

## **O CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO DURANTE O PROCESSO CONSTRUTIVO DA RODOVIA COMO CERTIFICADOR DA QUALIDADE DO PAVIMENTO EXECUTADO**

**Glicério Trichês**

Departamento de Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Catarina - PPGE/UFSC.

**Guido Paulo Simm Júnior**

Engenheiro Civil da PROSUL Ltda e mestrando do PPGE/UFSC

### **RESUMO**

O presente trabalho se propõe a mostrar a eficiência e as vantagens da adoção do controle deflectométrico durante o processo construtivo de uma rodovia de baixo volume de tráfego (rodovia coletora rural) localizada na parte central do estado de Santa Catarina. As deflexões foram medidas em todas as camadas da estrutura do pavimento executado, inclusive a camada final de terraplenagem, empregando-se a viga Benkelman. Em alguns segmentos, também, determinou-se a bacia de deflexão com o objetivo de se avaliar, através da técnica de retroanálise, os módulos de deformação dos materiais em campo. A partir dos resultados obtidos e das análises efetuadas, foi possível se estabelecer um comparativo entre as hipóteses de comportamento dos materiais assumidas por ocasião do dimensionamento do pavimento e o seu efetivo comportamento estrutural observado em campo, bem como avaliar a capacidade de cada camada em reduzir a deflexão total da estrutura. Também foi possível, através do emprego do procedimento de Rosenblueth, avaliar a probabilidade do pavimento executado suportar o tráfego estimado para o período de projeto. As análises conduzidas indicam que o pavimento executado apresenta uma probabilidade de 76% de suportar o tráfego estimado para o período de projeto. Este percentual está no limite inferior do nível de confiabilidade desejado para uma rodovia coletora rural (75 a 95%). O trabalho conduzido mostrou a sistemática adotada, e contida nas especificações gerais do DEINFRA/SC, se constitui em um potente procedimento para a certificação do pavimento executado.

### **ABSTRACT**

The present work has the purpose of showing the efficiency and advantages of the adoption of pavement structural evaluation by means of deflectometric control during the constructive process of low-volume highway (rural collector road) located at the central part of the state of Santa Catarina. The deflections were measured at all pavement layers, including the subgrade, using a Benkelman beam. Also, in some segments, deflection basins were measured with the objective of obtaining, through backcalculation techniques, the resilient modulus of the materials used in the highway construction. With the results obtained and the analysis carried out, it was possible to establish a comparison between the hypothesis adopted during the pavement's dimensioning and the effective behavior observed during construction. It was also possible to evaluate the pavement probability to supporting the estimated design traffic, with the use of Rosenblueth procedure. The analysis carried out showed that the constructed structure had a 77% probability of supporting the design traffic for the life cycle. This percentage is on the inferior limit of the level of trustworthiness desired for a rural collector road (75% to 95%). The work carried out showed that the deflection analysis during the constructive process, together with the measure of deflection basins, indicated that the approach adopted, and contained in the general specifications of the DEINFRA/SC, constitutes in a powerful procedure for the executed pavement certification.

### **1. INTRODUÇÃO**

Inúmeros trabalhos apresentados na literatura internacional mostram, de forma inequívoca, que a deformação específica inicial de tração recuperável, ou resiliente, à qual o revestimento asfáltico novo estará submetido no início de um determinado ciclo de vida, é um dos principais parâmetros indicadores da durabilidade do revestimento, no que diz respeito ao seu trincamento por fadiga. Esta deformação específica de tração resiliente, que nos modernos relatórios de projeto de pavimentos é objeto de avaliação, está intimamente ligada à espessura e qualidade mecânica da própria camada de revestimento, à magnitude das cargas solicitantes e, fundamentalmente, à deformabilidade da infra-estrutura onde o revestimento estará assente.

Em que pese os racionais critérios que possam ter sido adotados na fase de projeto, um sentimento de angústia que se instala no íntimo do projetista diz respeito à efetiva obtenção, em campo de uma elevada probabilidade de êxito para o pavimento projetado a qual, sem dúvida, está associada à magnitude da deformação de tração inicial recuperável que o

revestimento estará submetido. O ideal seria, então, se dispor de mecanismos eficientes para se avaliar a magnitude destas deformações de tração no momento de abertura da rodovia ao tráfego. Entretanto, isto exige uma instrumentação cujo custo e nível de sofisticação inviabiliza o seu emprego no dia-a-dia em um canteiro de obra, notadamente em países em desenvolvimento.

