



44ª RAPv | **18º ENACOR**
44ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO | 18º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA
4ª Expopavimentação
Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.
18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

44ª RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 18º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA

Foz do Iguaçu, PR – 18 a 21 de agosto de 2015

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO PAVIMENTO EXECUTADO SUPPORTAR O TRÁFEGO ESTIMADO EM PROJETO

Bruno Sousa Almeida¹; Francisco Heber Lacerda de Oliveira² & Marcos Fábio Porto de Aguiar³

RESUMO

O presente estudo se propõe a analisar a confiabilidade de uma rodovia de baixo volume de tráfego em suportar o tráfego estimado e verificar as vantagens da adoção do controle defletoométrico durante o processo construtivo. As análises defletoométricas foram calculadas em todas as camadas do pavimento utilizando-se a Viga Benkelman. A partir dos cálculos efetuados, foi possível estabelecer um comparativo entre as hipóteses de comportamento dos materiais, assumidas pelo projetista, e o seu efetivo comportamento estrutural observado em campo. Através de análises estatísticas, determinou-se o nível de confiabilidade do pavimento executado. As referidas análises indicaram que o pavimento apresenta intervalos de confiança abaixo do estimado em projeto, mas dentro do limite do nível de confiabilidade desejado para a rodovia (75 a 95%). O trabalho mostrou a sistemática adotada pelas especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, constituindo-se em um procedimento para a certificação e liberação do tráfego, principalmente para o engenheiro de campo, que muitas vezes necessita de procedimentos confiáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Controle defletoométrico, nível de confiança, viga Benkelman.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the reliability of a low volume of traffic on highway support the estimated traffic and check the advantages of adopting defletoométrico control during the construction process. The defletoométricas analyzes were calculated in all layers of the floor using the Benkelman beam. From the calculations, it was possible to establish a comparison between the cases of behavior of materials, taken by the designer, and its effective structural behavior observed in the field. Through statistical analysis, we determined whether the reliability level of the running surface. These analyzes indicated that the pavement has confidence intervals below the estimated project, but within the limit of the desired reliability level for the highway (75-95%). The study showed the system adopted by the specifications of the National Department of Transport Infrastructure - DNIT, being in a procedure for certification and release of traffic, especially for the field engineer who often need reliable procedures.

KEY WORDS: Defletoométric control, confidence level, Benkelman beam.

¹ Especialista em Infraestrutura de Transportes | Rodovias. Universidade Cidade de São Paulo - UNICID. Instituto Brasileiro de Educação Continuada



INTRODUÇÃO

Alguns estudos apontam que a deformação específica inicial de tração recuperável, ou resiliente, à qual o revestimento asfáltico estará submetido no início de um determinado ciclo de vida, é um dos principais critérios ou parâmetros indicadores da durabilidade do revestimento, no que diz respeito ao seu trincamento por fadiga, responsável pelo trincamento da mistura asfáltica que resulta, em seu estágio final, no aparecimento dos buracos e painelas. Trichês (2014) diz que tradicionalmente o fenômeno por fadiga é descrito como um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de extensões repetidas, resultando no aparecimento de fissuras no material que evoluem para trincas ou ruptura completa, após um número suficiente de repetições de carregamento. Ou seja, é a deterioração do material quando solicitado repetidamente por um carregamento.

Esta deformação específica de tração resiliente, que nos relatórios de projeto de pavimentos são objetos de estudo e avaliação, está intimamente ligada à espessura e qualidade mecânica das próprias camadas de base e de revestimento, à magnitude e quantidade das cargas solicitantes e, principalmente, à deformabilidade da infraestrutura que o revestimento estará assente, ou seja, a ação ou resultado da deformação da estrutura de suas camadas de base.

Mesmo levando em conta os racionais limites ou critérios que possam ter sido adotados na fase de elaboração de projeto do pavimento, um problema diz respeito ao efetivo alcance, *in loco* de uma alta probabilidade de êxito para o pavimento pensado e projetado a qual, sem dúvida, está ligado e associado à magnitude da deformação de tração inicial recuperável que a capa asfáltica estará submetida.

O ideal seria, então, se acondicionar de mecanismos eficientes para se avaliar o tamanho e a magnitude destas deformações de tração no momento da liberação da rodovia ao tráfego. Todavia, isso exige uma instrumentação cujo custo e, por vezes, o nível de sofisticação impossibilita o seu emprego no dia-a-dia em um canteiro simples de obra, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil.

Um dos meios encontrados para conseguir aumentar a probabilidade de bom desempenho de um pavimento novo é se controlar as espessuras das bases e sub-bases, ou seja, da estrutura do pavimento, controlar a densidade, o grau de compactação, e principalmente a deformação resiliente da estrutura durante a fase construtiva. A medida das deflexões recuperáveis possibilita, de uma forma indireta, averiguar e avaliar a magnitude da deformação de tração inicial resiliente a que o revestimento estará submetido no início de sua vida, enquanto o pavimento vai sendo construído.

