

Estudo de obtenção de número estrutural em pavimentos flexíveis

Marlova Grazziotin Johnston
Jorge Augusto Pereira Ceratti

1. APRESENTAÇÃO

O presente trabalho versa sobre um novo enfoque para a obtenção de número estrutural em pavimentos flexíveis. O estudo foi realizado em trechos pertencentes à duas regiões do Rio Grande do Sul com a mesma formação geológica. A partir dos dados levantados das deflexões obtidos com um equipamento tipo FWD (Falling Weight Deflectometer), bem como dos valores das espessuras dos pavimentos fornecidos pelo DAER-RS, foram realizadas retroanálises de todas as bacias de deformação levantadas para cada ponto dos trechos estudados. Encontrados os Módulos de Resiliência de cada camada dos pavimentos, foram determinados, através das correlações da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), os coeficientes estruturais e, conseqüentemente, os números estruturais para cada camada de pavimento.

Por outro lado, determinou-se o raio de curvatura para cada ponto levantado pelo equipamento, através da parábola de segundo grau utilizada pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem). Verificou-se que os valores de número estrutural dos pavimentos e dos raios de curvatura variam em proporções semelhantes, permitindo, então, a identificação de correlações entre os mesmos. As correlações, entre raio de curvatura e número estrutural,

apresentadas neste trabalho, facilitam a obtenção do número estrutural sem utilizar retroanálises.

O estudo é parte integrante do trabalho de conclusão do primeiro autor, para obtenção do título de Mestre em Engenharia - modalidade profissionalizante – ênfase geotecnia, pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos valores de número estrutural das camadas de um pavimento existente é de grande importância para a avaliação estrutural deste pavimento. Os valores são utilizados em projetos de restauração e também na previsão da vida útil destes pavimentos. Sendo assim, torna-se imprescindível a determinação dos mesmos.

O método de dimensionamento de Pavimentos flexíveis da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), 1993, determina a espessura de reforço, utilizando conceitos de queda de serventia - Δ PSI (Present Serviceability Index) e número estrutural do pavimento (SN), admitindo o aspecto funcional e o estrutural dos pavimentos.

O trabalho analisa dados de deflexão obtidos pelo equipamento Falling Weight Deflectometer (FWD), dos trechos pertencentes ao lote 2 e ao

lote 7 do Programa de Restauração das rodovias do Rio Grande do Sul, que foi criado pelo DAER-RS (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens – Rio Grande do Sul), para restaurar e manter as rodovias localizadas em distintas regiões daquele Estado, tendo sido dividido, inicialmente, em sete lotes.

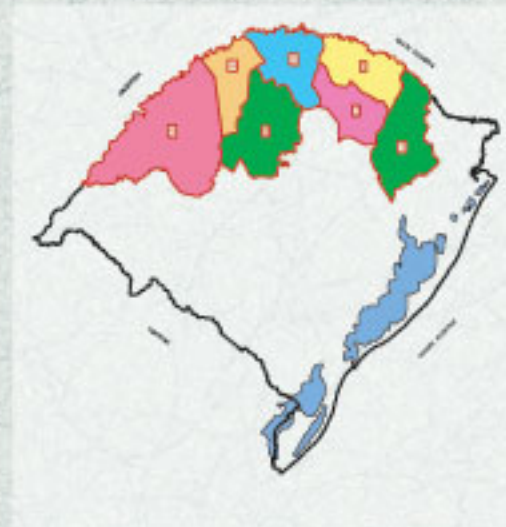
Através de uma retroanálise realizada com os dados de deflexão, foram encontrados os Módulos de Resiliência de cada uma das camadas que constituem os pavimentos dos trechos estudados e, utilizando correlações criadas pela AASHTO (1986) e desenvolvidas por ULLIDTZ (1987), foram obtidos coeficientes de cada camada (a_i), que incorporados às espessuras existentes, forneceram os números estruturais.

Por outro lado, o trabalho permitiu estudar a bacia de deformação de cada trecho, encontrar o raio de curvatura e propor correlações com o número estrutural.

