Onde:

V<sub>c</sub> = Volume de argila medido no corte

V<sub>a</sub> = Volume compactado no aterro

C = Contração (se a redução volumétrica é de 10%, a contração é de 90%)

Portanto:

$$V_c = \frac{825,6}{0,90}$$

$$V_c = 917,34 \text{ m}^3$$

Considerando que o material argiloso tenha um empolamento de 40%, seria necessário o corte de 656 m<sup>3</sup> da jazida.

Em função do volume a ser cortado da jazida e dos serviços a serem executados, temos os seguintes valores (Tabela 18):

Tabela 18 – Valores da camada composta por argila

SUB-BASE COMPOSTA POR ARGILA					
Código	Serviço	Unid.	Qtde	Preço Un. (R\$)	Preço Tot. (R\$)
40160	Escavação, carga, descarga, espalhamento e transporte de material de 1ª categoria. Distância média de transporte de 3.001 a 4.000 m	m3	656,00	10,62	6966,72
40252	Compactação de aterro a 100% do proctor intermediário	m3	656,00	2,70	1771,20
	Material argiloso retirado da jazida	m3	656,00	19,00	12464,00

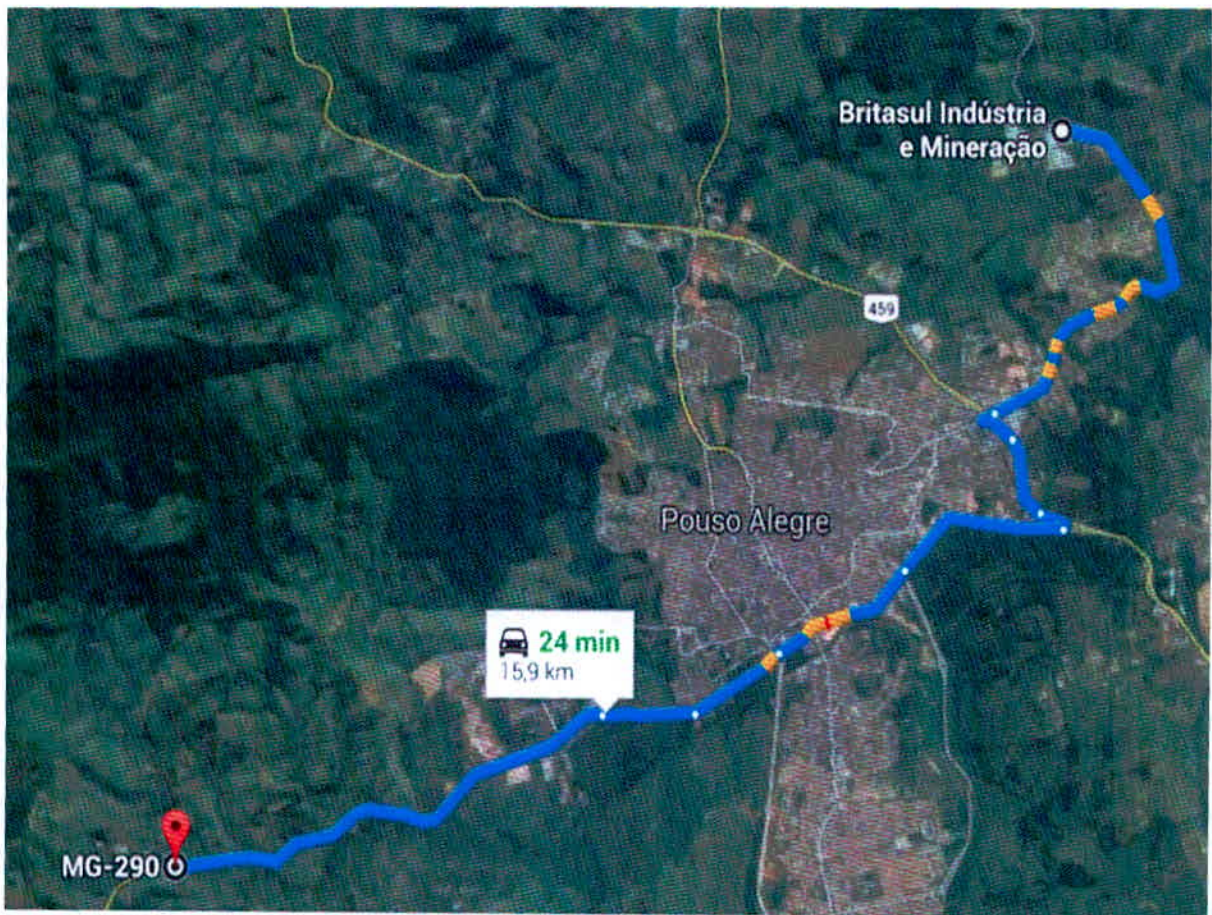
(Fonte: o autor)

Podendo assim definir que o valor a ser gasto com a camada de sub – base composta por argila será de R\$ 21201,92.

