

**UNIVERSIDADE FERDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSO NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



RELATÓRIO DO ESTÁGIO SUPERVISIONADO

Aluna: Janaina Lima de Araújo - Mat: 20021069

Campina Grande – PB

Junho de 2006



Biblioteca Setorial do CDSA. Junho de 2021.

Sumé - PB

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Tecnologia e Recurso Natural - CTRN
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Estágio Supervisionado

Título:

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE VIA EXPRESSA NA ZONA URBANA DE
CAMPINA GRANDE-PB.**

Aluna: Janaina Lima de Araújo

Aprovada em _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Afonso Gonçalves de Macêdo
Orientador

Eng^o Fabiano Pereira Cavalcante.
Examinador

AGRADECIMENTOS

Ao mesmo tempo em que é o fim de uma etapa, a realização deste trabalho é apenas um passo dentre muitos já dados e muitos que virão. É a construção de uma base de conhecimentos que serão utilizados durante toda minha carreira profissional.

Apesar de tanto esforço pessoal empenhado na realização deste trabalho, não se trata de uma conquista individual. Foi através dos conhecimentos acadêmicos, conversas com amigos, professores e profissionais da área que consegui alcançar meus objetivos. Sendo assim, agradeço primeiramente a **DEUS** por permitir minha realização pessoal. Aos meus pais, **Absalão Galdino de Araújo** e **Judith Maria de Lima**, que sempre me acompanharam e foram grandes incentivadores da busca do meu sonho – ser uma Engenheira Civil. As minhas irmãs, por fazerem parte da minha vida. E em especial ao meu tio **João Eudes**, que ao lado no nosso grande PAI com certeza esteve torcem muito pelo meu sucesso, e a todos os **amigos**, pela ajuda, força, conselhos e amor com o qual sempre me presentearam.

Agradeço ainda ao professor **José Afonso Gonçalves de Macêdo** que se dispôs tão prontamente a orientar-me na realização deste trabalho. Aos **professores e funcionários da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil**, que contribuíram com o desempenho de seus papéis durante todos estes anos.

Ao **LEP**, por ter sido cenário na idealização deste trabalho, principalmente na pessoa do **Professor Ailton Alves Diniz**, que me deu apoio total nas realizações dos ensaios.

A **JBR engenharia LTDA.**, por ter me dado oportunidade da realização deste trabalho, em especial ao **Engenheiro Fabiano Pereira Cavalcante**, pelo apoio e pelos valiosos ensinamentos.

Aos meus amigos **Jorge Luís e Ricardo**, pela amizade a mim confiada e por todas as ajudas concedidas colaborando de maneira decisiva na elaboração deste trabalho.

Aos **meus amigos curso**, em especial a **Patrícia**, pelas contínuas experiências vividas dentro e fora de sala de aula e pela paciência.

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	5
2. IDENTIFICAÇÃO	6
3. INTRODUÇÃO	7
4. PAVIMENTO RODOVIÁRIO	9
5. AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS	13
5.1. Avaliação da Condição Funcional	14
5.2. Avaliação da Condição Estrutural	20
6. ANÁLISE DE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS	23
6.1. Ensaio Macâmico	25
6.2. Programas Computacionais de Análise	31
6.2.1. ELSYM5 (<i>Elastic Layered System</i>)	31
6.2.2. FEPAVE2 (<i>Finite Element Analysis of Pavement</i>)	32
6.3. Fadiga de Misturas Asfálticas	35
6.3.1. Modelos de Fadiga	38
6.3.2. Deformação Elástica e Permanente	42
7. PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO	43
7.1. Métodos de dimensionamentos para pavimentos flexíveis	45
7.1.1. Método do DNIT	45
7.1.2. Método Mecânico	50
8. PROLONGAMENTO DA AVENIDA FLORIANO PEIXOTO - ESTUDO DE CASO	52
8.1. Características do trecho	52
8.2. Especificação do projeto executado	52
8.3. Metodologia	53
8.1.1. Materiais Granulares	54
8.1.2. Ensaio mecânico	54
8.1.3. Coletas de amostras e Ensaio de Laboratório do trecho	54
8.4. Apresentação e Discussão dos resultados	55
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
10. CONCLUSÃO	62
11. BIBLIOGRAFIA	63
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

ÍNDICE – TABELAS

Tabela 1 – Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG.....	17
Tabela 2 - Modelos Existentes no FEPAVE.....	33
Tabela 3 - Faixas granulométricas para material de base.....	47
Tabela 4 - Espessura mínima do revestimento.....	48
Tabela 5-Coefficientes de equivalência estrutural.....	49
Tabela 6 - Amostras coletadas de CBUQ do revestimento.....	55
Tabela 7 - Resultados coeficientes baseado no modelo composto.....	56
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de compressão diametral do revestimento de CBUQ.....	57
Tabela 9 - Resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas estudadas.....	57
Tabela 10 - Resultados do módulo de resiliência (MR) e Flexibilidade das misturas asfálticas.....	58
Tabela 11 - Módulos médios obtidos no programa FEPAVE2.....	58
Tabela 12 - Dados Obtidos a partir do ELSYM e do modelo de Pinto no ponto $x = 0$	59
Tabela 13 - Dados Obtidos a partir do ELSYM e do modelo de Pinto no ponto $x = 10.8$	59
Tabela 14 - Dados Obtidos a partir do ELSYM e do modelo de Pinto no ponto $x = 15.0$	60
Tabela 15 – Tensões sob Revestimento a partir do FEPAVE2 com características não lineares.....	60
Tabela 16 – Tensões sobre Subleito a partir do FEPAVE2 com características não lineares.....	60
Tabela 17 – Deformação específica sob o revestimento a partir do FEPAVE2 com características não lineares e a partir do ELSYM5 com características lineares.....	60

ÍNDICE – FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal de um Pavimento Rígido	9
Figura 2 – Distribuição do carregamento em uma placa do pavimento rígido.....	10
Figura 3 – Distribuição do carregamento em pavimentos flexíveis.....	10
Figura 4 – Seção transversal de um Pavimento Flexível	13
Figura 5 – Treliça da NORMA DNIT 006/2003 – PRO.....	15
Figura 6 – Efeito da carga sobre o pavimento	22
Figura 7 – Equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida.....	28
Figura 8 – Ensaio de Resistência à tração.....	30
Figura 9 – Exemplo de saída do programa FEPAVE2	35

ÍNDICE

QUADROS

Quadro 1 – Inventário do estado de superfície.....	18
Quadro 2 – Cálculo do Índice de Gravidade Global – IGG.....	18
Quadro 3 – Resumo dos Defeitos – Codificação e Classificação	19

ÁBACO

Ábaco 1 – De dimensionamento de pavimentos flexíveis.....	48
---	----

ANEXOS

ANEXO 1 - Caracterização dos materiais granulares.....	65
ANEXO 2 - Modelo Composto - BASE.....	66
ANEXO 3 - Modelo Composto – SUB-BASE.....	67
ANEXO 4 - Modelo Composto – SUBLEITO.....	68
ANEXO 5 - Pontos de Inspeção.....	69

1. APRESENTAÇÃO

Neste relatório apresenta-se a descrição das atividades realizadas durante o estágio desenvolvido no período de 09 de Janeiro de 2006 a 09 de Junho de 2006, com uma carga horária de 20 horas semanais. Sob orientação do professor José Afonso Gonçalves de Macêdo, no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN, e sob supervisão, nas análises dos resultados, do Engenheiro Fabiano Pereira Cavalcante da JBR Engenharia Ltda., em cumprimento às exigências da disciplina Estágio Supervisionado do curso Graduação em Engenharia Civil.

Entre a teoria vista no curso de Engenharia civil e a pratica observada durante o estagio podemos destacar disciplinas como PAVIMENTAÇÃO, que apesar de ser uma disciplina optativa, é de grande importância para a formação de um engenheiro. Nesta disciplina foi possível observa na pratica todo o processo de dimensionamento de uma estrutura de pavimento, ensaios empregados para a boa qualidade de tal estrutura, métodos mais usuais no Brasil. Outra disciplina que sua prática foi muito bem observada foi MECÂNICA DOS SOLOS, onde foi possível observa todo o processo caracterização dos materiais empregados, realizando os mais diversos experimentos em laboratório e em campo.

Deste modo esse estágio tem a finalidade, de fazer com que tudo aquilo que foi visto em sala de aula fique mais concreto para o aluno, facilitando assim todo o aprendizado e aperfeiçoar o aluno nas técnicas da construção civil, possibilitando também conhecer os materiais e equipamentos atualmente empregados nesta ciência.

E desta forma fazendo valer o conceito de estagio, que é o de apresenta para o futuro profissional aquilo que ele vai enfrenta na vida prática e fazer com que ele entenda que tudo aquilo visto em sala de aula é de grande importância para o seu desempenho profissional futuro.

2. IDENTIFICAÇÃO

Do estagiário:

- *Nome:* Janaina Lima de Araújo
- *Matrícula:* 20021069
- *Curso:* Engenharia Civil
- *Endereço:* Rua: Antônio Joaquim Pequeno, 525 - Bodocongó.
- *Telefone:* (083) 3333-2882 / 8814-6206

Da empresa / estágio:

- *Nome da Empresa:* JBR Engenharia Ltda.
- *Endereço da Empresa:* Avenida Correia de Brito, nº. 271 - Boa Viagem.
Recife – PE, CEP: 52.040-360.
- *Telefone:* (81) 3241-8508

- *Estágio Realizado no Laboratório:* Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP/ UFCG
- *Endereço:* Avenida Aprígio Veloso, N° 882 – Bodocongó.
Campina Grande-PB, CEP: 58109-910.
- *Telefone:* (083) 3310-1310

Do orientador:

- *Nome:* José Afonso Gonçalves de Macêdo
- *Atividade:* Professor Adjunto – D.Sc
- *Telefone:* (81) 3241-8508

Do supervisor:

- *Nome:* Fabiano Pereira Cavalcanti
- *Atividade:* Engenheiro da JBR Engenharia
- *Telefone:* (083) 216-7310

Período do estágio:

- *Duração:* 09/01/2006 a 09/06/2006.
- *Carga horária diária:* 4 horas
- *Carga horária total:* 480 horas

3. INTRODUÇÃO

O dimensionamento e a análise de estruturas de pavimentos realizadas no Brasil são baseados em metodologias que vêm se desenvolvendo há muitos anos.

Inicialmente, os modelos aplicados eram totalmente empíricos e importados, a exemplo temos o método baseado no valor do Índice de Suporte Califórnia ou CBR (*California Bearing Ratio*) obtidos experimentalmente pelo “*Corps of Engineers*”. Os projetos modernos de pavimentação utilizam métodos racionais de dimensionamento que tem como entrada de dados tensões e deformações em diferentes pontos das camadas dos pavimentos.

A análise de tensões e deformações em estruturas de pavimentos como sistemas de múltiplas camadas e a aplicação da teoria da elasticidade, deu ensejo à consideração mecanística das deformações resilientes no dimensionamento de pavimentos.

Os métodos mecanísticos de dimensionamento, contrapondo os métodos empíricos utilizados em pavimentação por muitos anos, ao invés de considerar o CBR empírico do subleito e das camadas de base e sub-base, levam em conta as características mecânicas destas camadas, - resiliência no caso de modelos elásticos. A caracterização mecânica possibilita um aprimoramento no procedimento de dimensionamento bem como uma investigação do potencial para utilização de materiais locais alternativos e novas tecnologias para as camadas do pavimento.

O desempenho de um pavimento vem sendo avaliado atualmente sob diversos aspectos funcionais e estruturais. Dentre os aspectos estruturais, que implicam em definição de espessuras e escolha de materiais adequados, pode-se avaliar o desempenho em função das características e do comportamento dos materiais que compõem o pavimento, tais como o módulo resiliente ou dinâmico, o comportamento em relação à temperatura no seu interior, deformação permanente ou vida de fadiga. Estes comportamentos são estimados através de simulações das condições de campo em laboratório, que levam ao desenvolvimento de modelos analíticos de previsão.

Portanto, o conhecimento do comportamento dos materiais de pavimentação em relação às cargas e às condições do meio físico que lhe são impostas torna-se indispensável. Esse comportamento deve ser medido em ensaios realizados em laboratório que permitam simular as condições reais de utilização dos materiais de pavimentação. É preciso também conhecer o comportamento da estrutura do pavimento em relação às tensões e deformações desenvolvidas sob as cargas a que ela está sujeita. Tal comportamento é extremamente complexo e, para tornar viável uma análise, utilizam-se simplificações que consideram este comportamento puramente elástico linear ou elástico não-linear. Diversos métodos

de cálculo de tensões e deformações em estruturas de pavimento encontram-se, atualmente, inseridos em programas de computador e podem ser facilmente utilizados em qualquer ponto do pavimento, desde que se conheçam os parâmetros de sua estrutura e do carregamento a que está submetido.

São exemplos desses programas: o FEPAVE2 (*Finite Element Analysis of Pavement*), que considera a modelagem elástica não-linear, e usa o método dos elementos finitos como procedimento de cálculo; ELSYM5 (*Elastic Layered System*) que utiliza modelagem, elástico linear e o procedimento de cálculo dos métodos das diferenças finitas; além de outros.

Este trabalho foi concebido com o objetivo geral de revisar os conceitos da Mecânica dos Pavimentos, obtidos ao longo do curso de graduação em Engenharia Civil através da realização do estágio supervisionado, aplicando-os na solução de problemas específicos das áreas de Infra-estrutura de Transportes e da Geotecnia.

O objetivo específico deste trabalho foi o de estudar e realizar a avaliação estrutural de pavimentação do prolongamento da Avenida Floriano Peixoto no município de Campina Grande – Paraíba, tentando conhecer o comportamento da estrutura de pavimento em relação às tensões e deformações desenvolvidas sob as cargas que ela foi dimensionada.

4. PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Pavimento é uma estrutura constituída por uma ou mais camadas, construída sobre a terraplanagem de um terreno, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, proporcionando condições satisfatórias de velocidade, segurança, conforto e economia no transporte de pessoas e mercadorias, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura.

Os pavimentos são classificados, de acordo com a forma de distribuição de tensões, em: rígido, flexível e semi-rígido:

A motivação inicial desta classificação era em separar os pavimentos construídos com cimento portland dos construídos à base de ligantes betuminosos. A motivação atual é separar os pavimentos em função de seu comportamento estrutural.

> PAVIMENTOS RÍGIDOS

São constituídos basicamente por uma placa de concreto que praticamente absorve toda a solicitação, distribuindo-a em uma grande área. Ao chegar ao subleito, a carga encontra-se suficientemente amortecida. Essas placas se caracterizam por terem uma alta rigidez, alta resistência, pequenas espessuras, definidas em função da resistência à flexão.

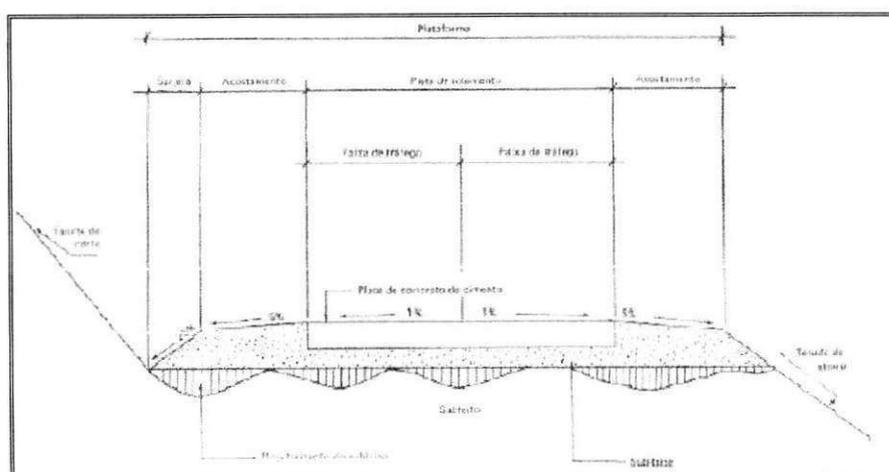


Figura 1 – Seção transversal de um Pavimento Rígido

O principal fator de projeto é a resistência à tração das placas de concreto de cimento Portland. A base e a sub-base podem ser flexíveis ou semi-rígidas e servem para controlar o bombeamento de

finos, a expansão e a contração do subleito. Possuindo também uma função drenante. As placas distribuem as tensões impostas pelo carregamento de forma aproximadamente uniforme.

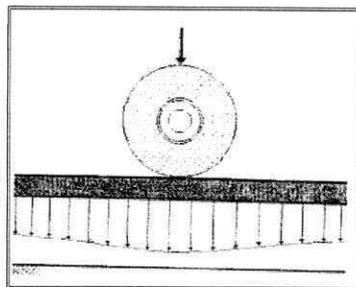


Figura 2 - Distribuição do carregamento em uma placa do pavimento rígido

Pelas suas características, o pavimento rígido, se bem projetado e construído, tem vida mais longa e maior espaçamento entre manutenções quando comparado ao pavimento flexível.

> PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

São pavimentos compostos por várias camadas que sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, todas as camadas devem trabalhar em conjunto, cada uma delas absorvendo parte das solicitações impostas e transmitindo o restante às camadas localizadas em níveis inferiores.

