



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

RELATÓRIO DO ESTÁGIO SUPERVISIONADO

ÁREA DE GEOTECNIA
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAMENTOS
DEC/CTRN/UFPA

Aluna:

Alessandra Martins Avelino - Mat: 29921054

Prof. José Afonso Gonçalves de Macêdo

Orientador

Campina Grande – PB

Março de 2008



Biblioteca Setorial do CDSA. Julho de 2021.

Sumé - PB

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para alcançar meus objetivos.

Agradeço a minha família, meu esposo e companheiro Alex Costa de Amorim e meus filhos Natan, Ana Luza e Renan, por ter sido combustível e motivação para enfrentar os obstáculos que ao longo do caminho quisera me derrubar. E em especial ao meu Pai, **Tarcizio Inácio Avelino**, que me ensinou a ser forte e nunca baixar a cabeça diante dos outros e dos problemas.

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 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.

A **DYNATEST Engenharia Ltda.**, por ter me dado oportunidade da realização deste trabalho, em especial ao **Engenheiro Gilson Assis Marini**, pelo apoio e pelos valiosos ensinamentos.

A minha amiga **Rosângela Evangelista Medrado**, pela amizade a mim confiada e por todas as ajudas concedidas colaborando de maneira decisiva na elaboração deste trabalho.

Aos **meus amigos curso** pelas contínuas experiências vividas dentro e fora de sala de aula e pela paciência.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	1
1. INTRODUÇÃO	2
2. OBJETIVO	3
2.1. Objetivo Geral	3
2.2. Objetivo específico	3
3. Revisão Bibliográfica	4
3.1 Pavimento Rodoviário	4
3.1.1 Pavimento Rígido	4
3.1.1 Pavimentos Flexíveis	6
3.2 Avaliação de Pavimentos	9
3.2.1. Avaliação da Condição Funcional	10
3.2.2. Avaliação da Condição Estrutural	16
3.3. Análise de Tensões, Deformações e Deslocamentos	19
3.3.1. Ensaio Macâmicos	21
3.3.2. Fadiga de Misturas Asfálticas	27
3.3.2.1. Modelos de Fadiga	30
3.3.2.2. Deformação Elástica e Permanente	33
3.4. Projeto de Pavimentação	34
3.4.1. Métodos de dimensionamentos para pavimentos flexíveis	37
3.4.1.1. Método do DNIT	37
3.4.1.2. Método Mecânico	41
4. ATIVIDADES DE ESTAGIO	43
4.1. PRIMEIRA ETAPA – acompanhamento de ensaios realizados em laboratório.	43
4.2. SEGUNDA ETAPA – Duplicação e Restauração da Rodovia BR-101 – Estudo de Caso	43
4.2.1. Característica do Trecho	43
4.2.2. Serviços executados na segunda etapa do estagio	44
4.3. Patologias	48
5. CONCLUSÃO	50
6. BIBLIOGRAFIA	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

ÍNDICE – TABELAS

Tabela 1 – Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG	13
Tabela 2 – Faixas granulométricas para material de base	38
Tabela 3 – Espessura mínima do revestimento	40
Tabela 4 – Coeficientes de equivalência estrutural	40

ÍNDICE – ESQUEMATA

Esquema 1 – Fluxograma do dimensionamento mecanístico	41
-------------------------------------------------------	----

ÍNDICE – FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal de um Pavimento Rígido	4
Figura 2 – Distribuição do carregamento em uma placa do pavimento rígido	5
Figura 3 – Distribuição do carregamento em pavimentos flexíveis	6
Figura 4 – Seção transversal de um Pavimento Flexível	9
Figura 5 – Treliça da NORMA DNIT 006/2003 – PRO	11
Figura 6 – Efeito da carga sobre o pavimento	18
Figura 7 – Equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida	24
Figura 8 – Ensaio de Resistência à tração	

ÍNDICE – FOTO

Foto 1 – Extração de Corpo de Prova	25
Foto 2 – Modelagem de corpos de prova em laboratório	25
Foto 3 – Equipamento para Ensaio de Creep	26
Foto 4 – Extração de corpo de prova	43
Foto 5 – Tratamento do Solo	44
Foto 6 – Aplicação do CCR	45
Foto 7 – Preparação do concreto na usina do 2º BEC	45
Foto 8 – Descarregamento do concreto	46
Foto 9 – Barra de Transferência	47
Foto 4 – Execução do acostamento	47
Foto 4 – Sarjeta de Canteiro Central	48
Foto 12 – Trinca no Pavimento	49

ÍNDICE QUADROS

Quadro 1 - Inventário do estado de superfície	14
Quadro 2 - Cálculo do Índice de Gravidade Global – IGG	14
Quadro 3 - Resumo dos Defeitos – Codificação e Classificação	15

ÁBACO

Ábaco 1 – De dimensionamento de pavimentos flexíveis	39
------------------------------------------------------	----

APRESENTAÇÃO

Neste relatório apresenta-se a descrição das atividades realizadas pela aluna Alessandra Martins Avelino, regularmente matriculado no curso de Engenharia Civil, na Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) sob o número de matrícula 29921054, com a orientação do professor Dr. José Afonso Gonçalves de Macêdo.