3. LEVANTAMENTO DE DADOS

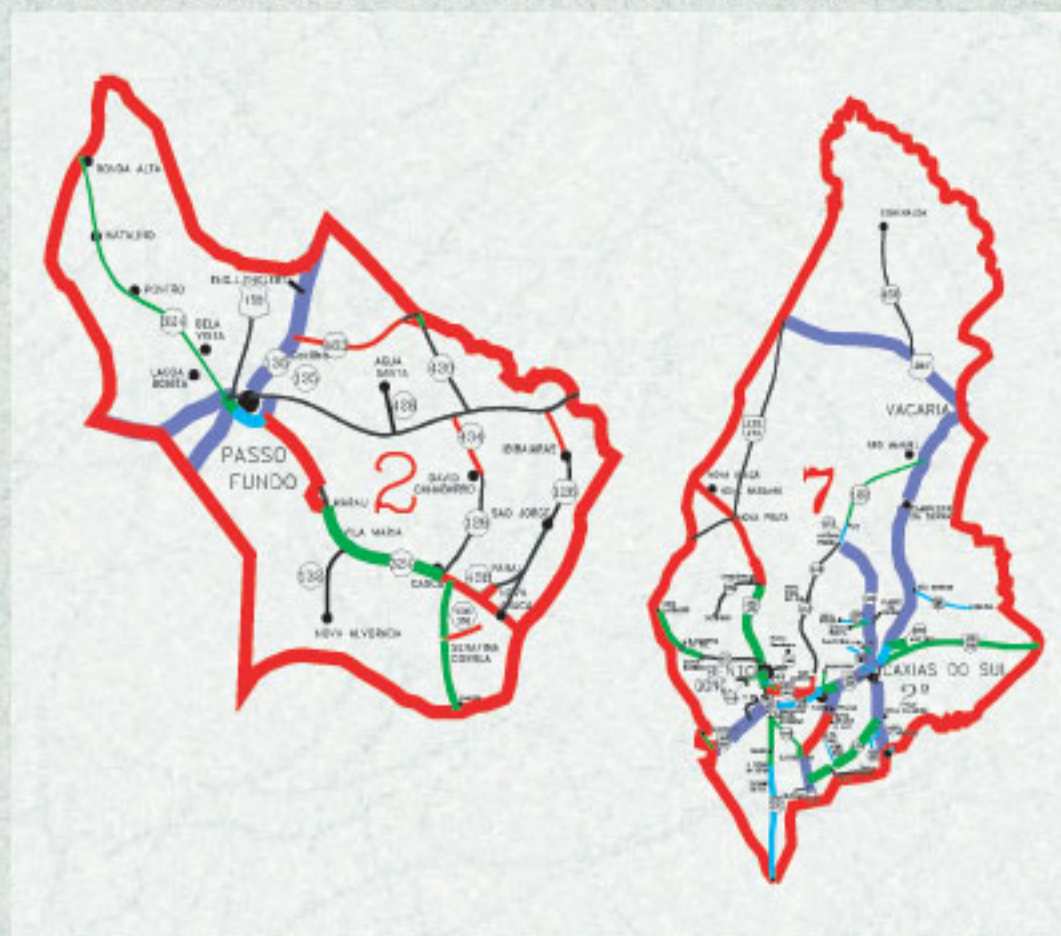
Esta pesquisa desenvolveu-se através de um estudo das rodovias pertencentes aos lotes 2 e 7 do Programa de Restauração, visando a restauração e manutenção das rodovias. Para este programa, em primeira fase, a Região Norte do Estado foi dividida em 7 lotes. As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente,

Figura 1 – Distribuição dos lotes no Estado do Rio Grande do Sul



a distribuição dos lotes e o croqui esquemático das rodovias, enquanto os Quadros 1 e 2 apresentam a descrição dos trechos, suas extensões e avaliações funcionais expeditas com base em três níveis: P (Péssimo), R (Regular) e B (Bom).

Figura 2 – Croqui esquemático das rodovias pertencentes aos lotes 2 e 7



3.1 Coleta de Dados das Espessuras dos Pavimentos

O Departamento Autônomo de

Estradas e Rodagens do Rio Grande do Sul (DAER-RS) forneceu as espessuras e os tipos das camadas dos

pavimentos dos trechos estudados. Estes dados foram obtidos, através de consultas a antigos e novos