Em geral são três as camadas constituintes de um pavimento flexível, são elas a sub-base, base e revestimento. Essas camadas repousam sobre o subleito, que é a plataforma da estrada. Compreende a infra-estrutura implantada, bem acaba em termos de movimento de terra (limpeza, cortes e aterros) e de seu aspecto superficial. O subleito é o terreno de fundação do pavimento.

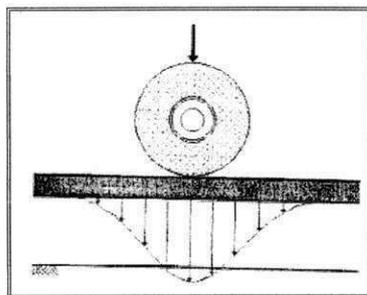


Figura 3 - Distribuição do carregamento em pavimentos flexíveis

Sua capacidade estrutural é fornecida pelas sucessivas camadas e pelas propriedades de resistência e rigidez de cada material nelas empregado, a camada estruturalmente mais importante é a base, que tem a função de receber as tensões do tráfego e distribuir os esforços antes de transmiti-los à sub-base ou ao reforço do subleito.

Adaptação a eventuais recalques do subleito é uma das grandes vantagens dos pavimentos flexíveis, pois deformam sob a ação das cargas, outras vantagens é a rapidez de execução e liberação ao tráfego, além de proporcionar reparos fáceis e rápidos.

» **DESCRIÇÃO DAS CAMADAS DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL**

* **Regularização do subleito**

- Camada com espessura variável;
- Executada quando se faz necessária à preparação do subleito da estrada, para conformá-lo transversal e longitudinalmente com o projeto;
- Pode em alguns trechos não ocorrer;
- Deve ser executada sempre em aterro.

* **Reforço do subleito**

- Camada necessária quando o subleito possui baixa capacidade de carga;
- É também utilizada para redução da espessura da sub-base;
- Possui espessura constante;
- É construída acima da regularização e possui características técnicas superiores ao material do subleito e inferiores ao material que vier acima.

* **Sub-base**

- Camada utilizada para reduzir a espessura da base;
- Exerce as mesmas funções da base, sendo complementar a esta;
- Tem como funções básicas resistir às cargas transmitidas pela base, drenar infiltrações e controlar a ascensão capilar da água, quando for o caso.

* **Base**

- Camada estruturalmente mais importante, sua principal função no pavimento é o suporte estrutural, promovendo a rigidez e a resistência à fadiga da estrutura;
- A base deve resistir e distribuir os esforços provenientes da ação do tráfego, atenuando a transmissão destes esforços às camadas subjacentes;
- Além disso, deve garantir que a magnitude das tensões de flexão no revestimento não o leve ao trincamento prematuro;
- Geralmente é construída com materiais estabilizados granulometricamente ou quimicamente, através do uso de aditivos (cal, cimento, betume etc.)

* **Revestimento**

- Destinado a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, é constituído por uma combinação de agregado mineral e material betuminoso;
- O agregado (cerca de 90% a 95%) suporta e transmite as cargas aplicadas pelos veículos e, resiste ao desgaste imposto pelas solicitações;
- O material betuminoso (asfalto) compõe entre 5% e 10% do revestimento é o elemento aglutinante, que liga os agregados, tem ação impermeabilizante (oferece resistência à ação das águas provenientes das chuvas).

Tipos de Revestimentos de Pavimentos Flexíveis

- **Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)** - mistura à quente, em usina, de agregado mineral graduado, material de enchimento e cimento asfáltico, espalhado e comprimido à quente. Como no Brasil não se usa mais alcatrão e sim o asfalto, o termo concreto betuminoso significa praticamente concreto asfáltico. O concreto asfáltico também pode ser usado como base.
- **Pré-misturado a quente** - quando o ligante e o agregado são misturados e espalhados ainda quentes. O ligante é o cimento asfáltico. A espessura da camada varia de 3 a 10 cm.
- **Pré-misturado a frio** - quando os agregados (um ou mais) e ligantes utilizados permitem que o espalhamento seja feito à temperatura ambiente (embora a mistura tenha sido feita a quente). O ligante é emulsão asfáltica ou asfalto diluído.
- **Areia-asfalto a quente** - agregado miúdo e cimento asfáltico com presença ou não de material de enchimento. Espalhado e comprimido à quente. Espessura não deve ultrapassar 5 cm.
- **Areia-asfalto a frio** - asfalto diluído ou emulsão asfáltica e agregado miúdo com a presença ou não de material de enchimento. Espalhado e comprimido à frio.
- **Revestimentos betuminosos por penetração invertida ou tratamentos superficiais**

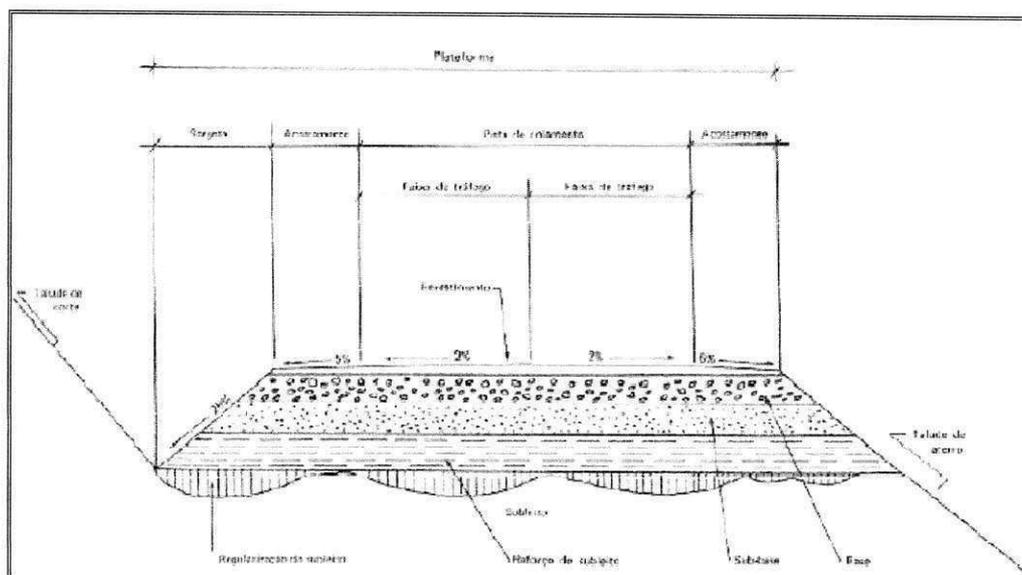


Figura 4 - Seção transversal de um Pavimento Flexível

A Necessidade de se conhecer o tráfego se dá, devido que as características do tráfego afetam a qualidade de pavimentos flexíveis. As solicitações acima das previstas em projeto podem ocasionar degradações como deformações permanentes, trincas e perda de material da superfície de rolamento.

5. AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

A avaliação de um pavimento compreende um conjunto de atividades destinadas à obtenção de dados, informações e parâmetros que permitam diagnosticar os problemas e interpretar o desempenho apresentado pelo pavimento, de modo a se poder, detectar as suas necessidades atuais e futuras de manutenção e se prever as conseqüências da implementação de estratégias alternativas de manutenção.

Consiste, portanto, na primeira fase do processo de seleção de medidas de manutenção de uma determinada via, ou seja, é a partir da sua realização que é possível identificar a necessidade de intervenção oferecida. A avaliação de um pavimento requer a coleta de dados substanciais, os quais podem ser divididos nas seguintes categorias principais:

- Condições do pavimento (incluindo os acostamentos);
- Dados de projeto do pavimento;
- Propriedades dos materiais componentes;
- Volume de tráfego e carregamento;
- Condições climáticas;
- Considerações de segurança

A identificação das necessidades de manutenção também requer informações relativas às condições de drenagem oferecida pelo pavimento existente, ou seja:

- Se o projeto de drenagem concebido é adequado para a via;
- No caso do pavimento apresentar problemas de drenagem, que medidas são necessárias para assegurar que as deficiências existentes, as quais podem contribuir para a aceleração da degradação da estrutura, serão corrigidas.

5.1. Avaliação da Condição Funcional

A avaliação funcional destina-se a avaliar a condição do pavimento de acordo com a visão do usuário, de modo a se detectar as deficiências merecedoras de atenção.

Compreende o levantamento dos aspectos que afetam mais diretamente ao usuário da rodovia, na forma de conforto ao rolamento (relacionado aos custos operacionais dos veículos), tempo de viagem (que também pode ter um custo associado) e segurança (custo de acidentes). Mais especificamente:

- **Conforto ao Rolamento:** depende da irregularidade longitudinal da pista, o que é função primordial dos afundamentos plásticos gerados por acúmulo de deformações permanentes sob cargas repetidas em todas as camadas do pavimento;
- **Segurança:** tem como principal elemento o atrito em pista molhada (resistência à derrapagem), o qual é função da microtextura e da macrotextura superficiais, ambas afetadas pelo desgaste produzido pela passagem do tráfego. O potencial para hidroplanagem é incrementado pela irregularidade transversal (afundamentos em trilha de roda). A refletividade da superfície é outro item que pode adquirir importância quanto à segurança.

Um aspecto importante a ser considerado quando da avaliação funcional de um pavimento refere-se à variabilidade imposta na fase de sua construção, a qual pode ser representada pela irregularidade longitudinal oferecida quando da sua abertura ao tráfego. Quanto maior for essa irregularidade, maiores serão as solicitações dinâmicas a que o pavimento estará sujeito. Além disso, a própria fórmula de dimensionamento da AASHTO mostra que, se o nível de serventia inicial for igual a $PSI_0 = 4.0$, por exemplo, a vida de serviço do pavimento será menor do que se um melhor padrão de construção for obtido, levando a $PSI_0 = 4.5$, por exemplo. Além desse aspecto, relacionado à geometria,

quanto maior for a heterogeneidade longitudinal das propriedades dos materiais das camadas, maior será a irregularidade futura gerada pela repetição das cargas do tráfego.

A irregularidade longitudinal pode ser medida de duas formas: registrando-se o próprio perfil longitudinal da via por meio de perfilômetros, como o APL (Analisador de Perfil Longitudinal, do LCPC), ou por meio dos equipamentos tipo resposta, como o *Maysmeter*, que registram os picos das vibrações de maiores amplitudes em um veículo em movimento (“*Quarter-car Index*”, QI, em contagens/km).

A irregularidade transversal pode ser medida por meio de aparelhos caros e automatizados, como os que funcionam à base de sensores a laser, ou simplesmente utilizando-se a **treliça da NORMA DNIT 006/2003 - PRO**. No primeiro caso, tem-se um registro contínuo e confiável de todo o perfil transversal, enquanto que, no segundo, medem-se apenas os afundamentos nas trilhas de roda relativa às áreas da pista situadas nas adjacências, fora das trilhas de roda. Alternativamente, pode-se utilizar um aparelho simples, formado por uma haste equipada com um ponteiro sobre rodas, que permite o registro contínuo do perfil transversal em papel milimetrado.

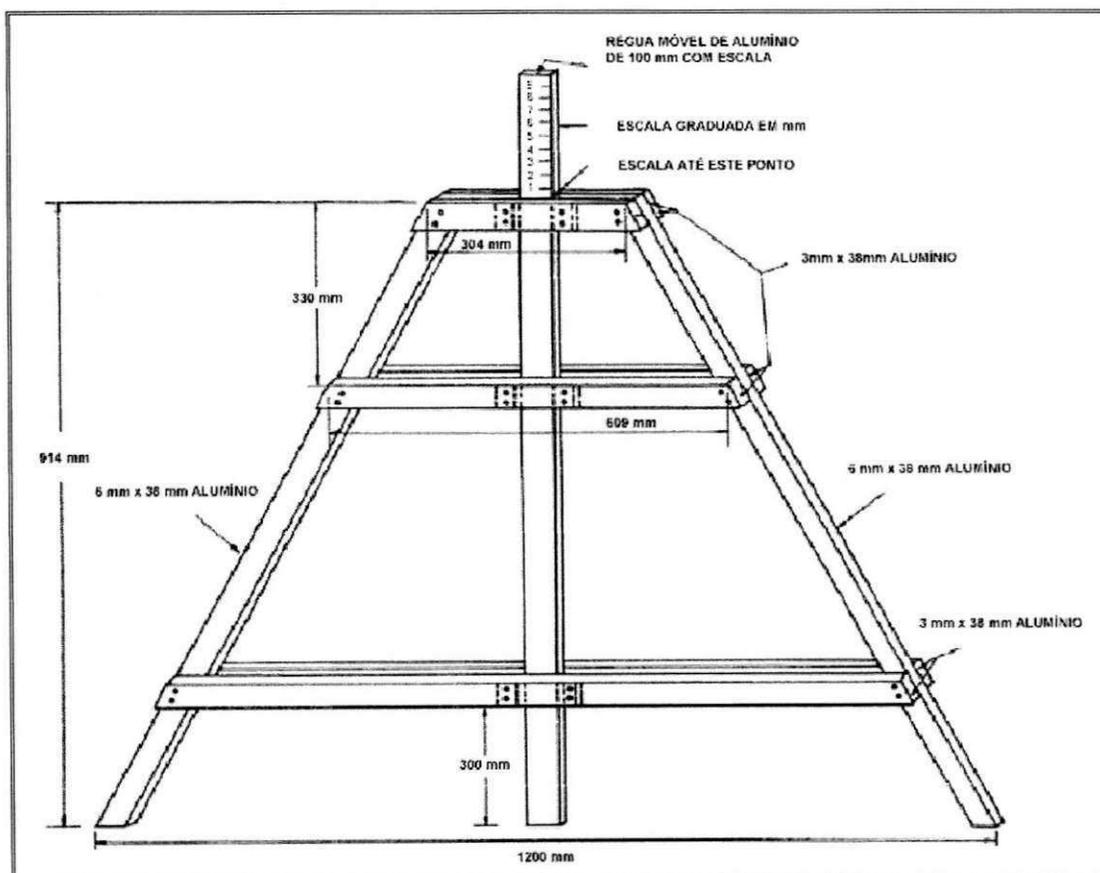


Figura 5 – Treliça da NORMA DNIT 006/2003 – PRO

* Avaliação da Deterioração de Superfície

A avaliação de superfície de um pavimento consiste do registro da extensão, frequência e severidade dos defeitos de superfície existentes.

Os defeitos de superfície, para sua completa caracterização, devem ser descritos quanto aos seguintes parâmetros:

- **Tipo de Defeito:** dentre trincas, desgaste, exsudação de asfalto ou de água, escorregamento de massa, erosão de bordo, bombeamento de finos, remendos e panelas. As trincas podem ser classificadas quanto à sua configuração geométrica, a qual se relaciona ao mecanismo que deu origem à trinca (couro-de-crocodilo, isoladas, interligadas em padrão irregular, longitudinais, transversais, de bloco);
- **Intensidade:** retrata o grau com que aquele defeito afeta a estrutura do pavimento ou compromete seu desempenho. É usual, em diversas metodologias, avaliá-la por meio de três níveis: baixa, média e elevada. No caso de trincas, por exemplo, esta avaliação depende da relação entre a soma total dos comprimentos das trincas existentes em uma determinada área e o valor dessa área;
- **Gravidade:** é a medida do grau de evolução do defeito. No caso de trincas, refere-se à sua abertura. São comuns as metodologias não diferenciarem gravidade de intensidade, adotando um parâmetro único relacionado a ambas e denominado severidade;
- **Frequência:** é a distribuição da ocorrência do defeito ao longo de um segmento ou trecho da rodovia, sendo expressa pela relação percentual entre o número de estacas onde ocorre o defeito e o número total de estacas existente dentro do segmento;
- **Extensão:** ilustra a área ocupada pelo defeito em uma determinada estaca. No caso de trincas, tem-se a percentagem de área trincada, como exemplo desse parâmetro de medida.

O registro de defeitos é quase sempre realizado visualmente, embora já existam equipamentos automatizados que efetuam as leituras por meio de sensores a laser.

O levantamento de defeitos de superfície é direcionado para se avaliar as medidas de conservação necessárias para se evitar uma deterioração acelerada no futuro, ou para se determinar as

medidas de restauração requeridas para se melhorar o pavimento. Este levantamento não tem por objetivo representar a resposta do usuário, embora esteja a ela relacionado, na medida em que os defeitos de superfície são a causa da perda de serventia atual e futura. A aplicação mais imediata de uma avaliação de defeitos de superfície ocorre dentro de projetos de restauração de pavimentos deteriorados, quando os registros efetuados serão utilizados para:

- Selecionar-se as medidas necessárias para correção das deficiências funcionais detectadas;
- Dimensionar as espessuras das camadas de recapeamentos, se esta solução for aplicável, levando-se em conta o fenômeno da reflexão de trincas;
- Elaborar-se um diagnóstico para o pavimento, por meio de uma análise conjunta dos defeitos levantados, do histórico de manutenção e de tráfego do pavimento, de sua condição estrutural e de sua idade, esclarecendo-se os mecanismos através dos quais se deu a sua deterioração.