O estágio foi realizado em duas etapas: a primeira no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN e a segunda etapa na duplicação da Rodovia BR-101.

O período do estágio durou do dia 30 de Outubro de 2007 a 28 de Março de 2008, com uma carga horária de 8 horas semanais e a segunda etapa no dia 02 de Janeiro de 2008 até 31 de Janeiro de 2008, com uma carga horária de 8 horas semanais, sob a supervisão do Engenheiro Gilson Assis Marini da DYNATEST Engenharia Ltda em cumprimento às exigências da disciplina Estágio Supervisionado do curso de Graduação em Engenharia Civil.

1. INTRODUÇÃO

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

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.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Este trabalho foi concebido com o objetivo 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. Na segunda etapa do estágio, foi possível observar, na prática, todo o processo de dimensionamento de uma estrutura de pavimento, ensaios empregados para a boa qualidade de tal estrutura e os métodos mais usuais no Brasil.

2.2. Objetivo específico

O objetivo específico deste trabalho foi o de estudar e realizar a avaliação estrutural de pavimentação, tentando conhecer o comportamento da estrutura de pavimento em relação às tensões e deformações desenvolvidas sob as cargas que ela foi dimensionada.

E desta forma fazendo valer o conceito de estágio, que é o de apresentar para o futuro profissional aquilo que ele vai enfrentar 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.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Pavimento Rodoviário

Pavimento é uma estrutura constituída por camadas de espessura finita, construída sobre a uma superfície final da terraplanagem, 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, ou seja, separando-os em função de seu comportamento estrutural.

3.1.1. Pavimento Rígido

São constituídos basicamente por uma placa de concreto, onde a espessura é fixada em função da resistência a flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. Ao chegar ao subleito, a carga encontra-se suficientemente amortecida. Essas placas se caracterizam por terem uma alta rigidez, alta resistência. As subcamadas são chamadas de sub-base, onde a qualidade desse material equivale à sub-base do pavimento asfáltico.

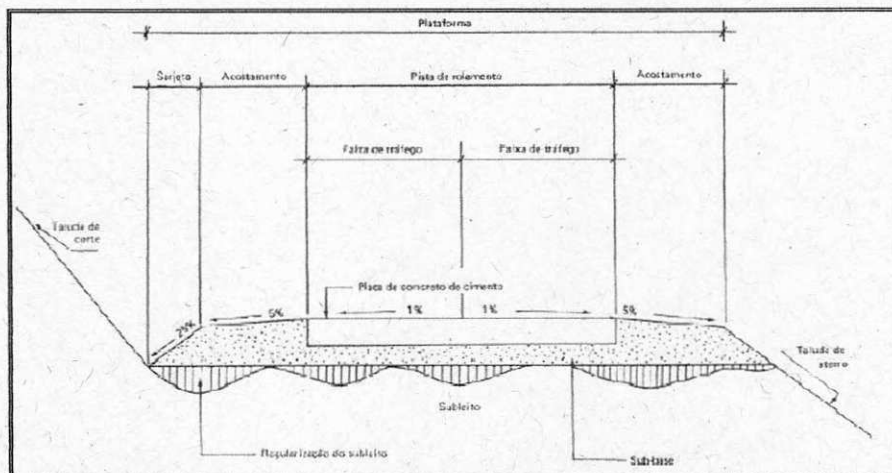


Figura 1 – Seção transversal de um Pavimento Rígido

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.

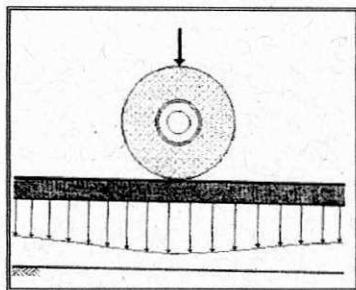


Figura 2 - Distribuição do carregamento em uma placa do pavimento rígido

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.

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

*** Regularização do subleito**

- Camada com espessura variável;
- Executada quando à preparação do subleito da estrada, para conformá-lo transversalmente e longitudinalmente com o projeto;
- Deve ser executada sempre em aterro.

*** Sub-base**

- Camada utilizada para uniformizar o suporte disponível;
- Bloquear as pressões que possam ocorrer por força variabilidade volumétrica do solo do subleito;
- Evitar ocorrência de bombeamento que tem sido a causa primordial da ruína da maior parte dos antigos pavimento de concreto;
- Garantir o bom comportamento e a durabilidade do pavimento como um todo.

*** Placa de Concreto**

- Camada estruturalmente mais importante, sua principal função no pavimento é a elevada resistência à tração na flexão e à compressão simples garantindo assim uma maior durabilidade;
- A base deve resistir e distribuir os esforços provenientes da ação do tráfego, atenuando a transmissão destes esforços às camadas subjacentes;
- É construída com materiais estabilizados como cimento Portland, agregados e água e se necessário o uso de aditivos;
- O concreto empregado em pavimentos deve ser dosado exclusivamente por método experimental garantido a sua trabalhabilidade e alta resistência mecânica.

3.1.2. 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.