Uma das formas encontradas para se aumentar a probabilidade de bom desempenho de um pavimento novo é se controlar a deformação resiliente da estrutura durante o processo construtivo, através da medida sistemática das deflexões recuperáveis. A medida das deflexões recuperáveis possibilita, de forma indireta, avaliar a magnitude da deformação de tração inicial resiliente a que o revestimento estará submetido no início do ciclo de vida, enquanto o pavimento vai sendo executado.

Embora tal procedimento venha de longa data sendo empregado por países como Alemanha e França, no Brasil, somente a partir da década de 90 do século passado é que algumas especificações construtivas, então editadas, começaram a contemplar o controle deflectométrico das camadas durante o processo construtivo, como um dos parâmetros a serem verificados para a aceitação e liberação do serviço executado. Tal preocupação, entre nós, teve como respaldo a constatação de que muitas rodovias brasileiras, embora não externem problemas de ruptura plástica, têm apresentado um trincamento precoce do revestimento, o qual tem sido associado ao elevado nível deflectométrico da estrutura.

O trabalho ora apresentado procura mostrar a eficiência e as vantagens da adoção do controle deflectométrico durante o processo construtivo de uma rodovia de baixo volume de tráfego (rodovia coletora rural) localizada na parte central do estado de Santa Catarina.

## **2. CARACTERÍSTICAS DA RODOVIA ESTUDADA**

Os dados para o desenvolvimento do presente trabalho foram obtidos nas obras de execução da rodovia SC-458, Trecho Campo Belo do Sul - Anita Garibaldi, localizada na região central do estado de Santa Catarina. A rodovia é classificada como sendo de baixo volume de tráfego, com um  $N_{8,2tf}$  de  $7,19 \times 10^5$  (USACE). As obras iniciaram em março de 2002 e a sua inauguração se deu em janeiro de 2004.

O solo predominante na camada final de terraplenagem é o residual de basalto que se apresenta em forma de argilas vermelhas e amarelas, muito à pouco laterizadas. A espessura da camada de solo residual chega a atingir vários metros. Os estudos geotécnicos indicaram uma grande homogeneidade dos tipos de solos, sendo encontrado 98% de solos A-7-5 e 2% como A-7-6. Os valores de CBR de projeto obtidos para os segmentos homogêneos situam-se entre 9,5 e 12,5%.

Devido ao baixo tráfego e aos elevados valores de CBR de projeto obtidos para os segmentos homogêneos, o dimensionamento conduziu a uma estrutura de pavimento mínima, assim constituída:

4 cm de revestimento asfáltico (tipo CBRQ);  
13cm de base de brita graduada; e,  
17cm de sub-base de macadame seco.

## **3. DEFLEXÕES MÁXIMAS ADMISSÍVEIS PARA ESTRUTURA PROJETADA**

Durante a 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 utilizando-se a 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. Ressalta-se que não foram feitos quaisquer ensaios sobre a caracterização do comportamento resiliente dos materiais, sendo os valores adotados de correlações encontradas na literatura.

Inicialmente, determinou-se a deflexão máxima admissível no topo do revestimento de acordo com o Método DNER-PRO 269/94, expresso pelo modelo:

$$\text{Log } D_{adm} = 3,148 - 0,188 \cdot \log N \quad \text{eq. 1}$$

onde:  $D_{adm}$  = deflexão máxima admissível no revestimento (0,01mm); e,  
N = número de solicitações do eixo padrão de  $N_{8,2tf}$  durante o período de projeto.

De acordo com este modelo, a deflexão máxima admissível a ser controlada no topo da camada de revestimento deveria ser de  $105 \times 10^{-2}$  mm.

Através de simulação numérica da estrutura do pavimento projetado, a projetista determinou os seguintes valores para as deflexões admissíveis para as demais camadas:

- Camada final de terraplenagem:  $140 \times 10^{-2}$  mm;
- Camada de sub-base:  $130 \times 10^{-2}$  mm; e,
- Camada de base:  $115 \times 10^{-2}$  mm.

Vale ressaltar que o relatório de projeto é completamente omissivo em definir se estes limites são valores máximos ou se eles representam a média pura das deflexões medidas, ou ainda, se são valores estatísticos. Esta definição é de fundamental importância para o controle de campo.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO

### 4.1 Análise das deflexões

A medida das deflexões foi feita utilizando-se a viga Benkelman. O caminhão utilizado era dotado de eixo simples de roda dupla, com pneus calibrados a 5,7 kgf/cm<sup>2</sup> e carga de 8,2 tf no eixo traseiro. As deflexões foram medidas em todas as estacas, de forma alternada, e na região da futura trilha de roda externa. Para uma melhor visualização dos resultados que iam sendo obtidos, foram traçados perfis deflectométricos longitudinais contendo as deflexões em cada camada, com seus respectivos limites máximos.