Quadro 1 - Rodovias pertencentes ao lote 2

NÚMERO RODOVIA	TRECHO DAER	TRECHO PESQUISA	DESCRIÇÃO TRECHO	EXTENSÃO TRECHO	AVALIÇÃO RESIDENTE	DATA LEVANTAMENTO
126	0007	201	IBIRAIARAS - ENTR. BR/285(A)(CASEIROS)	13,730	R	04/06/00
129	0150	202	ENTR. RS/441 (GUAPORÉ) - ENTR. VRS/351 (SERAFINA CORRÊA)	20,010	B	04/06/00
129	0170	203	ENTR. VRS/351 (SERAFINA CORRÊA) - ENTR. RS/447 (EVANGELISTA)	2,990	B	04/06/00
129	0180	204	ENTR. RS/447 (EVANGELISTA) - ENTR. RS/324(A) (P/NOVA ARACA)	13,540	B	04/06/00
324	0070	205	ENTR. RS/211/404 (RONDA ALTA) - NATALINO	19,040		06/06/00
324	0090	206	NATALINO - PONTÃO	18,570		06/06/00
324	0100	207	PONTÃO - LAGOA BONITA	17,740	B	06/06/00
324	0110	208	LAGOA BONITA - ENTR. BR/153(A)/285(P/CARAZINHO)	14,070	B	06/06/00
324	0130	209	ENTR. BR/153(A)/285(P/CARAZINHO) - ENTR. BR/153(B)(P/PASSO FUNDO)	6,380	B	06/06/00
324	0150	210	ENTR. BR/153(B)(P/PASSO FUNDO) - ENTR. RS/135 (P/PASSO FUNDO)	8,590	R	06/06/00
324	0170	211	ENTR. RS/135 (P/PASSO FUNDO) - MARAU (ACESSO NORTE)	23,870	P	08/06/00
324	0190	212	MARAU (ACESSO NORTE) - MARAU (ACESSO SUL)	5,830	P	03/06/00
324	0210	213	MARAU (ACESSO SUL) - ENTR. RS/132(P/CAMARGO)	6,960		03/06/00
324	0215	214	ENTR. RS/132(P/CAMARGO) - ENTR. RS/129(A) (P/CASCA)	21,620		03/06/00
324	0220	215	ENTR. RS/129(A)(P/CASCA) - ENTR. RS/129(B) (P/GUAPORÉ)	2,440	R	03/06/00
324	0230	216	ENTR. RS/129(B) (P/GUAPORÉ) - ENTR. RS/438 (P/PARAÍ)	16,800	B	03/06/00
324	0250	217	ENTR. RS/438 (P/PARAÍ) - NOVA ARACA	8,100	B	03/06/00
434	0010	218	ENTR. RS/129 (DAVID CANABARRO) - CIRIACO	8,660	P	04/06/00
434	0030	219	CIRIACO - ENTR. BR/285 (P/PASSO FUNDO)	10,070	P	04/06/00
438	0010	220	PARAÍ - ENTR. RS/324 (P/CASCA)	4,350	P	04/06/00
463	0030	221	ENTR. RS/135 (COXILHA) - TAPEJARA (ACESSO)	30,910	P	07/06/00
351	0010	222	ENTR. RS/129 (SERAFINA CORREA) - RIO CARRERO	9,720	P	04/06/00
TOTAL				283,990		

Quadro 2 - Rodovias pertencentes ao lote 7

NÚMERO RODOVIA	NÚMERO TRECHO	TRECHO PESQUISA	DESCRIÇÃO TRECHO	EXTENSÃO TRECHO(m)	AVALIAÇÃO RESIDENTE		DATA
453	9145	701	ENTR. BR/453(FARROUPILHA) - CARAVAGGIO	6,160		B	29/05/00
122	9050	704	ENTR. RS/122 - OTAVIO ROCHA	8,640		B	02/06/00
122	0070	709	ENTR. RS/446(P/SÃO VENDELINO) - ENTR. BR 453(A) (P/FARROUPILHA)	15,400			27/05/00
122	0190	711	ENTR. RS/437(B)(IPE) - ENTR. BR/116(P/SAMUEL)	39,930			30/05/00
431	0020	716	SANTA BARBARA(RIO DAS ANTAS) - SÃO VALENTIM DO SUL	9,970		B	02/06/00
431	0030	717	SÃO VALENTIM DO SUL - ENTR. RS/129(DOIS LAJEADOS)	10,100		B	02/06/00
444	0020	719	BARRAÇÃO - ENTR. BR/470(A)(BENTO GONÇALVES)	6,210	R		27/05/00
444	0030	720	ENTR. BR/470(B)(P/VERANÓPOLIS) - * SUVALAN(ACESSO)	7,150		B	26/05/00
446	0020	722	SÃO VENDELINO (ACESSO) - ENTR. BR/470(CARLOS BARBOSA)	13,680		B	25/05/00
452	0010	724	ENTR. RS/122(P/BOM PRINCÍPIO) - FELIZ	5,470		B	24/05/00
452	0020	725	FELIZ - ENTR. VRS/326(P/ALTO FELIZ)	3,890		B	24/05/00
452	0030	726	ENTR. VRS/326(P/ALTO FELIZ) - ENTR. BR/116(NOVA PALMEIRA)	17,680		B	24/05/00
315	0010	730	ENTR. BR/116(SÃO MARCOS) - CRILVA	16,940	R		29/05/00
453	0150	735	ENTR. BR/470(B)(P/BENTO GONÇALVES) - ENTR. RS/444 (P/FARROUPILHA)	5,840	R		27/05/00
453	0170	737	ENTR. RS/448(P/VILA SÃO MARCOS) - CARAVAGGIO (ACESSO)	5,480	R		27/05/00
453	0290	740	EBERLE - ENTR. RS/476(LAJEADO GRANDE)	51,550		B	29/05/00
470	0475	752	SÃO PEDRO DA SERRA - SALVADOR DO SUL	1,460	R		25/05/00
470	0480	753	SALVADOR DO SUL - ENTR. BR/287(A)/RS/124(A)/240(MONTENEGRO)	31,830	R		25/05/00
TOTAL				257,380			

