

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/315076105>

Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando uma abordagem probabilística

Article · March 2012

CITATIONS

0

READS

24

3 authors:



Caio Rubens Santos

University of Minho

21 PUBLICATIONS 4 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Liedí Bernucci

University of São Paulo

97 PUBLICATIONS 327 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Carlos Yukio Suzuki

epusp

16 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Estudo da durabilidade da sinalização horizontal em campo e em laboratório [View project](#)



SOLOS LATERÍTICO FINOS NO ESTADO DO MARANHÃO [View project](#)

REVISTA

ABRV

Associação Brasileira de Pavimentação



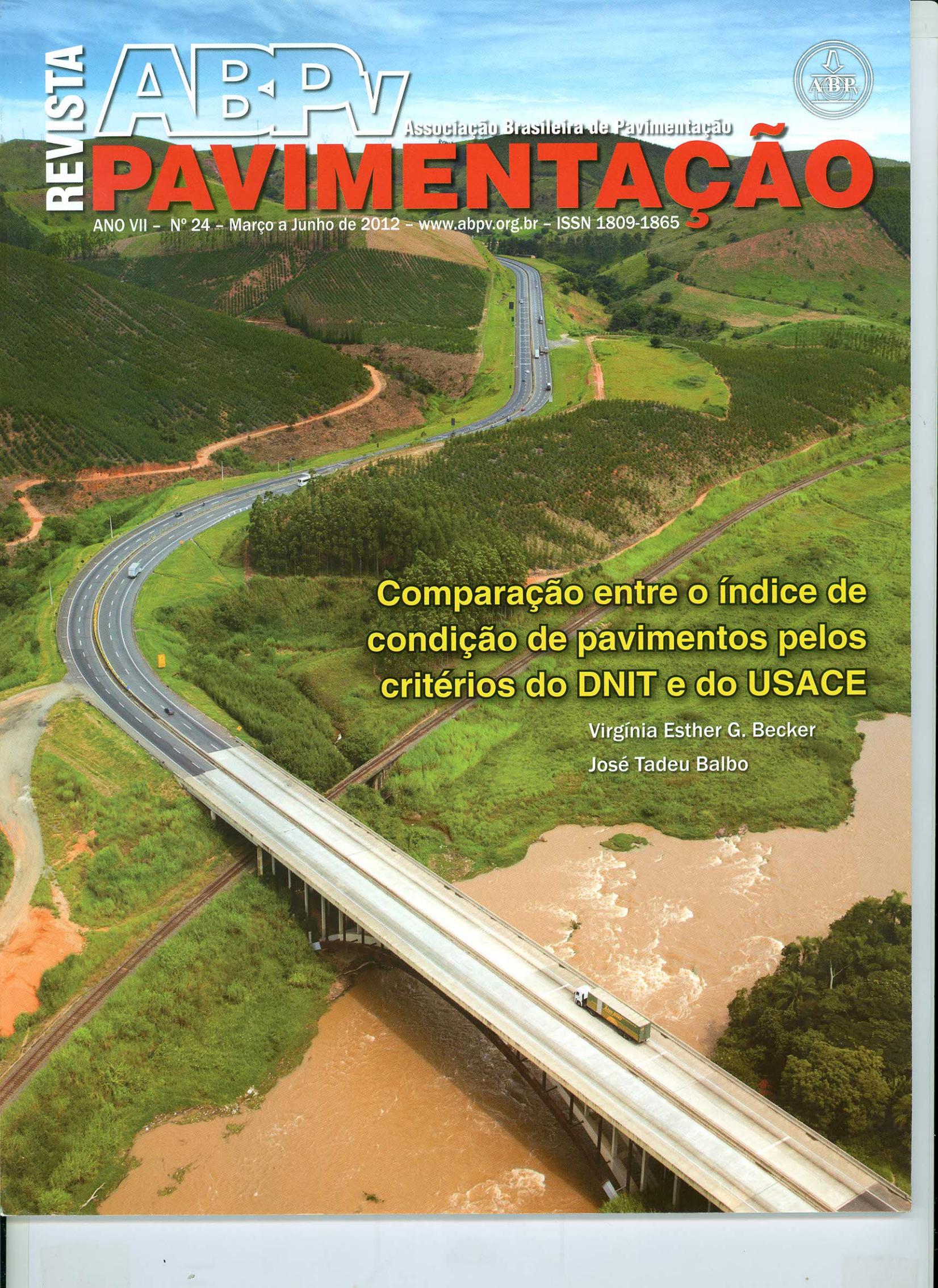
PAVIMENTAÇÃO

ANO VII - Nº 24 - Março a Junho de 2012 - www.abpv.org.br - ISSN 1809-1865

Comparação entre o índice de condição de pavimentos pelos critérios do DNIT e do USACE

Virgínia Esther G. Becker

José Tadeu Balbo



Considerações Sobre Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Utilizando uma Abordagem Probabilística

Caio Rubens Gonçalves Santos

Doutor e Mestre em Engenharia de Transportes pela USP, e Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Epusp), do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) e da Fundação Armando Álvares Penteado (Faap)
caiorubens@maua.br

Liedi Légi Bariani Bernucci

Doutora em Engenharia de Transportes pela USP, Mestre em Engenharia Geotécnica pela USP, Professora Titular da USP.
liedi@usp.br

Carlos Yukio Suzuki

Doutor e Mestre em Engenharia de Transportes pela USP, Graduado em Tecnologia em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia Industrial de Itatiba. suzuki@planservi.com.br

RESUMO

Frequentemente é utilizada a abordagem determinística em dimensionamentos de pavimentos rodoviários. A variabilidade inerente aos parâmetros pertinentes à implantação e ao desempenho de um pavimento é comumente desprezada, porém sua consideração pode ser contemplada com a utilização de uma abordagem probabilística, onde cada variável é caracterizada por meio de uma distribuição de probabilidade adequada. O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos concebido pelo professor Murillo Lopes de Souza, ainda largamente utilizado no Brasil e constante do *Manual de Pavimentação* do DNIT, determina uma espessura de material granular a ser implantada sobre o subleito, sendo esta convertida em espessuras de camadas de acordo com coeficientes estruturais dos materiais a serem empregados no pavimento. Selecionando espessuras superiores aos valores mínimos calculados pelo método, pode-se afirmar que o resultado é uma estrutura com uma maior probabilidade de sucesso ou, em outras palavras, uma maior confiabilidade. O método norte-americano da AASHTO de 1993, por sua vez, majora o número estrutural mínimo requerido, que expressa a robustez da estrutura de pavimento, em função da confiabilidade desejada. Este artigo propõe a utilização da abordagem probabilística no dimensionamento de um pavimento asfáltico. O modelo proposto determina a confiabilidade de uma estrutura frente a um tráfego previsto, durante um período de análise. São comparados o tráfego admissível e o previsto, ambos determinados por meio de simulações utilizando o método Monte Carlo. O modelo proposto determina a confiabilidade tanto para a equação de dimensionamento do método do DNIT, quanto da AASHTO. O estudo de caso conduzido evidenciou a variação da estrutura adotando-se uma análise probabilística do problema, e como o desempe-

nho previsto pode ser afetado por esta relação. A partir da variação das espessuras das camadas é possível, com o modelo proposto, o cálculo da confiabilidade, ou probabilidade de sucesso e falha, desta estrutura.

Palavras-chave: Pavimentos, Análise Probabilística, Dimensionamento, Confiabilidade, Simulação Monte Carlo.

ABSTRACT

The deterministic approach is frequently used in the design of highway pavements. The variability inherent to the construction and performance of pavements is usually neglected, although it could be considered using the probabilistic approach, where each variable is characterized by a suitable probabilistic distribution. The asphalt pavement design method developed by Prof. Murillo Lopes, present in the Paving Manual of the DNIT, is still the mostly used in Brazil and is based on the deterministic approach. This paper suggests the consideration of the probabilistic model for the design of asphalt pavements, using the reliability of a pavement structure based on the expected traffic, during the period of analysis. The acceptable and expected traffic are determined through simulations using the Monte Carlo method, and then compared. The proposed model determines the reliability for the DNIT and the AASHTO design methods. The paper presents a case study comparing the probabilistic and the deterministic analysis and shows how the pavement performance can be affected.