No Brasil, de modo geral, o estado de superfície dos pavimentos flexíveis é avaliado em termos do Índice de Gravidade Global (IGG). Sendo, para sua determinação, realizadas medidas de afundamentos em trilhas de roda e levantamentos visuais da superfície do pavimento, efetuados com o propósito de se identificar e quantificar os defeitos existentes na superfície do pavimento. Nos Quadros 1 e 2 estão apresentadas as etapas preconizadas para realização do inventário de superfície do pavimento e cálculo do IGG. O conceito do pavimento avaliado é atribuído de acordo com os limites mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG

IGG	Conceito Limites
$0 < \text{IGG} \leq 20$	Ótimo
$20 < \text{IGG} \leq 40$	Bom
$40 < \text{IGG} \leq 80$	Regular
$80 < \text{IGG} \leq 160$	Ruim
$\text{IGG} > 160$	Péssimo

No caso de pavimentos de concreto cimento o levantamento e a caracterização dos defeitos do pavimento pode ser realizada através da utilização da metodologia desenvolvida para o cálculo do PCI (*Pavement Condition Index*) do USACE.

Quadro 3 - Resumo dos Defeitos – Codificação e Classificação

FENDAS				CODIFICAÇÃO	CLASSE DAS FENDAS		
Fissuras				FI	-	-	-
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curvas	TC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TIL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curvas	LTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	Jacaré	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JL	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou à secagem da base (isolamento) ou do revestimento	TRR	FC-1	FC-2	FC-3	
	Trincas Interligadas	Boca	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	IB	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-	-	FC-3
	OUTROS DEFEITOS					CODIFICAÇÃO	
Afundamento	Plástico	Local	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ALP			
		da Trilha	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	AIP			
	De Consolidação	Local	Devido a consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ALC			
		da Trilha	Devido a consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	AIC			
Ondulação/Corrugação - Ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base				O			
Escorregamento (do revestimento betuminoso)				L			
Exsudação de ligante betuminoso no revestimento				EX			
Desgaste acentuado na superfície do revestimento				D			
"Pancias" ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores				P			
Remendos			Remendo Superficial	RS			
			Remendo Profundo	RP			

NOTA 1: Classe das trincas isoladas

FC-1: são trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0mm.

FC-2: são trincas com abertura superior a 1,0mm e sem erosão nas bordas.

FC-3: são trincas com abertura superior a 1,0mm e com erosão nas bordas.

NOTA 2: Classe das trincas interligadas

As trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nas bordas.

5.2. Avaliação da Condição Estrutural

A condição estrutural de um pavimento denota sua adequação ou sua capacidade de resistir à deterioração provocada pela passagem das cargas do tráfego. Assim, um retrato completo da condição estrutural de um pavimento deve ser composto pelos seguintes elementos:

- Parâmetros que descrevam a deformabilidade elástica ou viscoelástica dos materiais das camadas, sob as condições de solicitação impostas pelas cargas transientes dos veículos. Tais parâmetros são utilizados para se calcular as tensões e deformações induzidas pelas cargas do tráfego na estrutura do pavimento;
- Parâmetros que descrevam a resistência dos materiais ao acúmulo de deformações plásticas sob cargas repetidas, os quais são funções da natureza do material, de sua condição (densidade, umidade) e do histórico de solicitações;
- Integridade das camadas asfálticas e cimentadas, expressa pelo grau de fissuramento.

A condição estrutural pode ser avaliada de duas formas complementares:

- **Avaliação Destrutiva:** Consiste da abertura de furos de sondagem para identificação da natureza e das espessuras das camadas do pavimento, bem como da abertura de poços de sondagem para coleta de amostras dos materiais que serão ensaiados em laboratório. Alguns ensaios “in situ” nas camadas de solos e de materiais granulares podem ser realizados, como CBR “in situ” e determinações de umidade e densidade. Os ensaios de laboratório abrangem desde aqueles convencionais para caracterização geotécnica até ensaios especiais, como os que permitem a medida do módulo de deformação resiliente;
- **Avaliação Não-Destrutiva:** Consiste da realização de provas-de-carga para medida de parâmetros de resposta da estrutura às cargas de roda em movimento. Os deslocamentos verticais de superfície (“deflexões”) são os parâmetros de resposta cuja medida é mais simples e confiável, em comparação com tensões ou deformações, razão pela qual a quase totalidade dos equipamentos utilizados para ensaios não destrutivos são deflectômetros.

Uma condição estrutural inadequada ou uma capacidade estrutural insuficiente, para o tráfego atuante, acelerará a geração de defeitos de superfície (trincas de fadiga nas camadas asfálticas e cimentadas), bem como a queda do nível de serventia com o tempo (em decorrência da geração de afundamentos plásticos em trilha de roda e ondulações). Ao mesmo tempo, a existência de trincas no revestimento asfáltico permite a entrada de águas pluviais no pavimento, gerando bombeamento de finos e enfraquecimento do solo de subleito, o que degrada a condição estrutural do pavimento, acelerando, por sua vez, a queda do nível de serventia e a própria deterioração superficial.

A condição estrutural de um pavimento indica, portanto, a velocidade com que a deterioração do pavimento está se processando, ou seja, a velocidade com que os defeitos estão surgindo e/ou aumentando de severidade. A época mais eficaz para se restaurar um pavimento é aquela imediatamente antes de a condição estrutural atingir um nível tal que a deterioração do pavimento passa a se processar a uma velocidade cada vez maior.

*** Noções de Deformabilidade**

A ação das cargas de tráfego sobre os pavimentos flexíveis e semi-rígidos provoca deformações dos tipos permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, ou seja, tem caráter residual. Deformações geradas nas trilhas de roda pela consolidação adicional pelo tráfego, bem como as rupturas de natureza plásticas, são exemplos de deformações permanentes.

As deformações recuperáveis ou Deflexões representam um indicativo do comportamento elástico da estrutura, deixando de existir alguns momentos após a retirada da carga.

As deflexões recuperáveis provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e sua repetição é a responsável pelo Fenômeno da Fadiga das camadas betuminosas e cimentadas.

A deflexão recuperável máxima (d) é um parâmetro importante para a compreensão do comportamento da estrutura. Quanto maior seu valor, mais elástico ou resiliente é a estrutura, e maior o seu comportamento estrutural. Caracteriza a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto (ou uma área) da superfície do pavimento, todas as camadas fletam devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento. O valor da deflexão em cada camada geralmente diminui com a profundidade e o distanciamento do ponto de aplicação da carga e depende ainda do módulo de elasticidade das camadas. A partir de certas distâncias e profundidades as deflexões tornam-se muito pequenas.

Os pavimentos mais robustos estruturalmente fletam menos do que os pavimentos mais debilitados. A significativa diferença na “resposta” entre os pavimentos robustos e debilitados indica os efeitos no desempenho estrutural.

Assim sendo, pavimentos com deflexões mais baixas suportam maior número de solicitações de tráfego.

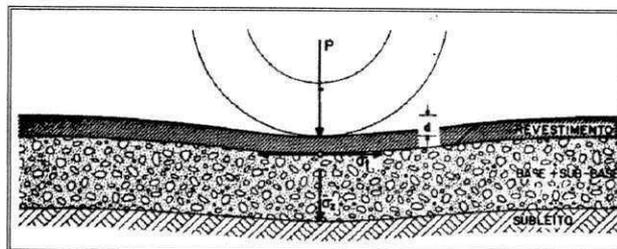


Figura 6 – Efeito da carga sobre o pavimento

* Raio de Curvatura

O raio de curvatura é um parâmetro afetado essencialmente pelas características elásticas dos componentes da porção superior da estrutura, ou seja, o próprio revestimento e a base. Assim, um baixo raio de curvatura é normalmente um indicativo de que os módulos elásticos das camadas superiores do pavimento apresentam valores abaixo dos desejáveis. Definir um valor crítico para o raio de curvatura é uma tarefa difícil, de vez que cada estrutura apresenta características particulares. No entanto, parece importante para uma análise mais aprofundada de estruturas flexíveis com revestimento em concreto asfáltico que exibem raios de curvatura inferiores a 100m, considerados críticos.

Os ensaios não destrutivos avaliam a deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento e são bastante apropriados para avaliação da capacidade estrutural.

Os equipamentos mais utilizados podem ser divididos em:

- **Vigas de deflexão** - As vigas de deflexão medem a resposta do pavimento submetido a um carregamento estático ou a aplicação de uma carga em movimento lento. Os equipamentos mais utilizados são: a viga Benkelman e as vigas de deflexão automatizadas.
- **Equipamentos dinâmicos de vibração** - Os equipamentos dinâmicos de vibração medem a resposta do pavimento quando submetido a uma carga vibratória ou cíclica.
- **Equipamentos dinâmicos de impacto** - Todos os equipamentos que transferem ao pavimento uma carga dinâmica de impacto estão incluídos nesta classificação e são chamados de FWD – “*Falling Weight Deflectometer*” ou

deflectômetros de impacto. Os equipamentos mais conhecidos no Brasil são o *Dynatest FWD* e o *KUAB FWD*. Estes equipamentos empregam um peso que é elevado até uma altura preestabelecida e solto em queda livre para atingir uma placa apoiada sobre a superfície do pavimento. Esta placa transmite uma força de impulso à estrutura, a qual pode ser modificada, alterando-se o peso e/ou a altura de queda. A resposta do pavimento ao impacto é registrada por um conjunto de sensores posicionados longitudinalmente a partir do centro da placa.

6. ANÁLISE DE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS.

A evolução mais recente no que tange ao projeto de pavimentos e avaliação estrutural está calcada nos conceitos de Mecânica dos Pavimentos.

No Brasil, essa técnica foi marcada pela introdução, em 1977, de ensaios de cargas repetidas com equipamentos acionados por sistemas pneumáticos, em pesquisas iniciadas através do Convênio de Cooperação Técnica firmado entre a COPPE/UFRJ e o IPR/DNER.

A Mecânica dos Pavimentos, nada mais é do que a aplicação das teorias da Mecânica do Contínuo, da Mecânica dos Solos e da Mecânica da Fratura na interpretação do comportamento de sistemas estratificados e, assim, estabelecendo bases mais racionais para o projeto de pavimentos novos e suas restaurações.

Portanto, o objetivo da Mecânica dos Pavimentos é de projetar um pavimento considerando o estado de tensões e de deformações atuantes, compatibilizando-os com as admissíveis ou resistentes, para um período de projeto e condição de serventia. Um projeto de pavimento flexível bem concebido deve atender limitações de:

- Tensões que possam provocar ruptura por cisalhamento;
- Deformações permanentes;
- Deformações recuperáveis ou elásticas.

Um pavimento bem dimensionado, em função do CBR, garante as duas primeiras condições. Contudo, a repetição das cargas transientes pode levar a ruptura por fadiga do revestimento betuminoso ou da camada cimentada prematuramente, se não for considerado o limite admissível das deformações elásticas para um “N” de projeto – repetição do carregamento.

O conhecimento das tensões e deformações em uma seção de pavimento proposta permite avaliar a ocorrência de fadiga durante o período de projeto. A natureza instantânea e recuperável das deformações tem conduzido os pesquisadores a utilizarem a Teoria da Elasticidade, para previsão do estado de tensão e deformação, porém, desde que os parâmetros elásticos sejam determinados em condições similares ao carregamento que ocorre no campo.

Ensaio de laboratório têm sido desenvolvidos para estudar os materiais de pavimentação sob condições de carregamento similares aqueles de campo. Entre eles, cita-se o ensaio triaxial de carga repetida para materiais terrosos, permitindo determinar o módulo de elasticidade ou resiliente sob diferentes condições de umidade, densidade, tensão confinante, tensão desvio, frequência do carregamento, duração e repetição do carregamento.

A concepção da viga de Benkelman deu ensejo à consideração desse parâmetro no projeto estrutural. Por outro lado, a difusão da análise numérica e da computação trouxe facilidades no que tange ao cálculo de tensões, de deformações e de deslocamentos, com a aplicação da teoria da elasticidade a sistemas de camadas.

A adoção dos métodos elásticos através de programas computacionais tem sido a tônica observada nos últimos anos. Assim, convencionou-se chamar em Mecânica dos Pavimentos, de deformação resiliente, a deformação elástica ou recuperável de solos e de estruturas de pavimentos sob a ação de cargas transientes.

Resiliência (segundo o “Aurélio”) é definida como a propriedade pela qual a energia armazenada em um corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora da deformação elástica. Portanto, o termo deformação resiliente passou a significar a deformação recuperável dos pavimentos quando submetidos a carregamentos repetidos, isto, como um a forma de distingui-la daquelas que ocorrem em outras estruturas onde as cargas não são repetidas tão aleatoriamente quanto à frequência, duração e intensidade como a do tráfego de veículos. Foi convencionado no país designar de “**Método da Resiliência**” a análise de deformações, de deslocamentos e de tensões de sistemas de camadas elásticas lineares e não-lineares.

A determinação do módulo de resiliência de solos é feita em laboratório, através do ensaio triaxial de carga repetida de curta duração. Conceitualmente, não existem solos resilientes e solos não-resiliente, uma vez que todos eles apresentam deformação resiliente quando solicitados por um carregamento.

6.1. ENSAIOS MACÂNICOS

➤ **Módulo de resiliência (MR) nos materiais das subcamadas**

Módulo de resiliência é o módulo elástico usado como entrada de dados para o cálculo de tensões e deformações nos diferentes pontos do pavimento. Ressalta-se que os materiais de pavimentação não são elásticos, sendo o uso da teoria da elasticidade uma aproximação. A temperatura, o estado de tensão, e a umidade são variáveis importantes na caracterização dos materiais. O módulo de resiliência da mistura asfáltica depende da temperatura, enquanto que os módulos dos materiais de base, sub-base e subleito variam mais com a umidade. O módulo dos materiais granulares (não coesivos) e solos finos (coesivos) podem ser determinados através do ensaio triaxial com carregamento repetido (triaxial dinâmico).

* **Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas**

O estado de tensões em um meio elástico varia com a posição da carga móvel. Quando o carregamento vertical se situa acima do elemento de solo ou de camada do pavimento, tem-se o estado de tensões normais principais, vertical (σ_1) e horizontal (σ_3). O ensaio de laboratório é feito rotineiramente com tensão vertical variável e confinante constante, ou seja: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, onde σ_d é a tensão desvio variável.

Na determinação do módulo resiliente somente a parcela ε_r (recuperável) é considerada. O ensaio é realizado com corpos de prova não saturados, geralmente em condições de drenagem livre.

O módulo de deformação resiliente é definido no ensaio triaxial de cargas repetidas, pela equação:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \qquad \varepsilon_R = \frac{\Delta H}{H_o}$$

Onde:

M_R - módulo de deformação resiliente;

σ_d - tensão desvio aplicada repetidamente;

ε_R - deformação específica axial resiliente, correspondente a um número particular de repetição da tensão desvio;

ΔH - deslocamento vertical máximo;

H_o - Comprimento inicial de referência da amostra de solo cilíndrica ensaiada.

As deformações resilientes são elásticas no sentido de serem recuperáveis, porém não necessariamente lineares. O módulo resiliente dos materiais granulares é função crescente da tensão de confinamento (σ_3) que decresce com a profundidade do ponto considerado.

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 à 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 mecanoelétricos 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.

O ensaio é realizado com, corpo-de-prova obtido de bloco de amostra indeformada ou compactado em laboratório, sendo que o diâmetro do molde deve ser superior ou igual a 4 vezes o diâmetro máximo das partículas de solo e sua altura guarda uma relação de aproximadamente 2 vezes o diâmetro (DNER-ME 131/94).

No Brasil, os módulos têm sido freqüentemente determinados para as seguintes condições:

- Repetição do carregamento ≈ 200 ;
- Frequência: 20 a 60 solicitações por minuto;
- Duração 0,10 a 0,15 segundo;
- Intervalo entre cargas: 2,86 a 0,86 segundo.

Costuma-se fazer o ensaio a tensão confinante (σ_3) constante, medindo-se a deformação axial.

» **Ensaio de solos arenosos ou pedregulhosos**

- o **Tensões de condicionamento** – antes de fazer as medições de deformação, com a tensão de confinamento, $\sigma_3 = 0,7 \text{ Kg/cm}^2$, a razão de tensões principais $\sigma_1 / \sigma_3 = 2$, aplicar 200 vezes a tensão-desvio a 60 ciclos por minutos, duração de 0,10 segundo. A seguir, com a mesma tensão confinante aplicada e com razão de tensões principais igual a 4, aplicar o mesmo número de repetições da tensão-desvio.
- o **Medições de deformação** – a fim de obter o módulo resiliente, aplicam-se as seguintes tensões: $\sigma_3 = 0,21 - 0,35 - 0,525 - 0,70 - 1,05 - e 1,40 \text{ Kg/cm}^2$; para cada uma destas,

aplicam-se uma tensão-desvio tal que se obtenham as seguintes razões $\sigma_1 / \sigma_3 = 2, 3$ e 4 . Registram-se as deformações após 200 aplicações de cada tensão-desvio.

» **Ensaio de solos argilosos e siltosos**

- o Tanto o condicionamento como os registros das deformações são feitos à tensão confinante de $0,21 \text{ Kgf/cm}^2$. A razão de tensões principais máximas adotadas depende do tipo de solo, de modo a serem evitadas grandes deformações plásticas. Aplicam-se 200 repetições de tensão-desvio, entre $0,21$ e 2 Kgf/cm^2 .
- o Os corpos-de-prova cilíndricos têm, por exemplo, 10 cm de diâmetro e 20 cm , de altura. São obtidos por compactação por impacto, na condição de densidade e umidade desejada.
- o Para as condições reais de tráfego na rodovia, pode-se fazer a seguinte analogia:
 - Repetição do Carregamento – período de projeto;
 - Frequência – fluxo ou volume de tráfego;
 - Duração – velocidade dos veículos.