projetos; consultas a engenheiros residentes que acompanharam as conservações dos trechos, bem como levantamentos visuais realizados através da abertura de trincheiras em pontos estrategicamente locados pelos engenheiros do Departamento de Programação Rodoviária e da Divisão de Normas e Pesquisas do DAER-RS.

3.2. Estruturas dos Pavimentos

A pesquisa mostrou que dentro de um mesmo lote, existem trechos com diferentes estruturas. Para facilitar

o estudo, as rodovias foram, então, classificadas de acordo com os tipos de estrutura, que estão apresentados nos Quadros 4 (lote 7) e 5 (lote 2) com os respectivos trechos.

A presente pesquisa considerou o

pavimento constituído de duas, três e até quatro camadas, dependendo da estrutura encontrada.

Os tipos de estrutura são identificados com as siglas constantes do Quadro 3.

Quadro 4 - Tipos de estruturas do lote 7

REVESTIMENTO		BASE	SUBBASE	TRECHO
FLEXÍVEL	GRANULAR	GRANULAR	GRANULAR	
CBUQ		BG	BG	707;708;709;718;734;735;736; 737;739;740;746;747;749
CBUQ		BG		701;741
CBUQ		BG	MS	706;711;720;748
CBUQ		BG	RC	704;710
CBUQ		RC		729
CBUQ		RC	BD	712
CBUQ		BG	BD	714
CBUQ		MH	MH	743
CBUQ		SB		731
CBUQ	TSD	BG	RC	705;715
	TSD	BG	MS	716;717;750;751
	TSD	BG	RC	703
	TSD	BG	BG	719;752;753;729
	TSD	BG	SEB	723
	TSD	MS		730;733
	TSD	SR	SR	732
CBUQ + PMF		MH	MH	744
CBUQ	TSD	BG	BG	713;721;722;724;725;726; 742;744;745
CBUQ + PMUQ		BG		702;738
PMF		MS		727;728

Quadro 3 - Siglas

CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
PMF	Pré-Misturado a Frio
PMQ	Pré-Misturado a Quente
TSD	Tratamento Superficial Duplo
CS	Capa Selante
TSS	Tratamento Superficial Simples
BG	Brita Graduada
SC	Solo Cimento
BN	Base Negra
MS	Macadame Seco
MH	Macadame Hidráulico
BGA	Brita Graduada com Areia
RC	Rachão
BD	Basalto Decomposto
SEB	Sabro Estabilizado de Basalto

Quadro 5 - Tipos de estruturas do lote 2

REVESTIMENTO		BASE	SUBBASE	TRECHO
FLEXÍVEL	GRANULAR	GRANULAR	GRANULAR	
CBUQ		BG	BG	202; 203; 204; 212
	TSD	BG	BG	201
	TSD	BG	MS	207
	TSD+CS	BG	MS	205
CBUQ	TSD	BG	MS	206,208
CBUQ	TSD	BN+SC		209
CBUQ+PMF		BG	BG	210
CBUQ+PMF	TSS	BG		211
CBUQ+PMF	TSS	BG	MH	211
CBUQ	TSD	BG	BGA	213,214
CBUQ	TSD	BG	MH	215
CBUQ	TSD	BG	BG	216;217
CBUQ+PMQ	TSD	BG		218;219;220
PMF		BG	MS	221
PMF		MS		222

Quadro 6 – Espaçamento entre as estações de ensaio

AVALIAÇÃO FUNCIONAL EXPEDITA	ESPAÇAMENTO ENTRE AS ESTAÇÕES DE ENSAIO (M)
BOM	1000
REGULAR	500
RUIM	200

3.3 - Coleta de Dados das Deflexões dos Pavimentos

Foram estudados os dados das bacias de deformação detectados pelo equipamento de deflexão por impacto Falling Weight Deflectometer Dynatest 8000 (FWD), pertencente à empresa Dynatest (SP), que executou o trabalho para o DAER-RS.