Keywords: Pavements, Probabilistic Analysis, Design, Reliability, Monte Carlo Simulation

I INTRODUÇÃO

Os parâmetros considerados em um projeto de pavimento de uma rodovia são de natureza probabilística. Nenhum deles possui um valor único, determinístico, de modo que o tratamento estatístico não pode ser dispensado (Motta, 1991). Em uma análise determinística de uma seção de pavimento, os modelos utilizam parâmetros de projeto, que se constituem no valor médio, ou ainda deste valor acrescido ou subtraído de parcela envolvendo o desvio-padrão, para a previsão dos principais indicadores funcionais e estruturais ao longo da vida útil do pavimento. Quando são empregados valores médios dos parâmetros considerados, o resultado da análise possui uma confiabilidade de 50%, ou seja, existe uma probabilidade de 50% de ser maior ou menor do que o previsto.

Atualmente no Brasil são utilizados largamente em projetos de pavimentos asfálticos, métodos de dimensionamento essencialmente determinísticos. Dentre eles destacam-se o método da resistência do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), originalmente concebido em 1966 pelo professor Murillo Lopes de Souza, o método do DER/SP e o da Prefeitura de São Paulo, todos com o mesmo tipo de abordagem determinística.

A introdução da abordagem probabilística no dimensionamento de um pavimento possibilita a determinação da confiabilidade, ou seja, da probabilidade de sucesso da estrutura segundo determinado modelo de dimensionamento ou desempenho. Nesse tipo de abordagem, tanto os resultados quanto os parâmetros de entrada devem ser caracterizados segundo sua probabilidade de ocorrência, e não somente por um valor médio discreto.

Em uma definição mais ampla, a confiabilidade pode ser definida como um atributo inerente ao projeto de um produto e representa a capacidade potencial que deveria ser atingida em condições habituais, desde que o produto seja fabricado exatamente conforme projetado e operado, e mantido exatamente nas condições prescritas. No âmbito rodoviário, a confiabilidade do processo de projeto-desempenho do pavimento é a probabilidade de que uma seção do pavimento projetado, usando o referido processo, irá trabalhar de maneira satisfatória sob as solicitações de tráfego e as condições ambientais durante o período de projeto (AASHTO, 1993).

O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia para a abordagem do aspecto probabilístico no dimensionamento de pavimentos asfálticos, verificando-se a dimensão do impacto das incertezas das variáveis no resultado. É utilizado o método de simulação Monte Carlo nessa análise. São utilizadas as equações de dimensionamento do DNIT (2006), essencialmente determinística, e da AASHTO (1993), que possui a consideração de níveis de confiabilidade.

2 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA – INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE RISCO

Análise de risco é um termo utilizado para descrever qualquer método quantitativo ou qualitativo para avaliar os impactos do risco em situações de decisão. Walls III e Smith (1998) definiram a análise de risco como uma combinação da descrição probabilística da variação de cada parâmetro de entrada da análise com simulações para caracterizar o risco associado aos possíveis resultados. Quantificar as incertezas e avaliar seus efeitos em projeto e no desempenho de uma estrutura assume uma grande importância na tomada de decisão. Segundo Tighe (1999) é evidente que na previsão do desempenho de uma estrutura de pavimento de uma rodovia, as incertezas devem ser consideradas para que os resultados sejam relevantes para o “mundo real”.

A abordagem probabilística, com a consideração das incertezas e variações inerentes aos parâmetros que compõem a análise vem ganhando destaque entre trabalhos e estudos de pavimentos. Tighe (2001) desenvolveu uma análise probabilística incorporando média, variância e distribuições probabilísticas típicas para variáveis da construção do pavimento, como espessura e custo. Li e Madanu (2009) propõem uma estrutura generalizada para uma análise dos benefícios decorrentes de um projeto. A estrutura para análise do custo-benefício em nível de projeto baseia-se nas incertezas associadas às variáveis de entrada, sendo esses parâmetros de entrada caracterizados de acordo com sua variabilidade, a saber:

- certeza (o parâmetro de entrada é puramente determinístico com um único valor);
- risco (o parâmetro de entrada possui uma série de possibilidades de acordo com uma distribuição probabilística conhecida); e
- incerteza (o parâmetro de entrada possui uma série de possibilidades com probabilidades desconhecidas).

Se um parâmetro de entrada está sob certeza, um único valor é utilizado, se está sob risco é utilizada uma probabilidade matemática e se esse parâmetro está sob incerteza, pode ser adotado um único valor determinado de acordo com regra de decisão do modelo de Shackle.

Whiteley, Tighe e Zhang (2005) estudaram os efeitos das variações de alguns parâmetros na análise de custo do ciclo de vida e propõem a incorporação probabilística dessas variações. Foram avaliadas variações no desempenho em até 30%. As diferenças calculadas por meio das análises de ciclo de vida são então utilizadas para a especificação de um fator de pagamento. A execução de pavimentos com desempenho inferior ao desejado, ou projetado, implicaria em descontos diretamente proporcionais às variações de custo calculadas nas análises LCCA (Life Cycle Cost Analysis). Para a incorporação de conceitos de incerteza e/ou de risco em uma análise qualquer, a definição das distribuições probabilísticas mais adequadas para cada parâmetro assume grande importância.

3 PAVIMENTOS E AS DISTRIBUIÇÕES PROBABILÍSTICAS

A escolha da distribuição probabilística que melhor represente cada característica do pavimento é fator de extrema importância para o sucesso de uma análise de risco. Geralmente, essas distribuições são determinadas a partir de amostras significativas. Em um pavimento asfáltico, as principais características que influem no desempenho global da estrutura são a espessura, a homogeneidade dos materiais e o módulo de resiliência de cada camada, inclusive do subleito.

A distribuição normal é largamente utilizada em diversos trabalhos. Vennalaganti, Ferregut e Nazarian (1994) utilizaram a distribuição normal na modelagem de seu experimento. Para todos os parâmetros de entrada, deflexões, espessuras das camadas, carga do ensaio e coeficiente de Poisson, a caracterização seguiu uma distribuição normal, com uma média e desvio-padrão. Como resultado, concluíram que os módulos de resiliência das camadas do pavimento analisado seriam mais bem caracterizados por uma distribuição lognormal. Mladenovic et al. (2003) utilizaram os dados de espessuras de projeto e de *as-built* provenientes do projeto norte-americano LTPP (Long-Term Pave-

ment Performance), no ano de 2001, visando verificar eventuais diferenças entre as espessuras projetadas e as efetivamente implantadas. Como resultado, obtiveram que na maioria dos casos esta diferença, para camadas com mesmo material, segue uma distribuição normal. Reigle e Zaniewski (2002) utilizaram em seu modelo de análise, a modelagem de todas as variáveis segundo uma distribuição normal. Nesse modelo, tanto os parâmetros de entrada como de saída foram caracterizados pela distribuição gaussiana, porém houve a preocupação de se utilizar a distribuição normal truncada (evitando valores menores que zero na análise).

A seleção da distribuição probabilística na caracterização dos parâmetros em uma análise probabilística de pavimento tem vital importância na qualidade dos resultados. Além disso, a utilização de bancos de dados para a identificação de distribuições mais adequadas para cada característica do pavimento parece ser o caminho mais seguro para uma análise de qualidade, porém na ausência desses dados, a distribuição normal apresenta-se como uma boa solução nessa etapa da análise (Reigle, 2000).

4 CONFIABILIDADE

Em 1971, Lemer e Moavenzadeh¹ (apud Reigle, 2000) avaliaram a incerteza envolvida em todos os aspectos do processo de concepção do pavimento, desde o planejamento e projeto até a construção, operação e manutenção. Os autores discutiram a importância da consideração da confiabilidade como um parâmetro de projeto, e concluíram que sua inclusão nessa etapa tem o potencial para o dimensionamento de pavimentos economicamente eficientes. O conceito de confiabilidade foi incorporado no guia da AASHTO de 1986, utilizando os conceitos desenvolvidos por Irick, Hudson e McCullough (1987).

Em um método de concepção determinística, o projetista normalmente atribui um fator de segurança para os parâmetros que são incertos ou têm um efeito significativo sobre o dimensionamento final. No entanto, essa abordagem de dimensionamento tradicional pode resultar em estruturas tanto superdimensiona-

¹ LEMER, A.C.; MOAVENZADEH, F. *Reliability of highway pavements*. Highway Research Record 362. Washington D.C., 1971. p. 1-8.

das quanto subdimensionadas, dependendo da magnitude dos fatores de segurança aplicados e da sensibilidade dos modelos de dimensionamento (Huang, 2004). Em um método probabilístico de projeto de pavimentos, cada parâmetro de projeto é descrito por uma distribuição de probabilidade, e a confiabilidade do projeto pode ser avaliada.