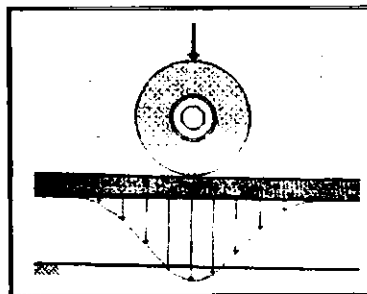


Figura 3 - Distribuição do carregamento em pavimentos flexíveis

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 à preparação do subleito da estrada, para conformá-lo transversal e longitudinalmente com o projeto;
- 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**

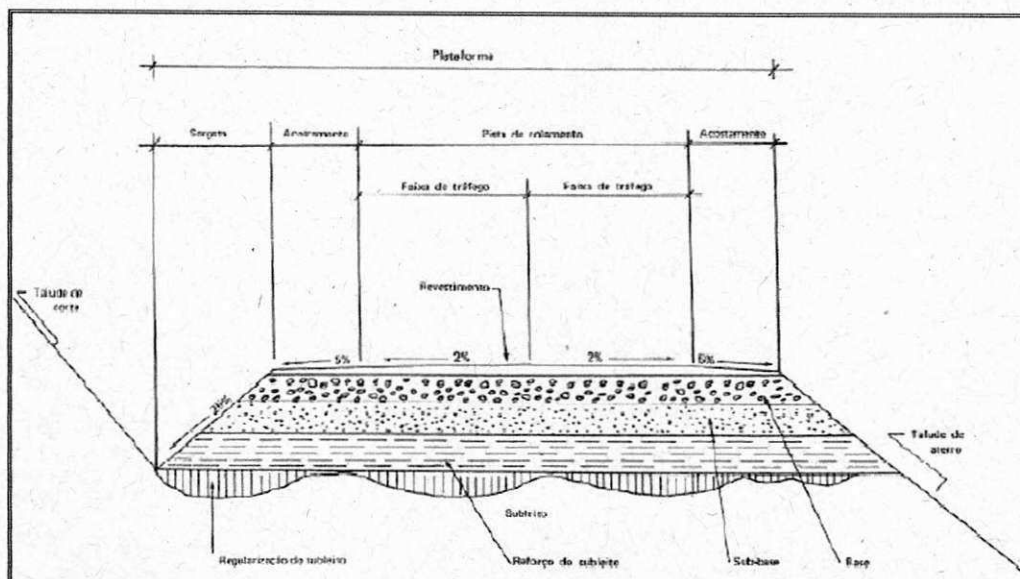


Figura 4 - Seção transversal de um Pavimento Flexível

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.

3.2. 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.

3.2.1. . 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.

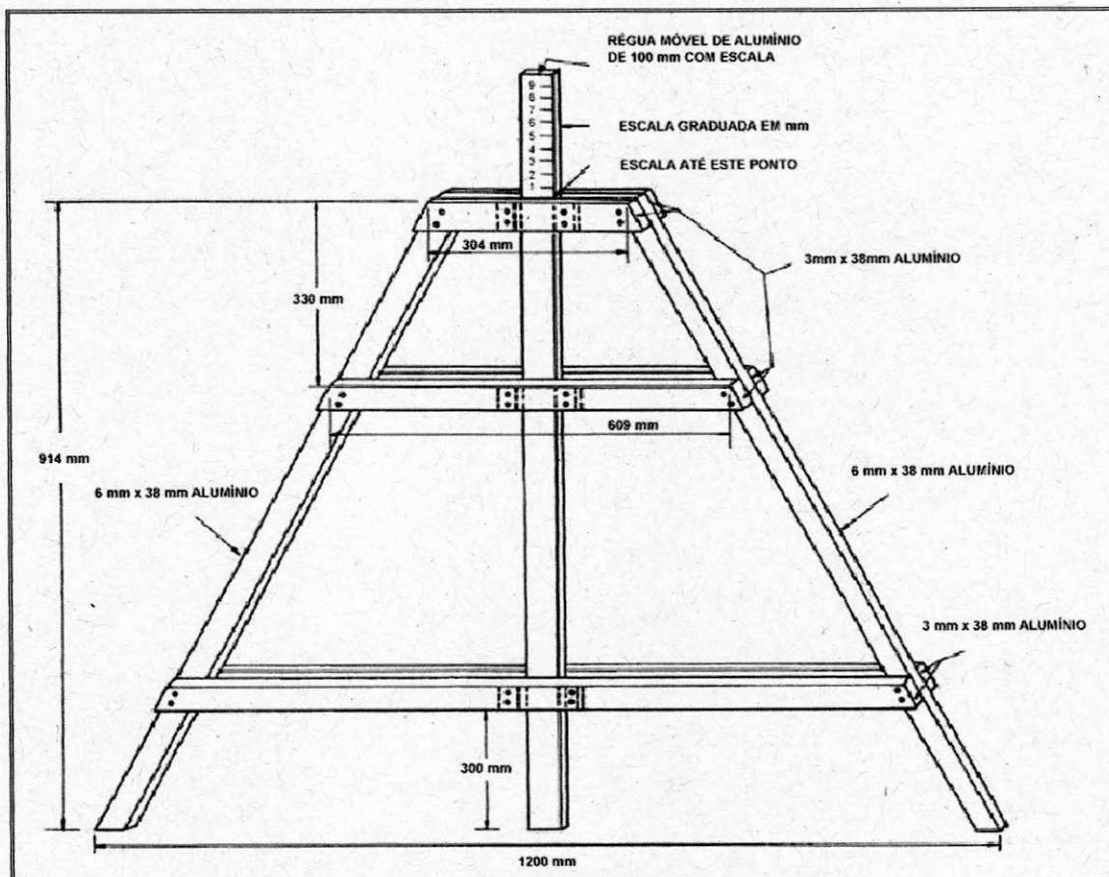


Figura 5 – Treliça da NORMA DNIT 006/2003 – PRO

* 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 1 - Inventário do estado de superfície

