

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

DIEGO ARTHUR HARTMANN

ANÁLISE DOS DEFEITOS E DA IRREGULARIDADE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
A PARTIR DO GUIA DA AASHTO DE 2004

Ijuí

2009

DIEGO ARTHUR HARTMANN

**ANÁLISE DOS DEFEITOS E DA IRREGULARIDADE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS A PARTIR DO
GUIA DA AASHTO DE 2004**

**TRABALHO ACADÊMICO
PARA A APROVAÇÃO NA DISCIPLINA
UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT

IJUÍ

2009

RESUMO

A construção de pavimentos envolve custos elevados, devido aos materiais e grande mão-de-obra envolvida. Faz-se importante o estudo de alternativas construtivas que venham a trazer benefícios a vida útil dos pavimentos. Dentre os diversos fatores importantes na determinação da vida útil dos pavimentos, tem-se o projeto estrutural. O mecanismo de degradação do pavimento depende principalmente das espessuras das camadas, assim como de sua rigidez. Estes dois fatores determinam a maneira como será distribuída às tensões atuantes, camadas mais rígidas e espessas elevam o grau de abertura do cone de tensões e reduzem os esforços solicitantes nas camadas subjacentes. Esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência do tipo de ligante asfáltico e das espessuras e módulos das camadas no trincamento por fadiga, no afundamento de trilha de roda e na irregularidade longitudinal de um pavimento flexível, através do programa MEPDG da AASHTO. Determinou-se então as variáveis de estudo como sendo a espessura do revestimento (5, 7,5 e 10 cm), a espessura da base (15, 30 e 45 cm), o módulo da base (150, 300 e 450 MPa) e o tipo de ligante (PG 64-22 e PG 76-22). Após determinadas as variáveis, foram definidas as constantes que seriam inseridas no programa, implementando-se então 54 casos no total. Após realizadas as simulações os dados foram tabelados e analisados graficamente e estatisticamente, procurando encontrar as variáveis de maior influência nas propriedades mecânicas e de trafegabilidade do pavimento. Notou-se de maneira geral que os resultados ficaram separados em três grupos de dados, de acordo com os módulos das bases. Verificou-se que módulos de base maiores apresentavam defeitos de menor grandeza, e a mesma lógica pode ser conferida para espessuras da base. O ligante de PG 76-22 influenciou para a maioria dos casos, desempenhos superiores aos do ligante de PG 64-22. Para as estruturas simuladas com o ligante de PG 64-22, notou-se que a estrutura que apresentou melhor desempenho foi a com base de 450 MPa e espessura de 30 cm. Quanto ao desempenho a fadiga, verificou-se que todas as estruturas com bases de módulo de 150 MPa apresentaram elevados graus de trincamento, quando comparados as outras misturas, as quais apresentaram valores menor variabilidade. A análise estatística pode comprovar o que foi verificado nos gráficos, ressaltando a importância do módulo da base no desempenho geral do pavimento. Verificou-se também que a espessura do revestimento foi a segunda maior variável de influência para os resultados de irregularidade e afundamento de trilha de roda, visto que com espessuras mais elevadas do revestimento a estrutura se tornava mais susceptível a deformações plásticas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Deformação devido à aplicação de carga estática	14
Figura 2: Deformação devido à aplicação de pulsante (veículo)	14
Figura 3: Visualização das linhas imaginárias.....	17
Figura 4: Faixas de variação do IRI.....	21
Figura 5: Conceito de confiança para IRI.....	31
Figura 6: Trincamento estimado a diferentes níveis de confiança.....	32
Figura 7: Níveis de confiança para restaurações e pavimentos novos.....	32
Figura 8: Variáveis a serem analisadas.....	34
Figura 9: Diagrama de blocos representando o método da AASHTO.....	35
Figura 10: Tela inicial do programa.....	36
Figura 11: Composição dos agregados	38
Figura 12: Tela de referência do programa MEPDG.....	39
Figura 13: Janela de informações gerais	41
Figura 14: Parâmetros de análise	43
Figura 15: Informações gerais de tráfego.....	45
Figura 16: Ajuste mensal do tráfego	46
Figura 17: Distribuição de veículos por classe	47
Figura 18: Distribuição de tráfego pelo horário do dia.....	48
Figura 19: Fatores de crescimento do tráfego	49
Figura 20: Relação passagem cobertura.....	50
Figura 21: Configurações de eixo.....	51
Figura 22: Espaçamento entre os eixos.....	52
Figura 23: Janela inicial para o item clima	53
Figura 24: Escolha da estação climática	53
Figura 25: Definição da estrutura.....	54
Figura 26: Propriedades da mistura asfáltica	55

Figura 27: Definição do ligante.....	56
Figura 28: Propriedades gerais da camada asfáltica	57
Figura 29: Adicionando camada de base	58
Figura 30: Comparações dos resultados de ATR.....	62
Figura 31: Dados estatísticos do ATR	63
Figura 32: Comparações dos resultados de TF	64
Figura 33: Dados estatísticos do TF.....	65
Figura 34: Comparações dos resultados de IRI.....	66
Figura 35: Dados estatísticos do IRI	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

ANOVA – *Analysis of Variance.*

ATR – *Afundamento na Trilha de Roda.*

BPR – *Bureau of Public Roads.*

CBR – *California Bearing Ratio.*

DNER – *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.*

EB – *Espessura da Base.*

ER – *Espessura do Revestimento.*

HDF – *Hourly Distribution Factors*

HRB – *Highway Research Board.*

IG – *Índice de Grupo.*

LTRC – *Louisiana Transportation Research Center.*

MB – *Módulo da Base*

MEPDG – *Mechanical-Empirical Pavement Design Guide.*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program.*

PG – *Performance Grade.*

PSR – *Present Serviceability Rating.*

TF – Trincamento por Fadiga

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Tema da Pesquisa	9
1.2 Delimitação do Tema	9
1.3 Formulação da Questão de Estudo	9
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo Geral	9
1.4.2 Objetivos Específicos	9
1.5 Justificativas	10
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1 Mecanismos de Degradação Estrutural de Pavimentos Flexíveis.....	12
2.1.1 Deformações Permanentes	13
2.1.2 Trincamento por Fadiga	15
2.2 Irregularidade	15
2.2.1 Visão Geral Sobre a Irregularidade.....	16
2.2.2 Índice de Irregularidade Internacional	20
2.2.3 Demais Índices	21
2.3 Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.....	22
2.3.1 Métodos Empíricos	22
2.3.2 Métodos Mecanísticos.....	24
2.3.3 Guia da AASHTO 2002	26
3 METODOLOGIA	33
3.1 Classificação da Pesquisa.....	33
3.2 Planejamento da Pesquisa	33
3.3 Materiais e Equipamentos	34

4 IMPLEMENTAÇÃO	35
4.1 Introdução ao Guia da AASHTO	35
4.1.1 Método de Análise	35
4.1.2 Noções Básicas.....	36
4.2 Utilizando o Programa MEPDG	37
4.2.1 Definição dos Parâmetros de Projeto	37
4.2.2 Implementação no Programa.....	39
4.3 Notas Finais.....	59
5 RESULTADOS	60
5.1 Afundamento de Trilha de Roda	61
5.2 Trincamento por Fadiga	63
5.3 Índice de Irregularidade Longitudinal.....	65
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
6.1 Conclusões	68
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	70
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA DA PESQUISA

O tema da pesquisa é: Infra-estrutura do transporte rodoviário.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa limita-se a estudar o projeto de pavimentos flexíveis.

1.3 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO

Qual a influência do tipo de ligante asfáltico, da espessura e módulo da base e da espessura do revestimento, no desempenho de um pavimento flexível, a partir do método da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) 2004?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Verificar a influência do tipo de ligante asfáltico e das espessuras e módulos das camadas no desempenho de um pavimento flexível.

1.4.2 Objetivos Específicos

Implementar o projeto de um pavimento flexível no programa MEPDG (*Mechanical-Empirical Pavement Design Guide*);

Verificar a influência do tipo de ligante asfáltico e das espessuras e módulos das camadas no desempenho a fadiga;

Verificar a influência do tipo de ligante asfáltico e das espessuras e módulos das camadas na deformação permanente de um pavimento flexível;

Verificar a influência do tipo de ligante asfáltico e das espessuras e módulos das camadas no índice de irregularidade longitudinal de um pavimento flexível.

1.5 JUSTIFICATIVAS

Os transportes e o desenvolvimento econômico estão diretamente relacionados, visto que os transportes possibilitam o melhor aproveitamento de uma região. A preservação e a ampliação de nossa malha rodoviária pavimentada é uma das principais condições para o grande salto de desenvolvimento que o país precisa. Também é importante lembrar que a má conservação das vias acarreta na maior ocorrência de acidentes, maior tempo gasto, consumo elevado de combustível, entre outros fatores.

Dentre os diversos fatores importantes na determinação da vida útil dos pavimentos, tem-se o projeto estrutural. Um pavimento projetado adequadamente é capaz de suportar as cargas advindas do tráfego, transferindo os esforços solicitantes para as camadas subjacentes, prevenindo então danos causados devido ao deslocamento demasiado, como a ruptura ou deformações permanentes (FRANCO, 2007).

O mecanismo de degradação do pavimento depende principalmente das espessuras das camadas, assim como da rigidez das mesmas. Estes dois fatores determinam a maneira que será distribuída às tensões atuantes, onde camadas mais rígidas e espessas elevam o grau de abertura do cone de tensões e reduzem os esforços solicitantes nas camadas subjacentes.

Sendo assim, para que um pavimento seja estruturalmente eficiente, é necessário que haja uma relação intrínseca entre as diferentes camadas do mesmo, assim como possuir espessuras e rigidezes adequadas.

De acordo com Huang (2003), os métodos de projeto de pavimentos asfálticos podem ser classificados em cinco categorias: métodos empíricos, com ou sem ensaio de

resistência do solo; métodos que limitam a ruptura por cisalhamento; métodos que limitam a ruptura por deformação vertical; métodos fundamentados no desempenho de pavimentos em pistas experimentais; e métodos mecanístico empíricos.

Atualmente diversas instituições pesquisam e tentam desenvolver métodos modernos e analíticos, visando ao máximo excluir a parcela empírica contida nos métodos atuais. Os modelos obtidos no país através de regressões de dados obtidos em ensaios laboratoriais acabam não representando a realidade em campo, pois necessitam da utilização de um fator de calibração (*shift-factor*), exato ponto onde se encontra o empirismo das equações (FRANCO, 2007).

Recentemente a AASHTO desenvolveu por meio da utilização do programa NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) 1-37^a, um novo guia de dimensionamento de pavimentos (*AASHTO Design Guide 2002*), que não é apenas uma atualização dos guias anteriores, e sim uma reestruturação completa na conceituação, com a incorporação de soluções mecanísticas para a análise de pavimentos asfálticos.

O programa MEPDG inserido no Guia da AASHTO é a ferramenta mais atual e poderosa para dimensionamento de pavimentos em geral, fundamentado em critérios mecanísticos-empíricos (PETERLINI et al., 2008).

O programa requer uma interação manual do projetista, onde uma estrutura de teste é montada e o programa analisa se esta cumpre os critérios de desempenho estabelecidos pelo projetista, caso estes critérios não sejam cumpridos o programa permite que o projetista faça uma reestruturação até que estes critérios sejam satisfeitos.

Por fim, ressalta-se que os gastos com manutenção e reconstrução precoce dos pavimentos são elevados e inaceitáveis, visto que podemos dispor de diversos equipamentos de laboratório e campo que permitam uma análise aprofundada dos materiais e métodos de projeto teórico-empíricos. Com isto torna-se possível a investigação de novas alternativas para as tecnologias e materiais empregados nos pavimentos, possibilitando pavimentos mais duradouros e, conseqüentemente, menores gastos em restauração.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A degradação de pavimentos está associada a várias patologias, dentre elas:

- Deformações permanentes;
- Trincamento por fadiga;
- Trincamento por retração térmica;
- Perda de adesão agregado/ligante; e,
- Suscetibilidade a umidade.

As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as três últimas estão mais relacionadas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes.

As misturas asfálticas são freqüentemente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimentos. Os mais severos defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis, se refletem no revestimento e permitem identificar dois modos distintos de solicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material (associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas) e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (PINTO, 1991).

2.1.1 Deformações Permanentes

É coerente a observação de que o defeito mais freqüente nos pavimentos flexíveis, no Brasil, é o trincamento da camada superior de concreto asfáltico. O trincamento se desenvolve pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares, geralmente bastante deformáveis elasticamente.

Porém também é comum o acontecimento de outro defeito, conhecido como deformação permanente. Afundamento de trilha de roda (ou deformação permanente) resulta do acúmulo de pequenas tensões não recuperáveis, advindas de repetidas aplicações de cargas.

Esses afundamentos, além de prejudicarem a serventia das estradas, são também indesejáveis sob aspecto da segurança, porque a água pode depositar-se nessas áreas e dificultar a dirigibilidade dos veículos.

De maneira geral, a proporção de qualquer deformação ocorrida no revestimento devido à viscosidade do ligante, aumenta devido à temperatura e ao período de carregamento. Tal fato pode ser verificado na Figura 1 e Figura 2.

A Figura 1 apresenta o resultado da aplicação de uma carga estática. Nota-se que a deformação resultante da aplicação da carga mostra uma resposta elástica instantânea, seguida por um aumento gradual na deformação com o tempo, até o carregamento ser removido. A alteração gradual na deformação ocorre devido às propriedades viscoelásticas do ligante. Com a remoção da carga, a deformação elástica é recuperada instantaneamente e parte se recupera com o passar do tempo. Nota-se também que parte da deformação é mantida, isto se deve ao comportamento elástico do material (WHITEOAK, 1990).

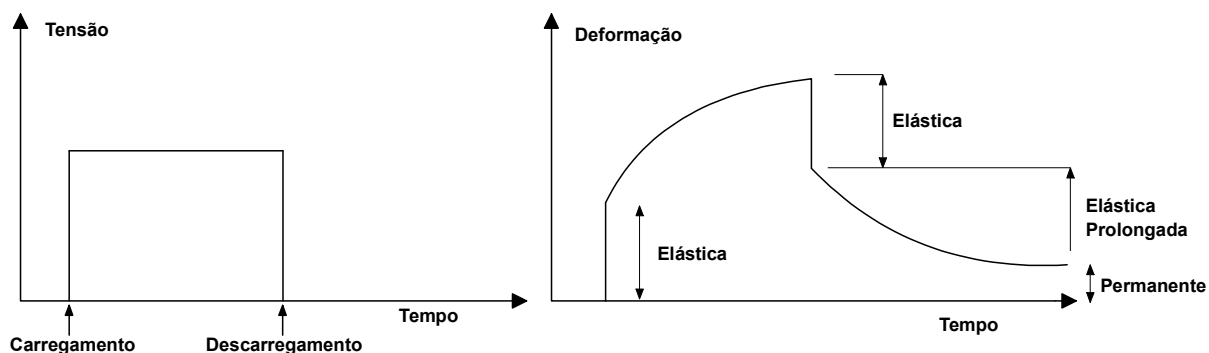


Figura 1: Deformação devido à aplicação de carga estática

Fonte: WHITEOAK, 1990

A resposta da deformação do pavimento devido a um carregamento pulsante (ex. veículo em movimento) encontra-se na Figura 2. Nota-se que ao fim do carregamento houve uma deformação não recuperável, que por menor que possa parecer para único pulso, ela se tornará uma enorme deformação ao somatório de milhares de aplicações de carga.