Os métodos de dimensionamento da United States Army Corps of Engineers (USACE) são puramente determinísticos (Pittman; Opelika, 1996). O método da resistência, empregado pelo DNIT em seu manual, concebido pelo professor Murillo Lopes de Souza, tem por base o trabalho *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume* de autoria de Turnbull, Foster e Ahlvin (1962), do USACE, e conclusões obtidas na pista experimental da AASHTO, sendo que o principal objetivo da estrutura dimensionada é a proteção contra a ruptura por tensões de cisalhamento no subleito. Nesses métodos, puramente determinísticos, as possíveis variações inerentes a cada uma das variáveis de entrada do processo não são consideradas. A grande maioria dos métodos que tomam por base o método do USACE adota a abordagem determinística. O método de dimensionamento da AASHTO, desde sua primeira concepção utiliza conceitos probabilísticos.

Motta (1991) introduz pioneiramente no Brasil a discussão de adoção da confiabilidade em dimensionamento de pavimentos. Suzuki et al. (2001, 2004) ressaltaram a necessidade de se incorporar o conceito de confiabilidade nos métodos brasileiros puramente determinísticos. A análise de sensibilidade conduzida por Suzuki et al. (2004) permitiu constatar a necessidade da utilização de procedimentos de dimensionamento probabilísticos, em função da variabilidade dos resultados encontrados ao se aplicar um procedimento simplificado para consideração da confiabilidade no dimensionamento. Verificaram que para uma confiabilidade de 99,9%, há necessidade de majorar a espessura (determinada pelo método de resistência do DNIT), expressa em termos de material granular, da ordem de 10% a 20%. Esses autores concluem ainda que em termos de confiabilidade estatística pode-se, em função dos resultados de campo do pavimento construído (*"as built"*), estimar o acréscimo ou redução da vida útil e com isso estabelecer políticas de penalização ou bonificação nas obras futuras de pavimentação.

5 CONFIABILIDADE NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS – MODELO PROPOSTO

O modelo proposto está configurado em planilhas do programa Microsoft Excel®. A figura 1 ilustra resumidamente o fluxo de informações, desde os dados de tráfego e a estrutura de pavimento asfáltico a ser testada, até o cálculo da confiabilidade dessa estrutura ante o tráfego previsto. Para a determinação da confiabilidade, o modelo utiliza o número N – repetições de carga do eixo padrão – como critério de ruptura, conforme demonstrado em Huang (2004). São calculados e comparados dois tipos de números N: o previsto e o admissível. Segundo Huang (2004), o uso das repetições de carga do eixo padrão como critério de ruptura é apenas um dos vários métodos para avaliar a confiabilidade de um projeto. Cita ainda como exemplo o software VESYS, que é um modelo probabilístico e mecanicista de análise de pavimentos flexíveis. Esse modelo (VESYS) emprega a serventia como critério de ruptura, e o tráfego é tratado como uma das muitas variáveis que afetam a serventia do pavimento.

No modelo proposto, que utiliza abordagem probabilística, tanto a caracterização do número de repetições previsto (n) durante o período de projeto, quanto o número de repetições admissível (N) são definidos por distribuições de probabilidade provenientes de simulações estocásticas de modelos determinísticos. Para as simulações, as variáveis de entrada dos modelos são definidas através do valor médio e desvio-padrão, segundo uma distribuição normal.

O tráfego, caracterizado pelo número de repetições do eixo padrão (número N), é um dos mais importantes fatores de projeto de pavimentos. Existem dois tipos de números N: o previsto e o admissível. Em um método determinístico, ambos os números N (previsto e admissível) são caracterizados por um único valor, já nos métodos probabilísticos são caracterizados por uma média e o respectivo desvio-padrão. Em um projeto com abordagem determinística, os dois valores de número N são comparados diretamente, a estrutura proposta sempre deve apresentar valor admissível de aplicações do eixo padrão superior ao previsto. Já na abordagem probabilística, onde o projeto está baseado na variabilidade das aplicações de carga, deve ser utilizado o conceito de índice de dano.

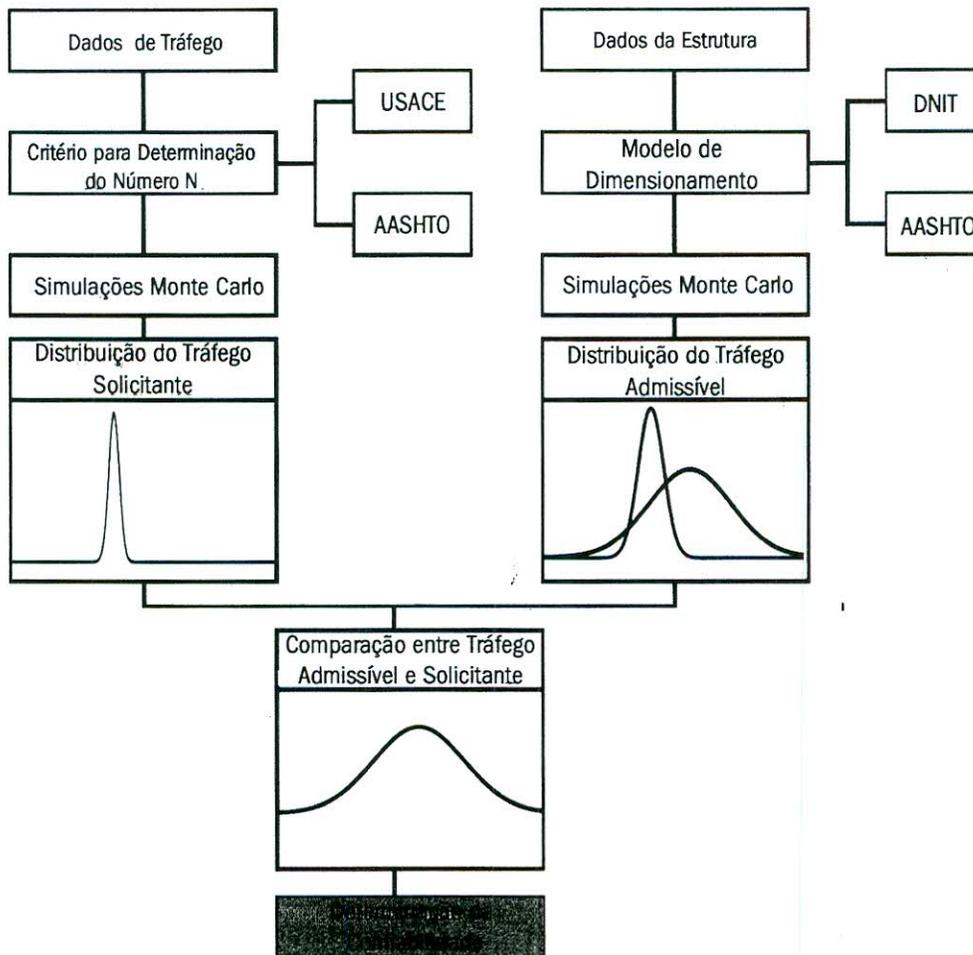


Figura 1 – Esquema do modelo para determinação de confiabilidade no dimensionamento de pavimentos asfálticos

O índice de dano, que é a relação entre o número atuante previsto e o admissível de repetições, deve ser calculado para cada grupo de cargas em cada período do ano, e é determinado pela equação (1).

$$D_R = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (1)$$

Onde:

D_R = índice de dano;

n_{ij} = número de repetições previsto para uma carga j em um período i ;

N_{ij} = número de repetições admissível para uma carga j em um período i ;

p = número de períodos considerados na análise;

m = número de cargas consideradas na análise.

Para a caracterização do número de repetições previsto (n) durante o período de projeto definido, utilizam-se a equação (2) a seguir.

$$n = (365) \cdot (VDM_i) \cdot (VP) \cdot (FV) \cdot (FD) \cdot (FF) \cdot (P) \cdot (TC_A) \quad (2)$$

Onde:

VDM_i = volume diário médio no ano inicial;

VP = porcentagem de veículos pesados;

FV = fator de veículos;

FD = fator direcional;

FF = fator de faixa;

P = período de projeto, em anos;

TC_A = fator de crescimento acumulado no período de projeto.

O fator de crescimento pode ser calculado de maneiras diferentes, assumindo-se diferentes formas de progressão, neste artigo utiliza-se a formulação de crescimento geométrico usada no guia da AASHTO (1993) dada pela equação (3).

$$TC_A = \frac{(1+i)^p - 1}{i} \quad (3)$$

Onde:

i = taxa anual de crescimento;

p = período de projeto, em anos.