Os levantamentos deflectométricos foram realizados com espaçamentos variáveis em função da condição de cada trecho, definidas pela avaliação funcional expedita, promovida por funcionários dos distritos do DAER. Esse procedimento foi adotado para obtenção de uma amostragem mais significativa dos trechos críticos. O espaçamento entre as estações de ensaio foi definido em conformidade com o critério mostrado no Quadro 6.

O trabalho foi realizado em conformidade com a norma DNER PRO-273/96, utilizando uma carga de 40kN, equivalente a um semi-eixo padrão rodoviário.

Os sensores do equipamento foram

posicionados à 0cm, 20cm, 30cm, 45cm, 65cm, 90cm e 120cm do ponto de aplicação da carga. Cada sensor mediu a deflexão recuperável em 1/100mm. Sendo assim, conseguimos as bacias de deformação em todos os pontos medidos.

4. METODOLOGIA DO TRABALHO

4.1 Retroanálise

É um processo que possibilita a determinação dos parâmetros de deformabilidade elástica de um pavimento, quando se tem uma correta interpretação do conjunto de informações da deformada da superfície, carregamento aplicado e estrutura do pavimento.

Os módulos de resiliência de cada camada dos pavimentos estudados foram encontrados através de retroanálise dos dados de deflexões. Foi utilizada a técnica da análise dos módulos das camadas do pavimento da AASHTO, que é baseada na suposição de que existe um único módulo para cada camada, de forma que a bacia

de deformação prevista teoricamente, seja equivalente à bacia de deformação medida.

O equipamento Falling Weight Deflectometer (FWD), ensaio não destrutivo, forneceu os dados da bacia de deformação medida em cada estação de ensaio. As espessuras das camadas dos pavimentos utilizadas como dados de entrada para a retroanálise foram fornecidas pelo DAER.

Os módulos assim obtidos, eliminam as coletas de amostras na pista que são onerosas e dispensam a realização do ensaio de laboratório. Estes módulos conduzem a resultados mais confiáveis, pois o equipamento FWD simula a passagem de um veículo e os dados de deflexões são obtidos em camadas de pavimento já executadas, ou seja, condição efetiva da camada em termos de umidade, densidade, temperatura e estado de tensões, sob um pulso de carga.

O software ELMOD 4 (DYNATEST) foi utilizado para retroanalisar os dados de deflexão e acessar o Módulo de Resiliência "in situ" de cada camada.

Neste software, as retroanálises foram realizadas através de ajustes interativos, minimizando a diferença entre as deflexões das bacias medidas e calculadas. Esta diferença foi avaliada por um critério de convergência estabelecida através de uma função erro denominada Raiz Quadrática Média (RMS).

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{dm_i - dc_i}{dm_i} \right)^2 \times 100 \right]}{n} \quad (3.1)$$

Onde:

dm_i = deflexão medida no sensor i
dc_i = deflexão calculada no sensor i;
n = número de deflexões (sensores) utilizadas na bacia analisada.
No presente estudo, o RMS foi

considerado menor do que 1.

Inicialmente, o programa foi abastecido com as estruturas dos pavimentos e também foi informado quando um trecho possuía espessuras de pavimentos variadas, pois o mesmo foi subdividido em subtrechos.

Os trechos revestidos com CBUQ foram divididos em 4 camadas: Revestimento, Base, Sub-base e Subleito. Com as espessuras de cada camada que constituía o pavimento, foram encontrados os Módulos de Resiliência para cada camada. O subleito no presente estudo foi considerado infinito.

Quando a camada de revestimento era de Tratamento Superficial, esta camada foi incorporada à base. Neste caso, foram encontrados os Módulos de Resiliência da Base, Sub-base e Subleito.

Em alguns casos, foi necessário utilizar faixas de variação de módulos com a finalidade de orientar o processo iterativo a partir do estabelecimento de uma faixa de valores aceitáveis, estabelecida com base na natureza e no comportamento dos materiais das camadas do pavimento analisado.

Para realizar a retroanálise, inicialmente foi feito o ajuste das curvas, pela aproximação do raio de curvatura, onde é utilizada somente a leitura de

deflexão de dois sensores; depois foi feita a opção do ajuste da curva que utiliza todos os sensores, ou, toda a bacia de deformação, para determinar os módulos que melhor se ajustam. Neste caso, todas as medidas de deflexão e espessura das camadas foram utilizadas.