Durante o processo de análise dos resultados, verificou-se que a rodovia atravessava duas unidades pedológicas principais: Cambissolo Álico e Terra Bruna Estruturada, ambas formadas por solos residuais de basalto. Optou-se então por se conduzir a análise em separado, dividindo-se o trecho em dois segmentos principais com o intuito de se averiguar possíveis diferenças quanto ao comportamento deflectométrico da estrutura devido ao diferente grau de evolução dos solos dessas duas unidades pedológicas. Assim, o segmento 1, com 10,5km de extensão, desenvolve-se sobre a unidade pedológica Cambissolo, enquanto que o segmento 2, com 12,4km de extensão, desenvolve-se sobre a unidade Terra Bruna Estruturada.

A Tabela 1 apresenta um resumo estatístico dos principais parâmetros obtidos a partir da análise dos perfis deflectométricos traçados para o segmento 1 enquanto que a Tabela 2,

apresenta o resumo para o segmento 2. Nas tabelas, os valores da deflexão característica representam a média mais 1 desvio padrão da amostra.

**Tabela 1:** Quadro-resumo das deflexões no segmento 1 (Cambissolo)

Parâmetro	CAUQ	Brita Graduada	Macadame Seco	Subleito
Média ( $10^{-2}$ mm)	74,9	104,5	125,2	134,4
Desv. Padrão ( $10^{-2}$ mm)	10,4	5,5	4,0	4,5
Deflexão característica ( $10^{-2}$ mm)	85,3	110,0	129,2	138,9
C.V (%)	13,9	5,3	3,2	3,3

**Tabela 2:** Quadro-resumo das deflexões no segmento 2 (Terra Bruna Estruturada)

Parâmetro	CAUQ	Brita Graduada	Macadame Seco	Subleito
Média ( $10^{-2}$ mm)	74,8	103,6	123,2	131,5
Desv. Padrão ( $10^{-2}$ mm)	11,2	5,8	4,1	4,8
Deflexão característica ( $10^{-2}$ mm)	86,0	109,4	127,2	136,3
C.V (%)	14,8	5,6	3,3	3,6

Os valores apresentados nas Tabelas 1 e 2 mostram uma grande homogeneidade nas deflexões medidas em cada camada, o que pode ser facilmente constatado pelo pequeno coeficiente de variação. Além disso, pode-se perceber que o comportamento deflectométrico de todas as camadas é idêntico nos dois segmentos, o que justificaria a adoção de mesmos valores de deflexão máxima admissível para estes dois tipos de solos.

Verifica-se, também, que em termos médios, as deflexões das camadas são muito inferiores aos valores admissíveis de projeto, o que indicaria um comportamento da estrutura em campo muito superior ao previsto em projeto. Tal constatação poderia levar a um redimensionamento da estrutura, não fosse o fato de que já se estava executando uma estrutura mínima, como mencionado no item 2.

Por outro lado, analisando-se as deflexões características calculadas, verifica-se que estas se apresentam próximas aos limites estabelecidos em projeto, exceto para o revestimento. Em princípio, pode-se atestar, 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 projetista na estimativa das deflexões admissíveis para as camadas foi satisfatória, desde que entendido que os limites apresentados em projeto referiam-se a valores estatísticos. Já, em relação ao revestimento, os resultados obtidos podem estar indicando que a capacidade de redução da deflexão de uma mistura asfáltica é muito maior do que aquela prevista em projeto ( $2,25 \times 10^{-2}$  mm/centímetros de espessura) para este tipo de estrutura.

Mas sem dúvida, o fator mais preocupante nesta análise é que os resultados obtidos no controle de campo podem estar alertando que uma estrutura de uma rodovia de baixo volume de tráfego, executada com um bom controle tecnológico, pode conduzir a um nível de deflexão significativamente menor do que aquele previsto pelo modelo adotado pelo DNER-PRO 269/94 (eq.1). Isto pode estar indicando que, conforme Trichês (2000), 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 deformações de tração, o que pode acarretar na fadiga precoce do revestimento.

Isto pode ser facilmente exemplificado utilizando-se o critério de ruptura apresentado por Pinto (1991) em sua tese de doutorado, baseado na deformação específica de tração do revestimento asfáltico, expresso pela equação:

$$N = 2,04 \cdot 10^{-3} \times (1/\epsilon_t)^{2,6} \quad \text{eq. 2}$$

onde:  $\epsilon_t$  = deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (cm/cm), obtém-se,

Para o  $N_{8,2tf}$  de projeto da rodovia estudada ( $7,19 \times 10^5$ ), a deformação específica de tração deveria ser igual a  $\epsilon_t = 5,16 \times 10^{-4}$ . Ou seja, para que a rodovia atinja a vida útil de projeto, segundo 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  $90 \times 10^{-2}$  mm.