O número de repetições admissível (N) deve ser calculado por meio do modelo de dimensionamento da estrutura. Nesse ponto deve ser selecionado um modelo para a condução da análise, e sempre verificando a compatibilidade entre o cálculo do tráfego previsto e o admissível. Ambos devem ser determinados utilizando-se o mesmo conceito de dano, ou seja, aquele também utilizado no cálculo do Fator de Veículos do tráfego previsto. Para dimensionamentos que se utilizam do tráfego caracterizado segundo a metodologia da AASHTO, segundo a mesma metodologia deve ser determinado o Fator de Veículos. O mesmo deve ocorrer se a metodologia for USACE (United States Army Corps of Engineers). Os métodos de dimensionamento de pavimentos selecionados para a determinação do número N admissível no modelo proposto são apresentados adiante.

Para a determinação da confiabilidade do dimensionamento, os tráfegos, previsto e admissível, devem ser calculados probabilisticamente, ou seja, devem ser caracterizados por um valor médio e uma variância. Quanto maior o universo amostral, mais a distribuição se aproxima de uma curva gaussiana (normal), sendo assim, deve ser utilizado um número elevado de simulações ou de amostras. A distribuição estatística selecionada para caracterizar o tráfego foi a distribuição lognormal. Portanto, utilizando o conceito de Índice de Dano, tem-se a equação (4).

$$D_R = \frac{n}{N} \quad \text{ou} \quad \log D_R = \log n - \log N \quad (4)$$

Conhecidos os valores de $\log n$, $\text{Var}[\log n]$, $\log N$, $\text{Var}[\log N]$, a confiabilidade R é caracterizada pela probabilidade da diferença entre o logaritmo do tráfego admissível e o logaritmo do tráfego previsto ser menor que 0, conforme a equação (5).

$$R (\%) = p(\log n - \log N < 0) \quad (5)$$

Sendo $\log(n)$ e $\log(N)$ os valores médios das distribuições tipo lognormal que caracterizam os tráfegos

previsto e admissível, respectivamente, e $\log(D_r)$ a distribuição, também lognormal, do índice de dano, por sua vez caracterizado pela relação entre n e N ($D_r = n/N$), a variância e o desvio-padrão de $\log(D_r)$ podem ser descritos pelas equações (6) e (7).

$$\text{Var}[\log D_R] = \text{Var}[\log n] + \text{Var}[\log N] \quad (6)$$

$$s[\log D_R] = \sqrt{\text{Var}[\log D_R]} \quad (7)$$

Portanto, assumindo que o índice de dano é descrito por uma distribuição lognormal, o valor da confiabilidade pode ser calculado aproximando a distribuição resultante para uma distribuição normal padrão, utilizando as equações (8) e (9).

$$Z_R = \frac{0 - \log D_R}{s} \quad (8)$$

$$R(\%) = p(Z_R) \quad (9)$$

Onde:

Z_R = variável aleatória padronizada;

s = desvio-padrão de D_R ;

R = confiabilidade.

Modelos de dimensionamento onde a confiabilidade é avaliada são notadamente mais adequados para o projeto de pavimentos. Visando esses modelos de dimensionamento, estudos no sentido de introduzir o conceito da confiabilidade nos dimensionamentos têm ocorrido. No campo dos pavimentos de aeroportos, Chou (1997) e Chen e Flintsch (2007) propuseram a avaliação da confiabilidade nessas estruturas. Sanchez-Silva et al. (2005) é outro exemplo acerca da introdução da confiabilidade no dimensionamento de estruturas asfálticas.

Em suma, a confiabilidade está diretamente ligada à variabilidade dos parâmetros que descrevem tanto o tráfego solicitante quanto o admissível. Nessa abordagem, probabilística, cada parâmetro é descrito por uma distribuição probabilística. Huang (2004) resumiu diversos valores de coeficientes de variação que foram usados em experiências anteriores para definir as distribuições de probabilidade para parâmetros, tanto do tráfego quanto do desempenho da estrutura.

As tabelas 1 e 2 apresentam os valores de coeficientes de variação para os parâmetros de previsão do tráfego, de desempenho de pavimentos asfálticos, respectivamente. Esses valores, retirados por Huang (2004) do guia de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO de 1986, são utilizados como referência no modelo proposto.

Tabela 1 – Coeficientes de variação para parâmetros de previsão do tráfego (adaptado de Huang, 2004)

Descrição	Coefficiente de Variação (%)
Somatória Fator de carga vezes Distribuição de eixos	35
Volume Médio Diário Inicial	15
Fator de Crescimento	10
Porcentagem de Veículos Pesados	10
Número Médio de Eixos por Veículo	10
Previsão Global do Tráfego	42

Fonte: AASHTO (1985)

Tabela 2 – Coeficientes de variação para parâmetros de desempenho de pavimentos asfálticos (adaptado de Huang, 2004)

Descrição	Coefficiente de Variação (%)
Índice de Serventia Inicial	6,7
Coefficiente Estrutural do Revestimento	10,0
Espessura do Revestimento	10,0
Coefficiente Estrutural da Base	14,3
Coefficiente Drenagem da Base	10,0
Espessura da Base	10,0
Coefficiente Estrutural da Subbase	18,2
Coefficiente Drenagem da Subbase	10,0
Espessura da Subbase	10,0
Módulo de Resiliência do Subleito	15,0

Fonte: AASHTO (1985)

6 MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DO TRÁFEGO ADMISSÍVEL

6.1 MÉTODO DO DNIT

A última revisão do método de dimensionamento do DNIT é parte integrante da edição do *Manual de Pavimentação* do DNIT de 2006 (DNIT, 2006). Segundo tal procedimento, determina-se a espessura total necessária para o pavimento, dada em termos de material granular, em função dos dados geotécnicos e das características de tráfego solicitante. Este último parâmetro também é utilizado para a seleção da espessura mínima do revestimento asfáltico.

Definidas essas espessuras, procede-se ao cálculo das espessuras das demais camadas constituintes da estrutura do pavimento. Dadas em termos de material granular, as camadas são convertidas para espessuras reais dos materiais utilizados através dos coeficientes de equivalência estrutural, que expressam a relação entre a espessura de material granular e do material utilizado, de forma que ambos, nas respectivas espessuras, apresentem desempenho estrutural semelhante. As equações (10) e (11) representam o ábaco de dimensionamento apresentado no método, pela determinação da espessura total em termos de material granular em função do tráfego solicitante e da capacidade de suporte do solo (CBR) do subleito.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (10)$$

$$N = 6,069 \times 10^{-40} \times H_t^{20,747} \times CBR^{12,407} \quad (11)$$

Onde:

H_t = espessura total do pavimento (cm);

N = número de repetições do eixo padrão de 80 kN;

CBR = índice de suporte Califórnia do subleito (%).

A equação (12) ilustra a relação entre a espessura granular total e as espessuras e coeficientes estruturais de cada camada de um pavimento asfáltico.

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + H_{SB} \cdot K_{SB} \geq H_t \quad (12)$$

Onde:

R = espessura do revestimento;

B = espessura da base;

H_{SB} = espessura da sub-base;

K_R, K_B, K_{SB} = coeficientes de equivalência estrutural.

6.2 MÉTODO DA AASHTO

A concepção do método de dimensionamento da AASHTO teve seu início na década de 50 nos Estados Unidos quando foi realizado um estudo do desempenho de vários tipos de estruturas de pavimento por meio da avaliação dos efeitos das cargas do tráfego de magnitude e frequência conhecidas. As informações adquiridas na pista experimental da AASHO Road Test foram cruciais para o progresso dos estudos de desempenho de pavimentos, dimensionamento estru-

tural, equivalência de carga e efeitos climáticos. Com as informações, vieram os gráficos e as equações de dimensionamento utilizadas no guia de dimensionamento de pavimentos da AASHTO. Foi durante a avaliação da pista experimental da AASHTO que surgiu o conceito de serventia (PSI – *Present Serviceability Index*) e de desempenho que, hoje, norteia alguns projetos de pavimento.

A equação preconizada no método, que relaciona o tráfego (número N), serventia e as espessuras de camadas para descrever o desempenho de dado pavimento asfáltico no tempo, para pavimentos asfálticos, é descrita a seguir na equação (13).

$$\log(N) = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{p_0 - p_t}{p_0 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log(M_r) - 8,07 \quad (13)$$

Onde:

SN = número estrutural do pavimento (pol);

p_0 = serventia inicial (após a construção) do pavimento asfáltico;

p_t = serventia terminal (final do período de projeto);

M_r = módulo de resiliência efetivo do subleito, em lb/pol²;

Z_R = nível de confiabilidade (Confiabilidade Estatística);

S_0 = desvio padrão.

O número estrutural SN (*Structural Number*) é calculado pela equação (14) apresentada a seguir.