Ainda que tal procedimento venha de longa data sendo utilizado por países desenvolvidos como Estados Unidos e Alemanha, no Brasil, apenas na década de 90 é que algumas especificações construtivas, então elaboradas, começaram a contemplar o controle deflectométrico das camadas durante a fase do processo construtivo, como sendo um dos critérios a serem verificados e avaliados para a aceitação e liberação do tráfego após o serviço executado. Esta preocupação teve como respaldo e apoio a constatação de que muitas rodovias novas brasileiras, embora não externem problemas de ruptura plástica, têm apresentado um fissuramento e um trincamento precoce do revestimento asfáltico, o qual está sendo associado ao elevado nível deflectométrico da infraestrutura das camadas que o revestimento está assente.



O presente trabalho procura mostrar, a eficiência e as vantagens que proporciona a adoção do controle deflectométrico durante a execução e o processo construtivo de uma rodovia de baixo volume de tráfego (rodovia coletora rural) localizada na zona rural de Planaltina, no Distrito Federal, juntamente com a avaliação da probabilidade do pavimento executado suportar o tráfego estimado para o período de projeto para um nível de confiabilidade desejado para rodovia coletora rural de 75 a 95%.

CARACTERÍSTICAS DA RODOVIA ESTUDADA

As informações para o desenvolvimento do presente trabalho foram obtidas nas obras de implantação da rodovia DF-355, do entroncamento da DF-120 com o entroncamento da DF-320, Trecho Núcleo Rural Tabatinga - Planaltina, localizada na região nordeste do Distrito Federal. A rodovia é de pista simples e tem trechos sinuosos, possui 14.000m de extensão e 10m de largura é classificada como sendo de baixo volume de tráfego, com um N8,2tf de $1,67 \times 10^6$ (USACE). As obras tiveram início em janeiro de 2013 e a sua inauguração se deu em abril de 2014.



Figura 1. Foto da rodovia DF-355 implantada.

O solo predominante na camada final de terraplenagem é o residual e se apresenta em forma de argilas vermelhas claras, muito a pouco laterizadas, neste caso, a espessura da camada de solo residual chega a atingir vários metros. Futai (2002) diz que em países de clima tropical, a ocorrência de solos residuais é mais profunda, uma vez que nesta região os valores elevados de temperatura e precipitação média são responsáveis por um intemperismo físico-químico-biológico mais intenso do que nas regiões frias e secas, resultando em um perfil de alteração com presença de solo residual a grandes profundidades.

Os estudos geotécnicos indicaram uma grande homogeneidade dos tipos de solos, os valores de Índice de Suporte Califórnia – ISC/CBR de projeto obtidos para os segmentos homogêneos situam-se entre 6,6% e 8,8%. Em novembro de 2012 foi realizada contagem volumétrica e classificatória de veículos conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Contagem volumétrica e classificatória de veículos

Veículo	Contagem	
	Sentido 1	Sentido 2
Leves	204	180
Médios	10	18
Pesados	16	13



Semi-reboques	5	2
Reboques	14	7
Ônibus	12	7
TOTAL	261	227

Foram utilizados os dados dessa contagem volumétrica e classificatória para calcular o número N a uma taxa de crescimento geométrico de 3,0% ao ano, e um horizonte de projeto até o ano de 2023. Para a determinação do crescimento geométrico do número N, utilizou-se, à época, a expressão (1) contida no DNIT (2006).

$$V_t = \frac{365V_i[(1+t/100)^p - 1]}{t/100} \quad (1)$$

Onde:

V_t = volume de tráfego total;

V_i = Volume de tráfego inicial;

t = taxa de crescimento;

p = período de projeto

Portanto, chegou-se ao seguinte número N de projeto de 1,67 x 10⁶ para o ano de 2023.

Com base nos dados obtidos nas sondagens dos pontos críticos da rodovia, pôde-se obter o ISC de projeto. Trata-se de um método de dimensionamento proposto pelo Eng. Murilo Lopes de Souza, com base no ensaio CBR de O.J. Porter, no Índice de Grupo, de Steele e no que se refere ao tráfego, nos trabalhos do U.S. Corps of Engineers. (Pastana 2014).

De acordo com Greco (2014) a ideia básica é adotar um Índice Suporte (IS), calculado com média aritmética de dois índices derivados, respectivamente, de CBR e do Índice de Grupo (IG). O método impõe a condição de que o índice de Suporte máximo seja igual ao valor do CBR. Para a avaliação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais que irão compor as camadas do pavimento é utilizado o ensaio CBR em amostras deformadas ou moldadas em laboratório, nas condições de serviço e submetidas à imersão em tanque apropriado por quatro dias, isto significa que quando o ISIG for maior que o CBR, o valor para o ISIG será o próprio CBR.