RODOVIA:		INVENTÁRIO DO ESTADO DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO														Data:		Folha:						
TRECHO:		OPERADOR:														Estaca ou Quilômetro		Estaca ou Quilômetro						
SUBTRECHO:		REVESTIMENTO TIPO:																						
Estaca ou Km	Seção Terrap.	OK	Trncas Isoladas					FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	O (5)	P (5)	EX (6)	D (7)	R (8)	ALC	ATC	E	Flechas		OBS:
			FI (1)	TTC (1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)	J (2)	TB (2)	JE (3)											TBE (3)	TRI	
309	Aterro									X	X					X						-2	E	
310	Aterro					X					X					X						-4	D	
311	Aterro				X											X						-3	E	
312	Aterro				X											X						-1	D	
313	Aterro	X				X										X						-2	E	
314	Aterro					X				X						X						0	D	
315	Aterro		X			X										X						-1	E	
316	Aterro				X											X						0	D	
317	A					X										X						-1	E	
318	A			X												X						0	D	
319	Corte	X			X											X						-3	E	
320	A					X										X						-2	D	
321	A										X	X				X						0	E	
322	Corte					X										X						0	D	
323	Corte	X			X											X						-2	E	
324	A										X	X				X						-15	D	
325	A			X		X										X						-2	E	
326	A		X			X										X						0	D	
327	A			X		X										X						-3	E	
328	A		X		X											X						-2	D	

Quadro 2 - Cálculo do Índice de Gravidade Global - IGG

RODOVIA:		PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL (IGG)														Data:		Folha:	
TRECHO:		REVESTIMENTO TIPO:														Estaca ou Quilômetro		Estaca ou Quilômetro	
SUB-TRECHO:																			
Item	Natureza do defeito	Frequência absoluta	Frequência absoluta considerada	Frequência relativa	Fator de ponderação	Índice de gravidade individual	Observações												
1	Trncas isoladas FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR			87%	0,2	17													
2	(FC-2), TB			7%	0,5	4													
3	(FC-3) JE, TBE.			6%	0,8	5													
4	ALP, ATP			-	0,9	-													
5	O e P			-	1,0	-													
6	EX			-	0,5	-													
7	D			100%	0,3	30													
8	R			2%	0,6	1													
9	Média aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TRE	TRE=	TRI=	F=	1A () 1B ()	1,48 x 4/3 = 2													
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em ambas as trilhas	TRE _v =	TRI _v =	FV=	2A () 2B ()	Variância 6													
Nº TOTAL DE ESTAÇÕES		n =	Σ IND. GRAVID. IND. = IGG				Σ = 65	Conceito											
1A) IGI = F x 4/3 quando F ≤ 30		1B) IGI = 40 quando F > 30				Operador													
2A) IGI = FV quando FV ≤ 50		2B) IGI = 50 quando FV > 50				Cálculo													
						Visto													

Quadro 3 - Resumo dos Defeitos – Codificação e Classificação

FENDAS				CODIFICAÇÃO	CLASSE DAS FENDAS		
Fissuras				FI	-	-	-
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	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	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	Bloco*	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	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	ATP			
	De Consolidação	Local	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ALC			
		da Trilha	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ATC			
Ondulação/Corrugação - Ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base					O		
Escorregamento (do revestimento betuminoso)					E		
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento					EX		
Desgaste acentuado na superfície do revestimento					D		
"Painéis" 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.

3.2.2. 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 fletem 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.

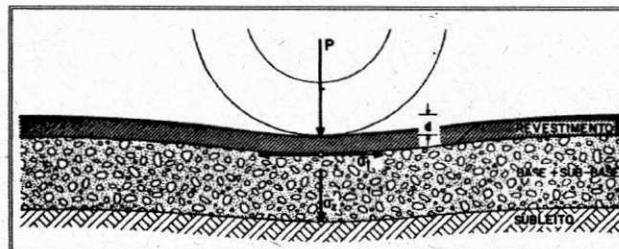


Figura 6 – Efeito da carga sobre o pavimento

* 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 Dflectometer*” 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.

3.3. Análise de Tensões, Deformações e Deslocamento.

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.

3.3.1. Ensaio 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_0 - 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.

- **Medições de deformação** – a fim de obter o módulo resiliente, aplicam-se as seguintes tensões: $\sigma_3 = 0,21 - 0,35 - 0,525 - 0,70 - 1,05 - e 1,40 \text{ Kgf/cm}^2$; 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**

- 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 $0,21 e 2 \text{ Kgf/cm}^2$.
- 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.
- 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.