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + H_{SB} \cdot K_{SB} \geq H_t \quad (14)$$

Onde:

a_i = coeficiente estrutural da i-ésima camada;

D_i = espessura (em polegada) da i-ésima camada;

m_i = coeficiente de drenagem da i-ésima camada.

Para o dimensionamento convencional utilizando o método da AASHTO (equação 13), é introduzida a confiabilidade pela consideração dos termos Z_R e S_0 . São recomendados no guia valores para esses dois termos em função do tipo e importância do projeto em estudo. Esses valores são provenientes das análises de dados realizadas na pista experimental do mesmo órgão.

Note-se que o modelo de dimensionamento da AASHTO (1993) descrito na equação (15) está apresentado segundo uma abordagem determinística, sendo que a abordagem probabilística do dimensionamento será considerada na variabilidade dos parâmetros in-

dependentes do modelo. A modificação foi a exclusão do termo $Z_R \cdot S_0$, referente à confiabilidade. As pesquisas realizadas na pista experimental da AASHTO Road Test, que mais tarde resultariam no método da AASHTO/93, representaram um grande salto de qualidade para os novos métodos de dimensionamento de estruturas de pavimento. O método da AASHTO/93, embora seja um método desenvolvido com bases empírico-estatísticas, leva em consideração uma maior quantidade de variáveis que podem influenciar no desempenho da estrutura, em comparação ao método do Corpo de Engenheiros (USACE).

Em suma, para se considerar as incertezas dos parâmetros em um método de dimensionamento de pavimentos, deve-se verificar a concepção do método. O método da AASHTO possibilita, por exemplo, a variação das características dos materiais constituintes das camadas do pavimento, pelos coeficientes estruturais. Esses coeficientes são caracterizados, no método, por meio de valores variáveis em função dos módulos de elasticidade, para revestimento asfáltico, resistência à compressão para materiais cimentados, CBR para solos e materiais granulares, entre outros. Já o método da resistência do DNIT, baseado no método do USACE, utiliza coeficientes estruturais caracterizados por valores discretos para cada tipo de material. Nesse último método, é difícil a distinção, por exemplo, de um dimensionamento onde é utilizado um revestimento com ligante asfáltico modificado por polímero ou por borracha de um com ligante convencional; já no método da AASHTO, essa consideração pode ser represen-

No modelo proposto, o tráfego admissível (N) é determinado utilizando a equação de dimensionamento da AASHTO (1993) sem os parâmetros relativos à confiabilidade, que é apresentada na equação (15).

$$\log(N) = 9,36 \cdot \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{p_0 - p_t}{p_0 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log(M_r) - 8,07 \quad (15)$$

tada pela variação do coeficiente estrutural em função do módulo de resiliência da mistura asfáltica.

Na fase do projeto da estrutura de pavimento, quando da determinação das características dos materiais e espessuras das camadas, é recomendado que se defina, em alguns métodos de dimensionamento, qual a probabilidade de falha que se admitirá para o pavimento. Essa probabilidade é a confiabilidade da estrutura. O método de dimensionamento americano da AASHTO (1993) majora a estrutura resultante em decorrência da confiabilidade atribuída ao projeto e ainda recomenda níveis mínimos em função da importância da via.

7 METODOLOGIA DE ANÁLISE E ESTUDO DE CASO

Neste artigo, emprega-se uma abordagem probabilística, considerando as variações inerentes aos parâmetros, por meio de simulações Monte Carlo. Definidas as equações para o cálculo do tráfego admissível, devem ser informadas as espessuras e os coeficientes estruturais. Após a caracterização das espessuras e dos coeficientes de variação, por meio de 5.000 simulações, determinam-se os diversos valores de tráfego admissível, tanto usando o método de resistência do DNIT, como da AASHTO/93. Para esse modelo estabelece-se um erro de 2% para as estimativas das variáveis aleatórias, sendo apresentada no modelo proposto a quantidade mínima de iterações a ser realizada e a verificação confrontando esse valor com o número de simulações (5.000) realizadas pelo programa. Caso esse valor seja inferior a 5.000, a simulação está validada, caso contrário, devem ser revistos os coeficientes de variação de cada variável. Como resultado da determinação da confiabilidade, são apresentados também os gráficos das distribuições, tanto para o tráfego previsto como o admissível.

O objetivo final é projetar o pavimento que seja capaz de suportar as cargas do tráfego previsto para o período do projeto. Portanto, deseja-se limitar a probabilidade de falha do pavimento, ou seja, a probabilidade de que o desempenho seja inferior ao tráfego solicitante. Com duas distribuições distintas, uma para o tráfego previsto e outra para o admissível (desempenho), o ajuste da confiabilidade pode ser feito moven-

do-se as distribuições até se determinar a confiabilidade superior a um valor mínimo especificado. A curva do tráfego previsto é regida por informações, sendo que esta distribuição não pode ser ajustada. Consequentemente, a distribuição que deve ser ajustada é a do tráfego admissível (desempenho), que corresponde ao projeto das camadas do pavimento.

As características do tráfego e a capacidade de suporte do subleito são parâmetros associados com o desempenho da estrutura que são fixados no projeto. Portanto, as espessuras e materiais (coeficientes estruturais) a serem utilizados no pavimento são os parâmetros que se referem ao desempenho que podem, e devem, ser ajustados no processo de concepção da estrutura. As espessuras das camadas e os coeficientes estruturais podem ser aumentados ou diminuídos para que se obtenha uma confiabilidade superior a um valor mínimo especificado.

Para os modelos de confiabilidade que utilizam as equações de dimensionamento da AASHTO, é calculado o SN_{REQ} . Esses valores não devem ser utilizados como resultado de dimensionamento, uma vez que o método da AASHTO preconiza a consideração da parcela referente à confiabilidade ($Z_R \cdot S_o$) e essa parcela foi convenientemente removida das equações, resultando em uma confiabilidade de aproximadamente 50%.

Visando ilustrar o funcionamento do modelo e seus resultados, apresenta-se neste artigo um estudo de caso. Utilizaram-se as características de tráfego e estruturas de pavimentos provenientes do projeto de implantação de uma rodovia com tráfego pesado. O dimensionamento das estruturas foi obtido de projetos de pavimento executados para rodovias no estado de São Paulo. Esses dimensionamentos foram realizados de acordo com os métodos vigentes nesse estado, puramente determinísticos, ou seja, a caracterização dos parâmetros pertinentes, tanto referentes ao tráfego solicitante quanto às camadas das estruturas, é realizada apenas por valores pontuais médios.

O objetivo deste artigo não é analisar a validade do dimensionamento das estruturas, mas visa verificar o resultado caso as hipóteses adotadas nos parâmetros de projeto não forem confirmadas ao longo do tempo. Ressalta-se que os modelos de dimensionamento que

integram as rotinas aqui apresentadas são parte do cálculo como usualmente é realizado e recomendado pelos órgãos competentes no país. A principal recomendação complementar é a verificação mecanicista, onde são determinados esforços e deformações críticas na estrutura. A tabela 3 apresenta os parâmetros de entrada no programa referentes ao tráfego solicitante.

Tabela 3 – Parâmetros de entrada para tráfego solicitante

Descrição	Unidade	Valor Considerado no Projeto	Tipo de Variável
Volume Diário Médio Inicial	veíc.	27.807	Probabilística
Fator Direcional	%	53	Determinística
Porcentagem de Veículos Pesados	%	27	Probabilística
Fator de Veículos AASHTO Asfáltico	-	1,648	Probabilística
Fator de Veículos USACE	-	6,229	Probabilística
Taxa de Crescimento	%	7,15	Probabilística
Fator de Faixa	%	80	Determinística
Período de Projeto - Pav. Asfáltico	anos	10	Determinística

Inicialmente, para a determinação da confiabilidade, utilizou-se o período de projeto igual a 10 anos para os pavimentos asfálticos. Adiante, no fim desta seção é realizada uma verificação dos impactos da variação do período de projeto na determinação da confiabilidade. Embora em alguns procedimentos seja recomendado o período de 15 anos para rodovias com tráfego pesado, foi adotado, no presente caso o período de 10 anos para ilustração da metodologia.

As estruturas de pavimento foram dimensionadas para os valores de número N calculados deterministicamente, por meio dos valores médios dos parâmetros, como usualmente é recomendado nos procedimentos do DNIT. A tabela 4 apresenta os parâmetros de entrada referentes à estrutura de pavimento asfáltico, conforme o resultado do dimensionamento projetado.