» **Módulo de resiliência em misturas betuminosas (DNER-ME 133/94)**

* **Ensaio de Compressão Diametral de Cargas Repetidas**

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro da COPPE/UFRJ, para a determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, sendo conhecido no exterior com “ensaio brasileiro”.

O investigador Schmidt da *Chevron*, Califórnia, introduziu esse ensaio para as misturas betuminosas sob carregamento repetido.

A carga é aplicada por compressão diametral em amostras cilíndricas, induzindo um estado de compressão na direção vertical e de tração na horizontal.

O carregamento vertical é, aplicado e distribuído através de um friso de carga curvo e o deslocamento horizontal é medido por transdutores do tipo LVDT.

A aplicação da teoria da elasticidade a misturas asfálticas no ensaio de compressão diametral, é admissível a níveis de tensão de tração de 50% ou menos em relação à de ruptura e a temperaturas inferiores a 35°C .

Atribui-se o coeficiente de Poisson de $0,25$ a $0,30$ para as misturas asfálticas a quente.

Em resumo, pode-se dizer que o módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração (σ_t) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente a tensão aplicada, numa temperatura (T °C), para certa freqüência de aplicação de carga. Tem-se adotado a temperatura de 25°C, com uma freqüência de 60 solicitações por minuto e duração da carga de 0,10s.

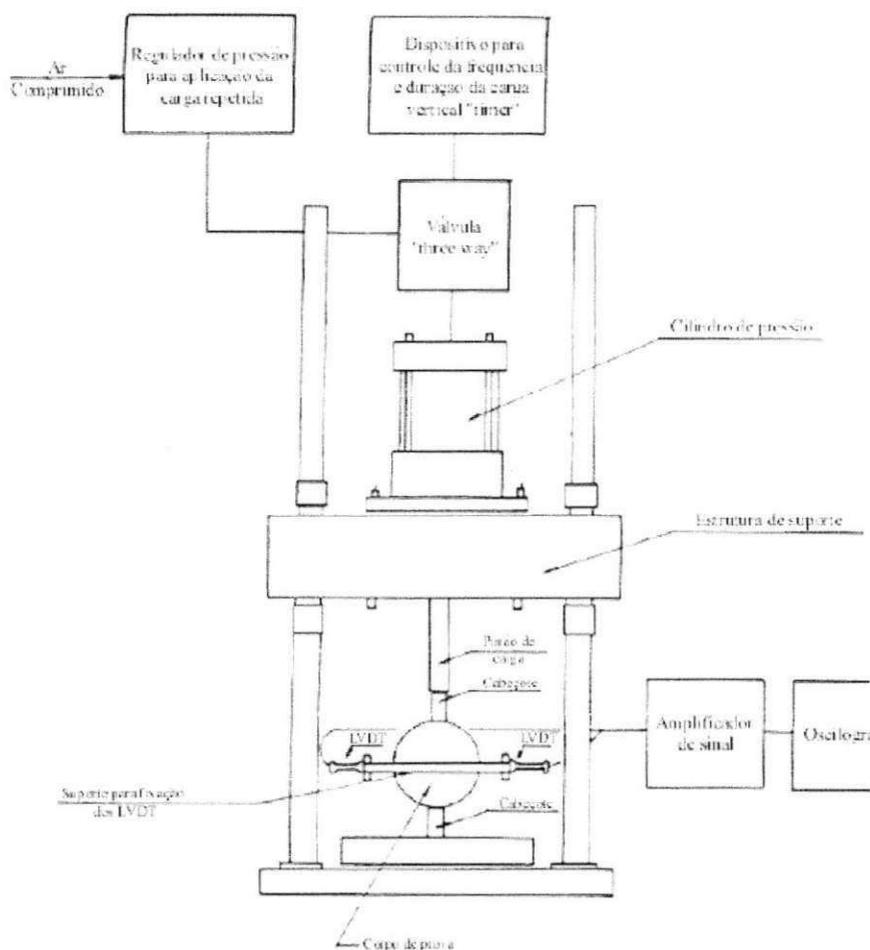


Figura 7 – Equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida

O corpo de prova destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente do campo por extração através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório, de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm.



Foto 1 – Extração de corpos de prova



Foto 2 – Modelagem de corpos de prova em laboratório

*** Tração estática (DNER-ME 138/94)**

Este ensaio tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas através do ensaio de compressão diametral. O corpo de prova pode ser obtido diretamente do campo por extração através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório. Com o valor

da carga de ruptura (F) obtido, a resistência à tração do corpo de prova é calculada através da expressão:

$$RT = \frac{2F}{\pi DH}$$

Onde:

- RT = resistência à tração, kgf/cm^2 ;
- F = carga de ruptura, kgf ;
- D = diâmetro do corpo de prova, cm ;
- H = altura do corpo de prova, cm .

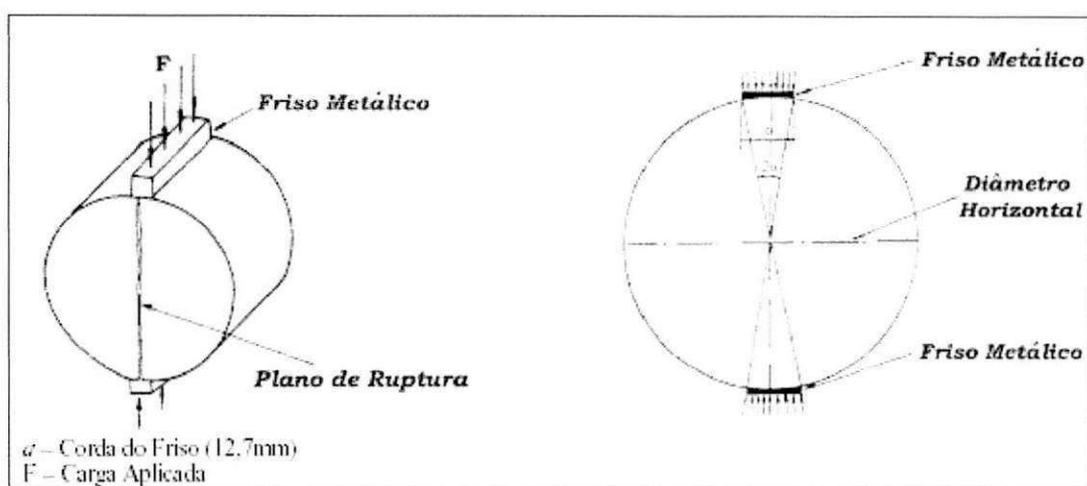


Figura 8 - Ensaio de Resistência à tração

* Deformação Permanente

O **ensaio de creep** consiste na aplicação de cargas de compressão estáticas e contínuas em corpos de prova cilíndricos, ao longo do tempo. Essa compressão é feita de forma uniaxial e executada no sentido axial, podendo ser realizada numa condição confinada ou não. Utiliza o mesmo equipamento do ensaio de compressão diametral.

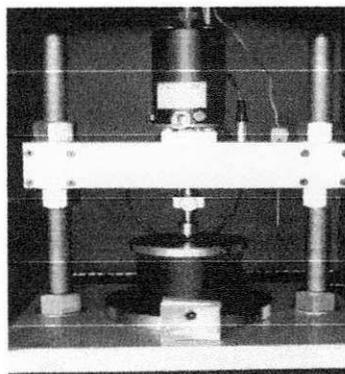


Foto 3 – Equipamento para Ensaio de creep

6.2. Programas Computacionais de Análise

O comportamento da estrutura do pavimento em relação às tensões e deformações desenvolvidas sob as cargas a que ela está sujeita é extremamente complexo e, para tornar viável uma análise, utilizam-se simplificações que consideram este comportamento puramente elástico linear ou elástico não linear. Diversos métodos de cálculo de tensões e deformações em estruturas de pavimento encontram-se, atualmente, inseridos em programas de computador e podem ser facilmente utilizados em qualquer ponto do pavimento, desde que se conheçam os parâmetros de sua estrutura e do carregamento a que está submetido.

São exemplos desses programas: FEPAVE2 (*Finite Element Analysis of Pavement*), que considera a modelagem elástica não linear, e usa o método dos elementos finitos como procedimento de cálculo; ELSYM5 (*Elastic Layered System*) que utiliza modelagem, elástico linear e o procedimento de cálculo dos métodos das diferenças finitas; além de outros.

Estes programas foram desenvolvidos para os cálculos de tensões, deformações e deslocamentos em sistemas de camadas elásticas, cada um com suas limitações, vantagens e hipóteses próprias, e utilizando diferentes técnicas numéricas (diferenças finitas, elementos finitos, camadas finitas).

6.2.1. ELSYM5 (*Elastic Layered System*)

O programa Elsym5 foi desenvolvido na Universidade de Berkeley, Califórnia, EUA, em linguagem científica FORTRAN, para computadores de grande porte, na década de 1970. Tendo sido adaptado para computadores pessoais por Kopperman em 1985. Tem como base os modelos teóricos de Burmister, o programa utiliza modelagem elástica linear e o procedimento de cálculo dos métodos das diferenças finitas. Este método consiste em se escrever as equações diferenciais em forma discreta, ou seja, em função dos valores que as incógnitas (tensões, deformações) recebem em cada ponto de uma rede aplicada sobre o meio contínuo. São obtidos, assim, fórmulas de recorrência, pelas quais os valores das incógnitas são determinados ponto a ponto de forma aproximada, a partir dos valores conhecidos nas fronteiras (cargas aplicadas e deslocamentos restringidos).

O programa Elsym5 aplica esta metodologia para o cálculo dos efeitos produzidos por uma roda simples em pontos especificados pelo usuário. No caso de cargas com rodas múltiplas, é feita a superposição dos efeitos de todas as rodas, procedimento este que é correto para a obtenção de deslocamento, uma vez que a estrutura é elástica linear, entretanto aproximado, para o cálculo das tensões.

As configurações possíveis de carregamento admitem até dez cargas de rodas simples, aplicadas uniformemente distribuídas sobre uma área circular na superfície do sistema e um perfil com até cinco camadas (incluindo o subleito, considerado semi-infinito).

Considera-se cada camada, homogênea, isotrópica, linearmente, elástica e horizontalmente infinita, com espessuras uniformes, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson constantes.

6.2.2. FEPAVE2 (*Finite Element Analysis of Pavement*)

O FEPAVE2 foi desenvolvido na Universidade de Berkeley, Califórnia, EUA, em linguagem científica FORTRAN, para computadores de grande porte, por E. L. WILSON em 1965, em 1966, J. M. Duncan, C. L. Monismith e E. L. Wilson introduziram modificações na versão original que permitiram gerar automaticamente configurações de elementos finitos adequadas à análise de estruturas axissimétricas de pavimentos flexíveis, e adaptar modelos de módulos de resiliência dependentes do estado de tensões atuante através de análise não-linear.

O programa considera o pavimento como um sistema em camadas horizontais e infinitas, com exceção de uma das dimensões, a espessura; utiliza a teoria da elasticidade cuja solução para o cálculo das tensões e deformações se obtêm pelo método dos elementos finitos. As propriedades dos materiais variam nas direções radial e vertical e são constantes segundo a direção tangencial.

O sistema considerado é o das coordenadas cilíndricas r , θ e z , com carregamento circular e o meio sendo discretizado em elementos anulares de seção transversal retangular no plano zr e com simetria axial em relação ao eixo z . Os deslocamentos vertical, radial e tangencial são positivos nas direções positivas dos respectivos eixos.

Ele substitui o meio contínuo por uma malha de elementos finitos dividindo-se a estrutura a analisar em elementos em forma de quadriláteros. A cada um desses elementos associa-se um material e uma função de interpolação (função que mais se aproxima da função representativa dos deslocamentos no elemento considerado) determinando o comportamento dos pontos no interior do elemento a partir dos pontos definidos com a fronteira.

Para cada elemento é calculada uma matriz de rigidez elementar associada às coordenadas dos nós, a geometria e ao material que caracteriza o referido elemento. A conexão entre os elementos é feita igualando-se as deformações nas extremidades de elementos adjacentes, tendo-se dessa forma um ponto único com duas deformações e, a função gerada ao longo da malha será contínua surgindo daí uma matriz de rigidez global obtida a partir do acoplamento das matrizes de rigidez elementares.

É admitido até doze camadas de materiais diferentes. O comportamento desses materiais é elástico, isotrópico podendo ser linear ou não-linear, utiliza-se à técnica incremental de rigidez tangente. Neste procedimento, a carga total de tráfego, é dividida, e aplicada em incrementos iguais de carga. A cada incremento soma-se o acréscimo de tensão, fração da tensão total, às frações já existentes e às tensões iniciais, que podem ser gravitacionais ou pré-definidas e embutidas no programa. Ao final, tem-se a aplicação do valor total da carga de tráfego.

Além da vantagem de analisar um material de características variáveis (módulos resilientes) tanto axialmente quanto radialmente, o FEPAVE2 também permite variar o módulo dos materiais asfálticos em função do perfil de temperaturas ao longo da espessura da camada.

A modelagem da relação tensão-deformação para cada tipo de material, usual em pavimentos flexíveis, é possível através, das equações apresentadas no quadro a baixo, tais equações são escolhidas em função do tipo de comportamento definido nos ensaios triaxiais dinâmicos.

Tabela 2 - Modelos Existentes no FEPAVE

CLASSE	MODELO	COMPORTAMENTO
0	$MR = f(T \text{ } ^\circ\text{C})$	Visco-Elástico
1	$MR = k_1 \sigma_3^{k_2}$	Granular
2	$MR = k_2 k_3 (k_1 - \sigma_d)$, para $\sigma_d < k_1$ $MR = k_2 + k_4 (k_1 - \sigma_d)$, para $\sigma_d > k_1$	Coesivo Bi-linear
3	$MR = \text{Constante}$	Elástico Linear
4	$MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d) \sigma_3^{k_5}$, para $\sigma_d < k_1$ $MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d) \sigma_3^{k_5}$, para $\sigma_d > k_1$	Combinado
5	$MR = k_1 \theta^{k_2}$	Granular $f(\theta)$
6	$MR = k_1 \sigma_d^{k_2}$	Coesivo $f(\sigma_d)$
7	$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Composto $f(\sigma_3, \sigma_d)$

SILVA (1995) introduziu novos aperfeiçoamentos no programa, dotando-o do utilitário UTILFEP, que facilitou a utilização do FEPAVE2.

Utilitário UTILFEP

O utilitário desenvolvido foi criado para facilitar, de forma interativa com usuário do FEPAVE através de sub-rotinas que geram: o arquivo de entrada de dados, a saída dos resultados em termos de

tensão, deformação, etc. Além da visualização gráfica de alguns parâmetros considerados importantes na análise de pavimentos.

A interface do programa com a criação do utilitário UTILFEP, facilitou seu uso através de 8 sub-rotinas, que permitem:

- 1- **Ler Arquivos** - possibilita o usuário ler arquivos já existentes, o utilitário dá instruções de como o usuário deve proceder.
- 2- **Entrada de dados** - o usuário iniciará a ele mesmo inserir os dados da estrutura a ser analisada.
- 3- **Alterar ou Exibir dados** - possibilita o usuário alterar dados de arquivos já existentes, ou alterar dados errados inseridos, o utilitário dá instruções de como o usuário deve proceder.
- 4- **Execução** - opção de execução do programa, neste caso, para ser gerado o arquivo de saída dos dados o programa é executado em outro utilitário o COF2, este utilitário só gera o arquivo de saída se todos os dados de entrada foram inseridos corretamente.
- 5- **Impressão dos Resultados**
- 6- **Gráficos e Resumo dos Resultados**
- 7- **Valores de Poisson e Módulos Resilientes** - opção de consulta de dados nos fornece alguns valores do Coeficiente de Poisson fornecido pelo Instituto do Asfalto de alguns materiais, e mostra a que classe dos módulos³.
- 8- **Sair do programa**

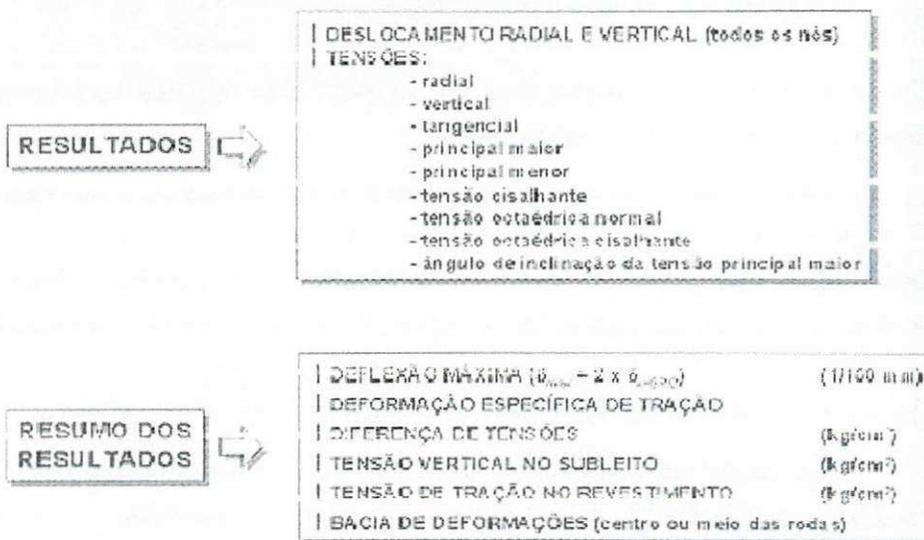
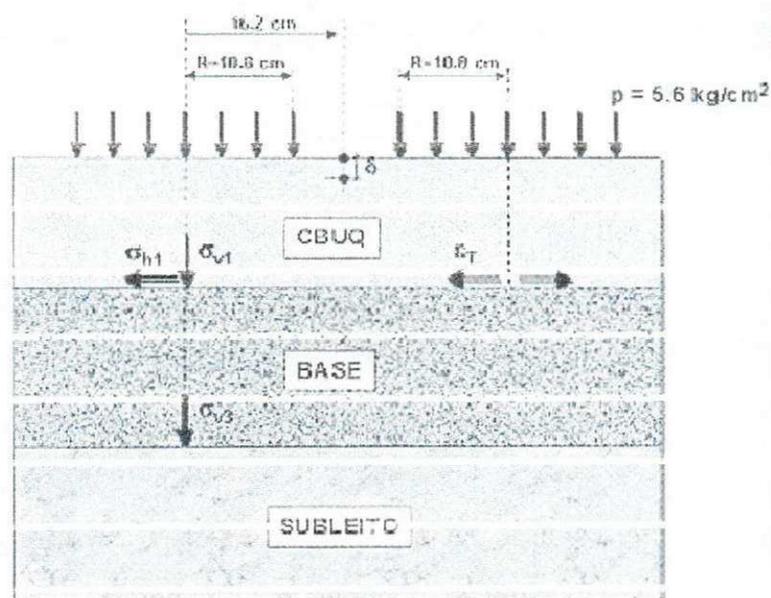


Figura 9 – Exemplo de saída do programa FEPAVE2

6.3. Fadiga de Misturas Asfálticas

A vida de fadiga de uma mistura betuminosa é definida em termos de vida de fratura (N_f) ou vida de serviço (N_s). A primeira (N_f) refere-se ao número total de aplicações de uma determinada carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda (N_s) ao número total de aplicações desta mesma carga que reduzam o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido.