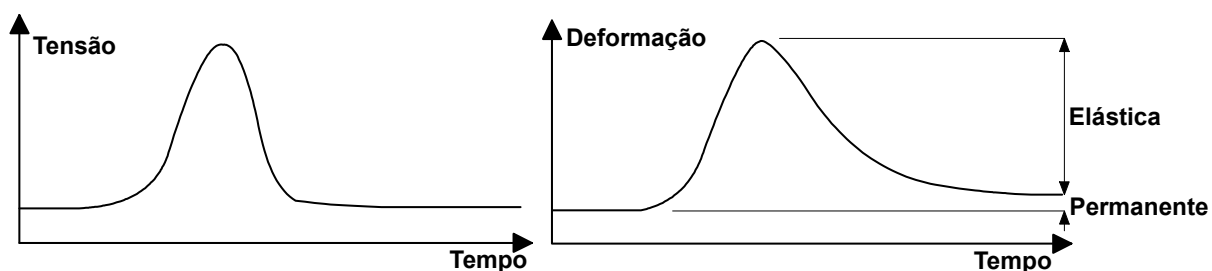


Figura 2: Deformação devido à aplicação de pulsante (veículo)

Fonte: WHITEOAK, 1990

A deformação permanente pode ocorrer em diversas circunstâncias, como problemas no subleito, base com compactação precária, dosagem errônea da mistura asfáltica, entre outros. Segundo Yoder e Witzak (1975), deformação permanente na camada de revestimento é causada devido ao agrupamento dos agregados (densificação) ou devido ao escorregamento de massa (deslocamento horizontal da massa asfáltica).

Brown et al. (2001) salientam que o deslocamento de massa tende a ocorrer normalmente nos primeiros 10cm do revestimento, podendo ocorrer em maiores profundidades caso materiais de baixa qualidade sejam usados.

O escorregamento de massa usualmente surge gradativamente com o aumento das aplicações de carga, mostrando-se na maioria das vezes como depressões nas trilhas de roda algumas vezes acompanhadas por pequenas elevações nas margens externas.

2.1.2 Trincamento por Fadiga

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e deformações dos pavimentos asfálticos, diminuindo seu desempenho. A repetição das cargas do tráfego, associada à elevada flexibilidade das camadas de base e sub-base granulares, tem caracterizado o fendilhamento por fadiga como o principal defeito que ocorre nos pavimentos rodoviários brasileiros (PINTO, 1991).

O trincamento por fadiga é comumente associado a cargas muito elevadas para a estrutura do pavimento ou o número de repetições para dada carga ultrapassam as utilizadas no projeto. O problema é muitas vezes agravado devido à drenagem inadequada, que faz com que as camadas do pavimento se tornem saturadas e percam rigidez e resistência.

O trincamento por fadiga também pode levar ao surgimento de panelas (aberturas no revestimento que expõem a base), quando os componentes individuais do revestimento se separam do material adjacente e são tragados pelo tráfego. Panelas normalmente ocorrem quando o trincamento do revestimento encontra-se em um estágio muito avançado e também quando as camadas de revestimento forem relativamente finas.

2.2 IRREGULARIDADE

A principal idéia na concepção de uma rodovia é garantir que esta venha a proporcionar trafegabilidade em todos os momentos, visando também que a capacidade de oferecer qualidade no conforto e segurança no tráfego dos veículos seja cumprida.

Do ponto de vista do usuário, o estado do revestimento é o mais importante, pois os defeitos e irregularidades desta camada são percebidos diretamente, uma vez que afetam seu conforto (BERNUCCI, 2006)

Uma pesquisa realizada pelo LTRC (*Louisiana Transportation Research Center*), nos Estados Unidos, verificou que o fator mais relevante para os usuários de uma rodovia é a condição do pavimento (irregularidade), com 36% das opiniões, ficando a frente de segurança com 22%, e escoamento do tráfego com 16% (LTRC, 2009).

A irregularidade longitudinal é definida como o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência de projeto geométrico.

A irregularidade longitudinal inicial é um dos principais indicadores de qualidade de construção de pavimentos, pois para alcançar valores iniciais satisfatórios é necessário muita dedicação e conhecimento para controlar os diversos fatores que controlam a irregularidade (graduação precisa e uniformidade das misturas de asfalto e concreto, linha de pista estável e suave, etc.) por parte da empresa pavimentadora (SMITH, 1997).

Tendo isto em vista, torna-se perceptível a necessidade de maneiras de melhor compreender esta propriedade tão importante para os pavimentos.

2.2.1 Visão Geral Sobre a Irregularidade

2.2.1.1 Perfis

Um perfil é uma fatia bi-dimensional sobre uma linha imaginária, disposta sobre um plano com cota variável. Perfis tomados sobre o plano transversal do pavimento apresentam a superelevação, a inclinação da rodovia e ainda afundamentos e outros defeitos. Já os perfis longitudinais apresentam o greide, a textura, e a irregularidade por exemplo (SAYERS, M.W; KARAMIHAS, S.M; 1998).

O perfil pode ser medido seguindo qualquer linha imaginária do pavimento. Se uma medição for repetida, os mesmos valores só serão idênticos se a mesma linha imaginária for seguida. A Figura 3 abaixo apresenta um exemplo de diversas linhas de medição.

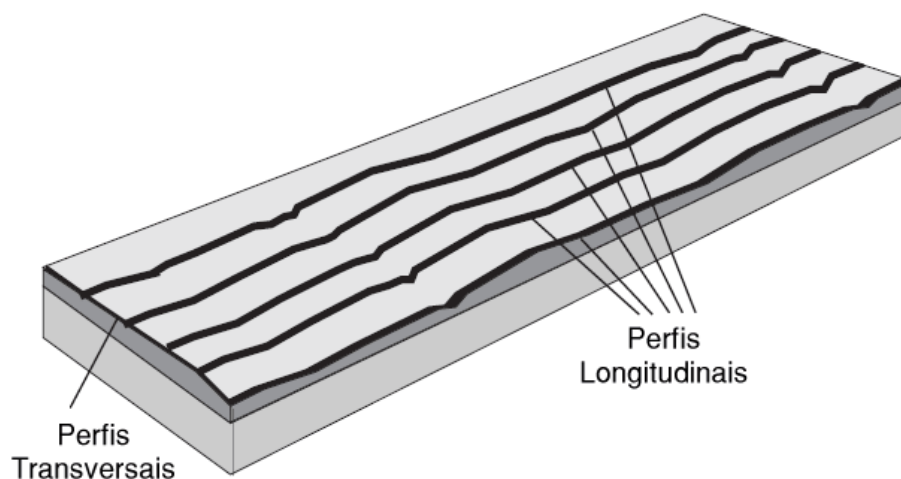


Figura 3: Visualização das linhas imaginárias.

Fonte: Sayers e Karamihas (1998).

Sendo assim, é possível obter inúmeros perfis para a rodovia caso cada um siga uma diferente linha imaginária, mas frequentemente são feitas duas medidas para cada pista, ambas sobre as trilhas de roda. Para resultados mais detalhados um maior número de medidas pode ser realizado.

Nota-se que a linha possui espessuras variáveis dependendo do equipamento que está sendo utilizado. Por exemplo, uma medição utilizando um equipamento com sistema ultrassônico pode dar resultados de alguns centímetros de largura, enquanto uma medição realizada com um sistema a laser pode oferecer resultados com milímetros de largura.

Por fim, é importante ressaltar que existe um “perfil verdadeiro”, porém os meios de se avaliar este perfil podem variar dependendo do caso. Sayers e Karamihas(1998) mostra duas situações distintas deste conceito. A primeira sendo o caso da construção de uma ponte, onde o projetista deseje o perfil de ambos os lados da ponte, com pontos a cada 3 metros de distância e alguns milímetros de diâmetro. A segunda seria o caso de uma análise computacional, focada na verificação da textura. A análise necessitaria de pontos espaçados a 1mm em uma distância de 1 metro, com uma resolução de 0,1 mm. Ambos os conjuntos de dados fazem parte de um “perfil verdadeiro”, cada um para seu uso específico.

2.2.1.2 Medição da Irregularidade no Passado

Desde que as rodovias e autoestradas começaram a ser construídas, os usuários sempre estiveram cientes da importância do seu grau de conforto ao trafegar (HVEEM apud GILLESPIE et. al., 1992). Antes mesmo, na Roma antiga por exemplo, pode-se notar a preocupação com a irregularidade nas vias construídas para as carruagens antigas.

Com o início da construção de veículos movidos a gasolina, essa preocupação tornou-se cada vez mais relevante, uma vez que a quantidade de pessoas que passaram a utilizar esse meio cresceu exponencialmente, e a velocidade das viagens também teve um grande acréscimo, influenciando assim a construção de pistas cada vez menos irregulares.

A necessidade da quantificação da irregularidade para fins de estudo e maior compreensão, fizeram com que durante os primeiros anos surgissem métodos simples e rudimentares para se quantificar essa propriedade.

Um equipamento semelhante a uma régua de pedreiro, conhecido como “*Viagraph*”, foi um dos primeiros métodos para se obter a irregularidade do pavimento. Interessantemente o resultado era medido em desvio por distância (digamos m/km), denotação que se tornou a base da medida de irregularidade (GILLESPIE, 1992). Porém a execução das medidas era muito lenta, e existia grande dificuldade de permanecer avançando com o equipamento rente a pista para realizar as medições.

Diversos outros equipamentos foram surgindo durante os anos, como o “*Via-Log*” que media o movimento da suspensão de um veículo preparado, o *Roughometer* (medidor de irregularidade em português) do BPR (*Bureau of Public Roads*) e o CHLOE (acrônimo referente aos nomes dos criadores) desenvolvido no fim da década de 50, este último sendo uma referência histórica por ser o primeiro instrumento a utilizar o conceito de capacidade de serventia do pavimento.

Apesar da maioria dos equipamentos de medição de irregularidade da época usarem a quantificação polegadas por milha, os resultados obtidos nunca eram idênticos entre um método e outro, e até mesmo os resultados entre os mesmos métodos eram muito variáveis.

Então a NCHRP iniciou no fim dos anos 70 uma extensa pesquisa a fim de se uniformizar a calibração dos equipamentos, de maneira a possibilitar a comparação entre os resultados obtidos através diversos métodos. Simultaneamente o Banco Mundial buscava um pensamento semelhante nos países para os quais fazia empréstimos vinculados ao desenvolvimento dos sistemas rodoviários.

O resultado destas pesquisas foi a padronização e a identificação de uma nova escala conhecida como IRI (*International Roughness Index*) (GILLESPIE, 1992; BERNUCCI, 2006).

De acordo com Gillespie (1992) para a identificação desta nova escala diversos fatores foram considerado, são estes:

- O índice deveria estar relacionado a resposta de vibração de veículos motorizados, visto que a maioria dos índices de irregularidade estavam ligados de alguma maneira a este fator.
- A escala deveria estar matematicamente ligada ao perfil da rodovia, de maneira a ser estável com o tempo.
- Deveria ser possível de ser medida pelo maior número de equipamentos existentes.
- Deveria ser de fácil reprodução, de maneira que o índice pudesse ser reproduzido de maneira confiável em diversos lugares do mundo.

2.2.2 Índice de Irregularidade Internacional

De acordo com Gillespie (1992), o índice de irregularidade internacional é uma escala para a irregularidade baseada na resposta de um veículo genérico motorizado à irregularidade do pavimento. Seu valor é determinado obtendo-se uma medida precisa e compatível do perfil da rodovia, processando essa informação com um algoritmo que simula a maneira que um veículo de referência responderia aos dados de irregularidade, e acumulando o movimento da suspensão.

O IRI foi o primeiro índice de irregularidade amplamente utilizado onde o método de análise visava o uso de diversos tipos de perfilômetros. Como o IRI é uma propriedade do “perfil verdadeiro” ele pode ser mensurado com qualquer tipo de perfilômetro. As equações de análise foram desenvolvidas de maneira a minimizar os efeitos de alguns parâmetros de medida dos perfilômetros, como o intervalo de amostras por exemplo (SAYERS, M.W; KARAMIHAS, S.M; 1998).

Porém devido a necessidade destas correlações e diversas outras limitações, a utilização de equipamentos de tipo resposta perdeu muito a força nas últimas décadas em países desenvolvidos, apesar de ainda serem muito utilizados no Brasil.

A *General Motors* desde 1980 disponibiliza instrumentos de medição inerciais. Estes instrumentos são bem semelhantes aos de tipo resposta, e trabalham com os mesmos três elementos, ponto de referência, altura em relação ao ponto de referência, e distância.

Uma das maiores vantagens deste método é não necessitar de correlações, o sistema processa os dados advindos do acelerômetro transformando o em deslocamento vertical, com a correção das medidas feitas tem-se um perfil com bastante semelhança ao perfil verdadeiro (BARELLA, 2004).

O IRI é a medida de irregularidade que vem sendo utilizada como ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços em alguns países. A Figura 4 apresenta um comparativo dos valores de IRI para várias situações.

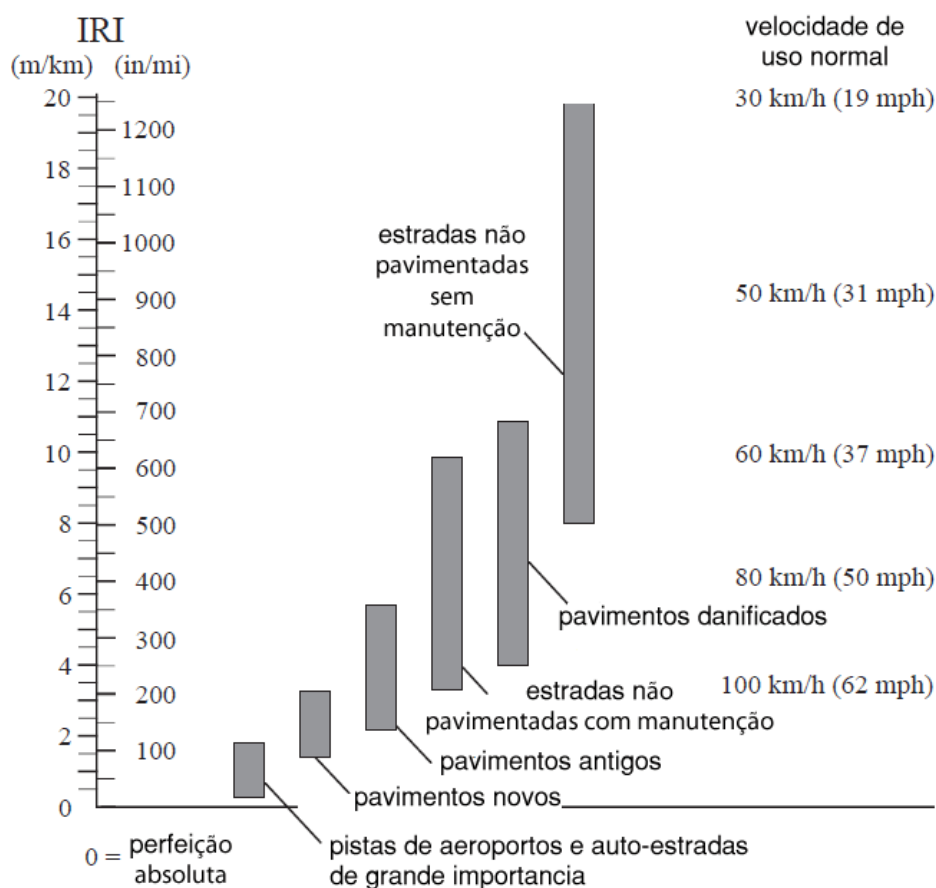


Figura 4: Faixas de variação do IRI.

Fonte: Sayers e Karamihas (1998).