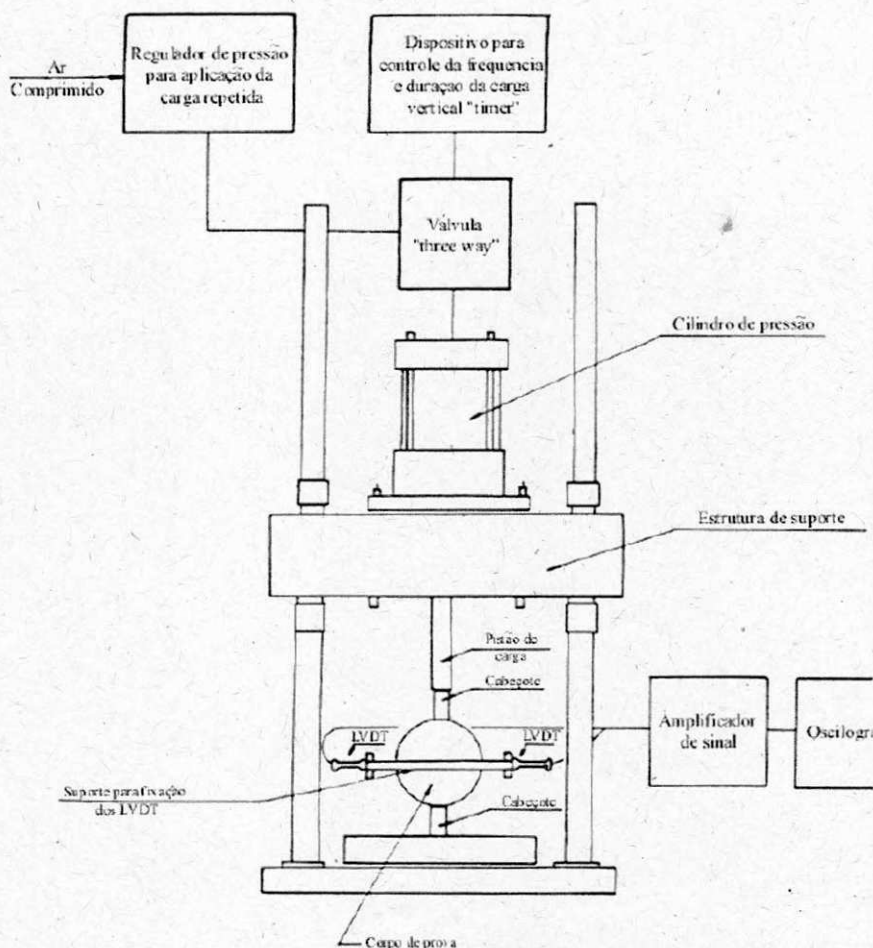


Figura 7 – Equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida

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/cm²;
- F = carga de ruptura, kgf;
- D = diâmetro do corpo de prova, cm;
- H = altura do corpo de prova, cm.

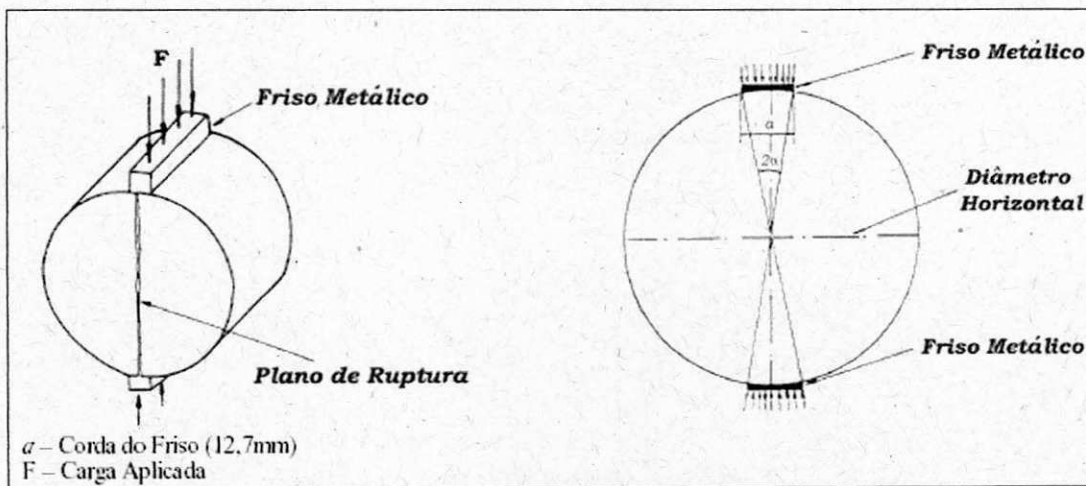
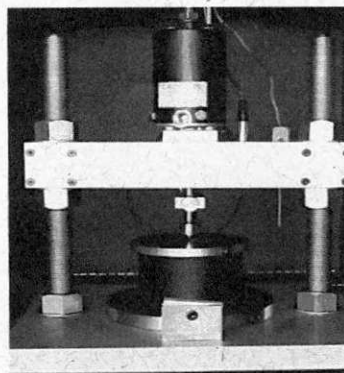


Figura 8 - Ensaio de Resistência à tração

* 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.