A fim de uma maior segurança o método recomenda utilizar o Índice de Suporte (IS), que é um CBR corrigido em função do Índice de Grupo (IG), conforme expressão (2):

$$IS = \frac{IS_{CBR} + IS_{IG}}{2} \quad (2)$$

Onde:

IS_{CBR} = índice de suporte numericamente igual ao Índice de Suporte Califórnia (CBR – obtido em ensaio e dado em %)

IS_{IG} = índice de suporte derivado do índice de grupo, correspondendo praticamente a uma inversão de escala, fazendo com que solos de boa qualidade tenham os maiores valores de IS_{IG}, conforme se apresenta na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de IS em função de IG

Índice de Grupo (IG)	Índice de Suporte (IS _{IG})
-------------------------	------------------------------------------



0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Da correlação da Tabela 2, conseguiu-se à época extrair a média do valor do CBR de projeto derivado do Índice de Grupo (IS_{IG}) mais ISC obtido em laboratório, conforme demonstrado na Tabela 3, logo abaixo.

Tabela 3. Índice de Suporte de Subleito - ISC Calculado

Local da Amostra (Km)	ISC	IG	IS_{IG}	$CBR_{CALCULADO}$
1,80	6,70	11	5	5,90
1,90	6,80	13	4	5,40
2,00	7,50	15	3	5,30
2,10	6,80	9	6	6,40
2,20	6,30	8	7	6,30
2,30	6,60	10	6	6,30
3,80	10,00	13	4	7,00
3,90	8,80	4	12	8,80
4,00	7,50	10	6	6,80
4,10	7,60	8	7	7,30
9,80	5,50	8	7	5,50
9,90	6,20	2	15	6,20
10,00	5,50	0	20	5,50
10,10	10,0	8	7	8,50
10,20	9,70	8	7	8,40
			Média	6,60
			Menor	5,30
			Maior	8,80

Conforme pode-se analisar na Tabela 3, caso tivesse sido adotado a média dos 15 valores obtidos, 8 amostras teriam CBR menor que o 6,6% que é o valor da média, o que geraria substituição de 60cm de subleito em mais de 50% do trecho. Portanto, adotou-se que o ISC de projeto seria o menor valor encontrado, ou seja, o de 5,30%, não gerando assim substituição de material. Logo, o ISC de projeto adotado foi de 5,3%.

O dimensionamento do pavimento foi pelo método DNER que depende basicamente de dois parâmetros: O número "N" e o Índice de Suporte do Subleito. Em função destes parâmetros, foi obtido as espessuras totais necessárias à proteção do Subleito, Sub-Base e Base do pavimento, ao



qual para obtenção dessas espessuras, foi utilizado a relação número N x ISC das diversas camadas através do ábaco de dimensionamento, conforme mostrado na Figura 2.