4.1.1 Correção do Módulo do Concreto Asfáltico (Temperatura)

O módulo de resiliência do concreto asfáltico obtido de deflexões medidas na superfície de pavimentos com grande variação de temperaturas, foi corrigido para uma temperatura de 20°C, conforme recomendação do guia da AASHTO.

Rada et al (1989) mostra uma equação que corrige as temperaturas de acordo com a exigência da AASHTO e que foi utilizada no presente trabalho.

$$E_{20} = \frac{E_T}{10^{3,245 \times 10^{-4} \times (2079,446 - T_p^{1,7^m})}} \quad (3.2)$$

onde:

$E_{(20)}$ = módulo corrigido pela temperatura

$E_{(T)}$ = módulo retroanalisado da bacia de deflexão (ELMOD)

T_p = temperatura do pavimento no momento do ensaio não destrutivo.

4.2 Determinação dos Coeficientes das Camadas (A_i)

Com o Módulo de resiliência de cada camada do pavimento conhecido (retroanálise), para cada ponto ensaiado, assegurando o efeito que o tempo causa quanto à capacidade estrutural dos materiais que a constituem, determinou-se o coeficiente estrutural (a_i) empírico da AASHTO, conforme Per Ullidtz (1987).

Para Concretos asfálticos:

$$a_1 = 0,40 \times \log\left(\frac{E_1}{3000\text{MPa}}\right) + 0,44$$

$$\text{com: } 0,20 < a_1 < 0,44 \quad (3.3)$$

Para Bases granulares:

$$a_2 = 0,25 \times \log\left(\frac{E_2}{160\text{MPa}}\right) + 0,11$$

$$\text{com: } 0,06 < a_2 < 0,20 \quad (3.4)$$

Para sub-bases granulares:

$$a_3 = 0,23 \times \log\left(\frac{E_3}{160\text{MPa}}\right) + 0,15$$

$$\text{com: } 0,06 < a_3 < 0,20 \quad (3.5)$$

De acordo com Ullidtz (1987), a posição em que o material encontra-se

Quadro 7 – Trechos revestidos com CBUQ e suas respectivas Estruturas e Espessuras

TRECHO	ESTRUTURA	ESPESSURAS (CM)
202	CBUQ+BG+BG	7,0+20,0+20,0
203	CBUQ+BG+BG	7,0+20,0+20,0
204	CBUQ+BG+BG	7,0+20,0+20,0
212	CBUQ+BG+BG	5,0+17,5+10,0
217	CBUQ+BG+BG	8,0+18,5+16,0
704	CBUQ+BG+BG	9,0+13,0+13,0
725	CBUQ+BG+BG	8,0+12,5+21,5
735	CBUQ+BG+BG	8,0+15,0+15,0
737	CBUQ+BG+BG	10,0+16,0+16,0
740	CBUQ+BG+BG	5,0+15,0+15,0
701	CBUQ+BG	6,0+20,0
216	CBUQ+TSD+BG+BG	10,0+2,5+20,0+20,0
206	CBUQ+BG+MS	7,5+17,0+16,0
213	CBUQ+BG+MS	9,0+17,5+35,5
720	CBUQ+BG+MS	5,0+17,0+18,0

na estrutura e o modo como distribui as tensões, influencia a relação entre os módulos elásticos e os coeficientes das camadas, mas os coeficientes das camadas não refletem apenas a habilidade que a camada tem de distribuir tensões, e, sim, são uma medida da resistência do material que a constitui.

4.3 Determinação do Número Estrutural (Sn)

Considerando a importância do método de dimensionamento da AASHTO, o presente trabalho teve como primeiro objetivo encontrar os coeficientes das camadas através dos módulos de resiliência destas camadas, em cada um dos pontos levantados defletometricamente pelo equipamento FWD e, como consequência, seu número estrutural.

Segundo a AASHTO (1993), conhecendo-se a espessura das camadas dos pavimentos e seus coeficientes de camada, conhece-se o número estrutural (SN) destes pavimentos através da fórmula descrita a seguir:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \dots a_n D_n m_n \quad (3.6)$$

Onde:

D = espessura das camadas existentes no pavimento

m_i = coeficiente de drenagem

De acordo com a AASHTO (1993), o presente trabalho considera os valores de m_i como igual a 1, onde as condições de drenagem são consideradas como

Regular, ou seja, uma semana para a remoção da água, com percentagem de tempo de exposição do pavimento a níveis de umidade próximos à saturação, variando de 5 a 25%.

Sendo assim,

$$SN_i = a_i h_i \quad (3.7)$$

Onde:

a_i = coeficiente das camadas

h_i = espessura das camadas

Realizando-se o somatório dos números estruturais de cada camada, obteve-se o número estrutural do pavimento de cada ponto ensaiado.