2.2.3 Demais Índices

Apesar desta pesquisa ser voltada apenas na utilização do IRI, existem outros índices e quocientes relacionados a irregularidade que merecem ser citados, como o Quociente de Irregularidade (QI) e o PSR (*Present Serviceability Rating*). Mais informações sobre estes índices podem ser encontradas em Sayers e Karamihas (1998).

2.3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Dimensionar um pavimento significa determinar as espessuras das camadas que o constituem de forma que estas camadas resistam e transmitam ao subleito as tensões a elas aplicadas devido à ação do tráfego, sem levar o pavimento à ruptura ou a deformações e a desgastes excessivos (GRECO, [200-?]).

Os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis são divididos em dois grupos: Empíricos e Mecanísticos. Há ainda alguns autores que dividem em três tipos, incluindo métodos semi-empíricos, porém esta divisão extra acaba não sendo muito encorajada. A seguir os três métodos serão tratados individualmente, expondo-se as vantagens e desvantagens impostas por cada.

Os métodos de projeto existentes foram, via de regra, concebidos de duas maneiras distintas: com base no desempenho ao longo do tempo, obtido através de experiências de campo (modelos empíricos) ou a partir de teoria elástica considerada adequada para a interpretação do fenômeno (modelos racionais). Alguns métodos apresentam ainda uma associação de modelos empíricos com modelos racionais (SEVERI et al., 1998).

2.3.1 Métodos Empíricos

Os métodos empíricos são aqueles fundamentados na experiência acumulada e correlacionam o desempenho do pavimento com algumas propriedades dos materiais utilizados na construção. Consistem de ábacos, tabelas ou fórmulas para o dimensionamento que refletem o desempenho observado em alguns pavimentos em serviço. São correlações diretas entre alguns parâmetros estruturais e de tráfego e a vida de serviço esperada (BEZERRA, 2004; SPECHT, 2008).

Os métodos de dimensionamento empíricos possuem as seguintes vantagens:

- Utilização fácil e rápida, o que é conveniente para pré-dimensionamento ou em aplicações rotineiras;

- São facilmente empregados, visto que os ensaios de caracterização exigidos são simples e não requerem aparelhagem sofisticada;
- Não necessita de muitos dados para a realização do projeto, os quais são de fácil aquisição;
- Reprodução de desempenho de alguns pavimentos em verdadeira grandeza, já embutindo, portanto, os efeitos do tráfego real (cargas, geometria, relação passagem cobertura, solicitações dinâmicas...) e os do intemperismo.

E as seguintes desvantagens:

- Por ser um método fundamentado em análises em trechos experimentais, são válidos apenas para regiões que possuem as mesmas condições apresentadas no trecho que lhe deu origem;
- Tem baixa precisão matemática, fator de extrema importância para se analisar os reflexos, para o desempenho, de variações nas propriedades mecânicas dos materiais, o que impede seu uso para integrar a dosagem das misturas com o projeto do pavimento, sem falar na impossibilidade de consideração de novos materiais.

Os métodos empíricos se dividem em:

- Métodos empíricos que não empregam ensaios de resistência dos solos, onde se tem como exemplos o método do índice de grupo (IG) e o método do HRB (*Highway Research Board*);
- Métodos empíricos que empregam ensaios de resistência dos solos, como o método do CBR (*California Bearing Ratio*) e o método de Hveem.

No Brasil as estruturas de pavimentos flexíveis têm sido dimensionadas a partir do método do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), que tem como base o trabalho “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*”, de autoria de Turnbull, Foster e Ahvin do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, e algumas conclusões obtidas na pista experimental da AASHTO. Foi elaborado pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza em 1966, e desde então têm sido utilizado em todo território nacional.

2.3.2 Métodos Mecanísticos

Um método de dimensionamento é dito mecanístico quando utiliza uma teoria para prever as tensões e deformações derivadas do tráfego e do meio ambiente na estrutura do pavimento, e procura compatibilizá-las com as tensões resistentes dos materiais.

São métodos que efetuam a integração de um modelo estrutural para o pavimento, modelo este relacionado estreitamente com a geração de defeitos na estrutura, com uma base experimental. Para tanto, utiliza as chamadas “funções de transferência”, que relacionam as respostas da estrutura às cargas do tráfego (tensões, deformações, deflexões) ao surgimento e à evolução dos defeitos (trincamentos e deformações plásticas) (SPECHT, 2008).

Por esse tipo de análise, tem-se um panorama de funcionamento da estrutura quando solicitada, possibilitando modificações quanto à natureza dos materiais constituintes, bem como quanto às espessuras das camadas. Ao analisar a estrutura do ponto de vista mecanístico, é possível alterá-la de modo a proporcionar um desempenho adequado de cada um dos materiais do pavimento, para que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem que a solicitação seja demasiada em uma das camadas de modo a levá-la a ruptura precoce (BEZERRA, 2004).

A tendência mundial é o estabelecimento de métodos de dimensionamento mecanísticos tanto para pavimentos flexíveis e rígidos, novos ou restaurados. Utilizam as ferramentas da análise estrutural no cálculo de tensões e deformações e determinam os mecanismos de fadiga e deformabilidade. Os parâmetros experimentais do modelo

matemático são determinados no laboratório e no campo. A dose de empirismo prende-se principalmente à correta avaliação do tráfego (MEDINA et al., 2005).

Medina *et al.* (2005) ainda explica que a concepção de um método mecanístico-empírico não é recente, porém só recentemente foi possível sua difusão na medida em que programas computacionais se tornaram disponíveis e que os equipamentos e métodos de ensaio de carga repetida foram introduzidos em vários laboratórios de pavimentação.

Segundo Peterlini et al (2008), algumas das vantagens do método mecanístico para projetos de pavimentos são:

- Criar métodos de dimensionamentos mais eficientes e de maior benefício/custo;
- Melhorar a confiabilidade dos dimensionamentos;
- Reduzir os custos do ciclo de vida;
- Incrementar suportes para alocação de recursos financeiros;
- Prognosticar modelos específicos de falhas;
- Extrapolar dados limitados de campo e laboratório;
- Aperfeiçoar a avaliação do impacto de novos carregamentos;
- Melhorar a utilização de materiais disponíveis;
- Minimizar defeitos precoces;
- Aperfeiçoar características sazonais dos dispositivos de drenagem;

- Melhorar dimensionamentos de reabilitação de pavimentos; e
- Apresentar diariamente e anualmente mudanças sazonais dos materiais, clima e tráfego nos processos de dimensionamentos.

2.3.3 Guia da AASHTO 2002

A AASHTO é uma associação norte americana mundialmente famosa por estudar os mais diversos tópicos relacionados aos transportes, dentre eles autoestradas, testes em materiais, transporte de passageiros, segurança, planejamento, entre outros.

De acordo com Peterlini et al (2008) o principal objetivo da NCHRP, Projeto I-37 A, é o desenvolvimento e entrega do Guia de Dimensionamento de Estruturas de Pavimentos versão 2002, acompanhada de um programa computacional, para adoção e distribuição pela AASHTO. A pesquisa tem perseguido este objetivo pelo desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Um guia textual para procedimentos fundamentados na tecnologia mecanística-empírica, incluindo calibração, validação e adaptação para condições locais;
- Planos materiais para implantação e serviços de treinamento para facilitar adaptações para o Guia AASHTO/2002, associados ao programa computacional;
- Estratégias para promover interesse e aceitação pela comunidade rodoviária.

As versões anteriores do guia da AASHTO serviram por cerca de quatro décadas para o dimensionamento de pavimentos, porém por diversos motivos se encoraja a utilização do novo guia, dentre elas:

- Procedimentos de dimensionamento de reforços não foram considerados na pista experimental da AASHTO, sendo que nos dias atuais as necessidades são veementes em termos de dimensionamento de reforços;

- A pista experimental se localizava numa área geográfica específica, Ottawa, Illinois, norte dos Estados Unidos, com dificuldades de simular os efeitos de diferentes condições climáticas nas performances dos pavimentos. Por exemplo, na pista experimental uma significativa quantidade de defeitos ocorreu durante o degelo da primavera, uma condição que não ocorre em inúmeros países, principalmente os tropicais, no caso do Brasil;
- Somente um tipo de subleito foi usado para todas as seções de testes da pista experimental. Existem muitos outros dentro do próprio território dos Estados Unidos;
- Somente bases granulares densas não-estabilizadas foram incluídas nas principais seções do pavimento. Vários outros tipos de bases são agora usados rotineiramente em todo o mundo;
- Veículos, suspensões, configurações de eixos e tipos de pneus eram representativos dos usados no final dos anos 50. Muitos deles estão em desuso nos dias de hoje devido à evolução tecnológica; e
- Dimensionamento de pavimentos, comportamento dos materiais e construções eram representativos daquela época. Nenhum sistema de drenagem profunda foi incluído nas seções da pista experimental.

Outro problema com os procedimentos anteriores da AASHTO é a enorme diferença entre a pista experimental e as rodovias atuais quanto ao carregamento a elas depositado. Na pista experimental houve a aplicação de cerca de 10 milhões de carga-eixo; menor do que os carregamentos a que são submetidos os pavimentos atuais em seus primeiros anos de uso devido ao crescimento exponencial do tráfego de veículos nos últimos 40 anos, principalmente com a entrada de novas configurações de caminhões cada vez mais pesados.

E outra grande extrapolação foi sobre a vida de projeto. Devido à curta duração da pesquisa, os efeitos de longo prazo das condições climáticas e envelhecimento dos materiais

não foram considerados. As pesquisas da pista experimental da AASHTO duraram 25 meses, enquanto vidas de projetos para muitos dos pavimentos atuais são de 20 a 50 anos, principalmente em países mais desenvolvidos.

2.3.3.1 Programa Computacional MEPDG

A AASHTO a anos desenvolve e aprimora seu método de previsão de desempenho de pavimentos, e a partir de 2002 incluiu em seu guia o programa MEPDG que incorpora métodos mecanístico-empíricos para a previsão de desempenho.

Um dos aspectos mais interessantes do programa é o acesso hierárquico, isto é, a consideração de diferentes níveis de precisão dos dados de entrada.

O nível 1, mais preciso, requer dados mais acurados, isto é, ensaios dos materiais, pesagens de veículos, etc. Já nível 2 requer ensaios, mas são permitidos correlações de dados, como por exemplo, módulo do subleito estimado através de correlação com o ensaio do CBR. E por ultimo o nível 3, o programa fornece valores no caso da falta de valores locais (AASHTO *Design Guide*, 2004).

Em vista disso, no Nível 1 tem-se a probabilidade de ocorrer menos erros do que os Níveis 2 e 3. No entanto, o nível escolhido para especificados parâmetros, pode ter significativos efeitos no dimensionamento, custos e confiabilidade do projeto.

De acordo com o guia da AASHTO (2004), o programa exige como dados de entrada para pavimentos flexíveis, o tráfego (espectros de carga para eixos simples, os eixos tandem-duplos e eixos tandem-triplos e até mesmo eixos quádruplos), os fatores climáticos e as caracterizações e comportamentos dos materiais integrantes da estrutura. Inclui ainda os critérios de desempenho, baseados na experiência e sensibilidade de cada projetista.

Uma estrutura de teste é montada e o programa analisa se esta cumpre os critérios de desempenho estabelecidos pelo projetista, caso estes critérios não sejam cumpridos o

programa permite que o projetista faça uma reestruturação até que estes critérios sejam cumpridos.

De maneira geral, os principais passos do programa MEPDG para o dimensionamento de pavimentos flexíveis são:

- Criação de uma estrutura com avaliações do tráfego, clima e dos materiais disponíveis no local;
- Estabelecimento de critérios de desempenho com previsão de desempenho para o desejado nível de confiabilidade durante toda a vida útil de projeto em termos de afundamento da trilha de roda, trincamento por fadiga, trincamento térmico e irregularidade longitudinal;
- Processamento de dados de entrada para obtenção de valores mensais do tráfego, variações sazonais, climáticas e dos materiais da estrutura, necessários nas avaliações durante o desenrolar da vida útil do projeto;
- Computação de respostas estruturais (tensões e deformações) utilizando-se teoria das multicamadas elásticas ou elementos finitos fundamentados nos modelos de respostas dos pavimentos, para cada tipo de carga por eixo e para cada cálculo de incremento de danos durante toda a vida útil de projeto;
- Cálculo acumulado dos danos e/ou defeitos no final de cada período de análise durante a vida útil de projeto;
- Previsão dos danos no final de cada período de análise durante toda a vida útil de projeto utilizando-se de modelos calibrados de desempenho mecanístico-empírico previsto no Guia/2002;

- Previsão de conforto ao rolamento como função do Índice de Irregularidade Internacional, defeitos que se acumulam com o tempo, e fatores locais no final de cada incremento de análise;
- Avaliação do desempenho esperada da estrutura-prova e na verificação se as previsões de defeitos e conforto ao rolamento atendem aos critérios selecionados no desejado nível de confiabilidade pré-estabelecido; e

Caso os critérios de desempenho pré-estabelecidos não seja cumpridos, uma nova estrutura de pavimento será submetida ao processo até que se atenda totalmente aos mesmos.

2.3.3.2 Níveis de Confiança

Praticamente tudo relacionado ao dimensionamento de pavimentos é variável ou incerto. Talvez o mais obviamente incerto seja a carga por eixo estimada, pois existe uma grande dificuldade em prever que níveis esta carga atingirá muitos anos à frente. Os materiais e estruturas também apontam grandes níveis de variabilidade. Além disto, os pavimentos apresentam grande mudança de suas condições com o tempo.

Mesmo que os conceitos mecanísticos possam prever com maior precisão o desempenho dos pavimentos, um método prático para se considerar as variações e incertezas contidas nestes conceitos é necessária, de maneira que um novo pavimento ou uma restauração possam ser projetados com um maior nível de confiança (AASHTO *Design Guide*, 2002).

Níveis de confiança foram incorporados no guia de maneira consistente e uniforme, para todos os tipos de pavimento. De acordo com o guia da AASHTO (2004), o índice de confiança é a probabilidade que cada um dos defeitos principais e da suavidade, serem menores que um nível crítico selecionado, durante os anos previstos.

Exemplificando, a Figura 5 apresenta o resultado previsto para uma previsão média baseada em valores médios para todos os dados de entrada. Assim, os valores dos defeitos e

irregularidades (no caso o IRI) podem ser interpretados como um índice de 50% de confiança.