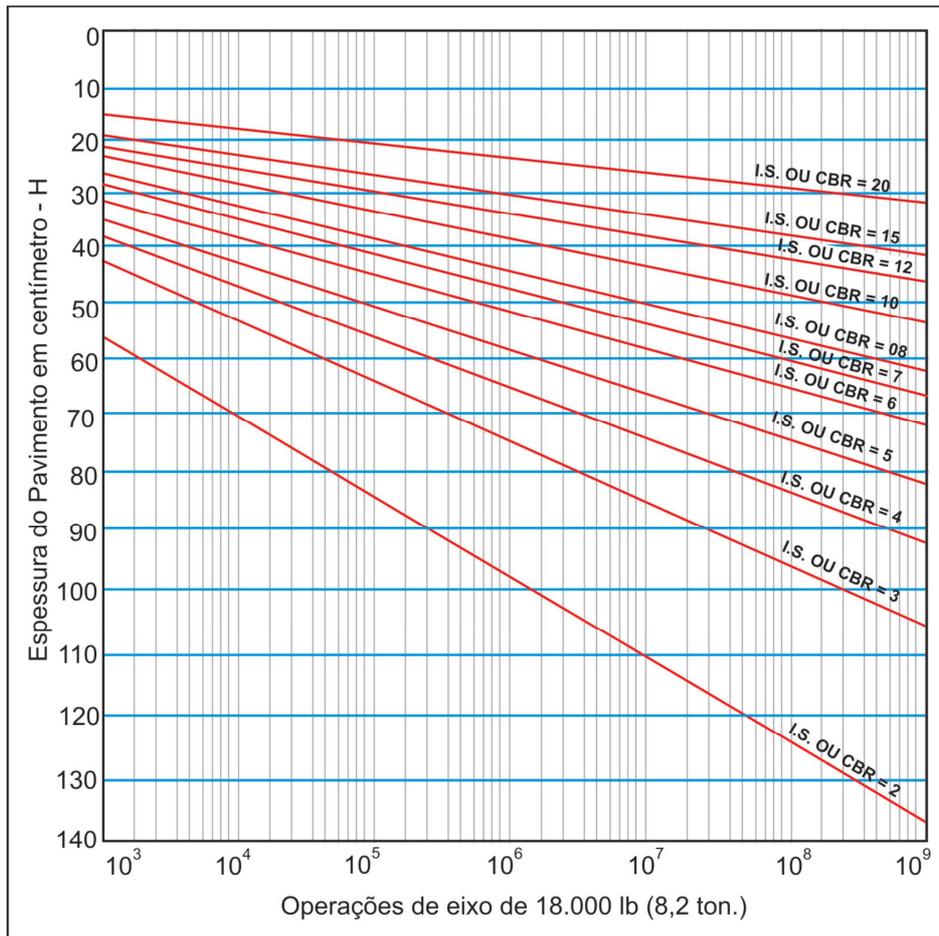


Figura 2. Espessura total do pavimento, em termos de material granular

A Empresa Projetista definiu a espessura do pavimento considerando-se o período de projeto para o ano de 2023, sendo o número N de projeto igual a $1,67 \times 10^6$. Dispondo dos Índices de Suporte, do Subleito, do reforço do subleito e da sub-base, puderam-se obter no ábaco da Figura 2, em primeira aproximação, as espessuras necessárias, respectivamente, acima dessas camadas.

Espessura total do pavimento (Hm): com os dados obtidos (fator de equivalência e ISC do subleito) chegou-se a espessura total necessária do pavimento 57,0cm. Hm → Para N_{10} e ISC_{SI} (5,3%), tem-se 57,0cm de espessura total do pavimento.

Espessura necessária do pavimento acima do reforço, ou seja, sub-base, base e revestimento: Hn → Adotando um índice de suporte (ISC) de 20% para o reforço do subleito e utilizando o ábaco da Figura 2 em função do número N, tem-se a espessura de 25,8cm, ou seja, não é obrigatório a presença de reforço.

Espessura necessária de pavimento acima da sub-base, ou seja, base e revestimento: H20 → Para N_{10} e $ISC_{Sb} = 20\%$ (20 mínimo) e de acordo com o ábaco da Figura 2 tem-se 25,8cm de espessura necessária de pavimento acima da sub-base.

Espessura do Revestimento: Revestimento (R) → Para $N_{10} = 1,67 \times 10^6$, utilizando-se a Tabela 4 abaixo, verifica-se que é indicado um revestimento asfáltico de 5,00cm de espessura, sendo



utilizada camada única de CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente). Porém, posteriormente durante a execução da obra, para uma melhor forma de execução, a Empresa Projetista, adotou um revestimento asfáltico de 4,5cm de espessura em toda a plataforma da pista, isto é, para capa de rolamento e acostamento, este último anteriormente era de 3,00cm de espessura e possuía 1,5m de largura.

Tabela 4. Espessuras mínimas de revestimento betuminoso em função de N

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \cdot 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0cm de espessura
$5 \cdot 10^6 < N \leq 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0cm de espessura
$N > 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5cm de espessura

Entende-se que a Empresa Projetista quanto à execução da sub-base fez-se necessária projetar em duas camadas de 15cm cada, de acordo com o preconizado pelo DNIT (2006) Achando-se melhor a mudança de nomenclatura de uma destas camadas para Reforço de Sub-leito, de modo a evitar a execução em camadas únicas de 30cm, o que poderia comprometer a estrutura do pavimento. Sendo assim a estrutura do pavimento dimensionada ficou constituída conforme Tabela 5, ao qual mostra também o ISC de projeto e as estimativas dos módulos de resiliência. A grau de compactação projetado foi Proctor intermediário para o Reforço de Sub-leito e para a Sub-base e Proctor Modificado para a Base em BGS.

Tabela 5. Estrutura do pavimento projetado

Camada	Tipo	Espessura (cm)	ISC(%)	Módulo de Resiliência (E) em Kgf/cm²⁴
Revestimento	CBUQ	4,5		30.000 < E < 50.000
Base	BGS	17	80,0	1.000 < E < 5.000
Sub-Base	Solo Cal 2%	15	20,0	2.417
Reforço do Subleito	Solo Cal 2%	15	20,0	2.417
Subleito			5,3	835

DEFLEXÕES MÁXIMAS ADMISSÍVEIS PARA ESTRUTURA PROJETADA

Na fase de projeto foram definidos os valores de deflexões máximas admissíveis a serem observados em cada camada do pavimento durante o processo construtivo da rodovia. A definição dos valores foi feita baseada na teoria das camadas elásticas, empregando-se o programa computacional ELSYM-5 (elastic layered system) que considera a relação tensão x deformação como sendo linear para todas as camadas do pavimento.