4.4 Raio de Curvatura (Rc)

De posse das deformações elásticas obtidas com o FWD, foi possível verificar, através do Raio de curvatura, se os pavimentos ainda possuem função estrutural adequada.

Neste estudo, para cada trecho, em cada estaca, foram calculados os Raios de Curvatura das bacias de deformação determinadas através dos dados obtidos com o FWD.

O Raio de curvatura foi calculado através da parábola de segundo grau adotada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

No caso, a linha elástica criada pelas deflexões passa a ser uma parábola de 2º grau até uma distância de 25cm do ponto de aplicação da carga.

O equipamento não destrutivo FWD mediu as deflexões recuperáveis em 1/100mm com os sensores posicionados à 0cm, 20cm, 30cm, 45cm, 65cm, 90cm

e 120cm do ponto de aplicação da carga. Como a equação adotada utiliza a linha elástica criada pelas deflexões até uma distância de 25cm do ponto de aplicação da carga, utilizou-se a média das deflexões medidas no ponto 20cm e no ponto 30cm, obtendo-se, assim, a deflexão no ponto 25cm.

5. CORRELAÇÕES

Através de retroanálise e utilizando-se os valores encontrados para o raio de curvatura nas bacias de deformação, verificou-se que poderia existir uma relação entre os valores do número estrutural (SN) e os valores dos raios de curvatura (R_c) das camadas dos pavimentos, permitindo, então, a busca de correlações entre os mesmos.

As correlações entre raio de curvatura e número estrutural apresentadas neste trabalho, facilitam a obtenção do número estrutural, sem utilizar retroanálises.

5.1 Correlações R_c X SN

Metodologia da análise estatística

A partir dos dados obtidos de Raio de Curvatura e de Número Estrutural, procedeu-se a um tratamento estatístico, procurando encontrar as relações existentes entre eles.

Segundo Martins e Donaire (1991), correlação é a busca de uma relação funcional entre as variáveis observadas que descrevem o fato.

No caso, buscamos a relação funcional entre o Número Estrutural e o Raio de Curvatura.

Foi utilizado o programa INFER em

Quadro 8 – Trechos revestidos com TSD e suas respectivas estruturas e espessuras.

TRECHO	ESTRUTURA	ESPESSURAS (CM)
201	TSD+BG+BG	2,5+14,5+14,5
719	TSD+BG+BG	2,5+18,0+18,0
753	TSD+BG+BG	2,5+20,0+22,0
218	TSD+BG	2,5+20,0
207	TSD+BG+MS	2,5+17,0+16,0
717	TSD+BG+MS	2,5+15,0+15,0

Quadro 9 - Inferência estatística para pavimentos revestidos com CBUQ

TRECHO	NÚMERO ELEMENTOS	DESVIO PADRÃO	MODELO REGRESSÃO	COEFICIENTES	
				CORRELAÇÃO - R	DETERMINAÇÃO - R2
202	21	2,964	$SN = (7,4595 + 1,5855 \times 10^{-4} \times RC^2)^{1/2}$	0,85	0,7225
203	4	4,588	$SN = \ln(-2,9094 + 1,3678 \times 10^{-3} \times RC^2)$	0,9982	0,9964
204	14	0,052	$SN = \exp 1 / (0,6273 + 981925 / RC^3)$	0,9512	0,9047
212	30	0,129	$SN = 1 / \{0,12587 + 9,2298 \times 10^{24} \times \exp(-RC)\}^{1/3}$	0,9192	0,8449
217	9	7,872	$SN = \ln(-48,569 + 0,6145 \times RC)$	0,9732	0,947
704	9	0,02154	$SN = 1 / \{0,15562 - 7,1802 \times 10^{-9} \times RC^3\}^{1/3}$	0,844	0,7123
725	5	2,304	$SN = (4,2982 + 1,2719 \times 10^{-6} \times RC^3)^{1/2}$	0,923	0,852
735	12	0,01359	$SN = \ln 1 / (1,5336 \times 10^{-2} + 1058,8 / RC^2)$	0,84	0,7056
737	12	0,241	$SN = \exp 1 / (0,6179 + 1891875 / RC^3)$	0,8904	0,7928
740	54	0,122	$SN = 1 / \{23,324 - 2,3209 \times 10^{-37} \times \exp(RC)\}^{1/3}$	0,9993	0,9985
701	6	0,01808	$SN = 1 / \{2,7940 - 2,7595 \times 10^{-38} \times \exp(RC)\}^{1/3}$	0,9999	0,9998
216	17	1,5857	$SN = (20,479 + 1,4955 \times 10^{-6} \times RC^3)$	0,9905	0,9812
206	19	0,02946	$SN = 1 / \{0,4528 + 1944,4 / RC^2\}^2$	0,7668	0,588
213	7	147,192	$SN = (185,87 + 2,6048 \times 10^{-6} \times RC^3)$	0,8389	0,7038
720	8	$3,136 \times 10^{-3}$	$SN = 1 / \{1,9000 \times 10^{-3} + 570,99 / RC^2\}^{1/3}$	0,909	0,8262

sua versão 3, que foi exaustivamente testado, sendo seus resultados conferidos, para que se pudesse ter segurança quanto à confiabilidade de operação dos resultados.