## 8.2 Orçamento na camada de sub – base composta com macadame

O material utilizado na camada de sub – base composta por macadame foi adquirido da pedreira Britasul Indústria e Mineração, localizado a 15,9 km do trecho a ser aplicado. Como mostra a figura 20.

Figura 20 – Distância entre a pedreira e o trecho de aplicação



(Fonte: Google maps)

O trecho que será aplicado o material está compreendido entre as estacas 240 a 248, totalizando em 160m de comprimento, com 7 metros de pista de rolamento, mais 2,5 metros de acostamento e 3,4 metros de calçada, totalizando em 12,9 metros de largura.

A camada será composta por 0,30 m de pedra de mão, 0,05 m de brita 03 e 0,05 m de pódrisco.

A tonelada do material utilizado foi adquirido pelos seguintes preços:

- ✓ Pedra de mão = R\$ 26,00
- ✓ Brita 03 = R\$ 26,00
- ✓ Pódrisco = R\$ 26,00

Para saber quantas toneladas de pedra de mão serão utilizadas em 0,30 metros na camada, foi necessário seguir algumas etapas:

O volume de pedra de mão é definido em função das seguintes dimensões, 160 metros de comprimento, 12,9 metros de largura e, 0,30 metros de espessura. Assim, totalizando em 619,2 m<sup>3</sup>.

O peso específico da pedra de mão é 1,5 ton/m<sup>3</sup>, então para 619,2 m<sup>3</sup> são necessárias 928,8 toneladas.

Para saber quantas toneladas de brita 03 serão utilizadas em 0,05 metros na camada, foi necessário seguir algumas etapas:

O volume de brita 03 é definido em função das seguintes dimensões, 160 metros de comprimento, 12,9 metros de largura e, 0,05 metros de espessura. Assim, totalizando em 103,2 m<sup>3</sup>.

O peso específico da brita 03 é de 1,385 ton/m<sup>3</sup>, então para 103,2 m<sup>3</sup> são necessárias 143 toneladas.

Para saber quantas toneladas de pódrisco serão utilizadas em 0,05 metros na camada foi necessário seguir algumas etapas:

O volume do pódrisco é definido em função das seguintes dimensões, 160 metros de comprimento, 12,9 metros de largura e 0,05 metros de espessura. Assim totalizando em 103,2 m<sup>3</sup>.

O peso específico obtido do pódrisco que é uma mistura feita em usina entre pó de pedra e pedrisco é de 1,440 ton/m<sup>3</sup>, então para 103,2 m<sup>3</sup> são necessárias 149 toneladas.

O meio a ser utilizado para o transporte dos materiais será o caminhão truck, sua capacidade é de 10 a 14 toneladas, considerando em que cada viagem sejam transportadas 13 toneladas, e sabendo que para a camada será utilizada 103,2 m<sup>3</sup> de pódrisco e 103,2 m<sup>3</sup> de brita 03, totalizando em 292 toneladas. Além disso, vale lembrar que a distância da pedreira ao trecho estudado é de 15,9 km e, deve-se considerar que terá de ser feita 23 viagens.

Em função dos aspectos apresentados e dos serviços a serem executados, temos os seguintes valores (Tabela 19):

Tabela 19 – Valores da camada composta por macadame

SUB-BASE COMPOSTA POR MACADAME					
Código	Serviço	Unid.	Qtde	Preço Un. (R\$)	Preço Tot. (R\$)
41347	Transporte de agregados para a conservação. Distância média de transporte de 15,10 a 20,0 km	M <sup>3</sup> x KM	75480,48	0,67	50571,92
40229	Enrocamento de pedra de mão jogada (execução incluindo o fornecimento de todos materiais)	M3	619,2	80,31	49727,95
43195	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura, compactado na energia de proctor modificado (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, espalhamento e compactação do material; exclui aquisição do material)	M3	206,4	12,44	2567,62
	Pódrisco	TON	149,00	26,00	3874,00
	Brita 03	TON	143,00	26,00	3718,00

(Fonte: o autor)

Podendo assim definir que, o valor a ser gasto com a camada de sub – base composta por macadame será de R\$ 110459,49.