Tabela 4 – Parâmetros de entrada para pavimento asfáltico – método DNIT

Descrição	Unidade	Valor Considerado no Projeto	Tipo de Variável
Coefficiente Estrutural do Revestimento	-	2,0	Determinística
Espessura do Revestimento	cm	12,5	Probabilística
Coefficiente Estrutural da Base	-	1,0	Determinística
Espessura da Base	cm	15,0	Probabilística
Coefficiente Estrutural da Subbase	-	1,0	Determinística
Espessura da Subbase	cm	30,0	Probabilística
CBR do Subleito	%	8,0	Probabilística

Apesar da estrutura não ter sido dimensionada pelo método da AASHTO (1993), pelo modelo de confiabilidade pode ser verificada a probabilidade de sucesso e falha dessa estrutura segundo essa metodologia, selecionando valores de coeficiente

estrutural adequados para cada camada. A tabela 5 apresenta, além dos coeficientes estruturais, todos os parâmetros utilizados nessa análise. A tabela 6 apresenta os resultados de cálculo para o tráfego solicitante.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada para pavimento asfáltico – método AASHTO

Descrição	Unidade	Valor Considerado no Projeto	Tipo de Variável
Índice de Serventia Inicial	-	4,2	Probabilística
Índice de Serventia Final	-	2,5	Determinística
Coefficiente Estrutural do Revestimento	-	0,44	Probabilística
Espessura do Revestimento	pol	4,92	Probabilística
Coefficiente Estrutural da Base	-	0,16	Probabilística
Coefficiente Drenagem da Base	-	1,00	Probabilística
Espessura da Base	pol	6,00	Probabilística
Coefficiente Estrutural da Subbase	-	0,11	Probabilística
Coefficiente Drenagem da Subbase	-	1,00	Probabilística
Espessura da Subbase	pol	11,81	Probabilística
Módulo de Resiliência do Subleito	psi	12.000	Probabilística

Tabela 6 – Tráfego solicitante para período de 10 anos

Parâmetro Tráfego Solicitante	Cálculo	Valor Médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Número N USACE	Determinístico	1,01E+08	-	-
	Probabilístico	1,00E+08	4,08E+07	41%
Numero N AASHTO Asfáltico	Determinístico	2,66E+07	-	-
	Probabilístico	2,68E+07	1,06E+07	40%

Na tabela 7 são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação das espessuras das camadas granulares e SN, determinísticos e probabilísticos, e o desempenho esperado probabilístico por essas estruturas pelo método da resistência do DNIT e pela AASHTO/93. A distribuição resultante do desempenho da estrutura de pavimento asfáltico analisada de acordo com o modelo do método da resistência do DNIT (2006) apresentou um coeficiente de variação bastante elevado, superior a 500%. Ressalta-se que nesse modelo as espessuras das camadas e o CBR do subleito são caracterizados probabilisticamente e os coeficientes estruturais são caracterizados deterministicamente. Para os modelos da AASHTO (1993), onde todos os parâmetros da estrutura são probabilísticos, os coeficientes de variação foram inferiores a 100%.

Tabela 7 – Resultados da análise de desempenho

Parâmetro Desempenho		Valor Médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Espessura em Termos de Material Granular (cm)	Determinístico	70	-	-
	Probabilístico	70,16	4,20	5,99%
Número Estrutural - SN (pol)	Determinístico	4,42	-	-
	Probabilístico	4,42	0,46	10,31%
Desempenho - Equação DNIT	Probabilístico	1,40E+11	7,48E+11	533,13%
Desempenho - Equação AASHTO Asfáltico	Probabilístico	6,74E+07	6,69E+07	99,18%

Para o tráfego solicitante no período de projeto previsto de 10 anos, verificou-se a partir do método aqui apresentado neste artigo – ilustrado pela figura 2 que traz uma das telas de saída da análise, com resultados resumidamente apresentados na tabela 8 – que a implantação das estruturas apresentadas na tabela 4 anterior, resultará para o pavimento asfáltico em uma probabilidade de sucesso de 98% referindo-se ao método de dimensionamento do DNIT (2006), e de 76%, referindo-se ao método da AASHTO (1993).

É importante observar que, segundo o método da resistência do DNIT, seria necessária a espessura total equivalente H_t de 54,24 cm, e a estrutura analisada

possui H_t igual a 70 cm (acréscimo de 29%). Por esse motivo a probabilidade de falha da estrutura dimensionada é de apenas 2%. Com relação ao modelo da AASHTO (1993), ocorre algo semelhante, o SN requerido é de 3,99, porém, a estrutura analisada possui SN igual a 4,42 (acréscimo de 10,8%). Embora tenham sido majoradas as espessuras das camadas, a probabilidade de falha é de 24% pelo método da AASHTO/93, valor elevado para o tráfego pesado. Quanto menor a diferença entre a estrutura mínima requerida e o resultado do dimensionamento, menor será a confiabilidade, ou probabilidade de sucesso. Verifica-se esta afirmação para os dimensionamentos realizados por meio dos métodos da AASHTO (1993).

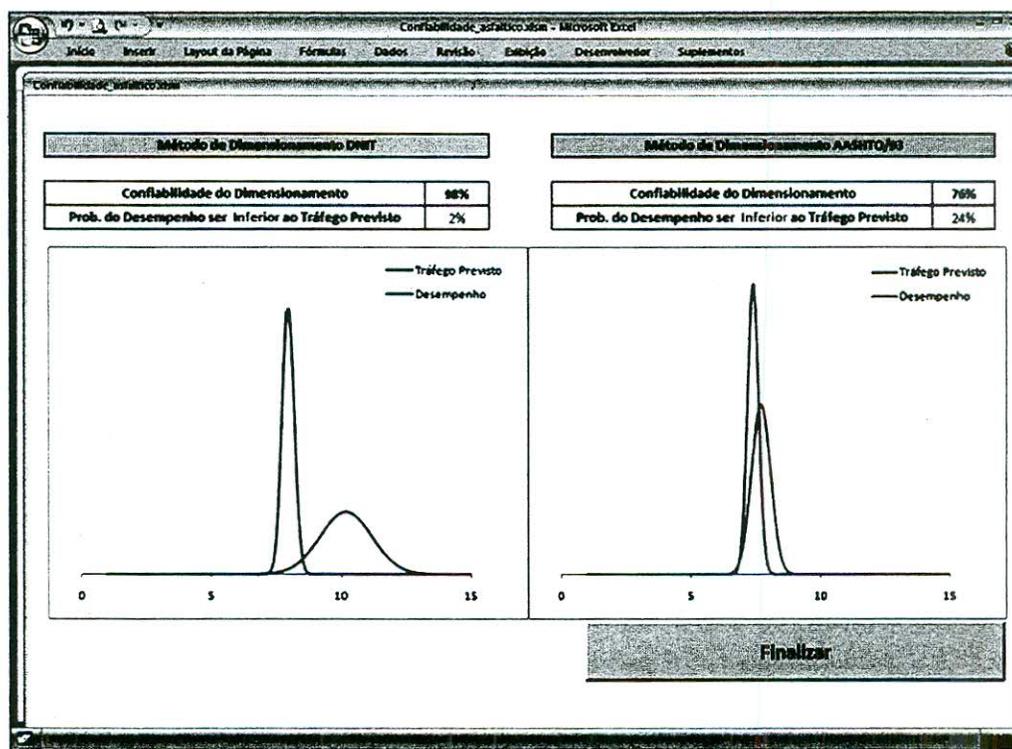


Figura 2 – Distribuições resultantes do estudo de caso

Tabela 8 – Resultados de confiabilidade do estudo de caso.

Dimensionamento	Método	Probabilidade de Sucesso	Probabilidade de Falha
Pavimento Asfáltico	DNIT (2006)	98%	2%
Pavimento Asfáltico	AASHTO (1993)	76%	24%

Em suma, a estrutura analisada possui espessuras e materiais que resultam em H_t e SN superiores aos mínimos requeridos pelos métodos de dimensionamentos. Essas parcelas de acréscimo nos valores mínimos requeridos reduzem o risco de falha da estrutura durante o período de projeto, e essa redução de risco é retratada pela confiabilidade, ou seja, quanto maior a

confiabilidade menor o risco de falha da estrutura, segundo o modelo de dimensionamento analisado.