⁴ Estimativas para adoção de módulos de resiliência para verificação de comportamento elástico das estruturas do pavimento, retirados da análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento | IP – 08/2004.



Inicialmente, determinou-se a deflexão máxima admissível no topo do revestimento de acordo com o Método DNER-PRO 11/79. De acordo com este modelo, a deflexão máxima admissível a ser controlada no topo da camada de revestimento deveria ser de $82,19 \times 10^{-2}$ mm.

Através de simulação numérica da estrutura do pavimento projetado, a Empresa Projetista determinou os seguintes valores para as deflexões admissíveis para as demais camadas, conforme Tabela 6 a seguir:

Tabela 6. Deflexões máximas admissíveis para as camadas do pavimento

Camada	Tipo	Espessura (cm)	Poisson ⁵	Módulo de Resiliência (E) em Kgf/cm ² adotado	Deflexão admissível de projeto (mm)
Revestimento	CBUQ	4,5	0,30	30.000	$82,19 \times 10^{-2}$
Base	BGS	17	0,35	2.500	$82,50 \times 10^{-2}$
Sub-Base	Solo Cal 2%	15	0,40	2.000	$94,50 \times 10^{-2}$
Reforço do Subleito	Solo Cal 2%	15	0,40	2.000	$111,00 \times 10^{-2}$
Subleito			0,40	1.000	$146,00 \times 10^{-2}$

ANÁLISE DOS RESULTADOS DO CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO

Análise das deflexões

A análise das deflexões foi feita de acordo como pede o método de ensaio DNER-ME 024/94 utilizando-se a viga Benkelman. O caminhão ao qual foi utilizado era dotado de eixo simples de roda dupla, com pneus calibrados a 5,7 kgf/cm² e carga de 8,2 tf no eixo traseiro. As deflexões foram medidas de forma alternada, e na região da futura trilha de roda externa.

A análise estatística das deflexões recuperáveis características foram obtidas através da norma DNER-PRO 11/79, onde foram consideradas como pertencentes a um único universo as deflexões recuperáveis encontradas nas trilhas de roda externa a cada faixa de rolamento.

Para cada estrutura do pavimento assim definida, efetuou-se o cálculo estatístico da deflexão característica correspondente, adotando-se o seguinte procedimento:

- Tabulam-se os valores individuais das deflexões recuperáveis encontradas (D_i);
- Calcula-se a média aritmética, D , dos valores individuais (média da amostra);

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

Onde n é igual o número de amostras.

- Determina-se o valor do desvio-padrão da amostra, σ , através da expressão:

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

⁵ Valores Usuais de Coeficiente de *Poisson* retirados da tabela 6 da instrução de projeto IP-DE-P00/001 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, folha 23/53.



- d) O valor do coeficiente de variação (cv) é determinado, para cada uma das distribuições, através da expressão:

$$cv = \frac{\sigma}{D} \quad (5)$$

- e) O valor da deflexão característica é determinado, para cada uma das distriuições, através da expressão:

$$Dc = D + \sigma \quad (6)$$

Onde D e σ representam, respectivamente, a média aritmética e o desvio-padrão da amostra.

A Tabela 7 apresenta um resumo estatístico dos principais parâmetros obtidos a partir da análise dos perfis deflectométricos traçados para o segmento, nesta os valores da deflexão característica representam a média mais 1 (um) desvio-padrão da amostra.

Tabela 7. Quadro resumo das deflexões

Parâmetro	Capa (CBUQ)	Base (BGS)	Sub-Base (Solo Cal)	Reforço Subleito (Solo Cal 2%)
Média (10^{-2} mm)	62	74	85	96
Desv. Padrão (10^{-2} mm)	6	5	8	6
Deflexão Característica	68	78	93	101
C. V (%)	9,78	6,55	9,44	6,09
nº amost	64	36	61	34

Verifica-se que os valores apresentados na Tabela 7, que em termos médios, as deflexões das camadas são menores aos valores admissíveis de projeto, como mostra a Tabela 6, o que indicaria um comportamento da estrutura em campo superior ao previsto em projeto. Tal constatação poderia, caso quisesse, levar a um redimensionamento da estrutura do pavimento, não fosse o fato de que a obra já se encontrava em execução, com a estrutura do pavimento conforme mostrado na Tabela 5.

Analisando-se as deflexões características calculadas, por outro lado, observa-se que estas se apresentam próximas aos limites estabelecidos no projeto, exceto para a capa asfáltica. Em princípio, pode-se afirmar, então, que mesmo sem os ensaios de comportamento dos materiais a serem empregados na camada final de terraplenagem e nas camadas de sub-base e base, a experiência da Empresa Projetista na estimativa das deflexões admissíveis para as camadas foi muito satisfatória, desde que sabido que os limites apresentados no projeto da estrutura do pavimento referiam-se a valores estatísticos. Mas, em relação ao revestimento, os resultados obtidos podem estar indicando que a capacidade de redução da deflexão de uma mistura asfáltica é muito maior que aquela prevista em projeto para esse tipo de estrutura, elevando o número N para ordem de $6,5 \times 10^6$ (USACE).