Desta forma, se a empresa construtora executasse a estrutura controlando as deflexões contemplando estritamente ao definido em projeto, ela poderia ser menos rígida em relação à compactação das camadas e a estrutura final, com uma deflexão de  $105 \times 10^{-2}$  mm, não atenderia ao tráfego de projeto.

Assim, é necessário que se desenvolva no País um programa de acompanhamento das rodovias de baixo e médio volume tráfego, dimensionadas pelo método DNER-PRO 269/94, para avaliar se de fato as deflexões admissíveis estimadas a partir do modelo nele contido são adequadas para estas classes de rodovias.

Vale ressaltar que o DEINFRA/SC orientou todas as empresas construtoras do Programa BID IV, ora em andamento no Estado, para a necessidade de se fazer segmentos experimentais no início de cada obra com o objetivo de avaliar as condições deflectométricas da estrutura a ser executada, uma vez que não haviam sido feitos ensaios de caracterização do comportamento resiliente dos materiais.

#### 4.2 Capacidade de redução de deflexão dos materiais

A execução de cada camada da estrutura do pavimento, com materiais de melhor qualidade do que a camada final de terraplenagem, pressupõe a redução da deflexão da estrutura. Entretanto, a falta de dados de campo sobre como se dá esta redução, tem levado consultores e supervisores das obras a se defrontarem com uma fronteira pouca pesquisada quando se propõem a controlar a deflexão durante o processo construtivo.

Neste trabalho, com os dados obtidos do controle deflectométrico, foi possível estabelecer fatores de redução de deflexão para cada camada do pavimento. Esse fator indica a capacidade de determinado material em reduzir a deflexão obtida na camada subsequente, sendo calculado pela expressão:

$$k_i = (D_{i-1} - D_i) / h_i \quad (\text{eq. 3})$$

onde:  $k_i$  = Fator de redução de deflexão da camada  $i$ , em 0,01mm/cm de material;

$D_{i-1}$  = deflexão medida na camada  $i-1$  subjacente a camada  $i$ , em 0,01mm;

$D_i$  = deflexão na camada  $i$ , em 0,01mm; e,

$h_i$  = espessura da camada  $i$ , em cm.

Inicialmente, foram calculados os fatores de redução de deflexão em cada ponto em que se mediu a deflexão. Após esta etapa, foi feita a remoção dos valores considerados espúrios, utilizando-se o seguinte critério: primeiramente, calculou-se para cada camada a média de todos os fatores e o seu desvio padrão; posteriormente, eliminou-se os valores inferiores à média menos um desvio-padrão e os valores maiores que a média mais um desvio padrão. O resumo do tratamento estatístico dos dados são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Análise estatística dos fatores de redução de deflexão

Parâmetro	CAUQ	Brita Graduada	Macadame Seco
Médio ( $10^{-2}$ mm/cm)	6,92	1,54	0,58
Desvio Padrão ( $10^{-2}$ mm/cm)	1,47	0,29	0,16
Coef. Variação (%)	21,30	18,95	26,95
Número de amostras	1.575	1.525	1.289

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos na Rodovia Matos Costa – Porto União, de médio volume de tráfego, em um estudo análogo ao desenvolvido para a rodovia Campo Belo do Sul - Anita Garibaldi.

**Tabela 4:** Análise estatística dos fatores de redução de deflexão. Rodovia Matos Costa – Porto União - SC

Parâmetro	CAUQ	Brita Graduada	Macadame Seco
Médio ( $10^{-2}$ mm/cm)	5,52	1,43	1,39
Desvio Padrão ( $10^{-2}$ mm/cm)	1,36	0,48	0,53
Número de amostras	1.787	1.559	1.616

Os dados contidos nas duas tabelas são bastante similares, exceto para a camada de macadame seco. Verifica-se que a capacidade de redução de deflexão da camada de revestimento é muito maior do que os  $2,25 \times 10^{-2}$  mm/cm comumente adotados pelas projetistas e que o CBUQ teria um fator de redução de deflexão, em analogia aos fatores de equivalência estrutural, 4 vezes maior que a brita graduada.

Em relação à camada de macadame seco, em termos médios, ela possui um poder de redução de deflexão entre 0,58 a  $1,39 \times 10^{-2}$  mm/cm. Esta camada, por não possuir ensaios normalizados para avaliar a sua real condição de compactação, tem sua densificação muito dependente do esmero do fiscal de campo. Daí, talvez, o porque de um intervalo tão aberto para a capacidade de redução da deflexão. No caso da rodovia Matos Costa – Porto União, o macadame seco teria uma capacidade de redução de deflexão semelhante ao da brita graduada (mesmo coeficiente estrutural).