3.3.2. 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.

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

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_0 = 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.

3.3.2.1. 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.

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

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

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/cm^2 .

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

$$MR = 2,04 \cdot 10^5 e^{-0,0517T}$$

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

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.

$$N_l = 5,63 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,61} r^2 = 0,98$$
$$N_{campo} = f_0 N_l$$

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_0 - fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a: $f_0 = 10^4$;

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.

$$N_l = 1,21 \cdot 10^{-8} \left(\frac{1}{\varepsilon_l} \right)^{2,66} r^2 = 0,96$$
$$N_{campo} = f_0 N_l$$

Onde:

N_L – vida de fadiga da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral;

ε_l - deformação específica resiliente inicial, cm/cm;

f_0 – fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a: $f_0 = 10^5$

N_{campo} – número “N” de campo para as mesmas condições anteriores consideradas.

Outras Leis de Fadigas:

» Modelo da “Shell Oil”

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

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**

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

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 tornar 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:

$$N_f = 18,4C \left[4,325 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot E_1^{-0,854} \right]$$

$$N_f = 30 \left[4,325 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot E_1^{-0,854} \right]$$

» **Modelo de "Berkeley", Califórnia.**

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

Onde:

B – Teor de asfalto da mistura, em %;

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

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

ϕ - ângulo de fase, em graus;

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

3.3.2.2. 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:

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

$$(\varepsilon_v)_{adm} = \frac{(\sigma_v)_{adm}}{M_R}$$

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.

3.4. 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, a 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:

1. 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;
2. Na escolha dos materiais que irão constituir as camadas constituintes;
3. Na indicação dos requisitos essenciais da drenagem subterrânea e subsuperficial, de acordo com as condições geotécnicas, hidrológicas e de estrutura do pavimento;
4. 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;
5. 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;
6. A pavimentação de uma estrada de rodagem exige vultosos investimentos, os quais atingem, freqüentemente, 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;
7. 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;

8. 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;
9. 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;
10. 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;
11. 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;
12. 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 (*Califórnia 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;
13. 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.

3.4.1. Métodos de dimensionamentos para pavimentos flexíveis

3.4.1.1. 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 2 - 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
nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85
nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70
nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45
nº 200	2-8	5-15	5-15	5-20

Obs.: A fração que passa na peneira nº 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).

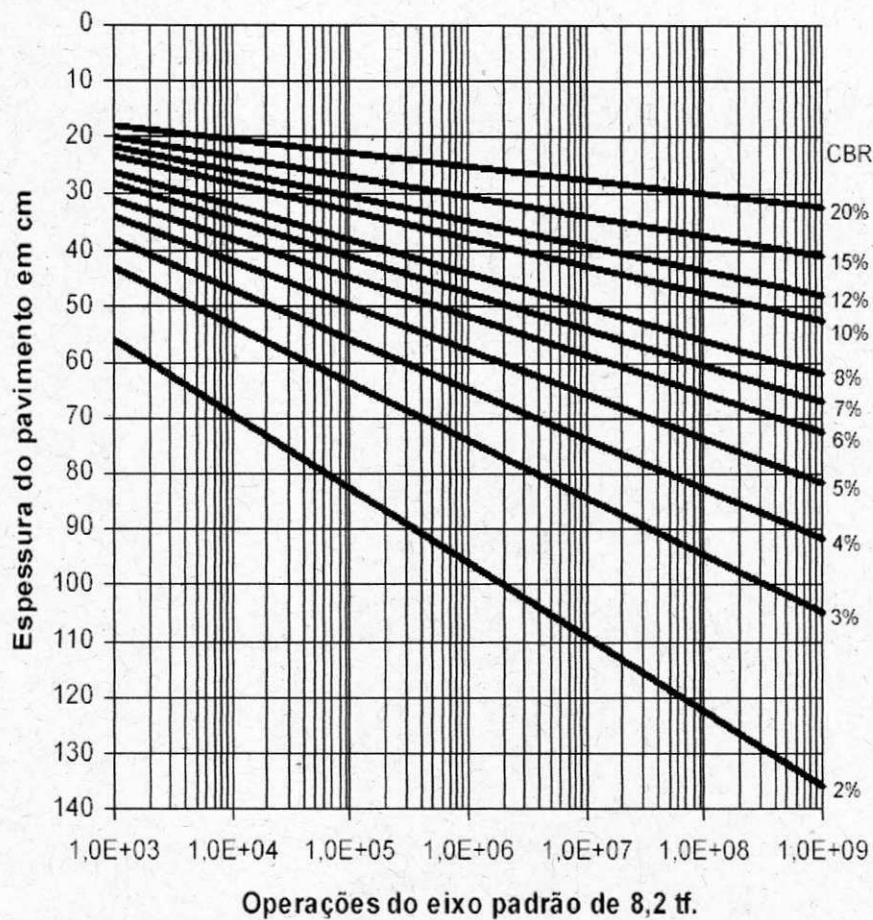
DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

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:

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

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 3 - 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 4-Coeficientes 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:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20}$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{REF} \geq H_m$$

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;

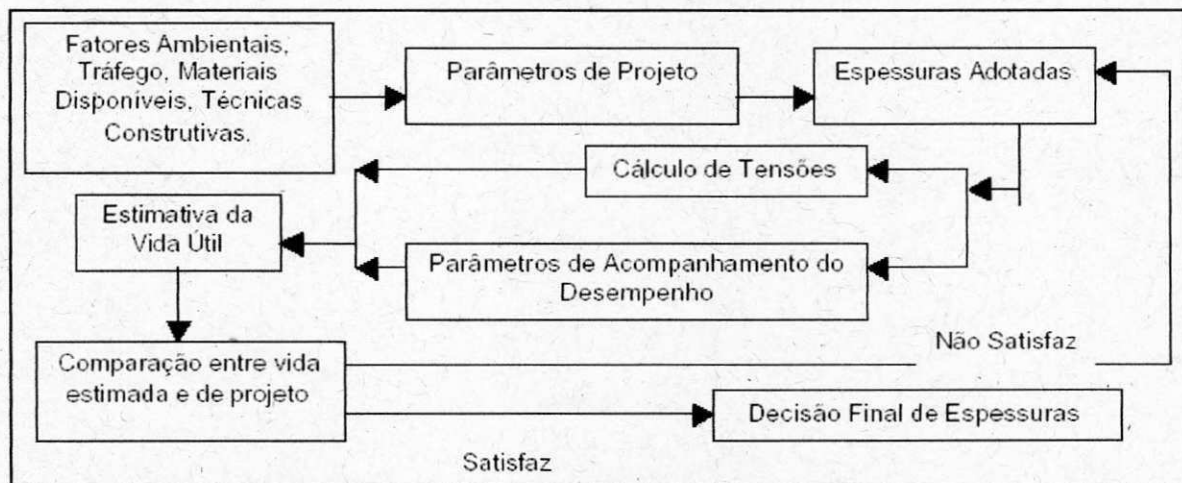
h_n = espessura do reforço do subleito;

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

3.4.1.2. 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.

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.

4. ATIVIDADE DE ESTAGIO

4.1. PRIMEIRA ETAPA – acompanhamento de ensaios realizados em laboratório.

Ensaio Realizados em laboratório foram desenvolvidas 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.

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.



Figura 4 – Extração de Corpo de Prova

4.2. SEGUNDA ETAPA - Duplicação e Restauração da Rodovia BR-101 - Estudo de Caso

4.2.1. Características do Trecho

O trecho em estudo trata-se da duplicação e restauração da rodovia BR-101 financiada pelo governo Federal. O trecho em análise durante todo o período de estágio limita-se entre o Km 74,1 PB até o Km 129 PB divisa com Pernambuco Km 0,0 PE.

O projeto de pavimentação do trecho foi elaborado de acordo com as recomendações do DNIT. Levando-se em consideração fatores como: tipo de tráfego, drenagem, facilidades de execução, solos locais.

4.2.2. Serviços executados na segunda etapa do estagio

Os serviços de terraplanagem foram realizados de acordo com o projeto em conformidade com as normas do DNIT. Em alguns trechos da rodovia a ser duplicado foi observado a presença de solo coesivo, onde estes recebem um tratamento especial com monitoramento por meio de instrumentos específicos. Após o processo de tratamento da sub-base (3º camada final) executou-se a aplicação da camada de concreto compactado com rolo (CCR).



Figura 5 – Tratamento do solo

O CCR, também chamado de concreto magro, é um concreto seco de consistência dura, sua aplicação é feita por caçambas, carregadas na usina e levadas ao local de aplicação, onde são lançadas nas máquinas vibro-acabadoras e compactadas por rolos compressores devido a sua fácil trabalhabilidade. Após a compactação é feita um salgamento sob a camada de CCR, ou seja, a pintura de ligação mais uma fina camada de areia evitando o contato direto entre dois tipos de concreto.



Figura 6 – Aplicação do CCR

A sub-base serve como suporte uniformizador das placas de concreto, bloqueando as pressões decorrentes da variação volumétrica, que ocorre no solo do subleito, evitando assim possíveis fissuras e ruínas.

Antes da aplicação da placa de concreto é necessário no mínimo um tempo de cura de 7 dias da camada de CCR. Passado esse período, procede-se o lançamento da placa de concreto que é realizado da seguinte forma:



Figura 7 – preparação do concreto na usina do 2º BEC

O concreto é carregado na usina do 2º Batalhão de Engenharia de Construção (2º BEC) em caminhões basculantes devidamente lonados, evitando a perda de água e levado ao local de aplicação. Ao descarregar o caminhão é feito o ensaio de abatimento, o mesmo realizado na usina, e o controle tecnológico com moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos para a análise da compressão e a resistência a tração na flexão respectivamente, que devem estar de acordo com o especificado em projeto e as normas técnicas.

Descarregado o concreto em frente a maquina pavimentadora, o mesmo é espalhado com o auxilio da escavadeira, para uma melhor distribuição por toda a largura prevista em projeto que é de 8,20 m (oito metros e 20 centímetro).