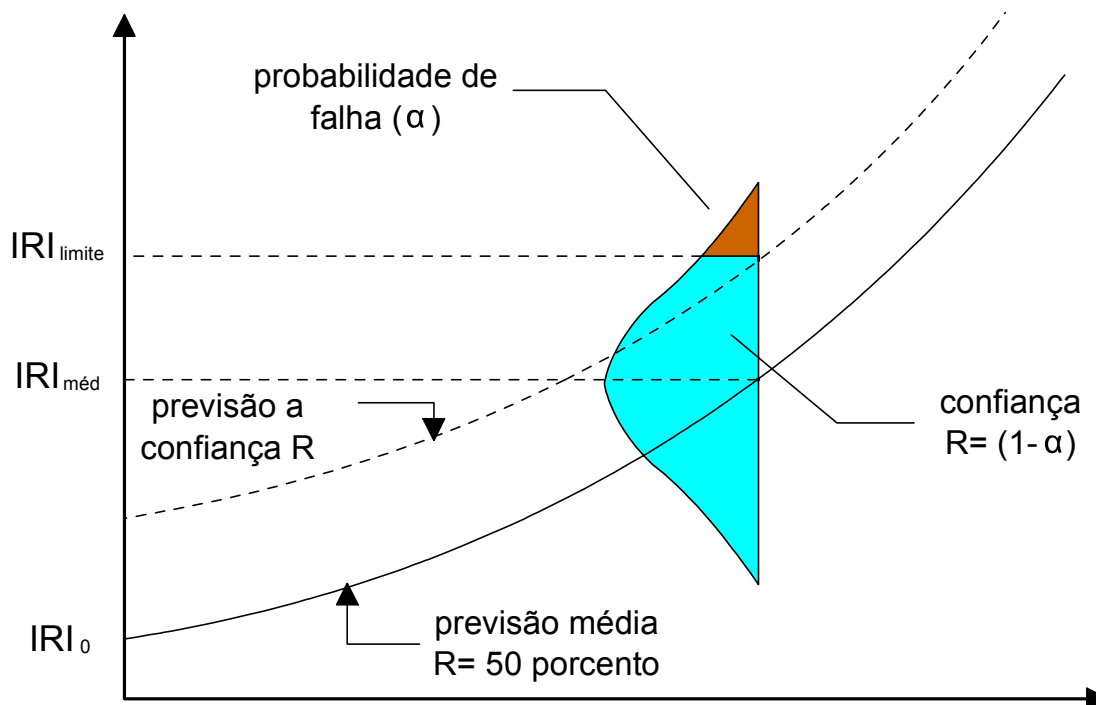


Figura 5: Conceito de confiança para IRI.

Fonte: AASHTO *Design Guide* 2004.

Nota-se que valores acima de 50% resultaram em uma previsão mais pessimista, onde o pavimento projetado estará sofrendo danos de maneira mais acelerado com o passar do tempo. De maneira contrária, valores abaixo de 50% indicam que o pavimento estará sobre menor influência de danos de natureza variável.

A Figura 6 apresenta uma comparação entre o trincamento de um pavimento qualquer, variando se apenas o nível de confiança. Através do gráfico é possível visualizar a informação dada anteriormente, visto que conforme o nível de confiança aumenta o mesmo ocorre com os resultados de trincamento por fadiga.

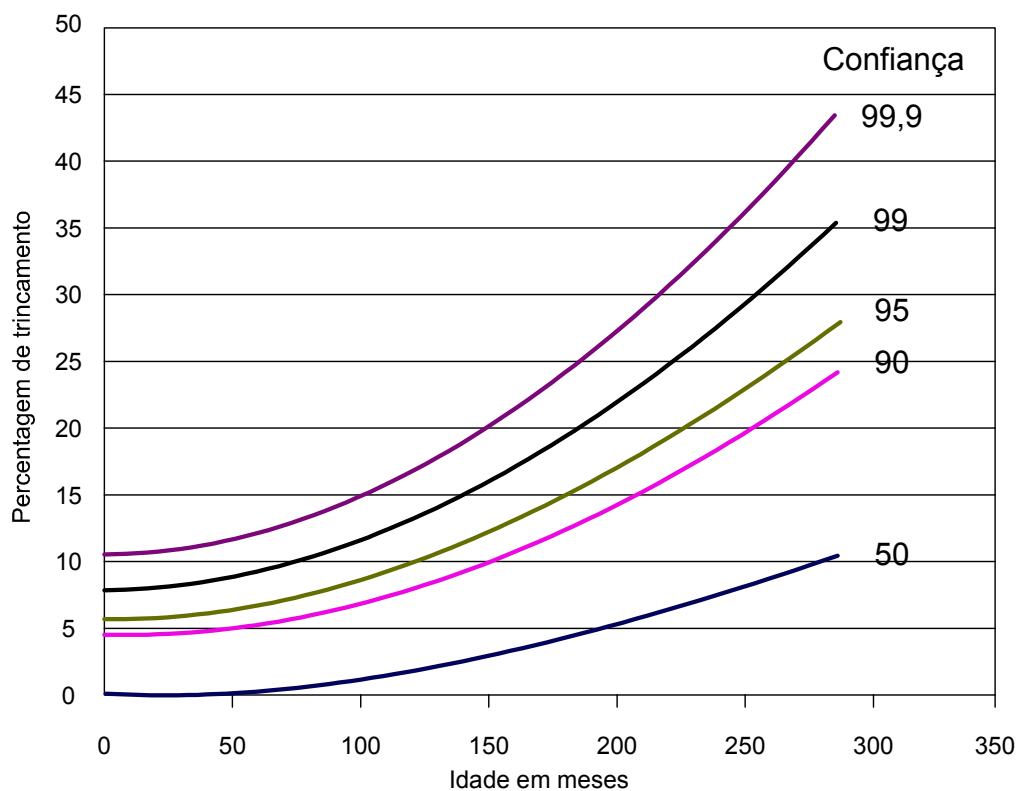


Figura 6: Trincamento estimado a diferentes níveis de confiança.

Fonte: AASHTO *Design Guide* 2004.

Tendo então em vista a importância da consideração dos níveis de confiança, a AASHTO propõe a tabela a seguir com os níveis de confiança indicados para cada situação.

Classificação Funcional	Nível Recomendado de Confiança	
	Urbano	Rural
Interestaduais e Freeways	85-97	80-95
Arteriais Principais	80-95	75-90
Coletoras	75-85	70-80
Locais	50-75	50-75

Figura 7: Níveis de confiança para restaurações e pavimentos novos.

Fonte: AASHTO *Design Guide* 2004.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa é de ordem quantitativa, uma vez que serão realizadas análises computacionais da vida de fadiga, do desempenho a deformações plásticas e do índice de irregularidade de um pavimento flexível teste.

3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa teve início com a definição das variáveis a serem analisadas, onde em um primeiro momento tinham-se como variáveis o envelhecimento do revestimento, o módulo e a espessura da base, e o tipo de ligante. Porém dificuldades foram encontradas para a inserção dos módulos das misturas asfálticas, visto que o programa MEPDG aceita apenas o módulo dinâmico (também conhecido como módulo complexo, E^*) como dado de entrada, e dispúnhamos apenas do módulo de resiliência.

Devido a esta dificuldade, foi necessário alterar-se o escopo da pesquisa. Assim foram removidas as variáveis de envelhecimento e ligantes modificados (representadas pelo módulo de resiliência), e as novas variáveis foram definidas.

Desta maneira, definiram-se como variáveis de estudo o tipo de ligante, as espessuras do revestimento e da base, e o módulo da base.

Determinadas as variáveis deu-se início a etapa de definição das constantes. O programa MEPDG, devido ao seu alto nível, solicita uma infinidade de valores para que possa obter resultados mais precisos. Sendo assim, foi reservado um capítulo específico para a apresentação dos dados assim como auxiliar na compreensão do programa de uma maneira geral.

Assim, deu-se início a etapa de implementação no programa MEPDG. A Figura 8 a seguir aponta as variáveis já definidas a serem analisadas.

Ligante		Espessura do revestimento (cm)	Espessura da Base (cm)	Módulo da Base (Mpa)
PG de alta	PG de baixa			
64	-22	15	5	150
		30	7,5	300
76		45	10	450

Figura 8: Variáveis a serem analisadas.

Com estes dados inseridos no programa, foram realizadas 54 simulações, a fim de se obter as representações gráficas da deformação permanente e do trincamento por fadiga versus o tempo.

3.3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa fez-se o uso de um computador portátil com 2 GiB de memória, 1,81 GHz de processamento e armazenamento de 160 GB. Neste foram instalados os seguintes programas para o estudo:

- BROffice versão 3.1.1;
- Statistica for Windows versão 4.3, e;
- MEPDG da AASHTO.

4 IMPLEMENTAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO AO GUIA DA AASHTO

4.1.1 Método de Análise

O guia da AASHTO de 2002 é fundamentado em métodos mecanístico-empíricos para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Primeiramente o método calcula mecanisticamente as reações estruturais como tensões, deformações e deflexões, e então calcula o dano que se acumulará com o tempo. O próximo passo realizado é empiricamente correlacionar o dano sofrido com o tempo com os defeitos especificados pelo projetista. A Figura 9 abaixo apresenta um diagrama de blocos para melhor visualizar a maneira com que o método da AASHTO interpreta os dados.

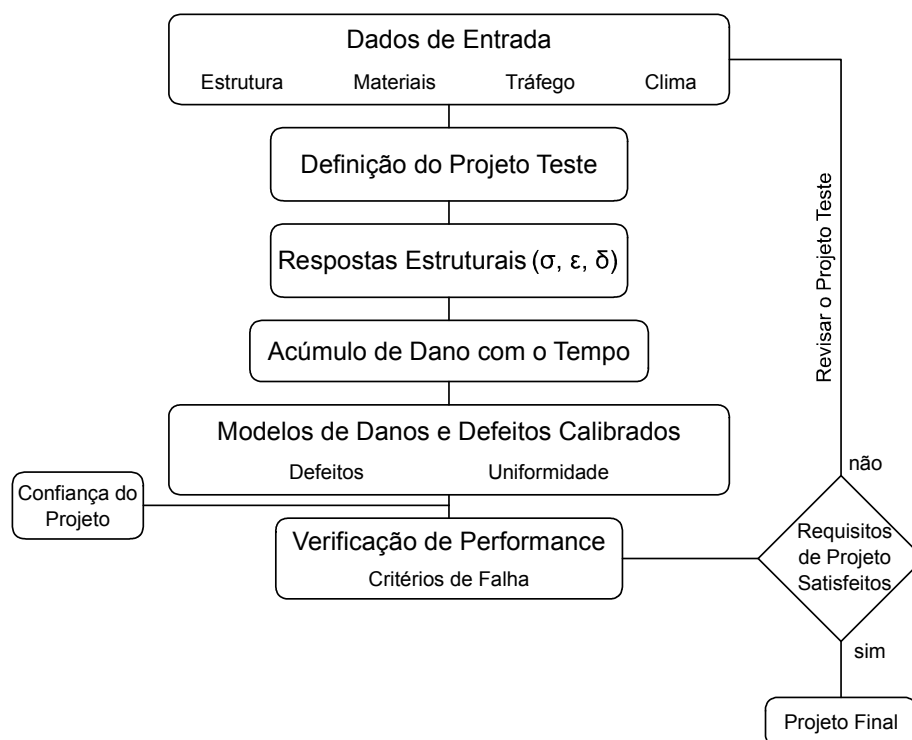


Figura 9: Diagrama de blocos representando o método da AASHTO

Fonte: AASHTO *Design Guide* 2004.

4.1.2 Noções Básicas

Com o programa instalado e sendo executado, basta clicar na folha em branco no canto superior esquerdo para se dar início ao projeto. Após selecionada a pasta onde o projeto será salvo o programa apresentará a tela principal. A Figura 10 apresenta a tela principal com as legendas das áreas básicas.

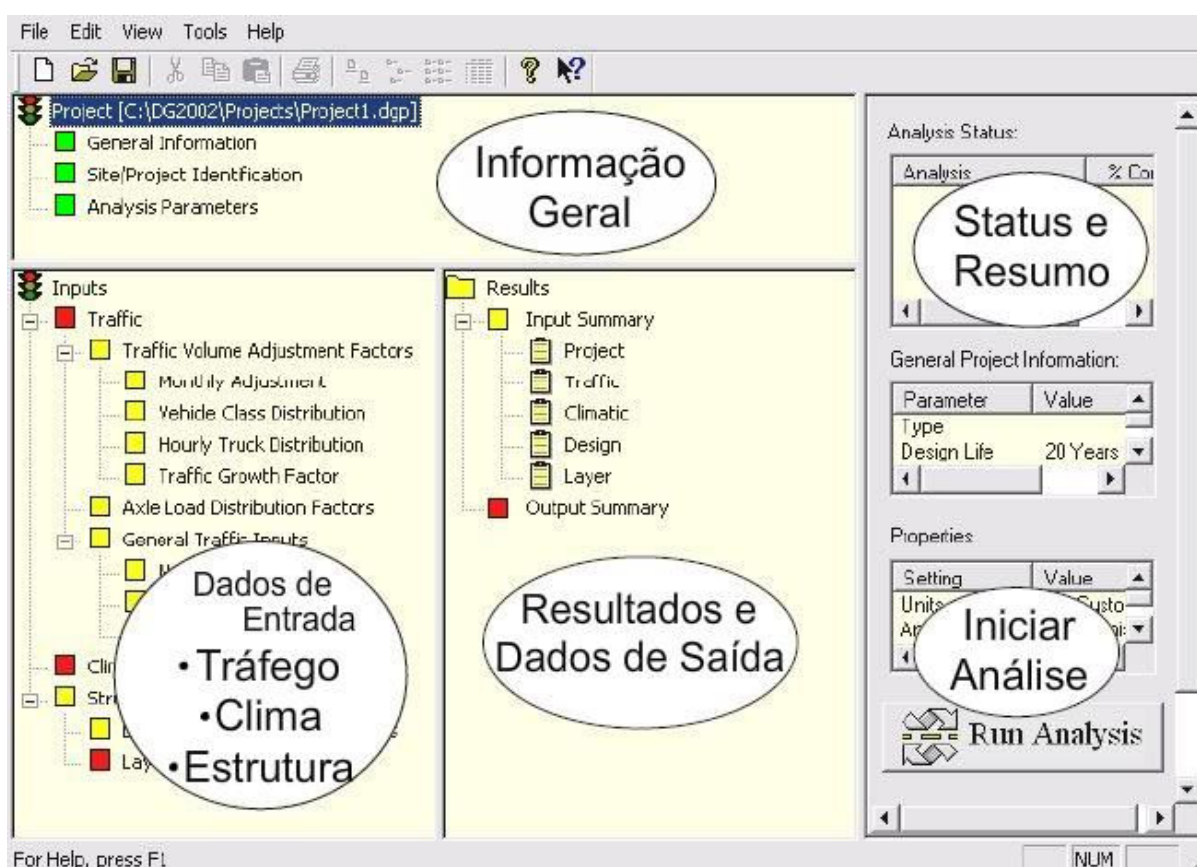


Figura 10: Tela inicial do programa

Todos os dados de entrada do programa são codificados por cores, como se pode notar na Figura 10 as “caixas” vermelhas, amarelas e verdes. As caixas vermelhas indicam que não houve alteração nos dados do parâmetro em questão, e que o programa está esperando que o projetista o faça. As caixas amarelas indicam que o programa utilizará os valores pré-definidos, cabendo ao projetista alterá-los ou não. Por fim, as caixas verdes indicam que o projetista já verificou e/ou alterou os dados do parâmetro em questão.

Conforme forem sendo preenchidos os dados, as cores sofrerão alteração para informar o usuário sobre a situação atual.

4.2 UTILIZANDO O PROGRAMA MEPDG

Este sub-ítem apresenta um exemplo de projeto de pavimento flexível, com a intenção de tornar mais simples a compreensão do funcionamento do programa, assim como já apresentar os dados utilizados para a criação do pavimento utilizado na pesquisa.

A organização se dá em duas partes, a primeira sendo definição dos parâmetros de projeto, apontando os dados necessários para se projetar o pavimento. Já a segunda parte aponta como inserir os parâmetros de projeto no programa MEPDG de maneira à melhor compreender o significado de cada parâmetro e em que lugar ele deve ser inserido.

4.2.1 Definição dos Parâmetros de Projeto

O pavimento deverá ser de concreto asfáltico e permanecer operável mediante as especificações mínimas por 10 anos. A construção da base será em agosto de 2009 e o revestimento será aplicado em setembro de 2009.

O pavimento deverá ter um IRI inicial de 63 polegadas por milha (aproximadamente 1 m/km), onde geralmente o valor ideal para pavimentos novos é entre 50 e 75 polegadas por milha (0,79 a 1,18 m/km).