Nos materiais betuminosos a fadiga ocorre pela repetição da aplicação das cargas oriundas de veículos sobre os pavimentos, gerando micro-fissuras na estrutura que resultam na perda de rigidez do material. Ao longo do tempo, as micro-fissuras vão se acumulando até a ruptura do material.

No país, um dos principais defeitos dos pavimentos flexíveis é o trincamento por fadiga do revestimento provocado pela repetição das cargas de tráfego. Por outro lado, a resiliência das camadas granulares é relativamente elevada para baixos níveis de tensões confinantes atuantes, contribuindo bastante para o aumento da deformabilidade elástica e, assim, acelerando o processo de degradação por fadiga dos revestimentos betuminosos ou de camadas cimentadas.

A fadiga das misturas betuminosas é considerada um importante fator para o bom dimensionamento de estruturas de pavimentos, portanto, seu comportamento deve ser bem conhecido e devidamente caracterizado.

Para a determinação da vida de fadiga pode ser utilizado o mesmo equipamento de determinação do módulo de resiliência.

Os ensaios do tipo destrutivos e, são geralmente realizados sob tensão e temperatura controlada. Utiliza-se uma frequência de 60 aplicações por minutos com 0,14 segundo de duração do carregamento repetido. Para manter a temperatura controlada utiliza-se de uma câmara com sistemas de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato.

$$N = K \left(\frac{1}{\sigma} \right)^n \quad N = K \left(\frac{1}{\varepsilon_o} \right)^n \quad N = K \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n$$

Para cada mistura ensaiada determinam-se as relações entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuantes:

Onde:

N = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

σ_t = tensão de tração repetida atuante;

ε_o = deformação resiliente inicial;

$\Delta\sigma$ = diferença algébrica entre as tensões horizontais (de tração) e verticais (de compressão) no centro da amostra;

K, n = constantes obtidas na regressão linear dos pares N e σ_t (ou $\Delta\sigma$) determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.

O conceito de fadiga pode, portanto, ser resumido nas seguintes definições:

- a) **Ensaio de Fadiga** – material submetido à solitação onde há evolução de modo irreversível para um estágio final de ruptura ou estabilização;
- b) **Susceptibilidade à Fadiga** – taxa de variação da resistência ao curso dos ciclos de carga;
- c) **Duração de Vida** – número de ciclos necessários para que uma solitação provoque a ruína;
- d) **Resistência à Fadiga** – é a solitação (tensão ou deformação) a que corresponde uma determinada duração de vida;
- e) **Limite de Fadiga** – solitação que conduz a uma duração de vida infinita.

Existe atualmente uma variedade de equipamentos de laboratórios para a determinação do comportamento de fadiga das misturas asfálticas. Os diversos equipamentos são capazes de atender às várias configurações de ensaios que podem ser:

- a) **Modo de condição do ensaio** – tensão controlada e deformação controlada;
- b) **Forma do corpo de prova** – cilíndrico, viga retangular ou trapezoidal, circular, circular com redução de seção;
- c) **Estado de tensão** – uniaxial, biaxial ou triaxial;
- d) **Forma de carregamento** – senoidal ou pulsante;
- e) **Frequência de carregamento** – 1 hz a 54 hz;
- f) **Apoio do corpo de prova** – rígido, molas, fluidos pressurizados.

Cada equipamento possui suas particularidades, ou seja, suas vantagens e limitações.

Revestimentos delgados onde o ligante betuminoso é de baixa viscosidade predominam a deformação controlada (pelas outras camadas), enquanto que os espessos, com asfaltos de elevada viscosidade (CAP duro), a predominância é a tensão controlada, dependendo certamente do seu suporte – camada subjacente. Em suma, os revestimentos delgados como fletem mais, aproveitam melhor o seu suporte, já os espessos fletem menos, tomando menos partido do suporte.

Os estudos teóricos mostraram que nos revestimentos delgados ($HR < 6$ cm), as deformações máximas na fibra inferior da camada não dependem significativamente da temperatura e do módulo elástico, sendo conveniente analisar a fadiga à deformação controlada.

Neste caso, a mistura betuminosa deve ser projetada com asfaltos de baixa viscosidade ou modificada por polímero, de pequena rigidez, de modo a gerar baixas tensões de tração e, conseqüentemente, maior vida de fadiga à deformação controlada (DC).

Para revestimentos espessos ($HR > 10$ cm), as deformações decrescem com o aumento do módulo elástico ou com a diminuição da temperatura, enquanto o estado de tensões permanece aproximadamente constante, e a condição crítica, está associada ao aumento da temperatura. Neste caso, o ensaio à tensão controlada é o indicado. A grande vantagem do ensaio de DC é permitir uma melhor observação da propagação de fissuras por fadiga.

No ensaio à tensão controlada, o critério de fadiga está associado à fratura da amostra. A tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do corpo-de-prova. Portanto, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à fratura completa da amostra.

No ensaio à deformação controlada, o critério de fadiga não está condicionado à ruptura completa do corpo-de-prova. Para que a deformação seja mantida constante ao longo do ensaio, é necessário que haja uma diminuição do carregamento aplicado.

Alguns autores definem a vida de fadiga à deformação controlada como o número de repetições da carga capaz de reduzir o desempenho ou rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido. Consideram esses autores que uma redução de módulo de rigidez ou de resiliência, da ordem de 50%, define o fim do ensaio, ou seja, da vida de fadiga. Outros admitem que, o fim do ensaio é quando a carga aplicada para manter a deformação é reduzida de 40% ou 50% da carga inicial.

O ensaio de fadiga à compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos (63 mm x 100 mm) é feito à tensão controlada, onde as cargas verticais devem induzir tensões de tração horizontais no centro da amostra entre 10% e 50% da resistência à tração estática.

A temperatura do ensaio adotada é de $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, fácil de manter no laboratório. Contudo, podem ser consideradas outras temperaturas, desde que os corpos-de-prova sejam mantidos durante os ensaios em câmara de temperatura controlada, dotadas de termômetro e termostato.

6.3.1. Modelos de Fadiga

Os pavimentos flexíveis são constituídos de camadas granulares, subjacentes a revestimentos betuminosos por penetração ou por misturas de agregados com ligantes betuminosos. Esses últimos sofrem o dano por fadiga devido à repetição do tráfego rodoviário. Daí, a consideração de modelos representativos de previsão do número de repetições da carga para atingir o trincamento por fadiga.

Os modelos básicos estão relacionados às tensões ou deformações de tração que ocorrem nos pontos críticos do pavimento concebido.

Pinto (1991) sugeriu uma lei de previsão de vida de fadiga baseado em uma análise de 82 pontos de ensaios de fadiga à tensão controlada de seis misturas asfálticas, a 25°C. Tornando-se a lei mais representativa da condição brasileira.

O modelo desenvolvido, que fornece o número de aplicações de carga necessário para a ruptura do corpo de prova.

$$N_{lab} = 9,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,65} \cdot \left(\frac{1}{MR}\right)^{-0,0633} \quad r^2 = 0,96$$

$$N_{campo} = 10^5 N_{lab}$$

Onde:

N_{lab} - número de repetições de carga para a ruptura por fadiga em laboratório;

ε_t - máxima deformação específica horizontal de tração na face inferior da camada betuminosa, cm/cm;

MR - módulo de resiliência do concreto betuminoso, em kgf/cm².

$$N_f = 2,03 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,63} \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^{1,45} \quad r^2 = 0,95$$

$$MR = 2,04 \cdot 10^5 e^{-0,051T}$$

$$\sigma_R = 72,34 e^{-0,075t}$$

Onde:

N_f - número de repetições de carga para a ruptura por fadiga;

T - temperatura, em °C;

σ_R - resistência à tração por compressão diametral, em kgf/cm².

$$N_l = 5,63 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,61} \quad r^2 = 0,98$$

$$N_{campo} = f_0 N_l$$

Onde:

N_{lab} - número de repetições de cargas necessárias à ruptura completa da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral à tensão controlada - Vida de Fadiga;

$\Delta\sigma$ - diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra;

f_o - fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a: $f_o = 10^4$;

N_{campo} - número terminal de solicitações do eixo padrão rodoviário, para uma área afetada por trincas de fadiga da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento.

$$N_l = 1,21 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{2,66} \cdot r^2 = 0,96$$

$$N_{campo} = f_o N_l$$

Onde:

N_l - vida de fadiga da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral;

ε_t - deformação específica resiliente inicial, cm/cm;

f_o - fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a: $f_o = 10^5$

N_{campo} - número "N" de campo para as mesmas condições anteriores consideradas.

Outras Leis de Fadigas:

» Modelo da "Shell Oil"

$$N_f = 6,85 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{5,671} \cdot \left(\frac{1}{E} \right)^{2,363}$$

Onde:

N_f - número de repetições de carga para a ruptura por fadiga;

E - módulo complexo da camada betuminosa, em psi;

ε_t - deformação de tração na fibra inferior do revestimento, cm/cm.

A diferença entre o módulo complexo ou dinâmico e o módulo resiliente é que o módulo complexo é determinado no ensaio triaxial onde a tensão desvio é aplicada em pulsos senoidiais. E o módulo resiliente ou de rigidez é determinado à compressão diametral, onde o carregamento é aplicado em pulsos retangulares para um tempo de aplicação da carga de cerca de 0,10 segundos para 0,90 segundo de repouso, ou seja, para uma frequência de 1 ciclo por segundo ou 1 hertz.

» **Modelo do "Asphalt Institute" – MS-1**

$$N_f = 18,4 \left[4,325 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot E^{-0,854} \right]$$

Onde:

N_f - número equivalente de solicitações da carga do eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada de concreto asfáltico;

ε_t - máxima deformação específica horizontal de tração na face inferior da camada de concreto asfáltico, cm/cm;

E - módulo dinâmico do concreto asfáltico, em psi;

$f_o = 18,4$ - fator laboratório-campo.

Com a finalidade de tomar o modelo mais amplo no que concerne ao efeito dos vazios da mistura betuminosa e do teor volumétrico de betume, foi introduzido o fator de ajustamento da mistura (C)

$$C = 10^m$$

$$m = 4,84 \left[\frac{V_b}{V_v + V_b} - 0,69 \right]$$

Onde:

V_b - volume de betume expresso como percentagem do volume total da mistura betuminosa;

V_v - volume de vazios ocupado pelo ar, expresso como percentagem do volume total da mistura betuminosa.

Para os concretos asfáltico bem projetados, $V_b = 11,0\%$ e $V_v = 4,0\%$, $m=0,21$ e $C=1,622$.

Tem-se:

$$N_f = 18,4C \left[4,325 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot E^{-0,854} \right]$$

$$N_f = 30 \left[4,325 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot E^{-0,854} \right]$$

» **Modelo de “Berkeley”, Califórnia.**

$$N_f = 2,738 \times 10^5 \cdot e^{0,077B} \cdot \epsilon_t^{-3,624} \cdot E_1^{-2,72}$$

Onde:

B – Teor de asfalto da mistura, em %;

ϵ_t - deformação específica de tração na face inferior da camada betuminosa, cm/cm;

E_1 – $E \cdot \sin \varphi$ - módulo de perda, em psi;

φ - ângulo de fase, em graus;

$$\varphi = 22,34 - 1,979 \log E + 28,71 (\log E)^2 + 17,23 (\log E)^3$$

6.3.2. Deformação Elástica e Permanente

A deformação permanente se caracteriza fundamentalmente pelos afundamentos que ocorrem ao longo da trilha de roda do revestimento.

A previsão da deformação permanente de forma indireta pode ser considerada através de tensões verticais e deformações causadas pelas cargas aplicadas nos pavimentos.

A limitação da tensão vertical no topo do subleito é um critério bastante utilizado devido ser a camada de menor resistência ao cisalhamento e, portanto, com aptidão para plastificação. *Heukelom e klomp* indicam para pavimentos dimensionados pelo método do CBR, o modelo abaixo:

$$(\sigma_v)_{adm} = \frac{0,006 M_R}{1 + 0,70 \log N}$$

$$(\epsilon_v)_{adm} = \frac{(\sigma_v)_{adm}}{M_{Ri}}$$

Tem-se ainda:

$$M_R = 100 \text{ CBR}$$

$$(\sigma_v)_{adm} = 3,87 \times 10^{-2} \text{ CBR}^{1,5}$$

Onde:

$(\sigma_v)_{adm}$ - tensão vertical admissível no topo do subleito, kgf/cm²;

MR - módulo da resiliência do subleito, kgf/cm²;

N - número de aplicações de carga.

7. PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO

O primordial objetivo do dimensionamento de um pavimento é o de calcular e/ou verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil do mesmo corresponda a um número projetado de solicitações de carga.

Visando sempre este objetivo, diversos métodos foram desenvolvidos para o dimensionamento de pavimentos tendo como diferenças, básicas, as maneiras de abordar o problema.

Antigamente, quando não se faziam uso dos métodos de dimensionamento, era via de regra empregar a mesma espessura de pavimento sobre qualquer solo de fundação. Através de observações dos pavimentos executados, percebeu-se que alguns trechos apresentavam rupturas precocemente. A partir daí, conclui-se que era necessária a utilização de métodos para o dimensionamento, de tal forma que o mesmo fornecesse uma espessura de pavimento compatível com o comportamento do solo de fundação e o tráfego, e ao mesmo tempo, fosse econômico.

A tarefa do dimensionamento deve-se à grande quantidade de variáveis de naturezas diversas. A consideração simultânea de tensões devidas ao tráfego, como fadiga e deformação permanente, as variáveis climáticas, como temperatura e umidade, a resistência do solo de fundação e dos materiais de construção disponíveis, a magnitude e a repetição das cargas de tráfego, a durabilidade do revestimento, são apenas alguns exemplos do alto grau de dificuldade existente na execução de um dimensionamento.

» Tipos de Dimensionamento

Os métodos de dimensionamento progrediram através de várias etapas, e podem ser classificadas genericamente em:

a. Métodos Empíricos

Os métodos empíricos são os que se utiliza de correlações entre um parâmetro mensurável, como por exemplo, à deflexão ou a capacidade de suporte do subleito, e a espessura, de modo a permitir que o desempenho do pavimento tenha sucesso ao suportar o volume de tráfego previsto;

b. Métodos Teóricos – Mecanísticos

Os métodos teóricos tiveram nos últimos anos um desenvolvimento considerável. Correlacionam valores teóricos calculados de tensões e de deformações em alguns pontos da estrutura, com a vida útil prevista ou com o número de repetições do eixo padrão te o final da vida útil do pavimento.

c. Métodos Mecanísticos – Empíricos

São baseados em modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico, através de observação de trechos experimentais concebidos.