O modelo de cálculo da confiabilidade pode ainda ser utilizado para determinar o período de projeto máximo para uma determinada combinação de estrutura e confiabilidade requerida. A tabela 9 apresenta o período de projeto máximo para o qual as estruturas ana-

lisadas apresentariam uma confiabilidade de 90%. Com esse tipo de utilização pode-se simular o período máximo onde o pavimento apresentaria um determinado risco de falha. Por meio desses resultados, verifica-se que a estrutura possui confiabilidade de 99% pelo método do DNIT (2006) e 76% quando utilizado AASHTO (1993). Fixando a confiabilidade em 90%, pode-se afirmar que, segundo a verificação do DNIT, o pavimento poderá ter um bom desempenho por um período maior, já que em 10 anos apresenta 2% de risco de falha, aumentando o nível de risco admitido para 10%, o período correspondente será de 28 anos. Utilizando os métodos da AASHTO (1993), ocorre o oposto de previsão. Se no período o risco já é superior a 10%, quando se fixar esse valor (confiabilidade 90%), o período máximo será reduzido para 5 anos, para a estrutura de pavimento asfáltico. Ressalta-se que esses períodos referem-se somente aos modelos de dimensionamento isolados. O suces-

so do pavimento, seu bom desempenho, depende de inúmeras variáveis, que vão desde a adequada estimativa de parâmetros de projeto, boa qualidade de execução e níveis de operação compatíveis com os considerados no projeto.

Tabela 9 – Período de projeto para as estruturas analisadas e confiabilidade de 90%

Dimensionamento	Método	Período de projeto para confiabilidade de 90%
Pavimento Asfáltico	DNIT (2006)	28 anos
Pavimento Asfáltico	AASHTO (1993)	5 anos

Com o objetivo de analisar o impacto do período de projeto na determinação da confiabilidade das estruturas de pavimento deste estudo de caso, foram calculados os valores de número N solicitante para os períodos de 15 anos (tabela 10) e 20 anos (tabela 11) para pavimentos asfálticos.

Tabela 10 – Tráfego solicitante para período de 15 anos

Parâmetro Tráfego Solicitante	Cálculo	Valor Médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Número N USACE	Determinístico	1,84E+08	-	-
	Probabilístico	1,82E+08	7,45E+07	41%
Numero N AASHTO Asfáltico	Determinístico	4,86E+07	-	-
	Probabilístico	4,88E+07	1,96E+07	40%

Tabela 11 – Tráfego solicitante para período de 20 anos

Parâmetro Tráfego Solicitante	Cálculo	Valor Médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Número N USACE	Determinístico	3,01E+08	-	-
	Probabilístico	3,00E+08	1,21E+08	40%
Numero N AASHTO Asfáltico	Determinístico	7,97E+07	-	-
	Probabilístico	8,02E+07	3,33E+07	42%

Para os períodos de projeto de 10, 15 e 20 anos, foram determinadas as confiabilidades das estruturas deste estudo de caso, cujos resultados são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados de confiabilidade do estudo de caso para outros períodos de projeto

Dimensionamento	Método	Período de Projeto (anos)	Ht _{REQ} (cm) SN _{REQ} (pol) D _{REQ} (pol)	Dif. entre (Ht, SN e D) e mín.req.	Probabilidade de Sucesso
Pavimento Asfáltico	DNIT (2006)	10	54,24	29%	99%
		15	55,83	25%	97%
		20	57,17	22%	95%
	AASHTO (1993)	10	3,992	11%	76%
		15	4,383	1%	53%
		20	4,719	-6%	35%

Os valores de confiabilidade determinados segundo o método da resistência do DNIT sofreram pequena variação para os períodos de 10, 15 e 20 anos. Esse fato decorre do pequeno aumento requerido na estrutura quando se aumenta o período de projeto, para o CBR do subleito adotado neste caso. A diferença entre a espessura em termos de material granular da estrutura e o valor mínimo requerido mantém-se entre 22% e 29%, e a confiabilidade varia entre 95% e 99%. Utilizando os métodos de dimensionamento da AASHTO (1993), o período de projeto (influenciado diretamente pelo tráfego solicitante) exerce grande impacto na probabilidade de falha da estrutura. Os valores mínimos requeridos sofrem aumentos mais representativos. Para o pavimento asfáltico aqui apresentado, o SN da estrutura quase que equivale ao mínimo para 15 anos (acréscimo de 1%) e é insuficiente para o período de 20 anos, resultando em uma representativa diminuição da confiabilidade de 76% (10 anos) para 35% (20 anos).

Visando caracterizar, para este estudo de caso, o comportamento dos acréscimos estruturais do pavimento na confiabilidade, foram submetidos ao modelo, com diversas espessuras, sempre em confronto com o tráfego solicitante, para períodos de projeto de 10, 15 e 20 anos. A figura 3 apresenta o gráfico resultante de todos os casos analisados anteriormente. Utilizando o modelo proposto neste artigo para o cálculo de confiabilidade de pavimentos asfálticos, foram determinadas as variações da confiabilidade (risco de falha) do pavimento em função do acréscimo estrutural, segundo os métodos de dimensionamento analisados. Para o método de resistência do DNIT (2006), verificou-se que, para as características do tráfego do estudo de caso, foram necessários menores acréscimos da espessura total para a elevação dos níveis de confiabilidade; com o aumento de aproximadamente 35% da espessura granular, o risco de falha já tende a zero. Para o modelo da AASHTO/93, para pavimentos asfálticos, esse valor de aumento na espessura, para a mesma redução do risco, foi de aproximadamente 50%.

Ainda na figura 3, pode-se determinar o acréscimo necessário na estrutura para um dado nível de confiabilidade. Por exemplo, buscando um projeto com 95% de confiabilidade, seria necessário para o dimensionamento com o método do DNIT, um acréscimo da espessura em termos de material granular de aproximadamente 23%. Se o dimensionamento seguir a metodologia pre-

conizada pela AASHTO, esse aumento deverá ser de aproximadamente 31% para pavimentos asfálticos.

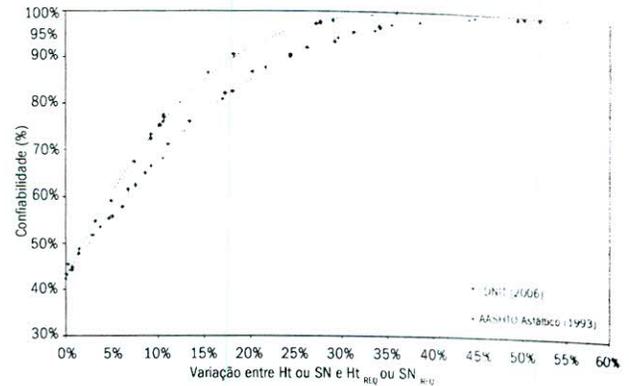


Figura 3 – Variação da confiabilidade em função do acréscimo de espessura requerido (DNIT) ou acréscimo de SN requerido (AASHTO) na estrutura de pavimento

Análise complementar foi conduzida para as estruturas de pavimento asfáltico, consideradas base e sub-base, ambas granulares com 15 cm cada uma, e variação de espessura do revestimento asfáltico, entre 12 cm e 32 cm, com o objetivo de determinar o impacto na confiabilidade do projeto. A camada de revestimento é, geralmente, composta pelos materiais mais nobres na hierarquia da estrutura. A partir da figura 4, pode-se observar que para o método da AASHTO (1993), o aumento do período de projeto acarreta necessidade maior na espessura do revestimento para uma mesma confiabilidade. Para a manutenção de 80% de confiabilidade, o aumento de espessura necessária no revestimento para a variação do período de projeto de 10 para 15 anos, seria de 0,8 cm para o método do DNIT e de aproximadamente 2,5 cm pelo método da AASHTO. Esta necessidade de aumento mantém-se praticamente as mesmas para o aumento do período de projeto de 15 para 20 anos.

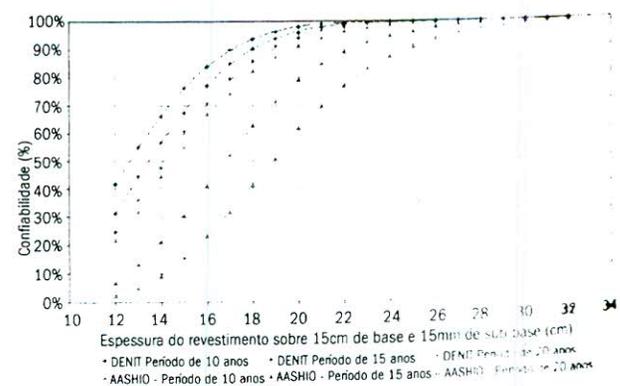


Figura 4 – Variação da confiabilidade do pavimento em função da espessura do revestimento asfáltico usando cálculo das espessuras pelo DNIT e pela AASHTO

A relevância do revestimento asfáltico em relação às outras camadas é mais pronunciada no dimensionamento da AASHTO (1993). A relação entre os coeficientes estruturais do revestimento (0,44) e da base (0,16), por exemplo, para este método é próximo de 3 vezes. Já para o método do DNIT (2006) esta relação é igual a 2.