Após os 10 anos definidos, os valores de IRI não podem ultrapassar 4 m/km. O trincamento do revestimento da superfície para baixo ou longitudinal não pode ultrapassar 1000 pés por milha e o trincamento inferior por fadiga não pode ultrapassar 20%. A deformação permanente da camada de revestimento não deve ultrapassar 0,25 polegadas e a total do pavimento não pode ultrapassar 0,75 polegadas.

A rodovia será construída entre Ijuí e Panambi, no Rio Grande do Sul, e possuirá uma média anual de chuvas de 20 pés (6096 mm).

A média anual de tráfego de caminhões diária (AADTT) estimada foi de 2240, esta média foi obtida com a empresa TORC. Haverá uma pista na direção de projeto, com 90% dos caminhões trafegando nesta. A velocidade de operação é de 96 km/h.

A mistura asfáltica terá a seguinte distribuição de agregados (Faixa B do DAER ou IV-B do Instituto do Asfalto):

PENEIRA	mm	Limite	centro faixa	Faixa de Trabalho		MISTURA
3/4"	19,1	100	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	80 - 100	90,00	84,00	96,00	90,00
3/8"	9,5	70 - 90	80,00	74,00	86,00	80,00
n 4	4,76	50 - 70	60,00	54,00	66,00	60,00
n 8	2,38	35 - 50	42,50	38,50	48,50	42,50
n 30	0,59	18 - 29	23,50	19,50	29,00	23,50
n 50	0,297	13 - 23	18,00	14,00	23,00	18,00
n 100	0,149	8 - 16	12,00	9,00	16,00	12,00
n 200	0,074	4 - 10	7,00	5,00	10,00	7,00

Figura 11: Composição dos agregados

Dois ligantes asfálticos serão utilizados, PG 64 -22 e PG 76 -22. Ambos classificados a partir da metodologia *SUPERPAVE*.

A mistura possui uma quantidade efetiva de ligante de 12% e um volume de vazios de 4%. A densidade da mistura é de 148 pcf (aproximadamente 2290 kg/m³). O coeficiente de Poisson utilizado é de 0,30 e a temperatura de referência de 77 graus fahrenheit (25 graus Celsius). A espessura da camada de revestimento foi definida como sendo de 2, 3 e 4 polegadas (5, 7,5 e 10 cm).

A camada de base possuirá espessuras de 6, 12 e 18 polegadas (15, 30 e 45cm), módulos de 21755, 43511 e 65267 psi (150, 300 e 450 MPa) e coeficiente de Poisson de 0,35.

Por fim, a camada do subleito é de material argiloso, classificação A-7-5 na HRB e possui espessura infinita. O coeficiente de Poisson é de 0,40.

4.2.2 Implementação no Programa

Com o programa instalado e sendo executado, deve se criar um novo projeto. A Figura 12 a seguir apresenta a tela básica do programa, ela será utilizada como um guia para cada etapa de implementação.

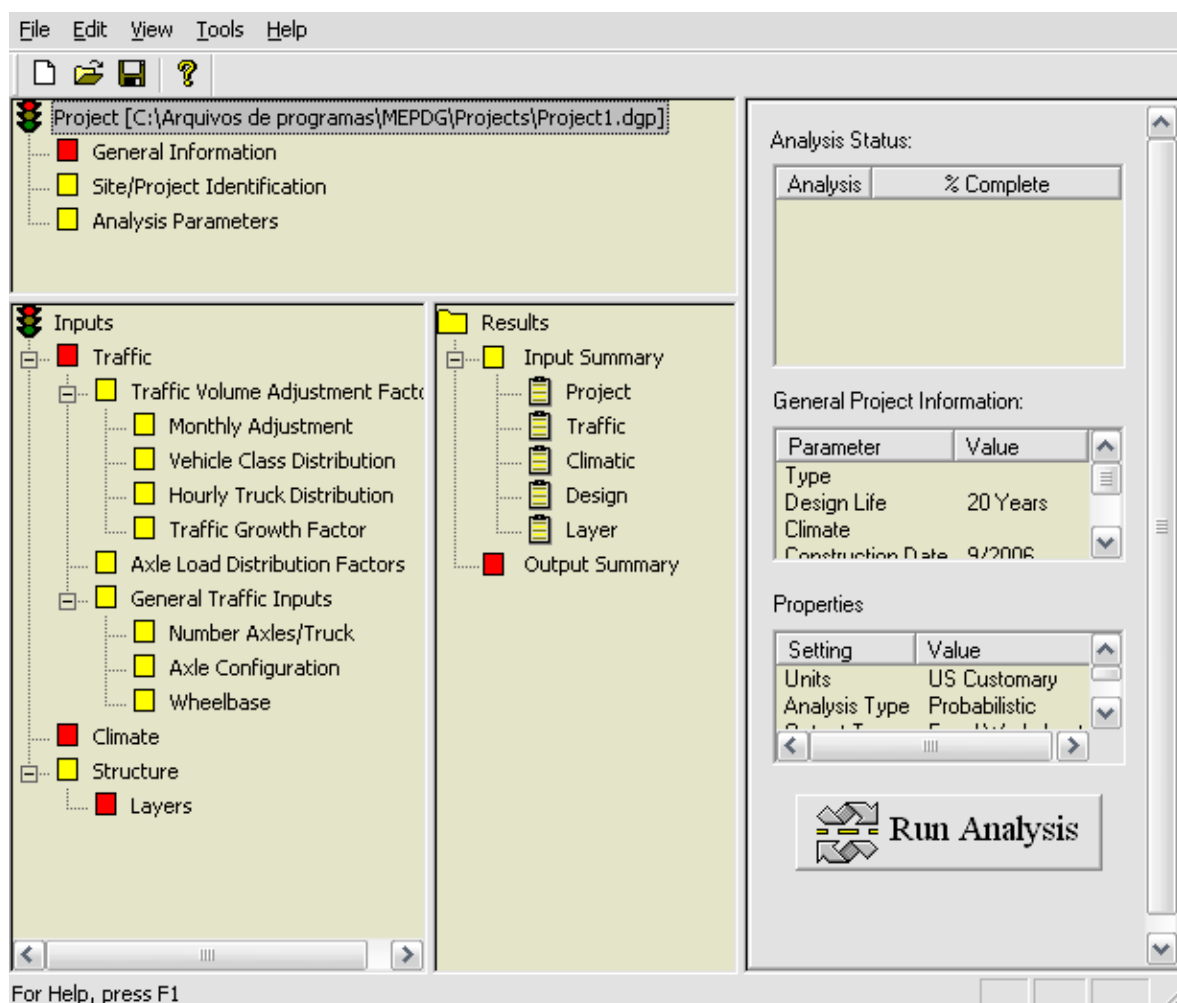


Figura 12: Tela de referência do programa MEPDG

4.2.2.1 Dados Gerais

Para se dar início a inclusão dos dados é necessário dar um clique duplo sobre o primeiro item, *General Information*. A Figura 13 apresenta a janela de informações gerais.

Nota-se que os seguintes itens estão apresentados:

- *Design life*: É a vida de projeto, o valor em si indica até quantos anos após o pavimento ser liberado para o tráfego o programa deve simular. Como mencionado anteriormente, o pavimento será projetado para durar 10 anos.
- *Base/Subgrade construction month*: O mês em que será construída a base e o subleito, este dado de entrada define o tempo zero para o início dos cálculos do modelo climático (vistos mais adiante), e a umidade neste tempo é tida como a umidade ótima. Definidos anteriormente como agosto de 2009.
- *Pavement construction month*: Mês que será construído o revestimento, marca o tempo zero para o início dos danos de envelhecimento e térmicos (para o caso de pavimentos asfálticos). Definidos como um mês após o início da base e do subleito, setembro de 2009.
- *Traffic open month*: Mês em que o pavimento estará pronto para receber tráfego, influência no dano advindo do tráfego. Após o término do revestimento, em outubro de 2009.

Em seguida seleciona-se o tipo de projeto, são possíveis realizar análises para pavimentos flexíveis, pavimentos de concreto e restaurações. Para este projeto foi utilizado a opção *new pavement – flexible pavement*.

Project Name: Project1.dgp

Description:

Design Life (years): 20

Base/Subgrade Construction Month: August Year: 2006

Pavement construction month: September Year: 2006

Traffic open month: October Year: 2006

Type of Design

New Pavement

Flexible Pavement Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

Restoration

Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)

Overlay

Asphalt Concrete Overlay PCC Overlay

OK Cancel

Figura 13: Janela de informações gerais

4.2.2.2 Dados de Identificação

Clicando em *Site/Project Identification* é possível inserir os dados referentes a localização da obra assim como a identificação do projeto. Estes dados não são utilizados na simulação, sendo apenas referenciais e de preenchimento opcional.

4.2.2.3 Parâmetros de Análise

Um dos mais importantes itens, em *Analysis Parameters* o projetista deve especificar quais os critérios de falha para o pavimento, assim como o valor de irregularidade inicial. A seguir encontram-se definidos os parâmetros utilizados no projeto:

- *Initial IRI*: Valor de irregularidade do pavimento como construído. Utilizado como 63 in/mi (1m/km).

- *Terminal IRI*: Valor limite da irregularidade longitudinal, definido em 172 in/mi.
- *AC Surface Down Cracking Long. Cracking*: Trincamento da face superior do revestimento para a face inferior. Utilizou-se 1000 ft/mi (189m/km) como critério de falha.
- *AC Bottom Up Alligator Cracking*: Trincamento da face inferior do pavimento para a face superior, conhecido como trincas tipo couro de jacaré. Definiu-se 25% como o valor limite.
- *AC Thermal Fracture*: Trincamento térmico, influenciado pela variação rápida de temperatura. Valor limite definido em 1000 ft/mi (189m/km).
- *Fatigue Fracture of Chemically Stabilized Layers*: O trincamento das camadas estabilizadas quimicamente influenciam diretamente os danos nas camadas subjacentes. Como o projeto não prevê o uso de camadas estabilizadas quimicamente este valor será definido como padrão.
- *Permanent Deformation – Total Pavement, AC Only*: Deformação permanente de todas as camadas e do revestimento. Os valores utilizados foram de 0,75 e de 0,25 in respectivamente (1,905 e 0,635cm).

A Figura 14 a seguir apresenta um exemplo da janela dos parâmetros de análise. E com isso tem-se o fim da etapa do projeto e dando-se início a etapa de inclusão dos dados de entrada.

Project Name:

Initial IRI (in/mi)

Performance Criteria

Rigid Pavement Flexible Pavement

	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mile)	<input type="text" value="172"/>	<input type="text" value="90"/>
<input checked="" type="checkbox"/> AC Surface Down Cracking Long. Cracking (ft/mi)	<input type="text" value="2000"/>	<input type="text" value="90"/>
<input checked="" type="checkbox"/> AC Bottom Up Cracking Alligator Cracking (%)	<input type="text" value="25"/>	<input type="text" value="90"/>
<input checked="" type="checkbox"/> AC Thermal Fracture (ft/mi)	<input type="text" value="1000"/>	<input type="text" value="90"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Chemically Stabilized Layer Fatigue Fracture(%)	<input type="text" value="25"/>	<input type="text" value="90"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - Total Pavement (in)	<input type="text" value="0.75"/>	<input type="text" value="90"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - AC Only (in)	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="90"/>

OK Cancel

Figura 14: Parâmetros de análise

4.2.2.4 Tráfego

Os dados do tráfego são um dos principais elementos para a realização da análise e projeto da estruturas do pavimento, é a partir destes dados que é determinado o quanto a estrutura está sendo solicitada, a posição das solicitações entre outros fatores importantes.

A janela principal do tráfego apresenta os seguintes itens:

- *Initial two-way AADTT*: É o volume total de tráfego de veículos pesados que passam por um determinado segmento da rodovia, em ambas as pistas, em um dia. O valor utilizado de AADTT para este projeto foi de 2240.
- *Number of lanes in the design direction*: É o numero de pistas que seguem a mesma direção, como especificado anteriormente será apenas uma.

- *Percent of trucks in the design direction*: Quantidade de caminhões trafegando na direção de projeto. Quando o AADTT é contado nas duas direções este valor geralmente é definido como 50%, como acontece neste trabalho, porém este valor pode ser alterado quando existe tendência de tráfego maior para um lado, como portos e áreas de grande comércio.
- *Percent of trucks in the design lane*: Define a quantidade de caminhões que passam sobre a pista de projeto. Devido a existência de apenas uma pista em cada direção este valor foi adotado como 100%.
- *Operational speed*: Velocidade de operação dos veículos. Utilizou-se o valor padrão do programa, 60 mph (aproximadamente 96 km/h).

A Figura 15 apresenta a janela principal do tráfego, onde é possível notar-se além dos itens citados anteriormente, a existência de três subdivisões do tráfego. Estas subdivisões são contempladas a seguir.

Design Life (years): 20 ...

Opening Date: October, 2006

Initial two-way AADTT: 2250 ...

Number of lanes in design direction: 2

Percent of trucks in design direction (%): 50.0

Percent of trucks in design lane (%): 95.0

Operational speed (mph): 60

Traffic Volume Adjustment: Edit

Axle load distribution factor: Edit

General Traffic Inputs: Edit

Import/Export

Traffic Growth: Compound, 4% ...

OK Cancel

Figura 15: Informações gerais de tráfego

4.2.2.4.1 Ajuste do Volume de Tráfego

Os fatores de ajuste de ajuste de tráfego de caminhões a seguir são necessários para a caracterização do tráfego. Nota-se a que os três primeiros itens a seguir apresentam a escolha do nível.

- *Monthly Adjustment*: É a variabilidade do tráfego dos veículos pesados de acordo com o mês. Esta ocorrência se deve a, por exemplo, momentos do ano onde existe maior escoamento de produtos, época de safra, entre outro. Para o presente projeto não houve variação mensal de tráfego, e os valores padrões foram utilizados. É interessante ressaltar que o guia de projeto considera os valores mensais sempre constantes, fato que na realidade não se verifica, visto que com o passar dos anos ocorrem alterações nesta distribuição. A Figura 16 abaixo apresenta a janela do ajuste mensal.