Projetar um pavimento compreende:

- No dimensionamento, ou seja, na determinação da espessura total e das espessuras das diferentes camadas constituintes (revestimento, base, sub-base, reforço do subleito). Consideram-se os seguintes fatores: cargas dos veículos e sua frequência de ocorrência prevista ao longo da vida de projeto, características geotécnicas do subleito, características dos materiais disponíveis e condições ambientais ou regionais. Gráficamente, o dimensionamento é apresentado sob a forma de uma seção transversal do pavimento das pistas de rolamento e do acostamento;
- Na escolha dos materiais que irão constituir as camadas constituintes;
- Na indicação dos requisitos essenciais da drenagem subterrânea e subsuperficial, de acordo com as condições geotécnicas, hidrológicas e de estrutura do pavimento;
- No estudo econômico das várias soluções, satisfatórias do ponto-de-vista estrutural, considerando-se os materiais disponíveis, seu transporte e utilização, a natureza do tráfego, as disponibilidades financeiras e a experiência local;
- Um das peculiaridades do pavimento, comparativamente a outras estruturas, tais como barragens e edifícios, é o fato de que a sua extensão costuma ser de vários quilômetros, com espessura em torno de apenas meio metro e largura em geral de sete metros ou menos;
- A pavimentação de uma estrada de rodagem exige vultosos investimentos, os quais atingem, frequentemente, a metade do custo de construção da rodovia. O conhecimento dos solos e dos materiais naturais disponíveis repercute consideravelmente no projeto e no custo da construção;
- As Investigações Geotécnicas, em seus itens: Estudos de Cortes, Estudo de Subleito de Trechos Implantados, Ocorrência de Solos e Materiais Granulares, estudo de Pedreiras e Ocorrências de Rochas, descreve os diversos tipos de trabalhos de campo que interessam diretamente ao projeto de pavimentos;
- O terreno de fundação do pavimento, ou subleito, pode variar muito quanto à natureza geológica, pois que, à variação vertical nas seções soma-se à variação horizontal decorrente das diferentes características geológicas e pedológicas do terreno ao longo da estrada;
- Os dados geotécnicos (referentes aos solos e aos materiais naturais) devem ser interpretados tendo-se em conta a natureza peculiar das solicitações que recebem os pavimentos. Sofre o

pavimento a ação dos fatores climáticos de modo acentuado. Há a natural intemperização de suas camadas superficiais;

- Tensões térmicas importantes se manifestam nos revestimentos e são levadas em conta no projeto das placas de concreto. As variações de temperatura dos pavimentos betuminosos fazem variar a rigidez destes, e o desempenho estrutural do pavimento como um todo;
- A natureza das cargas, que são móveis e repetitivas, leva à consideração de fenômeno de fadiga dos materiais. É este um aspecto importante deste tipo de estrutura, e que leva em conta no dimensionamento;
- O desenvolvimento do método de dimensionamento de pavimento flexível adotado pelo DNER fez-se a partir das curvas de dimensionamento baseadas no valor do Índice de Suporte Califórnia ou CBR (*California Bearing Ratio*) e obtidas experimentalmente pelo "Corps of Engineers" do Exército dos Estados Unidos, desde a época da II Guerra Mundial. A consideração das condições reais de tráfego – diversas cargas de roda e frequências de solicitações - só 1962 tornou-se possível, graças à divulgação de estudos do "Corps of Engineers". As curvas de dimensionamento, originais, foram modificadas a fim de permitirem calcular espessuras granulares equivalentes, tal como se faz no método do "Departamento Rodoviário da Califórnia". Finalmente, coeficientes de equivalência estrutural de diferentes tipos de materiais foram adotados coerentemente com os resultados da pista experimental da AASHTO. Até recentemente o DNER adotava, para o dimensionamento, um índice de suporte determinado a partir do CBR e do índice de grupo do solo do subleito;
- Em situações especiais de pavimentos dotados de bases cimentadas ou toda vez que a rigidez de uma camada sujeita a fadiga tiver que ser levada em conta, fugindo do alcance do método CBR poder-se-á estudar o pavimento como um sistema em camadas. A teoria da elasticidade e o método dos elementos finitos, com auxílio dos computadores, permitem o cálculo de tensões e deformações, desde que se conheçam os módulos de elasticidade dos materiais de pavimentação.

7.1. Métodos de dimensionamentos para pavimentos flexíveis

7.1.1. Método do DNIT

O método tem como base o trabalho "*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*", de autoria de W. J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U. e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO.

A capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes do pavimento é definida pelo CBR, adotando-se, o método de ensaio preconizado pelo DNIT, em corpos-de-prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço no campo e submetidos a embebição durante quatro dias.

O subleito e as diferentes camadas do pavimento devem ser compactados de acordo com os valores fixados nas "Especificações Gerais", recomendando-se que, em nenhum caso, o grau de compactação deve ser inferior a 100 %.

Para garantir que o pavimento não sofra ruptura precocemente, o método exige que os materiais utilizados na sua construção possuam certas características, descritas a seguir:

- a) Materiais de subleito
 - » $CBR > 2\%$
 - » $Expansão \leq 2\%$
- b) Materiais para reforço do subleito, os que apresentam:
 - » CBR maior que o do subleito
 - » $Expansão < 1\%$
- c) Materiais para sub-base, os que apresentam:
 - » $CBR \geq 20\%$
 - » $IG = 0$ (Índice de Grupo)
 - » $Expansão < 1\%$
- d) Materiais para base, os que apresentam:
 - » $CBR \geq 80\%$
 - » $Expansão < 0,5\%$
 - » $Limite\ de\ liquidez \leq 25\%$
 - » $Índice\ de\ plasticidade \leq 6\%$

Tais materiais ainda devem ser enquadrados numa das seguintes faixas granulométricas:

Tabela 3 - Faixas granulométricas para material de base

Peneiras	Porcentagem que Passa			
	A	B	C	D
2"	100	100	-	-
1"	-	75-90	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100
n° 4	25-55	30-60	35-65	50-85
n° 10	15-40	20-45	25-50	40-70
n° 40	8-20	15-30	15-30	25-45
n° 200	2-8	5-15	5-15	5-20

Obs.: A fração que passa na peneira n° 200 deve, ser inferior a 2/3 da fração que passa na peneira 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste *Los Angeles* igual ou inferior a 50%. Pode ser aceito um valor de desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material.

DETERMINAÇÃO DO TRÁFEGO

O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações do eixo padrão de 8,2tf, durante o período de projeto escolhido. O cálculo do número N é feito empregando-se a seguinte equação:

$$N = 365 \times P \times V_m \times FV \times FR$$

Onde:

N = número de operações do eixo padrão de 8,2tf;

P = período de projeto em anos;

V_m = volume médio diário de tráfego durante a vida de projeto;

FV = Fator de veículo da frota;

FR = Fator climático regional (Adota-se FR = 1,0).

DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

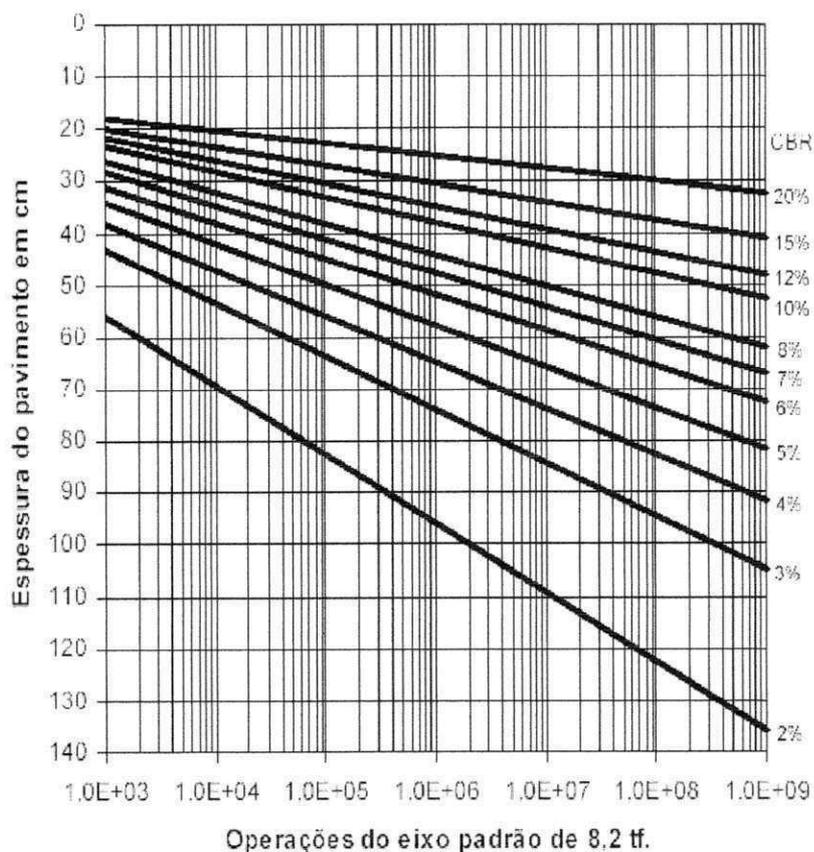
a. Espessura total do pavimento

Definido o tráfego que solicitará a via durante o período de projeto (número N) e o índice de suporte (CBR) do subleito, a espessura total (Hm) do pavimento, em termos de material granular, é

determinada utilizando-se o ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no método do DNIT, ou pela equação:

$$H_t = 77,67.N^{0,0482}.CBR^{-0,598}$$

Ábaco 1 – De dimensionamento de pavimentos flexíveis



b. Tipo e espessura da camada de revestimento

A espessura do revestimento (R) é estabelecida em função do tráfego (número N).

Tabela 4 - Espessura mínima do revestimento

N	Espessura mínima do revestimento
$N \leq 10^6$	Tratamento Superficial betuminoso
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimento betuminoso com 5 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

c. Espessura das demais camadas

Após determinar a espessura total do pavimento (H_m), em termos de material granular, e fixada a do revestimento (R), procede-se ao cálculo das espessuras das demais camadas considerando-se os materiais disponíveis para cada uma delas e seus respectivos coeficientes de equivalência estrutural. Este coeficiente indica a capacidade de distribuição de tensões que um determinado material possui em relação ao material padrão (pedra britada).

Tabela 5-Coefficientes de equivalência estrutural

Componentes do Pavimento	Coefficiente estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,0
Base ou revestimento de pré-misturado a quente, de graduação densa.	1,7
Base ou revestimento de pré-misturado a frio, de graduação densa.	1,4
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo-cimento com resistência à compressão, 7 dias superior a 45 kg/cm ²	1,7
Solo-cimento com resistência à compressão, 7 dias entre 45 kg/cm ² e 28 kg/cm ²	1,4
Solo-cimento com resistência à compressão, 7 dias entre 28 kg/cm ² e 21 kg/cm ²	1,2
Base de solo-cal	1,2

As espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e do reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$RxK_R + BxK_B \geq H_{20}$$

$$RxK_R + BxK_B + h_{20}xK_S \geq H_n$$

$$RxK_R + BxK_B + h_{20}xK_S + h_nxK_{REF} \geq H_m$$

Onde:

K_R = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

R = espessura do revestimento;

K_B = coeficiente de equivalência estrutural da base;

B = espessura da base;

H_{20} = espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

K_S = coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h_{20} = espessura da sub-base;

H_n = espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

K_{ref} = coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito;

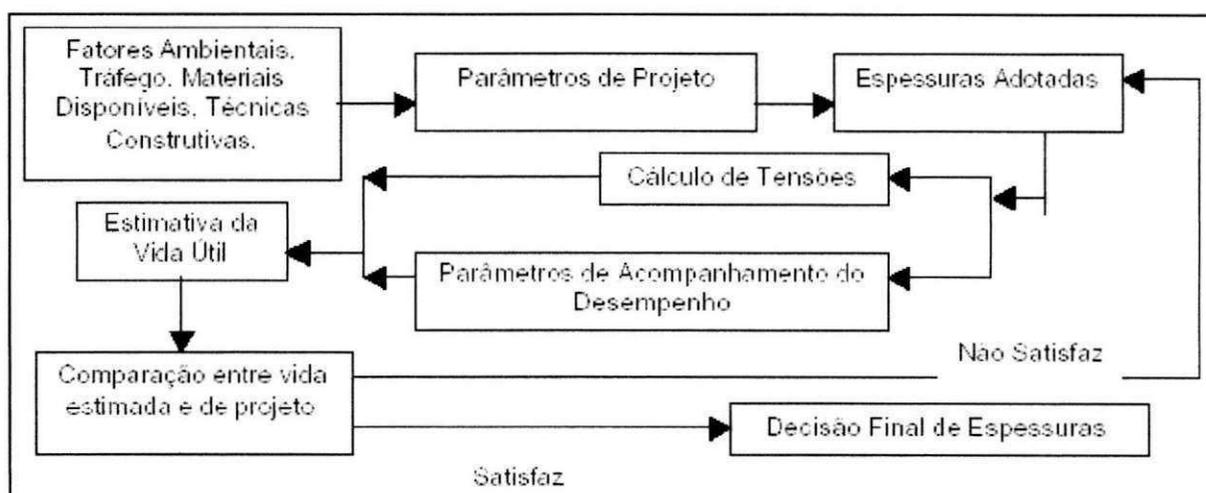
h_n = espessura do reforço do subleito;

H_m = espessura total de pavimento necessária para proteger um material com CBR igual a $m\%$.

7.1.2. Método Mecanístico

Fundamenta-se em definir por meio de ensaios de laboratório, equações constitutivas para os materiais, de modo que sejam utilizadas em modelos de comportamento mecânico do pavimento sob a ação das cargas.

O esquema que engloba estes condicionantes foi elaborado por Motta (1991), a seguir apresentado:



Esquema 1 – Fluxograma do dimensionamento mecânico

Para cada etapa de cálculo das tensões e deformações geradas na estrutura pela carga de tráfego, representada em geral pelo eixo padrão, as metodologias atualmente em uso para o dimensionamento do pavimento consideram os materiais segundo dois comportamentos tensão-deformação distintos:

- » **Comportamento Elástico Linear** – admite ser o módulo resiliente de um determinado material constante ao longo de toda espessura da camada que este constitui, ou seja, o valor de MR não varia com o estado de tensões vigente.
- » **Comportamento elástico Não Linear** – considera ser o valor do módulo Resiliente dos materiais dependente do estado de tensões vigentes.

Com base nestes modelos de comportamentos foram desenvolvidos diversos programas computacionais, que permitem a aplicação rotineira das teorias de Boussinesq, Burmister entre outros, que constituem a base matemática para cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em estruturas de múltiplas camadas. Os programas mais utilizados no Brasil são o ELSYM5 e o FEPAVE2.

O dimensionamento de pavimentos flexíveis consiste em:

- ✓ Ensaiar os materiais disponíveis na região, e o subleito para se obter os modelos de comportamento tensão-deformação, tanto elástico quanto plástico;
- ✓ Definir um valor de módulo resiliente para a mistura betuminosa a ser utilizada no revestimento, em função da temperatura média esperada para o revestimento;
- ✓ Adotar uma estrutura inicial, definindo que variabilidade será admitida para as espessuras das camadas;
- ✓ Calcular o estado de tensão-deformação atuante na estrutura composta com cada material disponível (caso exista mais de uma jazida ou opção de material).
- ✓ Comparar as tensões-deformações com critérios de rupturas estabelecidos. Definir o grau de confiabilidade a ser adotado em função da importância da obra;
- ✓ Se as espessuras adotadas conduzirem a valores não superiores aos admissíveis segundo os critérios de fadiga e deformação permanente, dar por concluído o dimensionamento. Caso algum dos critérios não seja satisfeito, alterar as espessuras e refazer os cálculos;
- ✓ Depois de dimensionada a estrutura do pavimento pode-se verificar o afundamento de trilha de roda provável, para o número N de projeto, desde que se conheçam as leis de variação da deformação permanente com a repetição das cargas. O valor máximo recomendado é de 16 mm.
- ✓ Os fatores ambientais (umidade de equilíbrio e temperatura de serviço) deverão ser levados em conta na execução dos ensaios de laboratório.

8. PROLONGAMENTO DA AVENIDA FLORIANO PEIXOTO - ESTUDO DE CASO

8.1. Características do trecho

O trecho em estudo trata-se do prolongamento da Avenida Floriano Peixoto, compreendido entre a Rua Plínio Floriano Lemos, no conjunto Deputado Álvaro Gaudêncio (Malvinas), a Rodovia BR 230 (Alça Sudoeste), na cidade de Campina Grande-PB.

O projeto de pavimentação do trecho foi elaborado de acordo com as recomendações do DNER. Levando-se em consideração fatores como: tipo de tráfego, drenagem, facilidades de execução, solos locais. O valor definido para o número de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas foi de $6,0 \times 10^4$, adotando-se para o revestimento superficial um concreto asfáltico com 5,0cm de espessura.

Foram realizados os estudos geotécnicos nas camadas granulares, com a finalidade de caracterizar os materiais, apesar de não ter sido fornecido os resultados dos trabalhos desenvolvidos de campo e laboratório.

As jazidas de solos para execução das camadas de base e sub-base, bem como de subleito, foram prospectadas para obtenção do perfil de solos a escavar e a área necessária para o volume requerido e caracterização dos materiais.

As amostras de solos foram coletadas, classificadas visualmente e separadas por horizontes, e encaminhadas ao laboratório para preparação e execução de ensaios.

Os ensaios empregados para caracterização física e mecânica foram os seguintes:

- Granulometria por peneiramento;
- Limites de liquidez e plasticidade;
- Compactação;
- C.B.R.