Acredita-se que os fatores obtidos neste estudo podem ser utilizados no pré-dimensionamento de novas rodovias e para a determinação de valores de deflexões máximas admissíveis a serem controladas durante a execução da obra. No entanto, é importante salientar que eles são válidos para rodovias semelhantes à analisada neste trabalho, ou seja, de baixo a médio volume de tráfego. É sabido que em rodovias de maior volume de tráfego e pavimentos de maior rigidez (com deflexões mais baixas), a adição de uma camada de concreto asfáltico não trará ganhos tão significativos na redução da deflexão. Por outro lado, quando as deflexões da estrutura são mais elevadas, a adição de uma camada de concreto asfáltico reduz significativamente as deflexões.

### 4.3 Caracterização do comportamento mecânico das camadas

Em adição ao controle deflectométrico adotado na rodovia, que contemplava a medida de deflexões a cada 20 metros, foram realizados, em alguns segmentos, medidas de bacias de deflexão, com o objetivo de se avaliar, através da técnica de retroanálise, os módulos de deformação dos materiais em campo. Foram medidas bacias de deformação nas camadas de subleito, base e revestimento. Foram adotados dois critérios distintos para verificar a acurácia da retroanálise realizada: o erro relativo e a raiz média quadrática (Fernandes, 2000).

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados obtidos após a análise estatística das bacias retroanalizadas com o uso do programa ELSYM-5. Deve-se ressaltar que não foi possível a determinação dos módulos elásticos da camada de revestimento asfáltico através da retroanálise. Devido a pequena espessura da camada, de apenas 4 centímetros, grandes variações modulares causavam alterações praticamente insignificantes na magnitude das deflexões. Em vista disso, optou-se por manter o módulo da camada constante em 30.000kgf/cm<sup>2</sup>, valor este comumente encontrado na literatura brasileira sobre o assunto.

**Tabela 5:** Análise estatística dos módulos obtidos com a retroanálise das bacias medidas sobre o subleito

Parâmetro	Subleito
Valor Médio (MPa)	52,5
Desv. Padrão (MPa)	1,9
Coef. de variação (%)	3,61
Número de amostras:	45

**Tabela 6:** Análise estatística dos módulos obtidos com a retroanálise das bacias medidas sobre a camada de base

Parâmetro	Brita Graduada	Macadame Seco	Subleito
Valor Médio (MPa)	103,0	81,9	67,6
Desv. Padrão (MPa)	18,4	11,7	10,0
Coef. de variação (%)	17,90	14,31	14,82
Número de amostras:	48		

**Tabela 7:** Análise estatística dos módulos obtidos com a retroanálise das bacias medidas sobre a camada de concreto asfáltico

Parâmetro	Brita Graduada	Macadame Seco	Subleito
Valor Médio (MPa)	210,4	131,3	93,5
Desv. Padrão (MPa)	89,2	49,4	28,3
Coef. de variação (%)	42,38	37,61	30,26
Número de amostras:	83		

Da análise dos resultados contidos nas Tabelas 5, 6 e 7, verifica-se que os valores modulares obtidos através da retroanálise das bacias medidas sobre o revestimento são significativamente 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.

Quanto ao subleito, observa-se que os valores modulares obtidos para esta camada com a retroanálise das bacias medidas sobre a brita graduada e sobre o revestimento asfáltico são

significativamente 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 demais camadas do pavimento. Para solos finos coesivos, o módulo resiliente é função da tensão atuante sobre o material. Para menores níveis de tensões, o módulo tende a ser mais elevado.

No geral, verifica-se que os módulos da camada de brita graduada e macadame seco são baixos, menores que os observados na literatura. Entretanto, salienta-se que estes são valores obtidos durante a execução e refletem esta condição. É muito provável que com a pós-compactação propiciada pelo tráfego estes valores venham a aumentar. Isto carece de estudos de acompanhamento de desempenho, o que será o propósito a ser feito nesta rodovia.

## 5. PROBABILIDADE DE EXITO DO PAVIMENTO EXECUTADO

Outro objetivo deste estudo foi avaliar se a estrutura de pavimento construída iria atingir a vida de projeto para o qual ela foi dimensionada. Para tanto, utilizou-se do método probabilístico de Rosenblueth. Neste método, os parâmetros estatísticos de cada variável independente de projeto são determinados pela média e variância dos mesmos.