O fator mais importante nesta análise é que os resultados obtidos no controle de campo podem estar alertando que a estrutura de uma rodovia de baixo volume de tráfego, executada com um satisfatório controle tecnológico, pode levar a um nível de deflexão significativamente menor do que aquele previsto pelo modelo adotado pelo DNER-PRO 11/79, ou pelo DNER-PRO 269/94.



Trichês (2000) diz que isso pode ser um indicativo que o modelo adotado para a determinação da deflexão admissível na superfície do revestimento de rodovias de baixo volume de tráfego fornece deflexões admissíveis elevadas, nem sempre compatíveis com as características tecnológicas dos materiais quando devidamente selecionados e compactados. Além disso, tal magnitude de deflexões faz com que o revestimento fique submetido a níveis elevados de deformação de tração, o que pode acarretar na fadiga precoce do revestimento.

Pinto (1991) exemplifica utilizando-se o critério de ruptura apresentado em sua tese de doutorado, baseado na deformação específica de tração do revestimento asfáltico, exposto pela equação:

$$N = 2,04 \cdot 10^{-3} \chi (1/\varepsilon_t)^{2,6} \quad (7)$$

Onde: ε_t = deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (cm/cm), obtem-se,

Para o $N_{8,2tf}$ de projeto da rodovia apresentada $N = 1,67 \times 10^6$, a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento deveria ser igual a $\varepsilon_t = 2,91 \times 10^{-4}$. Ou seja, para que a rodovia chegue ou atinja a vida útil de projeto, de acordo com este critério, a deformação de tração não pode ser superior a este valor. Simulações numéricas da estrutura projetada indicam que para que isto se verifique a deflexão da estrutura projetada não poderá ser superior a $64,7 \times 10^{-2}$ mm.

Caracterização do comportamento mecanicista

Não foi objeto de estudo deste trabalho, mas conforme diz Trichês (2000), em complemento ao controle defectométrico, pode-se realizar com o uso do programa ELSYM-5, em alguns seguimentos, medidas de deflexões, com o intuito de se avaliar, através da técnica de retroanálise, os módulos de deformação dos materiais em campo. Para isso, deve-se medir as bacias de deformação nas camadas de subleito, base e revestimento, adotando dois critérios distintos para verificar a acurácia da retroanálise realizada: o erro relativo e a raiz média quadrática.

Como dito anteriormente não foi feito o estudo estatístico de retroanálise das bacias medidas sobre as camadas. Mas, para as prováveis bacias do revestimento, pode-se imaginar que serão maiores do que aqueles obtidos com as bacias medidas sobre a brita graduada. Para as camadas granulares, este fato é explicado pelo maior efeito placa que o revestimento propicia na estrutura, associado ao confinamento oferecido pela adição desta camada sobre a camada de base.

Já, quanto ao subleito, provavelmente os módulos obtidos para esta camada com a retroanálise das bacias medidas sobre a brita graduada e sobre o revestimento asfáltico serão maiores que aqueles obtidos com a retroanálise das bacias medidas diretamente sobre o subleito. Isto se deve ao menor nível de tensão que passa a atuar sobre o subleito com a execução das outras camadas adjacentes do pavimento, uma vez que para menores níveis de tensões, o módulo tende a ser mais elevado.

Análise dos corpos de prova

A Empresa Projetista determinou valores para a densidade, a espessura do revestimento, a deflexão no topo do revestimento CBUQ e o grau de compactação do pavimento projetado, com seu respectivo desvio-padrão, que deveriam ser obedecidos na execução da obra. A Tabela 8 abaixo mostra estes parâmetros.



Tabela 8. Parâmetros de projeto a serem obedecidos com desvio-padrão

Parâmetro	Valores de projeto ideal	Desvio-Padrão (σ)	Valor mínimo de projeto
Densidade	2,447	0,08	2,367
Espessura da capa (mm)	45,00	2,25	42,75
Grau de compactação (%)	100	3	97
Deflexão máxima no topo do revestimento (10^{-2} mm)	82,19	9	91,19

A Tabela 9, apresenta um resumo estatístico dos principais parâmetros obtidos a partir da análise dos corpos de prova de betume (testemunhos) e da deflexão no topo do revestimento, adotando-se $z = 1,96$ para a margem de erro com 95% de confiança.