8.2. Especificação do projeto executado

Segundo as especificações os materiais que foram empregados em sub-base deveriam apresentar um Índice de Suporte Califórnia igual ou superior a 20% e expansão máxima de 1%, determinados segundo o método DNER-ME 49-64 com energia de compactação correspondente ao método DNER-ME 48-64. O Índice de Grupo deveria ser igual a zero. O agregado retido na peneira no 10 deveria ser constituído de partículas duras e duráveis, isentas de fragmentos moles, alongamentos ou achatados, isento de material vegetal ou outra substância prejudicial.

Os materiais empregados nas camadas de base apresentaram CBR > 62% e expansão máxima de 0,5% determinados segundo o método do DNER-ME 50-64 com energia de Proctor Modificado.

Infelizmente não foi fornecido nenhum resultado.

Ainda de acordo com as especificações do projeto foram realizados os seguintes ensaios:

- Determinações de massa específica aparente "*in situ*", com espaçamento máximo de 100 m de pista, nos pontos onde foram coletadas as amostras para os ensaios de compactação;
- Uma determinação do teor de umidade, cada 100 m, imediatamente antes da compactação;
- Ensaios de caracterização (limite de liquidez, limite de plasticidade e granulometria, respectivamente, segundo os métodos DNER-ME 44-64, DNER-ME 82-63 E DNER-ME 80-64), com espaçamento máximo de 150 m de pista e, no mínimo, dois grupos de ensaios por dia;
- Um ensaio do Índice de Suporte Califórnia, com energia de compactação do método DNER-ME 48-64, com espaçamento máximo de 300 m de pista e, no mínimo, um ensaio a cada dois dias;
- Um ensaio de compactação segundo o método DNER-ME 48/64, para determinação da massa específica aparente seca máxima, com espaçamento máximo de 100 m de pista, com amostras coletadas em pontos obedecendo sempre a ordem: bordo direito, eixo, bordo esquerdo, eixo, bordo direito, etc., a 60 cm de bordo.

8.3. Metodologia

Apesar de todos os obstáculos enfrentados, foram coletados materiais de campo da via expressa em fase final de construção, com pavimentos asfálticos dimensionados pelo método empírico do DNER. Ensaios, realizados em laboratório, foram empregados para caracterização física e mecânica dos materiais das camadas de base e sub-base, bem como de subleito, além dos ensaios para a determinação do módulo de resiliência nas amostras, da camada betuminosa do pavimento, obtidas através da Extratora Rotativa da estrutura avaliada.

Caracterização dos materiais

8.1.1. Materiais Granulares

Os ensaios realizados foram de acordos com as seguintes normas técnicas:

- **Granulometria por peneiramento e Compactação**

NBR 6457 ME - Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e de caracterização.
NB 51 Ago./86

NBR 7181 ME - Solo – análise granulométrica. MB 32 Dez/84

NBR 7182 ME - Solo – ensaio de compactação. MB 33 05/12/90

- **Limites de liquidez e plasticidade**

NBR 6459 ME - Solo – determinação do limite de liquidez. MB 29 Out./84

NBR 7180 ME - Solo – determinação do limite de plasticidade. MB 31 Out./84

- **CBR**

NBR 9895 ME - Solo – Índice de Suporte Califórnia. MB 2545 Jun./87

- **Absorção do material graúdo**

NBR 6458 ME - Grãos de pedregulho retidos nas peneiras de 4.8mm - determinação da massa específica aparente e da absorção de água. MB 27 Out./84.

8.1.2. Ensaios mecânicos

Os ensaios realizados foram de acordos com as seguintes normas técnicas:

DNER-ME131-94 - Solo Módulo Resiliente

DNER-ME138-94 - Tração Diametral

8.1.3. Coletas de amostras e Ensaios de Laboratório do trecho

Para análise mais detalhada do trecho, foram coletadas amostras das camadas de pavimento. Os materiais das camadas granulares foram coletados diretamente da jazida para análise e caracterização através de ensaios convencionais como granulometria, compactação, Índice Suporte Califórnia (CBR) e Absorção.

Amostras da camada de CBUQ foram extraídas da estrutura do pavimento, utilizando a Extratora Rotativa, em pontos de coleta mostrados a seguir, as quais foram submetidas a ensaios para a análise mecânica.

Tabela 6 - Amostras coletadas de CBUQ do revestimento.

Ponto de Coleta	Lado da Pista	Amostra
1 (ponto inicial)	Esquerdo	FP 1A
		FP 1B
		FP 1C
		FP 1D
2 (à 30m do ponto 1)	Esquerdo	FP 2A
		FP 2B
		FP 2C
		FP 2D
3 (à 100m do ponto 1)	Direito	FP 3A
		FP 3B
		FP 3C
		FP 3D
4 (à 111m do ponto 1)	Eixo	FP 4A
		FP 4B
		FP 4C
		FP 4D

Nota: FP - Floriano Peixoto

8.4. Apresentação e Discussão dos resultados

O solo do subleito é, em sua maioria, constituído de material de granulometria média e fina (areia) com uma percentagem de silte e argila cujo CBR é 8%. O solo da base e sub-base é constituído de material estabilizado granulometricamente, sendo predominante à presença de pedregulho. A base apresenta CBR de 62% e a sub-base de 49%.

Além dos ensaios tradicionais de caracterização nos materiais granulares, foram realizados ensaios triaxiais de carga repetida em corpos-de-prova com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, de acordo com o procedimento adotado pela COPPE (1988) para os solos e britas. As amostras do revestimento retiradas da pista foram submetidas a ensaios de compressão diametral para determinação da resistência à tração estática e módulo de resiliência à temperatura de 25°, e de estabilidade Marshall e fluência.

Para representação dos resultados, dos ensaios dinâmicos dos solos, foi utilizado o modelo composto proposto por Macêdo (1996), por ser do ponto de vista estatístico, mais representativo do que

os modelos tradicionais. No modelo composto, a deformação específica resiliente é obtida através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_r = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$$

Onde:

ε_r – deformação específica resiliente;

σ_3 – pressão confinante;

σ_d – tensão desvio;

k_i – parâmetros obtidos experimentalmente.

Sabe-se que o módulo resiliente é, por definição, dado por:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Onde:

MR – módulo resiliente.

Com os valores das deformações, foram encontrados, por regressão não-linear os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 . Assim, fazendo as devidas substituições, têm-se: $MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3}$ que compõe o modelo chamado *Modelo Composto*. Na Tabela 7, estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto.

Para o revestimento, o módulo resiliente obtido por compressão diametral é:

$$MR = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_a}$$

Sendo:

σ_t – tensão de tração no centro do corpo de prova, decorrente do carregamento repetido;

ε_a – deformação específica resiliente.

Tabela 7 - Resultados coeficientes baseado no modelo composto.

Amostra	k_1	k_2	k_3	R^2	$K_1 = 1/k_1$	$K_2 = -k_2$	$K_3 = 1-k_3$
Base	0,00017701	-0,32	1,54	0,926	5649,40	0,32	-0,54
Sub-base	0,00019251	-0,46	1,46	0,963	5194,54	0,46	-0,46
Subleito	0,0002463	-0,41	1,47	0,929	4060,09	0,41	-0,47

A Tabela 8 apresenta de forma resumida os resultados dos ensaios de compressão diametral para mistura asfáltica empregada no revestimento do trecho analisado.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de compressão diametral do revestimento de CBUQ.

Amostras	Corpos de Prova	σ_T (MPa)	Densidade Aparente	Módulo Resiliente (Kgf/cm ²)	Módulo Resiliente Médio (Kgf/cm ²)
FP 1A	2984	0,51	*	*	20561
FP 1B	3879	0,66	*	*	
FP 1C	4271	0,56	2,30	*	
FP 1D	4663	0,64	2,33	*	
FP 2A	*	*	3,45	*	
FP 2B	6322	0,67	2,25	18057	
FP 2C	*	*	2,24	*	
FP 2D	6434	0,67	2,30	20830	
FP 3A	4718	0,79	1,94	22433	
FP 3B	5185	0,74	2,36	*	
FP 3C	5968	0,83	2,34	19317	
FP 3D	4998	0,72	2,35	*	
FP 4A	*	*	2,39	*	
FP 4B	4476	0,77	2,37	*	
FP 4C	*	*	*	*	
FP 4D	6322	0,87	2,38	22170	

*Não determinado

A Tabela 9 apresenta os resultados médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas analisadas. Os valores encontrados neste estudo podem ser considerados adequados para as misturas estudadas, parecendo não sofrer influência do tipo de mistura nesta propriedade mecânica, pelo menos quando analisada isoladamente.

Tabela 9 - Resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas estudadas.

Amostras	Resistência à tração a 25°C (Kgf/cm ²)
FP 2B	6,71
FP 2D	6,74
FP 3A	7,90
FP 3C	8,33
FP 4D	8,76
RT média	7,70

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados dos módulos de resiliência (MR) e o valor da flexibilidade do material betuminoso, que é dado pela relação entre módulo de resiliência e resistência a tração estática das misturas.

Tabela 10 - Resultados do módulo de resiliência (MR) e Flexibilidade das misturas asfálticas.

Amostras	Módulo de Resiliência Médio (Kgf/cm ²)	Resistência à tração a 25°C (Kgf/cm ²)	Flexibilidade (MR/RT)
FP 2B	18057	6,71	2691
FP 2D	20830	6,74	3091
FP 3A	22433	7,90	2840
FP 3C	19317	8,33	2319
FP 4D	22170	8,76	2531
RT média	20561	7,70	2694

Obtido as constantes do modelo composto, foram calculados os módulos resilientes das camadas granulares utilizando-se do programa FEPAVE2.

Tabela 11 - Módulos médios obtidos no programa FEPAVE2

Camada	Módulo Resiliente médio (Kgf/cm ²)
Base	2475
Sub-base	1261
Subleito	1316

Com o objetivo de se fazer uma análise linear utilizou-se o programa ELSYM para obter os dados nos pontos $x = 0$ (centro da roda do eixo padrão), $x = 10.8$ (raio da área de atuação) e $x = 15.0$ (centro do eixo padrão).

A partir desta análise, foi feita a previsão da vida de fadiga dos trechos estudados. O modelo analítico-empírico empregado para avaliação é o desenvolvido por Pinto (1991).

$$N_{lab} = 9,07 \times 10^{-9} \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{2,65} \left(\frac{1}{MR} \right)^{-0,0633} ; n = 82 \text{ pontos, } r^2 = 0,92.$$

Onde:

ε_t - deformação específica sob o revestimento;

MR - módulo de resiliência da mistura betuminosa (kgf/cm²).

Este modelo fornece o número de aplicações do carregamento necessário para provocar a ruptura completa de um concreto asfáltico em laboratório. Para estimativa do número de operações do eixo padrão necessário para que o revestimento atinja um trincamento de 20%, Pinto (1991) deduz que um fator laboratório-campo igual à, $f_0 = 10^4$, para o caso de ensaio de compressão diametral a 25°C. Portanto, o modelo empregado para a análise é representado pela seguinte equação:

$$N_{campo} = 9,07 \times 10^{-5} \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{2,65} \left(\frac{1}{MR} \right)^{-0,0633}$$

Para aferição da validade do modelo empregado, estão apresentados na Tabela 12, 13 e 14 os valores de N esperados durante o período de projeto do tráfego, bem como os valores das deflexões obtidas.

Tabela 12 - Dados Obtidos a partir do ELSYM e do modelo de Pinto no ponto x = 0.

Espessura do Revestimento (cm)	Deformação Específica (ε_t)	Deflexão (0,01mm)	N
2	$7,0 \times 10^{-5}$	64	$1,74 \times 10^7$
4	$2,6 \times 10^{-4}$	57	$5,38 \times 10^5$
5	$2,7 \times 10^{-4}$	54	$4,87 \times 10^5$
6	$2,6 \times 10^{-4}$	51	$5,38 \times 10^5$
8	$2,3 \times 10^{-4}$	46	$7,45 \times 10^5$
10	$2,0 \times 10^{-4}$	42	$1,08 \times 10^6$
12	$1,7 \times 10^{-4}$	39	$1,66 \times 10^6$
14	$1,5 \times 10^{-4}$	36	$2,31 \times 10^6$
16	$1,3 \times 10^{-4}$	34	$3,38 \times 10^6$
18	$1,2 \times 10^{-4}$	32	$4,18 \times 10^6$
20	$1,0 \times 10^{-4}$	30	$6,77 \times 10^6$

Tabela 13 - Dados Obtidos a partir do ELSYM e do modelo de Pinto no ponto x = 10.8

Espessura do Revestimento (cm)	Deformação Específica (ε_t)	Deflexão (0,01mm)	N
2	$-2,0 \times 10^{-4}$	55	$1,08 \times 10^6$
4	$-1,9 \times 10^{-4}$	53	$1,24 \times 10^6$
5	$-1,5 \times 10^{-4}$	51	$2,31 \times 10^6$
6	$-1,1 \times 10^{-4}$	49	$5,26 \times 10^6$
8	$-3,6 \times 10^{-5}$	46	$1,01 \times 10^8$
10	$1,1 \times 10^{-5}$	42	$2,35 \times 10^9$
12	$4,1 \times 10^{-5}$	39	$7,19 \times 10^7$
14	$5,8 \times 10^{-5}$	36	$2,87 \times 10^7$
16	$6,8 \times 10^{-5}$	34	$1,88 \times 10^7$
18	$7,3 \times 10^{-5}$	32	$1,56 \times 10^7$
20	$7,5 \times 10^{-5}$	30	$1,45 \times 10^7$

Tabela 14 - Dados Obtidos a partir do ELSYM e do modelo de Pinto no ponto $x = 15.0$

Espessura do Revestimento (cm)	Deformação Específica (ϵ_t)	Deflexão (0,01mm)	N
2	$-4,7 \times 10^{-4}$	51	$1,12 \times 10^5$
4	$-4,1 \times 10^{-4}$	51	$1,61 \times 10^5$
5	$-3,3 \times 10^{-4}$	49	$2,86 \times 10^5$
6	$-2,5 \times 10^{-4}$	48	$5,97 \times 10^5$
8	$-1,2 \times 10^{-4}$	45	$4,18 \times 10^6$
10	$-4,4 \times 10^{-5}$	41	$5,96 \times 10^7$
12	$4,9 \times 10^{-6}$	38	$2,00 \times 10^{10}$
14	$3,5 \times 10^{-5}$	36	$1,09 \times 10^8$
16	$5,2 \times 10^{-5}$	33	$3,83 \times 10^7$
18	$6,3 \times 10^{-5}$	31	$2,30 \times 10^7$
20	$6,8 \times 10^{-5}$	29	$1,88 \times 10^7$

8.4.1. Resultados do programa FEPAVE2

Os resultados a seguir foram obtidos na análise com o FEPAVE2 com características não-lineares. Nesta análise a deflexão máxima recuperável obtida foi de 27 centésimos de milímetro.

Tabela 15 – Tensões sob Revestimento a partir do FEPAVE2 com características não lineares

Tensões sob Revestimento (Kgf/cm ²)		
Pontos de Inspeções	Tensões Radiais (σ_t)	Tensões Verticais (σ_v)
$x = 0$	2,22	-3,67
$x = 10,8$	-1,83	-1,42
$x = 15$	-3,18	-1,43

Tabela 16 – Tensões sobre Subleito a partir do FEPAVE2 com características não lineares

Tensões sobre subleito (Kgf/cm ²)	
Pontos de Inspeções	Tensões Verticais (σ_v)
$x = 0$	-0,19
$x = 10,8$	-0,17
$x = 15$	-0,17

Tabela 17 – Deformação específica sob o revestimento a partir do FEPAVE2 com características não lineares e a partir do ELSYM5 com características lineares

Deformação sob o Revestimento		
Pontos de Inspeções	Deformação Radial (ϵ_t) FEPAVE2	Deformação Radial (ϵ_t) ELSYM5
$x = 0$	$2,31 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$
$x = 10,8$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-1,5 \times 10^{-4}$
$x = 15$	$1,89 \times 10^{-4}$	$-3,3 \times 10^{-4}$

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir até o momento:

- Os valores encontrados podem ser considerados adequados para o pavimento estudado visto que estes são aceitáveis do que se diz respeito à vida de fadiga.
- Os módulos das camadas granulares se apresentam satisfatórios visto que os materiais que constituem os mesmo são arenosos.
- As misturas asfáltica ensaiadas a partir de corpos extraídos do pavimento, já executado, apresentaram módulos bastante baixos, esperava-se um módulo de valor mais elevado. Porém, não se pode confiar nos resultados obtidos, visto que os corpos de provas extraídos para análise forma bastantes irregulares. Para um resultado mais verdadeiro, era necessário reproduzir em laboratório a mistura asfáltica empregada na execução do prolongamento. Porém as especificações da obra não continham informações sobre a dosagem da mistura.
- Pode-se observar que todos os valores determinados, a partir da relação MR/RT, em média foram menores que os valores ditos como padrão (3000 a 5000) para a determinação da Flexibilidade, esta relação é um indicador do comportamento mecânico do pavimento porque pode associar boa resistência à tração com alta flexibilidade e capacidade de deformação.
- Os resultados do programa ELSYM junto com o do modelo de fadiga de Pinto mostraram que o pavimento atende as expectativas do projeto.
- De modo geral os valores encontrados com os programas foram diferentes em função da não-linearidade dos materiais empregados dificultando uma análise acusada por procedimentos lineares.
- Os valores das deformações e deflexões calculados como o FEPAVE não linear são menores que os obtidos pelo ELSYM5 provavelmente devido a maior rigidez conferida pela malha de elementos finitos. Observa-se também que nos pontos de inspeção, $x = 10,8$ e $x = 15$ cm, surgem deformações de compressão sob o revestimento na análise linear, o que significa para a vida de fadiga um valor ruim.
- A ausência dos resultados da Viga Benkelman, faz com a avaliação estrutural do trecho em estudo não se complete, por isso não foram feitas comparações das deflexões adquiridas nos programas computacionais com os resultados de campo.
- Fica como sugestão, para a disciplina de Pavimentação, da continuidade na avaliação estrutural desse trecho, fazendo uso dos diversos equipamentos existentes para tal avaliação.