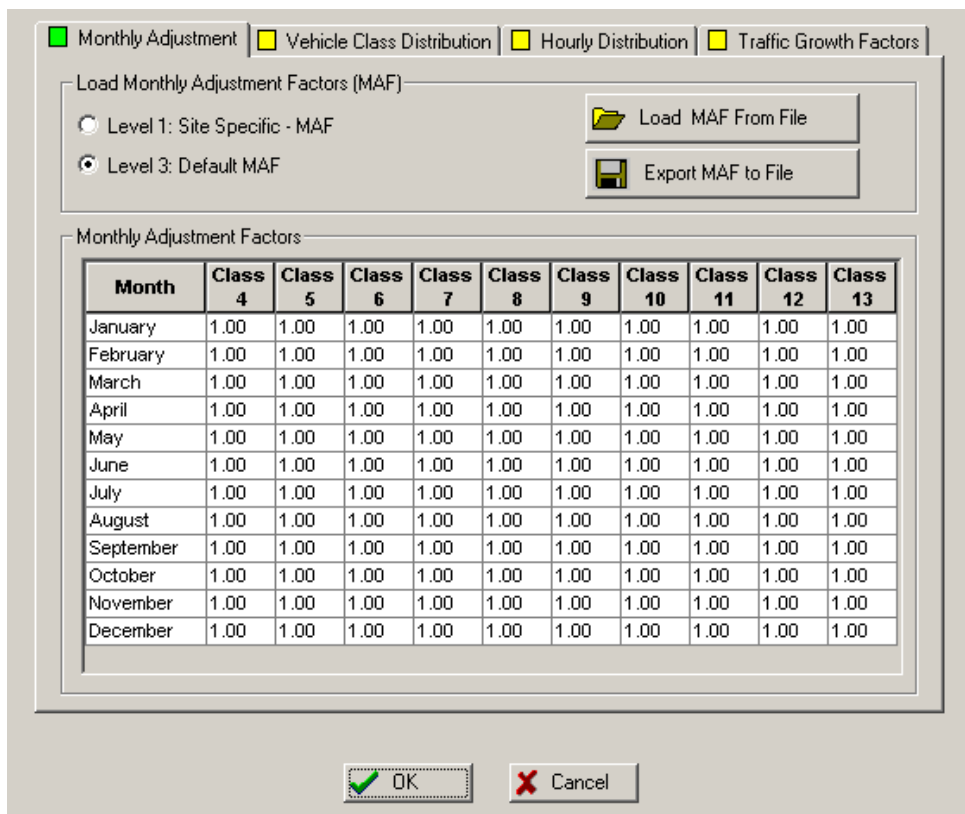












Figura 16: Ajuste mensal do tráfego

- Vehicle Class Distribution*: É a distribuição de classes de veículos através de percentagem. Em caso de ausência de dados, o programa oferece diversos grupos de distribuição pré-montados. Para este projeto foi utilizado o grupo 6 (caminhões médio intermediários e de reboque único) já pré estabelecido pelo programa, pois até o início das simulações não haviam dados suficientes para montar um grupo específico para a rodovia utilizada como base. Abaixo se encontra a Figura 17 mostrando a configuração utilizada.

Monthly Adjustment
 Vehicle Class Distribution
 Hourly Distribution
 Traffic Growth Factors

AADTT distribution by vehicle class

Class 4	<input type="text" value="1.8"/>	
Class 5	<input type="text" value="24.6"/>	
Class 6	<input type="text" value="7.6"/>	
Class 7	<input type="text" value="0.5"/>	
Class 8	<input type="text" value="5.0"/>	
Class 9	<input type="text" value="31.3"/>	
Class 10	<input type="text" value="9.8"/>	
Class 11	<input type="text" value="0.8"/>	
Class 12	<input type="text" value="3.3"/>	
Class 13	<input type="text" value="15.3"/>	
Total	<input type="text" value="100.0"/>	

Note: AADTT distribution must total 100%.

Load Default Distribution

Level 1: Site Specific Distribution
 Level 2: Regional Distribution
 Level 3: Default Distribution

Figura 17: Distribuição de veículos por classe

- Hourly Truck Distribution*: O fator de distribuição horário (HDF) representa a porcentagem de distribuição do AADTT em cada hora do dia. O padrão fornecido pelo programa foi utilizado neste projeto. Um ponto interessante desta distribuição é que ela está diretamente ligada ao fator do ambiente, uma vez que o pavimento apresenta diferentes temperaturas em diferentes horários do dia.

Hourly truck traffic distribution by period beginning:

Midnight	2.3	Noon	5.9
1:00 am	2.3	1:00 pm	5.9
2:00 am	2.3	2:00 pm	5.9
3:00 am	2.3	3:00 pm	5.9
4:00 am	2.3	4:00 pm	4.6
5:00 am	2.3	5:00 pm	4.6
6:00 am	5.0	6:00 pm	4.6
7:00 am	5.0	7:00 pm	4.6
8:00 am	5.0	8:00 pm	3.1
9:00 am	5.0	9:00 pm	3.1
10:00 am	5.9	10:00 pm	3.1
11:00 am	5.9	11:00 pm	3.1

Note: The hourly distribution must total 100%

Total: 100.0

OK Cancel

Figura 18: Distribuição de tráfego pelo horário do dia

- Traffic Growth Factor*: O programa que acompanha o guia de projeto da AASHTO apresenta três funções de previsão de crescimento de tráfego, para calcular o crescimento ou a decadência do volume de tráfego com o tempo. O programa possibilita o usuário a escolher tanto a taxa quanto a função de crescimento. Também é possível determinar uma taxa de crescimento para todas as classes ou uma taxa para cada classe. Para esta pesquisa utilizou-se uma taxa de crescimento de 4%. A Figura 19 apresenta a janela dos fatores de crescimento de tráfego.

Monthly Adjustment
 Vehicle Class Distribution
 Hourly Distribution
 Traffic Growth Factors

Opening Date:
Design Life (years): ...

Vehicle-class specific traffic growth

AADTT: ...
% Traffic Design Direction:
% Traffic Design Lane:

Default Growth Function

No Growth
 Linear Growth
 Compound Growth

Default growth rate (%)

Note: Vehicle-class distribution factors are needed to view the effects of traffic growth.

Figura 19: Fatores de crescimento do tráfego

4.2.2.4.2 Fator de Distribuição do Carregamento dos Eixos

O fator de distribuição do carregamento dos eixos representa a porcentagem do total de aplicações de eixo em cada intervalo de carregamento para um tipo de eixo específico (simplex, duplo, triplo, e quadruplo) e para a classe de veículos (classes 4 a 13). Todos os valores utilizados foram os padrões fornecidos pelo programa. A seguir encontram-se a Figura 20 apresentando a janela de *Lateral Traffic Wander* seguida pelas definições dos itens da janela.

Lateral Traffic Wander	
Mean wheel location (inches from the lane marking):	<input type="text" value="18"/>
Traffic wander standard deviation (in):	<input type="text" value="10"/>
Design lane width (ft): (Note: This is not slab width)	<input type="text" value="12"/>

Figura 20: Relação passagem cobertura

- *Mean Wheel location*: Distância da borda externa da roda até a marcação central do pavimento. O valor utilizado foi de 18 polegadas (aproximadamente 46 cm), padrão do nível 3 do programa, recomendado pelo guia na inexistência de dados mais precisos.
- *Traffic wander standard deviation*: É o desvio padrão do desvio lateral do trafego. O desvio é utilizado para calcular a quantidade de aplicações de carga de eixo sobre um certo ponto, para prever danos e desempenho. O valor utilizado foi de 10 polegadas (aproximadamente 25 cm), padrão do nível 3 do programa, recomendado pelo guia na inexistência de dados mais precisos.
- *Design lane width*: Atual largura da pista, definido pela distância entre as marcações da pista em cada lado da pista de projeto. É um fator de projeto, podendo ou não ser igual à largura da placa.

4.2.2.4.3 Dados de Entrada de Tráfego Gerais

- *Number Axles/Truck*: This input represents the average number of axles for each truck class (class 4 to 13) for each axle type (simples, duplo, triplo e quadruplo).
- *Axle Configuration*: Como geralmente as respostas estruturais do pavimento são sensíveis tanto a posição das rodas quanto a interação entre varias rodas em um dado eixo, é importante definir as configurações entre eles. Nesta janela é possível definir a distância entre as duas bordas inferiores do eixo (*average axle width*), espaçamentos entre os centros dos pneus para casos de configurações com pneus duplos (*dual tire spacing*), a pressão interna do pneu (*tire pressure*), e

o espaçamento dos eixos (*axle spacing*). Utilizou-se todas as configurações padrão para as configurações do eixo, na Figura 21 estas informações podem ser verificadas.

Parameter	Value
Average axle width (edge-to-edge) outside dimensions,ft):	8.5
Dual tire spacing (in):	12
Tire Pressure (psi):	120
Axle Spacing (in)	
Tandem axle:	51.6
Tridem axle:	49.2
Quad axle:	49.2

Figura 21: Configurações de eixo.

- *Wheelbase*: Série de valores utilizados para se definir o espaçamento entre os eixos dos veículos. São dois os itens, *average axle spacing* e *percent of trucks*, onde o primeiro é a distância entre os eixos dos veículos e medidas usuais para curto, médio e longo são respectivamente 12, 15 e 18 pés (aproximadamente 3,65, 4,57 e 5,49 metros); já o segundo item é a quantidade de caminhões entre as classes 8 a 13 que nos espaçamentos de curto, médio e longo. Os valores fornecidos pelo programa foram utilizados e encontram-se na Figura 22 a seguir.

	Short	Medium	Long
Average Axle Spacing (ft)	12	15	18
Percent of trucks (%)	33.0	33.0	34.0

Figura 22: Espaçamento entre os eixos

4.2.2.5 Clima

Condições ambientais têm um impacto significativo nas propriedades dos pavimentos rígidos e flexíveis. Fatores externos como precipitação, temperatura, ciclos de congelamento e descongelamento, são muito importantes para a definição dos impactos que o ambiente pode ter sobre o desempenho do pavimento. Fatores internos como a suscetibilidade dos materiais do pavimento a danos da umidade e degelo, capacidade de drenagem das camadas, potencial de infiltração do pavimento, entre outros, definem o grau de reação que o pavimento oferecerá as condições ambientais externas (AASHTO *Design Guide* 2004).

O programa MEPDG oferece uma ferramenta poderosa para previsão do clima, fundamentado em várias estações climáticas. Infelizmente estas estações são localizadas apenas nos Estados Unidos, havendo então a necessidade de interpolação de dados, ou também da utilização de estações com medidas semelhantes às brasileiras, sendo esta última a utilizada neste projeto.

A Figura 23 abaixo apresenta a janela geral do item *Climate*, para fazer a escolha do modelo climático a ser utilizado é necessário clicar em *Generate* (*Import* é utilizado para casos de possuir medições específicas para o projeto ou quando já se possui um arquivo climático pré-montado).

Current climatic data file:

Latitude (degrees.minutes)

Longitude (degrees.minutes)

Elevation (ft)

Seasonal

Depth of water table (ft)

Annual average

Import previously generated climatic data file.

Generate new climatic data file

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

Figura 23: Janela inicial para o item clima

Ao clicar em *generate* o item *depth of water table* se tornará modificável, neste item será adicionado a média anual de chuvas na unidade pés. Para o projeto em questão utilizou-se 20 pés. Como pode-se notar pela Figura 24 agora também existe a opção de selecionar a estação climática, para esta pesquisa foi utilizado uma estação localizada em Orlando na Flórida, por se assemelhar as condições locais.

Climatic data for a specific weather station.

Interpolate climatic data for given location.

Latitude (degrees.minutes)

Longitude (degrees.minutes)

Elevation (ft)

Seasonal

Depth of water table (ft)

Annual average

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

Select weather station:

- KLAWOCK, AK
- KODIAK, AK
- KOTZEBUE, AK
- MC GRATH, AK
- NENANA, AK
- NOME, AK
- NORTHWAY, AK
- NUIQSUT, AK
- PALMER, AK
- PORTAGE GLACIER, AK
- SELDOVIA, AK
- SEWARD, AK

Station Location:
ALLEN ARMY AIRFIELD

Months of available data:98

Months missing in file:0

Figura 24: Escolha da estação climática

Então após selecionada a estação climática deve-se clicar em *Select Station*, o programa irá então gerar um arquivo sobre a estação selecionada.

Importante notar que apenas com o programa MEPDG não é possível fazer esta escolha, visto que ele não oferece os dados das estações, sendo necessário baixar um arquivo gratuito no site do TRB (www.trb.org/mepdg/). É necessária também a verificação do item *months missing in file*, devendo este ser 0, de outra forma o programa não conseguirá fazer os cálculos necessários.

4.2.2.6 Estrutura

Neste momento é necessário definir as condições estruturais do pavimento, determinando os materiais, espessuras, entre outras características. Com um duplo clique em *structure* a janela da Figura 25 poderá ser vista.

Surface short-wave absorptivity:

Layers

Layer	Type	Material	Thicknes	Interface
1	Asphalt	Asphalt concrete	10.0	1

Insert Delete Edit

Opening Date: Design Life (years): ...

Figura 25: Definição da estrutura

Nota-se a existência do coeficiente *surface short-wave absorptivity*, que determina a quantidade de luz solar absorvida pelo pavimento. Este coeficiente depende diretamente da textura, composição e cor, e seu valor varia de 0 a 1. Para projetos de pavimentos novos utiliza-se 0,85.

Para dar prosseguimento ao projeto, é necessário editar a camada flexível existente. Ao clicar em *edit* a janela apresentada na Figura 26 irá aparecer. A seguir estão citados e explicados os itens contidos na janela.

- *Layer thickness*: Espessura da camada asfáltica, para o projeto se utilizou 2, 3 e 4 polegadas (aproximadamente 5, 7,5 e 10 centímetros).
- *Aggregate Gradation*: Graduação do agregado nas peneiras 3/4, 3/8, #4 e #200. Através dos dados da Figura 11 montou-se a graduação adicionada no programa e exposta na Figura 26.

Level: 3

Asphalt material type: Asphalt concrete

Layer thickness (in): 10

Asphalt Mix Asphalt Binder Asphalt General

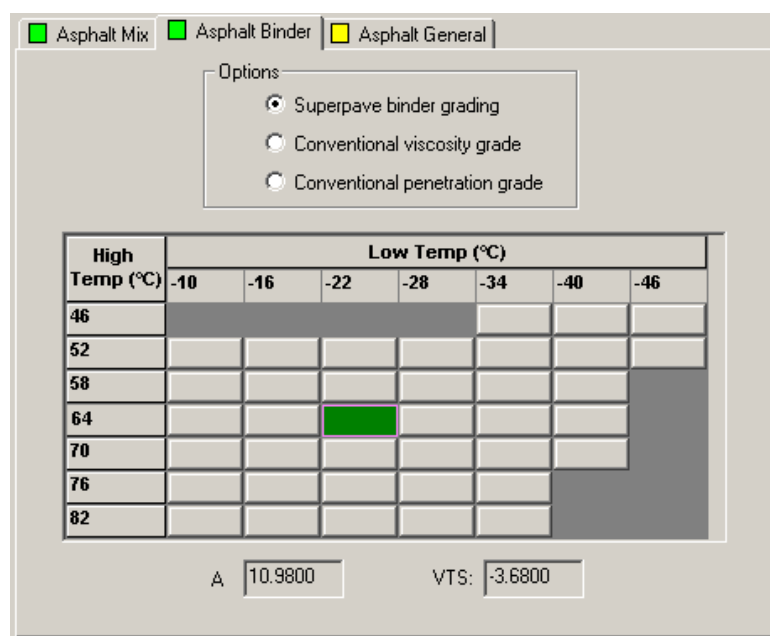
Aggregate Gradation

Cumulative % Retained 3/4 inch sieve:	0
Cumulative % Retained 3/8 inch sieve:	20
Cumulative % Retained #4 sieve:	40
% Passing #200 sieve:	7

OK Cancel View HMA Plots

Figura 26: Propriedades da mistura asfáltica

O próximo passo é a definição do ligante asfáltico, é possível escolher três opções de classificação, entre elas a classificação por viscosidade, por penetração, e pela metodologia *SUPERPAVE*, esta última utilizada neste projeto. Como visto no item 4.2.1 os ligantes a serem utilizados são ambos de PG de baixa -22 e de PG de alta 64 e 76. A Figura 27 apresenta o exemplo da seleção do ligante de PG 64-22.



Asphalt Mix
 Asphalt Binder
 Asphalt General

Options:

- Superpave binder grading
- Conventional viscosity grade
- Conventional penetration grade

High Temp (°C)	Low Temp (°C)						
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46
46							
52							
58							
64							
70							
76							
82							

A: VTS:

Figura 27: Definição do ligante

Em seguida se definem as propriedades gerais da camada asfáltica. Em itens são citados e definidos as propriedades contidas na Figura 28.

Reference temperature: Temperatura de referência utilizada para compor a curva mestre, utilizada para definir com precisão a dependência tempo-temperatura da mistura. Utilizou-se o valor de 77 graus Fahrenheit (25 graus Celsius).