Ressalta-se que as análises conduzidas nesta seção foram realizadas para uma frota de tráfego específica, caracterizada no início deste estudo. Vale lembrar ainda que os valores de SN mínimo requerido foram determinados para as equações de dimensionamento da AASHTO (1993), excluindo-se a parcela referente à confiabilidade, representada pelo produto $-Z_R \cdot S_o$.

7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste artigo traz à discussão a utilização de técnicas e elementos da análise probabilística em projetos de pavimentação. Foi considerado o conceito de confiabilidade em dimensionamentos de pavimentos asfálticos rodoviários, sendo este um assunto já tratado em trabalhos acadêmicos nacionais, porém ainda de uso muito restrito na prática dos órgãos viários brasileiros. A técnica de simulação estocástica de dados, chamada de simulação Monte Carlo, foi utilizada para as análises probabilísticas. Esse método de simulação, já consolidado, é bastante utilizado internacionalmente, não restrito ao meio rodoviário.

Foi aplicado um método de análise estatística para a determinação da probabilidade de sucesso (confiabilidade) de uma estrutura de pavimento asfáltico, quando exposta a determinado tráfego solicitante, utilizando duas equações de dimensionamento, a primeira, preconizada pelo método da resistência do DNIT, e a segunda, proveniente do guia de dimensionamento de pavimentos da AASHTO de 1993.

A análise, utilizando o modelo do DNIT, revelou que as necessidades de aumento na espessura da estrutura, apontadas para o aumento nas solicitações de tráfego, são relativamente pequenas. Parece, portanto, inadequada a utilização dessa equação isoladamente para elevados níveis de tráfego. Tanto o estado da arte, quanto o estado da prática de dimensionamentos de pavimentos no Brasil não está restrito ao modelo de dimensionamento do DNIT (2006). Este mesmo órgão, em seus manuais, recomenda ainda que o dimensionamento de estruturas de pavimento considerem análises mecanicistas do pavimento.

Para o modelo de determinação de confiabilidade da AASHTO, para pavimentos asfálticos, observou-se um comportamento diferente do estudado pelo método da resistência do DNIT. Com aumentos do tráfego solicitante, são demandados aumentos na estrutura bastante mais expressivos que pelo método da resistência. Verificou-se que a consideração da variabilidade dos parâmetros de entrada segundo recomendações da AASHTO, resultaram em desvio-padrão após simulações Monte Carlo para a distribuição do tráfego admissível, da mesma ordem de grandeza preconizada pela AASHTO (1993). O valor determinado de desvio-padrão foi 0,41 para pavimentos asfálticos, sendo que a AASHTO indica o uso do valor de 0,44. Já para a equação de dimensionamento estrutural do DNIT, o desvio-padrão resultou próximo de 1,00. Pode-se concluir, com base nesse valor de desvio-padrão, que a equação brasileira está menos adequada para a consideração da variabilidade dos diversos parâmetros pertinentes ao dimensionamento.

O cálculo da confiabilidade de um dimensionamento de pavimento pode ser uma importante ferramenta para a tomada de decisão quanto à aceitação de uma estrutura de pavimento executada diferentemente das condições de projeto. É possível determinar qual o risco que se assume nessa aceitação pelo órgão viário ou órgão gestor. Pode-se ainda verificar qual dos parâmetros de entrada possui mais influência no desempenho do pavimento, podendo dispensar uma maior atenção nos controles geométrico e tecnológico de campo.

O método estatístico utilizado abre a possibilidade de se introduzir nos parâmetros do dimensionamento, utilizando o modelo do DNIT, variações em função das oscilações sazonais, principalmente para pavimentos asfálticos em que os revestimentos são constituídos de materiais de comportamento viscoelástico, de difícil consideração em modelos determinísticos.

Os modelos de dimensionamento essencialmente determinísticos resultam em estruturas com a probabilidade de sucesso da ordem de 50% e, em algumas situações, isto pode não ser suficiente, principalmente para os casos de pavimento com camadas cimentadas em que os materiais têm ruptura friável. Uma única carga de grandes proporções pode levar a camada cimentada à ruptura. Modelos com abordagem probabi-

lística podem ser utilizados para avaliar as possibilidades de variação no tráfego, por exemplo.

Não existem hoje no Brasil recomendações ou estudos referentes aos aspectos de variações que ocorrem em estruturas implantadas em nossos pavimentos. A pesquisa usou recomendações norte-americanas, provenientes da pista experimental – AASHO Road Test. Quanto maiores forem as variações de cada parâmetro de entrada, maior será o desvio-padrão da distribuição resultante da análise.

Os investimentos necessários para a implantação de uma rodovia são bastante elevados, e os custos da

estrutura do pavimento possuem relevante representatividade nesse montante. Com os resultados de análises com esse modelo pode ser realizada uma avaliação do que pode ocorrer com o pavimento caso as hipóteses de projeto não sejam confirmadas durante a execução. Deficiências na implantação certamente irão ocasionar aumentos nos investimentos necessários durante o ciclo de vida do pavimento. Para ilustração, materiais de baixa qualidade e pavimentos mal construídos com larga faixa de variação dos parâmetros devem ser mais espessos do que pavimentos bem construídos com controle tecnológico adequado, para uma mesma confiabilidade, ou ainda, para um mesmo risco de falha do pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Guide for design of pavement structures**. Washington D.C., 1993. ISBN 1-56051-055-2.

CHEN, C.; FLINTSCH, G. W. Reliability design of flexible airfield pavements elastic layered method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., v.1990, p. 80-91, 2007.

CHOU, Y. T. Reliability design of flexible airfield pavements elastic layered method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., v.1568, p. 124-130, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR-719. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274. p.

HUANG, Y. H. **Pavements analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-142473-4.

IRICK, P.; HUDSON, W. R.; McCULLOUGH, B. F. Application of reliability concepts to pavement design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 6., 1987, Ann Arbor. **Proceedings...** Ann Arbor: University of Michigan, 1987. p. 163-179.

LI, Z.; MADANU, S. Highway project level life-cycle benefit/cost analysis under certainty, risk, and uncertainty: methodology with case study. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v. 131, n. 8, p. 516-526, 2009.

MLADENOVIC, G. et al. Comparison of as-constructed and as-designed flexible pavement layer thicknesses. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., v.1853, n. 03-3067, p. 165-176, 2003.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 366 f. Tese (Doutorado) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PITTMAN, D. W.; OPELIKA, A. **Development of a reliability-based design procedure for rigid and flexible airfield pavement**. U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., 1996.

REIGLE, J. A. **Development of an integrated project-level pavement management model using risk analysis**. 2000. Dissertation (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) - College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, 2000.

REIGLE, J. A.; ZANIEWSKI, J. P. Risk-based life-cycle cost analysis for project-level pavement management. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., v.1816, n. 02-2579, p. 34-42, 2002.

SANCHEZ-SILVA, M. et al. Reliability based design optimization of asphalt pavements. **The International Journal of Pavement Engineering**, London, v.6, n. 4, p. 281-294, 2005.

SANTOS, C.R.G. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica de São Paulo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SUZUKI, C. Y.; KABBACH JUNIOR, F. I.; AZEVEDO, A. M.; PEREIRA, A. C. O. e VICENTE, P. R. F. Introdução do conceito de confiabilidade nos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: RAPv, 2004.

SUZUKI, C. Y.; NAGAO, E. M.; OSÓRIO, C. C.; AZEVEDO, A. M. Considerações sobre o conceito de confiabilidade na análise mecânica de estruturas de pavimentos flexíveis. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: RAPv, 2001. p. 695-705.

TIGHE, S. L. Guidelines for probabilistic pavement life cycle cost analysis. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., v. 1769, p. 28-38, 2001.

TIGHE, S. L. **An integrated model to assess asphalt cement quality on low temperature performance and life cycle cost**. 1999. Ph. D. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering), University of Waterloo, Ontario, 1999.

VENNALAGANTI, K. M.; FERREGUT, C.; NAZARIAN, S. Stochastic analysis of errors in remaining life due to misestimation of pavement parameters in NDT. In: NONDESTRUCTIVE TESTING OF PAVEMENTS AND BACKCALCULATION OF MODULI, 2., **ASTM STP 1198**, Philadelphia: ASTM, 1994.

WALLS III, J.; SMITH, M. R. **Life-cycle cost analysis in pavement design - Interim technical bulletin**. FHWA-AS-98-079, Federal Highway Administration, Washington D.C., 1998.

WHITELEY, L.; TIGHE, S.; ZHANG, Z. Incorporating Variability into Pavement Performance, Life-Cycle Cost Analysis, and Performance-Based Specification Pay Factors. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., v. 1940, p. 13-20, 2005.