O método consiste no cálculo da média e variância dos  $2^N$  valores da variável dependente, sendo que “N” corresponde ao número de variáveis independentes envolvidas na análise. Neste caso, as variáveis independentes de projeto correspondem aos módulos elásticos das camadas do pavimento e do subleito e as variáveis dependentes, aos parâmetros da estrutura analisada. Ressalta-se que não se considerou a variabilidade das espessuras das camadas por elas terem sido insignificantes ao longo da rodovia.

Para a análise foram definidos três critérios de ruptura como segue:

- Deflexão total da estrutura: foi adotado o critério utilizado no método DNER-PRO 269/94, isto é, o modelo apresentado na equação 1;
- Deformação específica de tração no revestimento: adotou-se como critério de ruptura o modelo proposto por Pinto (1991), expresso pela equação 2;
- Tensão vertical no subleito: Foi adotado o critério proposto por Heukelom e Klomp (1962), expresso pela equação:

$$\sigma_{V_{ADM}} = 0,006 * MR / (1 + 0,7 \log N) \quad \text{eq. 4}$$

onde:  $\sigma_{V_{ADM}}$  = tensão vertical admissível no topo da camada de subleito, em  $\text{kgf/cm}^2$ ;  
 MR = módulo resiliente da camada final de terraplenagem, em  $\text{kgf/cm}^2$ . Adotou-se para este parâmetro o valor médio obtido das retroanálises das bacias de deflexão medidas sobre o revestimento, conforme apresentado na Tabela 7, ou seja, 93,5 MPa; e,  
 N = Número de solicitações equivalentes ao eixo de 8,2 tf, já definido anteriormente.

Calculando-se estes três critérios de ruptura para  $N_{8,2tf} = 7,19 \times 10^5$ , obtém-se os seguintes valores:

- Deflexão máxima admissível:  $111,40 \times 10^{-2} \text{ mm}$ ;
- Deformação específica de tração máxima admissível:  $5,16 \times 10^{-4} \text{ cm/cm}$ ; e,
- Tensão vertical máxima admissível no topo do subleito: 0,11 MPa.

Sendo quatro variáveis aleatórias envolvidas na análise da estrutura (módulo de resiliência do revestimento, da brita graduada, do macadame seco e do subleito), tem-se que  $N = 4$ .



Portanto, o número de termos das variáveis dependentes ( $D_{adm}$ ,  $\epsilon$  e  $\sigma_{ADM}$ ) é igual 16.

Utilizando-se dos valores modulares apresentados na Tabela 7, definiram-se para cada camada do pavimento, os seus valores máximos (média mais um desvio padrão) e mínimos (média menos um desvio padrão). Como dito anteriormente, não foi possível a obtenção dos módulos da camada de revestimento. Foi adotado, então, um módulo médio de 3.000 MPa com desvio padrão de 1.000 MPa, valores estes comumente encontrados na literatura brasileira sobre o assunto. A análise envolveu então o seguinte fatorial:

Revestimento:  $M_{REV+} = 3.000 + 1.000 = 4.000$  MPa;  
 $M_{REV-} = 3.000 - 1.000 = 2.000$  MPa;

Brita graduada:  $M_{BG+} = 210,4 + 89,2 = 299,6$  MPa;  
 $M_{BG-} = 210,4 - 89,2 = 121,3$  MPa;

Macadame seco:  $M_{MS+} = 131,3 + 49,4 = 180,6$  MPa;  
 $M_{MS-} = 131,3 - 49,4 = 81,9$  MPa;

Subleito:  $M_{SUB+} = 93,5 + 28,3 = 121,8$  MPa;  
 $M_{SUB-} = 93,5 - 28,3 = 65,2$  MPa.

A Tabela 8 exemplifica a rotina utilizada para a aplicação do método de Rosenblueth.