Volumetric Properties as Built: Propriedades volumétricas da mistura como preparada, são elas *Effective binder content* (quantidade de ligante efetiva), *Air voids* (volume de vazios), e *Total unit weight* (peso total da mistura). Os valores definidos encontram-se apresentados na Figura 28.

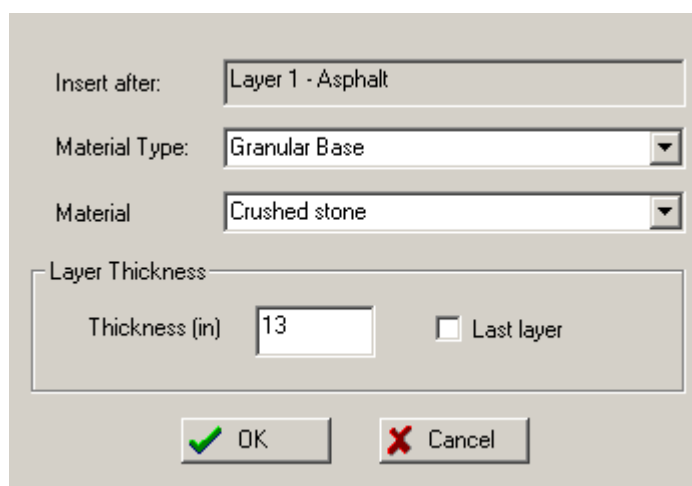
Poisson's Ratio: Para misturas asfálticas o coeficiente de Poisson normalmente varia entre 0,15 e 0,50 e é uma função da temperatura. Para este projeto o valor adotado foi de 0,30.

Thermal Properties: São duas propriedades térmicas da mistura, a primeira sendo a *thermal conductivity asphalt* que indica a quantidade de calor que flui ortogonalmente através de uma superfície de área e espessura unitárias por unidade de tempo devido a variação de temperatura; a segunda, *heat capacity asphalt*, é o calor necessário para elevar a temperatura de uma unidade de massa de material para uma unidade de temperatura.

Section	Parameter	Value
General	Reference temperature (F°)	70
	Binder content by weight(%)	
	Optimum binder content (OBC) (%)	
Gravimetric Properties (Mix Design)	Design air voids used to select OBC (%)	
	Effective binder content (%)	12
	Air voids (%)	8.5
Volumetric Properties as Built	Total unit weight (pcf)	148
	Poisson's Ratio	
Poisson's Ratio	Use predictive model to calculate Poisson's ratio.	<input type="checkbox"/>
	Poisson's ratio:	0.35
	Parameter a:	
Thermal Properties	Parameter b:	
	Thermal conductivity asphalt (BTU/hr-ft-F°)	0.67
	Heat capacity asphalt (BTU/lb-F°)	0.23

Figura 28: Propriedades gerais da camada asfáltica

Assim a camada de revestimento está completamente configurada, agora faz se necessário a configuração das duas próximas camadas. Clicando em *insert* na janela semelhante a da Figura 25 uma nova janela irá se abrir, nesta deve-se selecionar o tipo de material e o material, assim como a espessura da camada. Como esta é a camada de base o *material type* será *granular base*, em *material* será *crushed stone*, a espessura da camada será de 6, 12 e 18 polegadas (aproximadamente 15, 30 e 45 centímetros). A opção *last layer* permanecerá desmarcada por agora. A Figura 29 apresenta o exemplo da janela de adição de camadas.



Insert after: Layer 1 - Asphalt

Material Type: Granular Base

Material: Crushed stone

Layer Thickness

Thickness (in) 13 Last layer

OK Cancel

Figura 29: Adicionando camada de base

Após adicionada a camada de base é possível alterar suas propriedades, da mesma maneira realizada anteriormente para a camada de revestimento.

Diversos níveis de dados podem ser selecionados para a camada de base, mas para este projeto utilizou-se apenas o nível 3, o qual permite a escolha do módulo da camada. Como especificado anteriormente, três módulos serão utilizados para esta camada, 21755, 43511 e 65266 psi (aproximadamente 150, 300 e 450 MPa), e o coeficiente de Poisson será de 0,35. É possível classificar a camada de base de acordo com a granulometria, porém para este projeto manteve-se os valores padrões.

Por fim, adiciona-se a última camada, a de subleito, cujo *material type* é *subgrade*, o *material* é o definido como A-7-5 na classificação HRB. E desta vez, a opção *last layer* é marcada, definindo-se assim o fim da estrutura, e automaticamente determinando que esta camada possui espessura semi infinita. Nas propriedades da camada, especificou-se o módulo em 14504 psi (aproximadamente 100 MPa) e o coeficiente de Poisson em 0,40. Os demais valores foram mantidos no padrão do programa.

4.2.2.7 *Trincamento Térmico*

Apesar deste projeto não analisar o trincamento térmico é importante ressaltar que o programa disponibiliza modelos de previsão de desempenho térmico. Nota-se que os modelos térmicos não possuem semelhança com os modelos de defeitos relacionados a carga, assim para a análise do trincamento térmico do revestimento a análise não considera as camadas inferiores.

4.2.2.8 *Iniciar Análise*

Com toda a estrutura montada já é possível dar início a análise, se todas as caixas encontram-se verdes basta clicar em *Run Analisis* na janela principal e esperar. Quando a análise estiver completa o programa irá expor automaticamente o resumo dos resultados, assim como já salvar tudo na pasta selecionada ao iniciar o projeto.

4.3 **NOTAS FINAIS**

É importante ressaltar que o programa MEPDG é encontrado em duas versões distintas, uma distribuída em discos compactos onde é necessário a presença do disco no leitor do computador, e outra distribuída de maneira digital, que após instalada necessita de conexão com a internet para se utilizar, pois possui uma verificação *online*. Outro defeito encontrado nesta versão é a existência de um tempo limite de uso, cessando o funcionamento em alguns meses.

5 RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos através da simulação computacional foram montadas inúmeras tabelas em busca de uma melhor organização. Os resultados foram então organizados de maneira gráfica, e são apresentados em três itens distintos, com base no tipo de defeito.

Para cada defeito, foram montados 6 figuras comparando o tempo com o desenvolvimento do defeito. Ainda, as figuras estão esquematizadas de maneira a possibilitar a comparação entre o tipo de ligante e as espessuras de revestimento.

Também foi realizada uma análise estatística do tipo ANOVA a partir dos dados coletados utilizando o programa *Estatística for Windows* (versão 4.3B), visando determinar quais variáveis independentes apresentam maior influência nas variáveis resposta, assim como determinar o modelo de regressão para prever a variável resposta a partir das variáveis independentes.

Definiram-se então as variáveis independentes sendo: espessura da base (EB), espessura do revestimento (ER), módulo da base (MB) e tipo de ligante. Seus valores foram então codificados entre -1 e 1, onde por exemplo módulos de 150, 300 e 450 MPa codificados se transformaria em -1, 0 e 1.

As variáveis resposta seguiram uma lógica levemente diferente, devido a existência de resultados para cada mês de cada ano. Então, os intervalos foram definidos a cada 24 meses, ou seja, a análise foi realizada sobre os 24, 48, 72, 96 e 120 meses. Como se pretende analisar o afundamento de trilha de roda (ATR), o trincamento por fadiga (TF) e o índice de irregularidade (IRI), as variáveis resposta ficaram definidas como ATR24, ATR48, ATR72, ATR96, ATR120, TF24, TF48, TF72, TF96, TF120, IRI24, IRI 48, IRI 72, IRI96, IRI120. Por se tratarem de variáveis respostas, seus valores não foram codificados.

5.1 AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA

A Figura 30 apresenta a comparação dos resultados de afundamento de trilha de roda, onde na coluna da esquerda têm-se os resultados do ligante de PG 64-22 e na da direita os de PG de 76-22.

Analisando a figura é possível notar que conforme se verifica um acréscimo na espessura do revestimento, tem se uma redução no ATR de uma maneira geral. Porém para algumas estruturas específicas, é possível notar um aumento no ATR com o aumento da espessura do revestimento quando utilizado o ligante de PG 64-22, em especial a estrutura com módulo de base de 300 MPa e 30 cm, apesar de sempre manter um desempenho superior as outras.

De uma maneira geral as estruturas com o ligante de PG 76-22 comportaram-se de maneira semelhante, inclusive a mistura com base de 300 MPa e 30 cm de espessura, a qual nestas condições não apresentou o maior desempenho.

Em comparação ao desempenho do pavimento para diferentes tipos de ligante, é possível verificar que o ligante de PG 76-22 apresentou menores deformações comparado ao ligante de PG 64-22.

Apenas por motivos de comparação, ressalta-se que a prática brasileira define o máximo afundamento de trilha de roda em 1,3 cm, comparado aos 1,9 cm (0,75 in) definidos como padrão pelo programa.

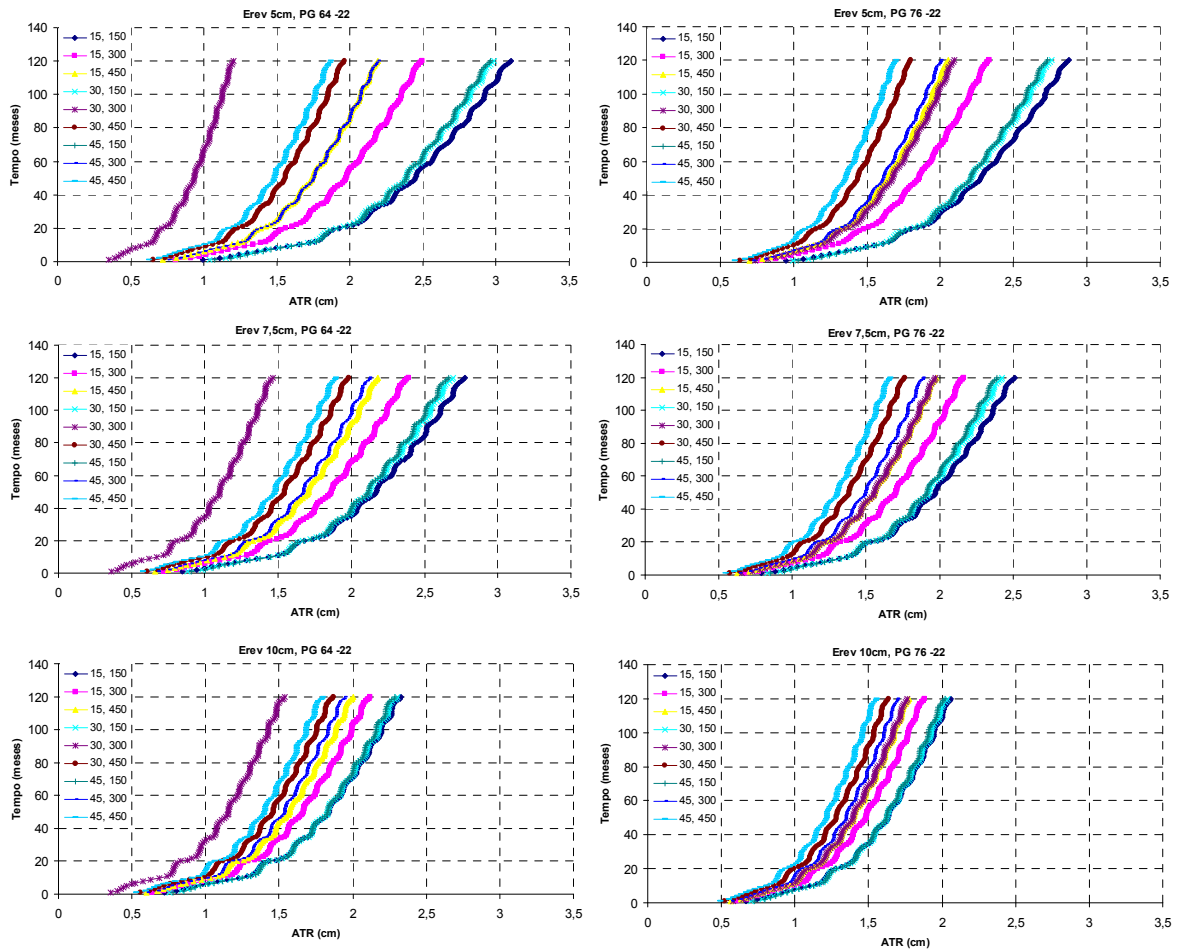


Figura 30: Comparações dos resultados de ATR

A Figura 31 apresenta as equações obtidas através da análise de regressão múltipla, para as variáveis resposta do ATR, considerando os 54 casos para cada tempo. Também estão expostos os valores de R^2 e do erro padrão.

É possível verificar que para todos os gradientes de tempo as variáveis influentes mantêm-se as mesmas, sendo elas o módulo da base (MB) e a espessura do revestimento (ER).

Variável Resposta	Modelo de Previsão	R ²	ε _p
ATR24	-0,242 * MB + -0,146* ER + -0,06 * EB + -0,009 * LG + 1,241	0,864	0,11
ATR48	-0,276* MB + -0,160 * ER + -0,07 * EB + -0,01 * LG + 1,457	0,867	0,12
ATR72	-0,299 * MB + -0,173 * ER + -0,09 * EB + -0,01 * LG + 1,612	0,869	0,14
ATR96	-0,321 * MB + -0,185 * ER + -0,09 * EB + -0,02 * LG + 1,748	0,870	0,15
ATR120	-0,339 * MB + -0,194 * ER + -0,107 * EB + -0,02 * LG + 1,87	0,871	0,16

Figura 31: Dados estatísticos do ATR

5.2 TRINCAMENTO POR FADIGA

A Figura 32 apresenta a comparação dos resultados de trincamento por fadiga, onde na coluna da esquerda têm-se os resultados do ligante de PG 64-22 e na da direita os de PG de 76-22.

Antes de dar início a análise se faz importante ressaltar a aparência dos gráficos, tendo em vista a existência de estruturas que fogem do padrão seguido pela maioria. Estas estruturas apesar de apresentarem resultados notavelmente diferenciados, seguem os padrões lógicos de trincamento.

Sendo assim, analisando primeiramente a espessura do revestimento, verifica-se um acréscimo do trincamento com o aumento da espessura para 7,5 cm, seguido de um decréscimo com o aumento para 10 cm. Esta condição se verifica para todas as estruturas com os valores de fadiga superior a 5% e ambos os tipos de ligante.

Em comparação ao tipo de ligante, tem-se que para o ligante de PG 76-22 os resultados foram levemente menores, apresentando trincamentos inferiores em cerca de 3%.

As estruturas que apresentaram os maiores valores em ordem decrescente foram as seguintes: 15-150, 30-150, 45-150 e 15-300 (valores relativos as espessuras e módulos da base respectivamente).

Por fim ressalta-se que o limite brasileiro de trincamento por fadiga é de 20% da área do pavimento, o qual não é obedecido ao fim dos 10 anos de projeto apenas pelas estruturas 15-150, 30-150 e 45-150.