Figura 8 – descarregamento do concreto

A maquina pavimentadora é composta por virbradores, forma deslizantes, régua e dispositivos que auxiliam a implantação das barras de transferências e de ligação . Após a aplicação do concreto, através da maquina pavimentadora, é feito a texturização com vassouras de fios de nylon rigidos em seguida a aplicação de aditivos para acelerar a cura.

De seis a oito horas após a aplicação do concreto é realizado o corte das juntas transversais e longitudinais com o emprego de uma serra circular dotada de disco diamantado. De acordo com a descrição do projeto a profundidade da ranhura é de 12mm e a abertura da ranhura é de 6mm. O espaçamento entre as juntas transversais é de 6m e as juntas longitudinais são de 3,5m.

Nas juntas transversais é implantada as barras de transferências que tem a função de transferir à placa seguinte certa porcentagem da carga atuante em um dos lados da junta transversal evitando ou diminuindo a possibilidade de formação de degraus entre as placas. Nas juntas longitudinais é implantada as barras de ligação permitindo a ligação das faixas longitudinais contínuas

de concretagem, a união colabora na transferência de carga entre as placas vizinhas, aliviando as tensões na região da junta.



Figura 9 – Barra de Transferência

O acostamento e retornos são construídas em pavimento flexível, composta de 28cm de brita graduada na base e o revestimento de 4cm de CBUQ. Sua aplicação é feita através da máquina vibro-acabadora e compactada com rolo compressor.



Figura 10 – execução do acostamento

A drenagem é uma das etapas fundamentais para a execução do projeto de pavimentação evitando problemas gerados pelo curso das águas principalmente em épocas de chuvas. À medida que se seguia a construção das placas de concreto se aplicava os dispositivos drenantes. A drenagem é feita de acordo com as necessidades solicitadas ao local como especificado em projeto, sendo aplicada de forma interna ou de forma externas. Os dispositivos aplicados são:

- Sarjetas de canteiro central;
- Valetas de proteção de aterro e de corte;
- Drenos profundos e superficiais;
- Bueiros tubulares e celulares;
- Dissipadores de energia;
- Descida d'água.



Figura 11 – sarjeta de canteiro central

Para os taludes que se encontram nas laterais da rodovia são feitas plantações de grama evitando possíveis erosões.

4.3. Patologias

No decorrer da aplicação da placa de concreto foram detectados patologias tais como fissuras e até mesmo trincas. Para a solução do problema foram feitas análises dos agregados miúdos e graúdos com também da água de amassamento. De acordo com os ensaios todos os agregados e a água estavam em conformidade com a norma.



Figura 12 – Trinca no pavimento

Numa segunda análise do problema foram feitas modificações no traço do concreto utilizado, porém, as retrações persistiram, restando apenas a análise do cimento. Tal análise consiste desde a extração em jazida até a fase final da fabricação. A análise confirmou que os problemas de retração foi devido a qualidade do cimento, causando a retração hidráulica, ou seja, perda rápida de água no concreto.

5. CONCLUSÃO

Com o crescimento acelerado da economia e da tecnologia nos dias atuais, o setor de transporte tem tido crescimentos consideráveis e em conseqüência, as necessidades de melhoria nas rodovias tem aumentado. A duplicação da rodovia BR-101 proporciona para o setor de transporte condições satisfatória de velocidade, segurança, conforto e economia no transporte de pessoas e mercadorias.

O desempenho de um pavimento vem sendo avaliado atualmente sob diversos aspectos funcionais e estruturais. Atualmente são empregados dois tipos de pavimentos o flexível e o rígido. O pavimento flexível é de fácil aplicação, porem requer uma maior manutenção, proporcionando transtorno no deslocamento de pessoas e mercadorias.

O pavimento rígido tem uma maior durabilidade e sua manutenção é reduzida comparada com pavimento flexível, embora seu custo de implantação seja mais elevado.

Apesar da escolha de um material de longa durabilidade obtendo uma rodovia com maior vida útil é necessário um fator que requer uma atenção especial, o sistema de Drenagem, e com isso, evitando possíveis alagamentos que podendo causar acidentes.

Em síntese o estágio realizado foi de grande importância para se colocar em prática os conhecimentos adquiridos durante o curso de engenharia civil, proporcionando um aprofundamento nos conhecimentos na área da mecânica dos pavimentos, através das práticas realizadas no laboratório e como também através da oportunidade de acompanhar a construção da duplicação da rodovia BR-101.

O estagio mostrou o inicio de uma carreira profissional despertando um maior interesse em aprofundar-se no conhecimento da mecânica dos pavimentos. As patologia encontradas aguçam a necessidade da busca de resoluções de problemas em que o engenheiro enfrenta no dia-a-dia desta profissão, transparecendo a criatividade, conhecimentos técnicos, experiência e bom senso.

6. 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** - Amostras 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.*

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.

PITTA, Marcio Rocha. Concreto rolado; aplicações em pavimentação. 7.ed. São Paulo, ABCP, 1998. 32p. (ET – 10).

PITTA, Marcio Rocha. Construção de pavimentos de concreto simples. 3.ed. São Paulo, ABCP, 1998. 88p. (ET – 81).