Tabela 9. Quadro resumo dos corpos de prova

Parâmetro	Densidade	Espessura (mm)	Grau de Compact. (%)	Deflexão no topo do revestimento
Média	2,306	44,50	97,51	62
Desv. Pad.	0,07	8,6	2,74	6
C. V (%)	8,67	19,35	2,81	9,78
nº amost	168	168	168	64
Margem de erro 95%	$1,05 \cdot 10^{-3}$	1,06	0,414	

No geral, verifica-se que os valores em termos médios dos 168 corpos de prova na Tabela 9 para densidade, espessura e grau de compactação, são menores que os parâmetros de projetos a serem obedecidos, estimados pela Empresa Projetista. É provável que o grau de compactação com a pós-compactação propiciada pelo tráfego este valor venha a aumentar.

Verifica-se também que a média amostral de 44,50mm da espessura da capa em CBUQ para toda a plataforma, aparentemente mostra-se bem próximo do especificado em projeto 45,00mm, porém, como ensina Assis (2014), o desvio-padrão de 8,60mm conforme mostra Figura 03 abaixo, fica muito fora do desvio-padrão e dos valores limites estabelecidos pela Empresa Projetista de 2,25mm, ou seja, o desvio-padrão estabelecido por ela foi de $\sigma = 1$ ou 99,7% de confiança, como mostrado na Tabela 8 acima, isto se deu uma vez que a variabilidade da amostra está muito grande, mesmo com as médias aproximadas.

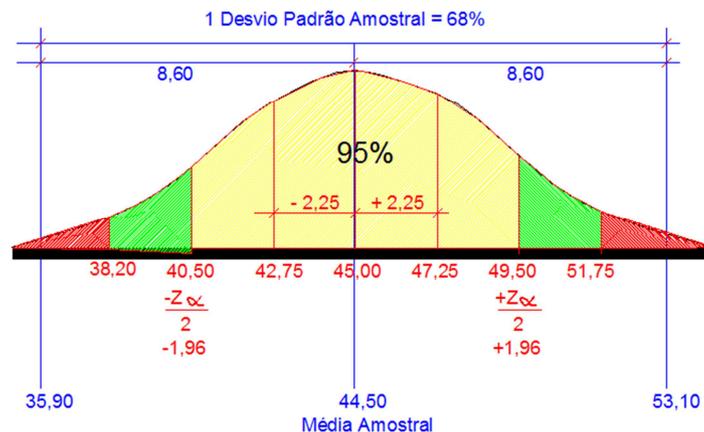


Figura 3. Comparativo de distribuição normal da espessura dada em projeto e do pavimento executado.



PROBABILIDADE DE ÊXITO DO PAVIMENTO EXECUTADO

Como diz Walpole (2009) a última etapa da análise consiste em se determinar qual é o nível de confiabilidade do pavimento executado, ou seja, a probabilidade de sucesso do mesmo. Uma vez que neste estudo as variáveis dependentes analisadas são, a deflexão no topo da estrutura, a densidade, a espessura da capa e o grau de compactação, deve-se determinar a probabilidade dos mesmos em apresentar valores menores que os limites de projeto obtidos. As determinações destas probabilidades foram feitas com o uso de tabelas de distribuição normal padronizadas, retiradas do livro de Rumsey (2012).

Intervalo de confiança para média amostral \bar{x} quando a variância é (σ^2) conhecida é obtido através da fórmula.

$$\left[\bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} ; \bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (8)$$

Se $\alpha = 0.05$, $\alpha/2 = 0.025$ e $z_{0.025} = -1.96$, logo, um Índice de Confiança = 95% para, com \bar{x} e σ^2 conhecido, é dado por:

$$\left[\bar{x} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (9)$$

Obteve-se os seguintes resultados:

- A Deflexão média no topo da estrutura (resvestimento asfáltico) em toda rodovia analisada é de $(60,53 * 10^{-2} \text{ a } 63,47 * 10^{-2})$ para 95% de confiança;
- A Densidade média em toda rodovia analisada varia de: (2,27 a 2,33), para 95% de confiança;
- A Espessura média do revestimento CBUQ em toda rodovia é de (40,52mm a 48,67mm), para 95% de confiança;
- O Grau de Compactação em toda a rodovia analisada é de (97,01% a 98,00%) com 95% de confiança.

Para se avaliar se as probabilidades de sucesso obtidas podem ser consideradas satisfatórias, fez-se uso dos níveis de confiança recomendados pela AASHTO, transcritos na Tabela 10. Neste caso, por se tratar de uma rodovia coletora, localizada em zona rural, a confiabilidade deve estar entre 75% e 95%.

Tabela 10. Confiabilidade C(%) recomendada pela AASHTO – método AASHTO 93.

Classe Funcional	Zona Urbana	Zona Rural
Interestadual	85 a 99,9	80 a 99,9
Artéria Principal	80 a 99	75 a 95
Coletora	80 a 95	75 a 95
Vicinal	50 a 80	50 a 80



Uma vez que os níveis de confiabilidade obtidos foram superiores a 75%, em todos os critérios analisados, pode-se certificar que a estrutura executada atenderá, de forma satisfatória e adequada, o tráfego estimado para o período de projeto, ou seja, até 2023.