**Tabela 8:** rotina utilizada para a aplicação do método de Rosenblueth

Camadas				Valores dos Módulos (MPa)				Critérios		
$M_{REV+}$	$M_{BG+}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB+}$	4.000	299,6	180,6	121,8	$\epsilon_{++++}$	$D_{++++}$	$\sigma_{++++}$
$M_{REV+}$	$M_{BG+}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB-}$	4.000	299,6	180,6	65,2	$\epsilon_{+++}$	$D_{+++}$	$\sigma_{+++}$
$M_{REV+}$	$M_{BG+}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB+}$	4.000	299,6	81,9	121,8	$\epsilon_{+++-}$	$D_{+++-}$	$\sigma_{+++-}$
$M_{REV+}$	$M_{BG+}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB-}$	4.000	299,6	81,9	65,2	$\epsilon_{++--}$	$D_{++--}$	$\sigma_{++--}$
$M_{REV+}$	$M_{BG-}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB+}$	4.000	121,3	180,6	121,8	$\epsilon_{+++-}$	$D_{+++-}$	$\sigma_{+++-}$
$M_{REV+}$	$M_{BG-}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB-}$	4.000	121,3	180,6	65,2	$\epsilon_{++--}$	$D_{++--}$	$\sigma_{++--}$
$M_{REV+}$	$M_{BG-}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB+}$	4.000	121,3	81,9	121,8	$\epsilon_{+-++}$	$D_{+-++}$	$\sigma_{+-++}$
$M_{REV+}$	$M_{BG-}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB-}$	4.000	121,3	81,9	65,2	$\epsilon_{+--+}$	$D_{+--+}$	$\sigma_{+--+}$
$M_{REV-}$	$M_{BG+}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB+}$	2.000	299,6	180,6	121,8	$\epsilon_{++++}$	$D_{++++}$	$\sigma_{++++}$
$M_{REV-}$	$M_{BG+}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB-}$	2.000	299,6	180,6	65,2	$\epsilon_{+++}$	$D_{+++}$	$\sigma_{+++}$
$M_{REV-}$	$M_{BG+}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB+}$	2.000	299,6	81,9	121,8	$\epsilon_{+++-}$	$D_{+++-}$	$\sigma_{+++-}$
$M_{REV-}$	$M_{BG+}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB-}$	2.000	299,6	81,9	65,2	$\epsilon_{++--}$	$D_{++--}$	$\sigma_{++--}$
$M_{REV-}$	$M_{BG-}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB+}$	2.000	121,3	180,6	121,8	$\epsilon_{+++-}$	$D_{+++-}$	$\sigma_{+++-}$
$M_{REV-}$	$M_{BG-}$	$M_{MS+}$	$M_{SUB-}$	2.000	121,3	180,6	65,2	$\epsilon_{++--}$	$D_{++--}$	$\sigma_{++--}$
$M_{REV-}$	$M_{BG-}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB+}$	2.000	121,3	81,9	121,8	$\epsilon_{+-++}$	$D_{+-++}$	$\sigma_{+-++}$
$M_{REV-}$	$M_{BG-}$	$M_{MS-}$	$M_{SUB-}$	2.000	121,3	81,9	65,2	$\epsilon_{+--+}$	$D_{+--+}$	$\sigma_{+--+}$

Utilizando-se o programa ELSYM-5, determinou-se os valores de deflexão no topo do

revestimento (D), deformação específica de tração na face inferior do revestimento ( $\epsilon_t$ ) e tensão vertical atuante no topo do subleito ( $\sigma_v$ ) para cada combinação de valores modulares constantes do Quadro 1.

Determinados os valores de D,  $\epsilon_t$  e  $\sigma_v$ , foram calculados a média, desvio padrão e o coeficiente de variação destes parâmetros, conforme apresentado na Tabela 9.

**Tabela 9:** Parâmetros estatísticos de  $\epsilon_t$ , deflexão e  $\sigma_v$ , resultantes da utilização do método de Rosenblueth

Parâmetro	$\epsilon_t$ (cm/cm)	Deflexão (0,01mm)	$\sigma_v$ (MPa)
Média	$4,05 \times 10^{-4}$	77,38	0,72
Desvio Padrão	$1,56 \times 10^{-4}$	15,94	0,11
Coeficiente de Variação (%)	39,00	20,60	14,99

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 deformação de tração na face inferior do revestimento, a deflexão no topo da estrutura e a tensão vertical no topo do subleito, deve-se determinar a probabilidade dos mesmos em apresentar valores menores que os limites obtidos pelos critérios de ruptura. A determinação destas probabilidades foi feita com o uso de tabelas de distribuição normal padronizadas, conduzindo aos seguintes resultados:

- $p(D_o < 111,40 \times 10^{-2} \text{ mm}) = 98\%$ ;
- $p(\epsilon_t < 5,16 \times 10^{-4} \text{ cm/cm}) = 77\%$ ; e,
- $p(\sigma_v < 1,10 \text{ MPa}) = 100\%$ .

Para se avaliar se as probabilidades de sucesso obtidas podem ser consideradas satisfatórias, fez-se uso dos níveis de confiabilidade 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

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 adequada, o tráfego estimado para o período de projeto, muito embora com a confiabilidade próxima ao limite inferior recomendado.