### 8.3 Análise e comparações

Por meio deste trabalho, foi possível estudar a camada de sub – base composta por argila e por macadame, podendo assim, analisar os aspectos de estabilização, deflexão e preços.

Para a execução da camada de sub – base composta por argila no trecho estudado, será gasto R\$ 21201,92, valor mais de cinco vezes menor do que a camada composta por macadame, que é de R\$ 110459,49.

A camada de sub – base composta por macadame tem uma deflexão de projeto de 96,068, em 0,01 mm, enquanto a camada composta por argila é de 219,35, em 0,01 mm, sendo um valor 2,28 vezes maior.

De acordo com a tabela 05, a camada composta por argila é considerada de qualidade estrutural má, havendo assim necessidade de substituição. Já a camada composta por macadame, é considerada de qualidade estrutural regular, atendendo a finalidade do projeto.

## 9 CONCLUSÃO

Os estudos de pavimentação exigem diversos tipos de levantamentos, ensaios, cálculos, avaliações e análises para obtenção de um projeto de qualidade.

Para se obter o conhecimento da qualidade estrutural do pavimento conforme relacionado na tabela que envolve critérios para avaliação estrutural, é necessário levar em conta alguns casos típicos como o número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t (N), a deflexão de projeto ( $D_p$ ), o raio de curvatura (R) e a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ). Esses resultados são obtidos por meio de avaliação estatística, como indicado no capítulo 5.5.3.

Após a execução da camada de argila na sub-base do trecho entre as estacas 240 a 248 da Avenida Perimetral da cidade de Pouso Alegre – MG, pode-se constatar por meio da tabela que abrange critérios para avaliação estrutural que, a qualidade estrutural é má, havendo necessidade de estudos complementares e, a medida corretiva é o reforço ou a reconstrução por meio de outros materiais.

Vale salientar que, por meio da análise feita na camada composta por argila foi definido que seria necessário ser feita a reconstrução da camada. Para a nova camada foi utilizado macadame, assim por meio da tabela 05 pode – se constatar que, a qualidade estrutural é regular, não havendo necessidade de estudos complementares e, a medida corretiva é apenas o reforço.

De acordo com o comparativo de preços feito entre as duas camadas, mesmo a camada composta por argila ter um valor mais de cinco vezes menor do que a camada composta por macadame ela não é a melhor camada a ser utilizada no trecho. Isso é comprovado através da análise feita nas camadas em função do tráfego previsto para o trecho, mostrando que a camada de sub – base que atende o projeto é a de macadame.

Nesse caso, a economia não é o mais importante aspecto a ser analisado, e sim a estabilização e deflexão, pois estes elementos são responsáveis para que se evitem deformações nas demais camadas. Podendo assim concluir que, a camada de sub – base composta por macadame, apesar de possuir um preço mais elevado, é a que mais atende a necessidade do tráfego.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica materiais, projeto e restauração**. 1. Ed. São Paulo: Oficinas de textos, 2011.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BAPTISTA, Cyro de Freitas Nogueira. **Pavimentação tomo I: Ensaio fundamentais para a pavimentação dimensionamentos dos pavimentos flexíveis**. 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1978.
- BAPTISTA, Cyro de Freitas Nogueira. **Pavimentação tomo II: Compactação dos solos no campo; camadas de base; estabilização dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1979.
- BERNUCCI, Liedi Nariani. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1.ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2006.
- CRAIG, Robert F. **Craig, mecânica dos solos**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 024/94: Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman**. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. **ME 061/94: Pavimentação – base de macadame hidráulico**. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. **PRO 011/79: Procedimento B, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Norma rodoviária**. Rio de Janeiro, 1979.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: 2006.
- \_\_\_\_\_. **Manual de estudos de tráfego**. 1. Ed. Rio de Janeiro: 2006.
- GONDIM, Lilian Medeiros. **Estudo Experimental de Misturas Solo - Emulsão Aplicado às Rodovias do Aglopólo do Baixo jaguaripe/ Estado do Ceará**. Dissertação De Mestrado. Fortaleza: 2008.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Dimensionamento de pavimentos flexível tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus**. São Paulo, 2004.

DER / MG- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE  
MINAS GERAIS.: **Tabela referencial de preços para obras rodoviárias** . Belo horizonte,  
2015.