CONCLUSÕES

O trabalho apresentado mostrou que o controle defletoométrico das camadas durante o processo construtivo da rodovia, juntamente com medidas de bacias de deflexão, possibilita a averiguar a contribuição de cada camada na redução da deflexão total da estrutura, corrigir pontos com elevada deflexão, caracterizar o comportamento dos materiais em campo, bem como mensurar e avaliar a capacidade da rodovia em atingir os critérios de projeto para a qual ela foi dimensionada e construída.

A análise dos perfis defletoométricos, concomitante com a análise computacional, indica que para estruturas de pavimento como esta, executadas em condições semelhantes à deste estudo, deve-se esperar um valor de deflexão admissível no topo do revestimento em torno de $64,7 \times 10^{-2}$ mm e não de $82,19 \times 10^{-2}$ mm.

Foi verificado através de métodos estatísticos que a densidade, espessura do revestimento e a compactação das camadas com Graus de Compactação executados, estão abaixo dos valores recomendados pela Empresa Projetista, mas para tanto estão dentro dos níveis de confiabilidade de 75 a 95% recomendados pela AASTHO 93, atendendo de forma satisfatória o tráfego estimado em projeto.

A análise mostrou também que as 168 amotras da população indicaram que a espessura do revestimento está com intervalo de confiança próximo da média amostral. A média amostral de 44,50mm da espessura do CBUQ aparentemente mostra-se bem próximo do especificado em projeto 45,00mm, porém, o desvio-padrão conforme indicado na Figura 03 fica muito fora dos valores limites estabelecidos em projeto, uma vez que o limite de desvio-padrão estabelecido em projeto foi de apenas $\sigma = 1$ (um), ou seja, com 99,70% de confiabilidade, sendo muito rígida, a luz da Tabela 10, que dá uma margem de 75 a 95% de confiabilidade. Mas, isto aconteceu porque a variabilidade da amostra está muito grande, $\sigma > 3$ (três) desvios-padrão, como apresentado na Figura 3, deixando em alguns pontos a espessura do pavimento delgada e em outros pontos grossa, portanto provavelmente há problema na análise da espessura do pavimento ou na amostra ao qual serviu como testemunho, mesmo estas estando com as médias amostrais das espessuras bem aproximadas.

Dada à variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais empregados em pavimentação, tornam-se evidentes as vantagens apresentadas pelos métodos estatísticos e probabilísticos, que permitem a análise da estrutura executada considerando tal variabilidade.

Os resultados obtidos no controle podem estar alertando que uma estrutura de pavimento rodoviário, calculada para um baixo volume de tráfego, executada com um bom controle tecnológico, pode conduzir a um nível de deflexão muito menor do que aquele previsto pelo método adotado pelo DNER-PRO 11/79 e DNER-PRO 269/94. Isto pode estar mostrando que o modelo adotado atualmente para a determinação da deflexão admissível na superfície do revestimento de rodovias com baixo volume de tráfego estaria fornecendo deflexões admissíveis elevadas para aquele tráfego, nem sempre compatíveis com as características tecnológicas dos materiais quando devidamente selecionados e compactados.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, André. (2014) **Métodos Estatísticos em Geotecnia**. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Notas de aula. Universidade de Brasília – UnB.
- DNER (1979). **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis**. DNER – PRO 011/79. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1994). Método de Ensaio – Pavimento – **Determinação das deflexões pela viga Benkelman** - DNER-ME 024/94 – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1994). **Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis** – TECNAPAV. DNER – PRO 269/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – **Manual de Pavimentação**. Versão Final (2006). Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf> Acesso 21/07/2014.
- FUTAI, M.M. 2002. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-saturados**: Aplicação a um caso de Voçorocamento. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ.
- GRECO, J. A. S. **Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis Método Empírico do DNIT**. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (2014). Disponível em: <http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/dimensionamento%20pav%20flexiveis.pdf>> Acesso 02/012/2015.
- PASTANA, C. E. T. (2014). **Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis**. Notas de Aula. Universidade de Marília.
- PINTO, S. (1991). Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- RUMSEY, D. (2012). **Estatística para leigos**. Rio de Janeiro, RJ, p. 69-197.
- TRICHÊS, G. (2000). “Avaliação Estrutural Durante o Processo Construtivo: Um Salto de Qualidade Para as Obras Rodoviárias Brasileiras”. In: 20 Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias. Florianópolis, SC.
- TRICHÊS, G.. (2014) **Fadiga dos revestimentos**. Biblioteca do asfalto http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos_conteudo/fatos_e_asfaltos/fatos_10.pdf> Acesso 02/12/2014.
- WALPOPE, R. E. (2009) **Probabilidade e Estatística para engenharia e ciências**, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 8º Edição. p. 100-175.