## 6. CONCLUSÕES

- O trabalho conduzido mostrou que o controle deflectométrico das camadas durante o processo construtivo, juntamente com medidas de bacias de deflexão, possibilita avaliar 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 avaliar a capacidade da rodovia em atingir a vida de projeto para a qual ela foi dimensionada e construída. Pode-se atestar que a sistemática adotada, e contida nas especificações gerais do DEINFRA/SC, se constitui em um potente procedimento para a certificação do pavimento executado;

- A análise dos perfis deflectométricos, juntamente com a análise computacional, indica que para estruturas mínimas de pavimento, executadas em condições semelhantes à deste trabalho, deve-se esperar um valor de deflexão admissível no topo do revestimento em torno de  $90 \times 10^{-2}$  mm. Estabelecer deflexões admissíveis superiores a esta, mesmo para volumes de tráfego menores, seria o mesmo que se admitir uma compactação das camadas com Graus de Compactação abaixo dos valores atualmente recomendados, com a sua conseqüente repercussão na vida útil da rodovia;
- Foram obtidos os seguintes fatores de redução de deflexão médios para os materiais do pavimento:  $0,58 \times 10^{-2}$  mm/cm para o macadame seco;  $1,54 \times 10^{-2}$  mm/cm para a brita graduada; e  $6,92 \times 10^{-2}$  mm/cm para o concreto asfáltico. Acredita-se que os fatores de redução de deflexão obtidos neste trabalho poderão ser utilizados em projetos futuros de rodovias semelhantes à estudada, para a determinação das deflexões a serem controladas no campo;
- Os valores modulares médios obtidos da retroanálise sobre a camada de concreto asfáltico indicam que, para o subleito, este valor deve estar em torno de 93,5 MPa; para o macadame seco, de 131,3 MPa; e, para a brita graduada, de 210,4 MPa. Os intervalos de valores modulares obtidos neste trabalho não se constituem numa solução para uso indiscriminado. Cada caso deverá ser analisado de forma crítica e de acordo com as condições de contorno que lhes são peculiares;
- Dada à variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais empregados em pavimentação, tornam-se evidentes as vantagens apresentadas pelos métodos probabilísticos, como o método de Rosenblueth, que permitem a análise da estrutura executada considerando tal variabilidade;
- Os resultados obtidos no controle podem estar alertando que uma estrutura de uma rodovia de baixo volume de tráfego, executada com um bom controle tecnológico, pode conduzir a um nível de deflexão significativamente menor do que aquele previsto pelo modelo adotado pelo DNER-PRO 269/94 (eq.1). Isto pode estar indicando que o modelo atualmente adotado para a determinação da deflexão admissível na superfície do revestimento de rodovias de baixo volume de tráfego estaria fornecendo deflexões admissíveis elevadas, nem sempre compatíveis com as características tecnológicas dos materiais quando devidamente selecionados e compactados; e,
- É necessário que se desenvolva no País um programa de acompanhamento das rodovias de baixo e médio volume tráfego, dimensionadas pelo método DNER-PRO 269/94, para avaliar se de fato as deflexões admissíveis estimadas a partir do modelo nele contido são adequadas para esta classe de rodovias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

- 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.
- DNER (1979). *Delineamento da Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação*

- por Intermédio da Viga Benkelman - DNER-ME 61/79. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.
- EMBRAPA (1998). *Levantamento de reconhecimento dos solos do estado de Santa Catarina*. Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa nº 6. Rio de Janeiro, RJ.
- Fernandes, I.S. (2000). *Avaliação do comportamento mecânico da camada de brita graduada "in situ"*. Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC.
- Fossati, M., Souza, R. (2000). *Reciclagem de pavimentos e levantamento deflectométrico como controle de qualidade na execução de rodovias*. Trabalho de Conclusão de Curso, UFSC, Florianópolis, SC.
- Heukelom, W, Klomp, A.J.G. (1962). *Dynamic testing as a mean of controlling pavements during and after construction. Proceedings*. In: 1<sup>a</sup> Intern. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan, An Arbor.
- Nóbrega, E.S (2003). *Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- 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.
- PROSUL (2001). *Projeto da Rodovia SC-458, Trecho: Anita Garibaldi – Campo Belo do Sul*. Florianópolis, SC.
- Stevenson, W.J. (1986). *Estatística aplicada à administração*. Editora HARBRA Ltda. São Paulo, SP.
- Simm, G.P (2004). *Avaliação estrutural durante o processo executivo da rodovia SC-458, trecho: Anita Garibaldi – Campo Belo do Sul*. Trabalho de Conclusão de Curso, UFSC, Florianópolis, SC.
- Trichês, G. (2000). "Avaliação Estrutural Durante o Processo Construtivo: Um Salto de Qualidade Para as Obras Rodoviárias Brasileiras". In: 2<sup>o</sup> Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias. Florianópolis, SC.
- Trichês, G. (2002). *Notas de Aula disciplina ECV 5154 – Pavimentação de Estradas*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DEINFRA/SC e a empresa PROSUL Ltda pelo apoio fornecido e que durante todo o processo de elaboração deste trabalho.