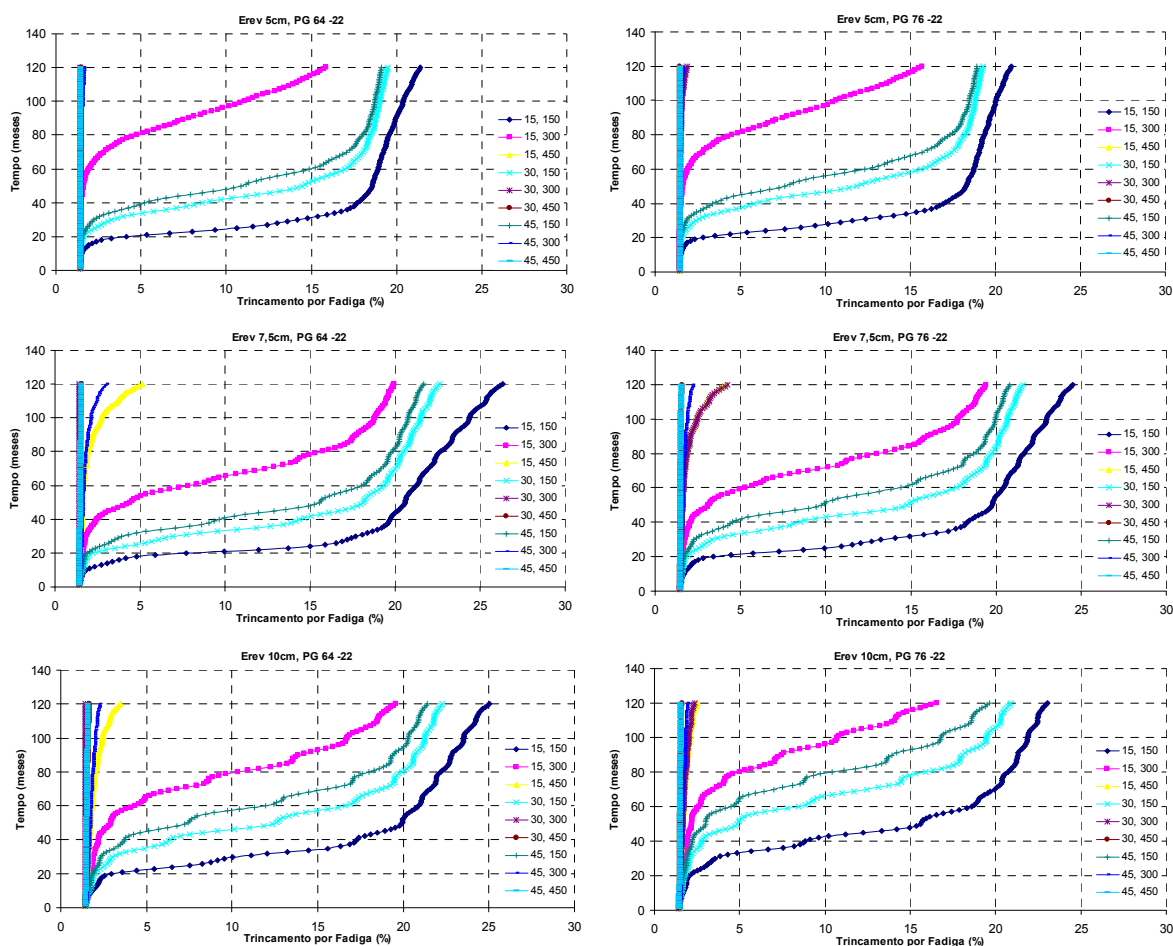


Figura 32: Comparações dos resultados de TF

A Figura 33 apresenta as equações obtidas através da análise de regressão múltipla, para as variáveis resposta do TF, considerando os 54 casos para cada tempo. Também estão expostos os valores de R^2 e do erro padrão.

É possível verificar que para todos os gradientes de tempo as variáveis de maior influência mantêm-se as mesmas, sendo elas o módulo da base (MB) e a espessura do revestimento (EB).

Variável Resposta	Modelo de Previsão	R ²	ε _p
TF24	-1,349 * MB + -1,056 * EB + -0,310 * LG + -0,120 * ER + 1,479	0,601	1,53
TF48	-5,759 * MB + -1,880 * EB + -0,640 * LG + -0,396 * ER + 2,525	0,936	1,82
TF72	-8,316 * MB + -1,708 * EB + -0,518 * LG + -0,022 * ER + 3,852	0,955	1,94
TF96	-9,333 * MB + -2,569 * EB + -0,476 * ER + -0,340 * LG + 5,160	0,915	2,97
TF120	-9,778 * MB + -3,428 * EB + -0,622 * ER + -0,237 * LG + 6,211	0,893	3,57

Figura 33: Dados estatísticos do TF

5.3 ÍNDICE DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

A Figura 34 apresenta a comparação dos resultados de irregularidade longitudinal, onde na coluna da esquerda têm-se os resultados do ligante de PG 64-22 e na da direita os de PG de 76-22.

Visando uma análise inicial da espessura do revestimento, verifica-se para o ligante de PG 64-22 que com a elevação da espessura tem-se uma queda dos valores de IRI para todas as configurações de estruturas exceto para a com base de 30 cm e módulo de 300 MPa, que apresentou um aumento considerável no IRI, apesar de sempre se permanecer com resultados gerais inferiores. Já para o ligante de PG 76-22 o IRI teve um declínio para todos os casos.

Em comparação aos ligantes, os resultados de IRI para o ligante de PG 76-22 apresentaram valores semelhantes, porém sempre inferiores aos do ligante de PG 64-22.

Apenas por caráter de informação, todas as estruturas cumpriram com os valores mínimos de 3,5 m/m mencionados na norma brasileira.

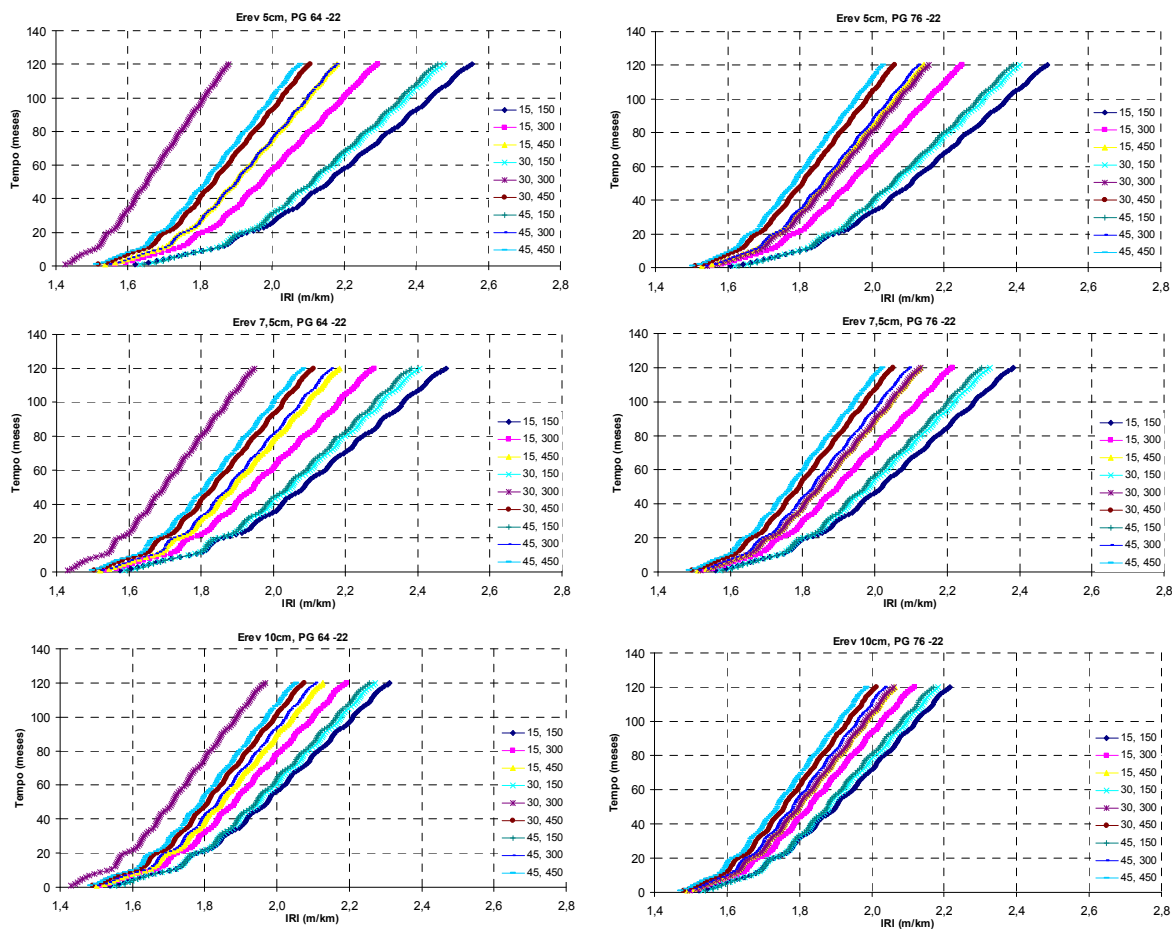


Figura 34: Comparações dos resultados de IRI

A Figura 35 apresenta as equações obtidas através da análise de regressão múltipla, para as variáveis resposta do IRI, considerando os 54 casos para cada tempo. Também estão expostos os valores de R^2 e do erro padrão.

É possível verificar que para todos os gradientes de tempo as variáveis de maior influência mantêm-se as mesmas, sendo elas o módulo da base (MB) e a espessura do revestimento (ER).

Variável Resposta	Modelo de Previsão	R ²	ε _p
IRI24	-0,080 * MB + -0,044 * ER + -0,022 * EB + -0,002 * LG + 1,713	0,874	,035
IRI48	-0,098 * MB + -0,049 * ER + -0,029 * EB + -0,003 * LG + 1,812	0,889	,040
IRI72	-0,113 * MB + -0,053 * ER + -0,035 * EB + -0,004 * LG + 1,904	0,896	,044
IRI96	-0,126 * MB + -0,056 * ER + -0,041 * EB + -0,004 * LG + 1,999	0,901	,047
IRI120	-0,137 * MB + -0,059 * ER + -0,047 * EB + -0,005 * LG + 2,093	0,905	,050

Figura 35: Dados estatísticos do IRI

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa, alcançadas através da análise gráfica e estatística dos resultados.

Também são feitas propostas para futuros trabalhos, de modo a dar continuidade a pesquisa.

6.1 CONCLUSÕES

Com o término do presente trabalho concluí-se quanto a(os):

- **Objetivos:** Os objetivos puderam ser concluídos de maneira geral com grande satisfação, apesar das dificuldades encontradas para a utilização dos dados das misturas em laboratório, as quais não puderam ser utilizadas para os fins desta pesquisa.
- **Metodologia:** Pode-se verificar que o programa utilizado possibilita uma análise completa e atual, pois tem incluso em seus modelos, métodos modernos de previsão do desempenho de pavimentos rígidos e flexíveis. Quanto à metodologia utilizada para verificação das variáveis de maior influência, ressalta-se que os resultados foram muito satisfatórios, alcançando objetivos claros e concisos.
- **Resultados:** Quanto aos resultados pôde-se observar:
 - a) Notou-se de maneira geral que os resultados ficaram separados em três grupos de dados, de acordo com os módulos das bases. Verificou-se que módulos de base maiores apresentavam defeitos de menor grandeza, e a mesma lógica pode ser conferida para espessuras da base.

- b) O ligante de PG 76-22 para a maioria dos casos apresentou desempenhos superiores aos do ligante de PG 64-22. Este fato está ligado as melhores propriedades reológicas do ligante.
- c) Quanto ao desempenho a fadiga, verificou-se que todas as estruturas com bases de módulo de 150 MPa (menor modulo de base utilizado nas simulações) apresentaram elevados graus de trincamento, quando comparados as outras misturas, as quais apresentaram valores menor variabilidade.
- d) A análise estatística pode comprovar o que foi verificado nos gráficos, ressaltando a importância do módulo da base no desempenho geral do pavimento. Pavimentos com bases mais rijas apresentam menor deslocamento do revestimento, resultando em menores tensões de tração e compressão.
- e) Verificou-se também que a espessura do revestimento foi a segunda maior variável de influência para os resultados de irregularidade e afundamento de trilha de roda, visto que com espessuras mais elevadas do revestimento a estrutura se tornava mais propícia a fluência do revestimento.
- f) Em suma, o módulo da base apresenta grande influência na determinação da vida de projeto do pavimento, seguido pela espessura do revestimento no caso do afundamento de trilha de roda e do índice de irregularidade, e pela espessura da base no caso do trincamento por fadiga.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios laboratoriais de módulo complexo em misturas, considerando como variáveis o envelhecimento a curto prazo e tipo de ligante, de maneira a verificar a influência destas no desempenho do pavimento.
- Incluir na análise o estudo do trincamento térmico, verificando a influência das propriedades de condutividade térmica e absorção de energia luminosa.
- Procurar montar um modelo climático da região para se utilizar no software, realizando então uma análise mais focada na realidade local, podendo-se fazer uso de ensaios de CBR do solo local entre outras variáveis.
- Incorporar no programa, através de resultados de módulo, bases estabilizadas quimicamente e materiais alternativos na composição da mistura asfáltica, como adição de cal e misturas asfálticas mornas.
- Calibrar modelos nacionais para que se torne possível a realização da previsão de desempenho de pavimentos flexíveis mais focados com as realidades e materiais brasileiros.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2002) - *Guide for design of pavement structures*. Washington: *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 2002.

AASHTO (2004) - *Guide for design of pavement structures*. Washington: *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 2004.

BARELLA, Rodrigo et al. **A Avaliação de Irregularidade com Perfilômetros Inerciais de Sensores Laser: Resultados Comparativos e Vantagens Técnicas**. 35a RAPv. Rio de Janeiro, 2004.

BERNUCCI, L; CERATTI, J; MOTTA, L; SOARES, J, **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2006.

BEZERRA NETO, R.S. **Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados Através dos Métodos Empírico do DNER e Mecanístico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos para a Região de Campo Grande (MS)**. 2004. 189p. Dissertação (Mestre em Engenharia dos Transportes) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

BROWN, E.R; KANDHAL, P.S; ZHANG, J. *Performance Testing for Hot Mix Asphalt*. Alabama: NCAT, 2001. 79p.

FRANCO, Filipe. **Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV**. 2007. 315p. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil), - COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação, Rio de Janeiro, 2007.

GILLESPIE, T. D. *Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask!*. Road Profile Users Group Meeting. Nebraska, 1992.

GRECO, J.A.S. **Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis Método Empírico do DNIT**. Minas Gerais, [200-?]. 7p.

HUANG, Y. H.. *Pavements Analysis and Design*. 2003. 2nd Ed., Prentice Hall Inc. New Jersey, E.U.A.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura M. G.; **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

PETERLINI, P.S; MARCON, A.F. Apresentação do Programa Computacional MEPDG Inserido no Guia da AASHTO/2002. In: CONINFRA – CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2008, São Paulo. **Anais...**São Paulo. 2008.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil), - COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação, Rio de Janeiro, 1991.

SAYERS, M.W.; KARAMIHAS, S.M. *The little book of profiling. Basis information about measuring and interpreting road profiles*. The regent of the University of Michigan. 1998. 98p.

SEVERI, A.A; BALBO, J.T; RODOLFO, M.P. **Conceitos Mecânicos Básicos Sobre Pavimentos Asfálticos**. São Paulo, 1998.

SMITH, K. D. *Smoothness Specifications for Pavements*. HCHRP, TRB, NRC, 2007.

SPECHT, L. P. **Notas de aula da disciplina Rodovias III**. Curso de Engenharia Civil. UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Disponível em: www.unijui.edu.br (apenas para alunos). Acesso em: 13 jun. 2008.

Louisiana Transportation Reserach Center - LTRC. Disponível em: <http://www.ltrc.lsu.edu/>. Acesso em: 18 out. 2009.

WHITEOAK, D. **SHELL *Bitumen Handbook***. Inglaterra: SHELL, 1990.

YODER, E. J.; WITCZACK, M. W. ***Principles of pavement design. Second Edition.*** New York: John Wiley & Sons, 1975. 711p.