10. CONCLUSÃO

O estágio realizado foi de grande importância para se colocar em prática os conhecimentos adquiridos durante o curso de engenharia civil.

O fato de o estágio ter sido uma bolsa de pesquisa foi possível durante todo o período do mesmo, aprofundar os conhecimentos na área da mecânica dos pavimentos, através das práticas realizadas no laboratório e também através da oportunidade de publicações de artigos em anais de congresso e em encontros científicos.

O Laboratório de Pavimentação – LEP, nos da toda condição necessária para realização dos trabalhos, possui os equipamentos necessários para os estudos mecânicos, porem há grandes dificuldades para o desenvolvimento das atividades, como a falta de verbas para adquirir os materiais dos laboratórios de mecânica dos solos. E apoio da própria instituição de ensino. Os estagiários têm que aprender a lidar com as condições precárias, como a falta de equipamentos de segurança, os imprevistos e ter criatividade para resolver os problemas da melhor forma possível.

O curso de engenharia da UFCG ainda não oferece conhecimento bastante sobre a importância de se estudar as características mecânicas dos materiais para pavimentação. Isso leva o estagiário a querer se aprofundar nesse assunto e a melhor forma é através de cursos de Pós-Graduação, que fazem com que o aluno tenda a seguir pela área acadêmica, repassando seus conhecimentos e desenvolvendo pesquisas de grande valia para a sociedade.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] **BENEVIDES, S. A. S.** (2000) *Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará.* Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [2] **DNER-PRO 10/79** – *Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis (Procedimento A).*
- [3] **DNER-PRO 11/79** – *Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis (Procedimento B).*
- [4] **DNER** (1994b) **ME 133** – *Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência,* Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- [5] **DNER** (1994a) **ME 138** – *Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral,* Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- [6] **DNER-ME138-94** - *Tração Diametral*
- [7] **FRANCO, F. A. C. P.** – *Avaliação dos modelos de previsão do dano de fadiga em misturas betuminosas.* 1º Seminário de qualificação ao doutorado, Agosto 2004.
- [8] **NBR 6457 ME** - Amstras de solo - preparação para ensaios de compactação e de caracterização. NB 51 Ago./86
- [9] **NBR 6458 ME** - Grãos de pedregulho retidos nas peneiras de 4.8mm - determinação da massa específica aparente e da absorção de água. MB 27 Out./84.
- [10] **NBR 6459 ME** - Solo – determinação do limite de liquidez. MB 29 Out./84
- [11] **NBR 7180 ME** - Solo – determinação do limite de plasticidade. MB 31 Out./84
- [12] **NBR 7181 ME** - Solo – análise granulométrica. MB 32 Dez/84
- [13] **NBR 7182 ME** - Solo – ensaio de compactação. MB 33 05/12/90
- [14] **NBR 9895 ME** - Solo – Índice de Suporte Califórnia. MB 2545 Jun./87
- [15] **PINTO, S.; PREUSSLER, E. S.** – *Pavimentação Rodoviária, Conceitos fundamentais sobre pavimento flexível.*

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- PREUSSLER** (1983), *Estudo da Deformação Resiliente de Pavimento Flexíveis e Aplicação ao projeto de Camadas de Reforço. Tes Dsc. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro - RJ.*
- COPPE** (1988) *Procedimento para execução de ensaios com Carregamento Repetido (solos, britas, misturas betuminosas, misturas cimentadas), Setor de mecânica dos pavimentos, laboratório de geotecnia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.*
- MACÊDO, J. A. G.** (1996), *Interpretação de Ensaio Defletométricos para Avaliação estrutural de Pavimentos Flexíveis – A experiência com FWD no Brasil, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.*
- PINTO, S.** (1991) *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.*

ANEXO 1 - Caracterização dos materiais granulares

FLORIANO PEIXOTO

REGISTRO II*	Sub-Leito	Sub-Base	Base						
FURO	-	-	-						
PROFUNDIDADE	-	-	-						
GRANULOMETRIA	PENEIRA % PASSANDO	2"							
		1"	-	-	96,0				
		3,8"	95,0	93,0	84,0				
		Nº 4	92,0	91,0	71,0				
		Nº 10	88,0	87,0	57,0				
		Nº 40	68,0	69,0	32,0				
		Nº 200	26,0	24,0	12,0				
FAIXA ASSHO									
LL	N/P	N/P	N/P						
IP	-	-	-						
EA									
IG	0	0	0						
CLASSIF. HRB	A-2-4	A-2-5	A-2-6						
12 GOLPES	DEHS. MÁX	1985							
	UMID. ÓTIMA	6,1							
	C.B.R.	9							
	EXPANSÃO	0,179							
26 GOLPES	DEHS. MÁX		2012						
	UMID. ÓTIMA		7,6						
	C.B.R.		49						
	EXPANSÃO		0						
56 GOLPES	DEHS. MÁX			2145					
	UMID. ÓTIMA			5,4					
	C.B.R.			62					
	EXPANSÃO			0					
APROVEITAVEL SIMS) IIÃO(II)									
OBSERVAÇÕES:	MANUAL DO DNER								
PED. ACIMA DE 2mm	11,6	12,3	42,6						
AREIA GROSSA	20,4	18,3	25,4						
AREIA FINA	41,7	45,3	20,2						
SILTE + ARGILA ABAIXO 0,074mm	26,3	24,1	11,8						

ANEXO 2 - Modelo Composto - BASE

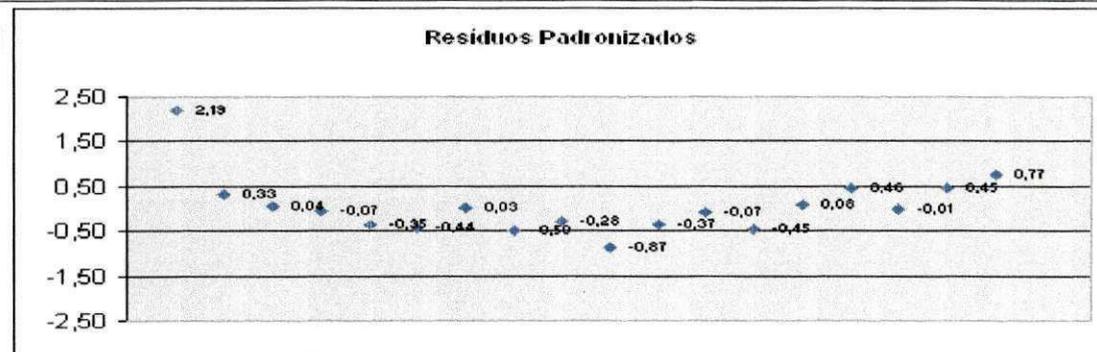
MATERIAL DE BASE MODELO COMPOSTO							COEFICIENTES DA REGRESSÃO				
							INTERSEÇÃO	-8,63933			
							X1	-0,3204			
							X2	1,543141			
							k_1	k_2	k_3		
							0,000177005	-0,3204	1,543141		
							$R^2 =$	0,925697			
							$M_R = K_1 \sigma_3^{k_1} \sigma_d^{k_2} \sigma_a^{k_3}$				
							$K_1 = 1/k_1$	$K_2 = -k_2$	$K_3 = 1-k_3$		
							5.650	0,3204	-0,5431		
DADOS DO ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO							M _R Calculado (kgf/cm ²)	ERRO (kgf/cm ²)	ERRO (%)	Resíduo Padronizado	
σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	ϵ_r	M _R (kgf/cm ²)	LN ϵ_a	LN σ_3	LN σ_d					
0,210	0,210	0,000018	11.667	-10,92514	-1,5606477	-1,56064775	7.998	3.669	31,45	1,51	
0,210	0,410	0,000050	8.200	-9,90349	-1,560648	-0,891598	5.561	2.639	32,18	1,09	
0,210	0,620	0,000146	4.247	-8,83190	-1,560648	-0,478036	4.442	-196	4,61	-0,08	
0,340	0,340	0,000037	9.189	-10,20459	-1,07881	-1,07881	7.184	2.005	21,82	0,83	
0,340	0,690	0,000167	4.132	-8,69752	-1,07881	-0,371064	4.891	-760	18,38	-0,31	
0,340	1,030	0,000360	2.861	-7,92941	-1,07881	0,0295588	3.935	-1.074	37,53	-0,44	
0,510	0,510	0,000073	6.986	-9,52505	-0,673345	-0,673345	6.564	423	6,05	0,17	
0,510	1,030	0,000343	3.003	-7,97778	-0,673345	0,0295588	4.481	-1.478	49,21	-0,61	
0,510	1,550	0,000549	2.823	-7,50741	-0,673345	0,4382549	3.589	-765	27,11	-0,32	
0,690	0,690	0,000151	4.570	-8,79823	-0,371064	-0,371064	6.136	-1.567	34,29	-0,64	
0,690	1,370	0,000435	3.149	-7,74016	-0,371064	0,3148107	4.228	-1.078	34,24	-0,44	
0,690	2,060	0,000651	3.164	-7,33700	-0,371064	0,722706	3.388	-223	7,06	-0,09	
1,030	1,030	0,000244	4.221	-8,31834	0,0295588	0,0295588	5.612	-1.391	32,96	-0,57	
1,030	2,060	0,000526	3.916	-7,55021	0,0295588	0,722706	3.852	65	1,65	0,03	
1,030	3,090	0,000748	4.131	-7,19811	0,0295588	1,1281711	3.090	1.041	25,19	0,43	
1,370	1,370	0,000275	4.982	-8,19874	0,3148107	0,3148107	5.267	-285	5,72	-0,12	
1,370	2,750	0,000576	4.774	-7,45940	0,3148107	1,0116009	3.607	1.167	24,44	0,48	
1,370	4,120	0,000855	4.819	-7,06441	0,3148107	1,4158532	2.896	1.922	39,89	0,79	
			Desv. Padrão					Média	24,0993		

Resíduos Padronizados

Resíduo Padronizado
1,51
1,09
0,83
0,17
0,43
0,48
0,79
0,03
-0,12
-0,09
-0,08
-0,31
-0,44
-0,44
-0,57
-0,61
-0,64
-0,32

ANEXO 3 - Modelo Composto – SUB-BASE

MATERIAL DE SUB-BASE MODELO COMPOSTO							COEFICIENTES DA REGRESSÃO					
							INTERSEÇÃO	-8,55534				
							b1	-0,45713				
							b2	1,464668				
							k ₁	k ₂	k ₃			
							0,00019251	-0,45713	1,464668			
							R ² =	0,963045				
							M _R = K ₁ σ ₃ ^{k₁} σ _d ^{k₂} σ _r ^{k₃}					
							K ₁ = 1/k ₁	K ₂ = -k ₂	K ₃ = 1-k ₃			
							5.194	0,4571	-0,4647			
DADOS DO ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO							M _R Calculado (kgf/cm ²)	ERRO (kgf/cm ²)	ERRO (%)	Resíduo Padronizado		
σ ₃ (kgf/cm ²)	σ _d (kgf/cm ²)	ε _r (cm)	M _R (kgf/cm ²)	LN ε _a	LN σ ₃	LN σ _d						
0,210	0,210	0,000026	8.077	-10,55741	-1,5606477	-1,56064775	5.256	2.821	34,93	2,19		
0,210	0,410	0,000096	4.271	-9,25116	-1,560648	-0,891598	3.851	419	9,82	0,33		
0,210	0,620	0,000192	3.229	-8,55802	-1,560648	-0,478036	3.178	51	1,58	0,04		
0,340	0,340	0,000066	5.152	-9,62586	-1,07881	-1,07881	5.237	-85	1,66	-0,07		
0,340	0,690	0,000208	3.317	-8,47797	-1,07881	-0,371064	3.769	-452	13,62	-0,35		
0,340	1,030	0,000401	2.569	-7,82155	-1,07881	0,0295588	3.129	-560	21,82	-0,44		
0,510	0,510	0,000097	5.258	-9,24080	-0,673345	-0,673345	5.221	37	0,70	0,03		
0,510	1,030	0,000330	3.121	-8,01642	-0,673345	0,0295588	3.766	-645	20,66	-0,50		
0,510	1,550	0,000562	2.758	-7,48401	-0,673345	0,4382549	3.115	-357	12,93	-0,28		
0,690	0,690	0,000169	4.083	-8,68561	-0,371064	-0,371064	5.209	-1.126	27,58	-0,87		
0,690	1,370	0,000413	3.317	-7,79206	-0,371064	0,3148107	3.787	-470	14,18	-0,37		
0,690	2,060	0,000678	3.038	-7,29636	-0,371064	0,722706	3.133	-95	3,13	-0,07		
1,030	1,030	0,000223	4.619	-8,40834	0,0295588	0,0295588	5.193	-574	12,44	-0,45		
1,030	2,060	0,000532	3.872	-7,53887	0,0295588	0,722706	3.763	109	2,81	0,08		
1,030	3,090	0,000833	3.709	-7,09048	0,0295588	1,1281711	3.117	592	15,97	0,46		
1,370	1,370	0,000265	5.170	-8,23578	0,3148107	0,3148107	5.182	-12	0,24	-0,01		
1,370	2,750	0,000636	4.324	-7,36031	0,3148107	1,0116009	3.749	575	13,30	0,45		
1,370	4,120	0,001006	4.095	-6,90177	0,3148107	1,4158532	3.107	989	24,14	0,77		
Desv. Padrão			1287,3354					Média	12,8614			



ANEXO 4 - Modelo Composto – SUBLEITO

MATERIAL DE SUBLEITO MODELO COMPOSTO							COEFICIENTES DA REGRESSÃO					
							INTERSEÇÃO	-8,30897				
DADOS DO ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO							b1	-0,41087				
							b2	1,47436				
							k ₁	k ₂	k ₃			
							0,0002463	-0,41087	1,47436			
							R ² =			0,928759		
							K ₁ = 1/k ₁	K ₂ = -k ₂	K ₃ = 1-k ₃			
							4,060	0,4109	-0,4744			
σ ₃ (kgf/cm ²)	σ _d (kgf/cm ²)	ε _r (cm)	M _R (kgf/cm ²)	LN ε _a	LN σ ₃	LN σ _d	M _R Calculado (kgf/cm ²)	ERRO (kgf/cm ²)	ERRO (%)	Resíduo Padronizado		
0,210	0,210	0,000023	9.130	-10,68002	-1,5606477	-1,56064775	4.483	4.647	50,90	2,96		
0,210	0,410	0,000112	3.661	-9,09701	-1,560648	-0,891598	3.264	397	10,84	0,25		
0,210	0,620	0,000258	2.403	-8,26255	-1,560648	-0,478036	2.682	-279	11,63	-0,18		
0,340	0,340	0,000083	4.096	-9,39667	-1,07881	-1,07881	4.348	-252	6,14	-0,16		
0,340	0,690	0,000271	2.546	-8,21339	-1,07881	-0,371064	3.108	-562	22,07	-0,36		
0,340	1,030	0,000502	2.052	-7,59691	-1,07881	0,0295588	2.570	-518	25,26	-0,33		
0,510	0,510	0,000123	4.146	-9,00333	-0,673345	-0,673345	4.237	-91	2,20	-0,06		
0,510	1,030	0,000445	2.315	-7,71744	-0,673345	0,0295588	3.036	-721	31,17	-0,46		
0,510	1,550	0,000687	2.256	-7,28318	-0,673345	0,4382549	2.501	-245	10,85	-0,16		
0,690	0,690	0,000218	3.165	-8,43102	-0,371064	-0,371064	4.157	-992	31,33	-0,63		
0,690	1,370	0,000537	2.551	-7,52951	-0,371064	0,3148107	3.002	-451	17,69	-0,29		
0,690	2,060	0,000836	2.464	-7,08688	-0,371064	0,722706	2.474	-10	0,41	-0,01		
1,030	1,030	0,000311	3.312	-8,07572	0,0295588	0,0295588	4.053	-741	22,36	-0,47		
1,030	2,060	0,000679	3.034	-7,29489	0,0295588	0,722706	2.917	117	3,85	0,07		
1,030	3,090	0,001001	3.087	-6,90676	0,0295588	1,1281711	2.407	680	22,04	0,43		
1,370	1,370	0,000368	3.723	-7,90743	0,3148107	0,3148107	3.980	-257	6,90	-0,16		
1,370	2,750	0,000771	3.567	-7,16782	0,3148107	1,0116009	2.860	707	19,83	0,45		
1,370	4,120	0,001214	3.394	-6,71383	0,3148107	1,4158532	2.361	1.033	30,44	0,66		
Desv. Padrão			1571,6844					Média	18,1057			

Resíduos Padronizados

ANEXO 5 - Pontos de Inspeção