O módulo de estatística desse programa é o ambiente responsável pela pesquisa do modelo matemático que melhor representa a amostra a ser avaliada, através de regressão linear por mínimos quadrados e da análise da regressão.

O Número Estrutural (SN) foi considerado como variável dependente ou variável explicada, ou seja, a que se procura. O Raio de Curvatura (Rc) foi considerado a variável independente ou explicativa.

Utilizando a estatística inferencial, ou modelo científico (regressão linear), foram pesquisados modelos matemáticos de ajuste de curvas que melhor se adequassem aos dados fornecidos. Os modelos escolhidos foram aqueles que tiveram melhor coeficiente de correlação e os que tiveram maior valor para o coeficiente de determinação ajustado r^2 .

Os coeficientes de correlação R e de determinação R2 são bons indicadores da qualidade da regressão, pois

mostram a aderência e a proximidade entre a variável dependente e as variáveis independentes no modelo, variando de +1 a -1.

5.2 Estudo das Correlações

Foram criadas basicamente duas correlações. A primeira, a partir do Raio de Curvatura, com o intuito de encontrar o Número Estrutural (SN) para pavimentos constituídos de base e/ou sub-base granular e revestimento de CBUQ. A segunda, a partir do Raio de Curvatura, de forma a encontrar o Número Estrutural, para pavimentos constituídos de base e/ou sub-base granular e revestimento de TSD.

Os quadros 7 e 8 apresentam os trechos estudados para encontrar as correlações, quando os pavimentos são revestidos com CBUQ e TSD respectivamente.

Inicialmente, foram feitas as inferências estatísticas para cada um dos trechos individualmente. Os quadros 9 e 10 apresentam os resultados destes estudos.

Posteriormente, foram agrupados todos os trechos com revestimentos de CBUQ e realizadas as inferências estatísticas, encontrando uma

correlação entre SN e Rc para pavimentos com este revestimento, base e sub-base de materiais granulares (Brita ou Macadame seco).

Da mesma forma, foram agrupados todos os trechos com revestimentos de TSD e realizadas as inferências estatísticas, encontrando uma correlação entre SN e Rc para pavimentos com este revestimento, base e sub-base de materiais granulares (Brita ou Macadame seco).

Os resultados para cada uma destas correlações são apresentados nas Figuras 3 e 4..

6. CONCLUSÃO

Verificou-se que existe uma relação entre os valores de número estrutural (SN) e os raios de curvatura (Rc) dos pavimentos, o que permitiu a identificação de correlações entre os mesmos, conforme apresentado na página 33.

Pavimentos com revestimento de CBUQ e Base + Sub-base granular:

$$SN = \frac{1}{(0,03588 + \frac{51,909}{R_c})} \quad (5.1)$$

- a) Correlação de Rc x SN para pavimentos com revestimento de CBUQ.

Estatísticas Básicas

Nº de elementos da amostra: 207

Nº de variáveis independentes: 01

Nº de graus de liberdade: 205

Desvio padrão da regressão: $7,972 \times 10^{-2}$

Modelo da Regressão

$$1/SN = 0,03588 + 51,909 / RC$$

Modelo para a Variável Dependente

$$SN = 1 / (0,03588 + 51,909 / RC)$$

Correlação do Modelo

Coefficiente de correlação (R): 0,8521

Valor t calculado: 23,31

Valor t tabelado (t crítico): 1,286 (para o nível de significância de 20,0 %)

Coefficiente de determinação (R²): 0,7261

Coefficiente de determinação ajustado r²: 0,7247

Análise da Variância

Significância do modelo igual a 0%

Aceita-se a hipótese de existência da regressão.

Gráfico da Regressão (figura 2)

Calculado no ponto médio da amostra, para:

RC = 170,905

- b) Correlação de Rc x SN para pavimentos com revestimento de TSD.

Estatísticas Básicas

Nº de elementos da amostra: 160

Nº de variáveis independentes: 01

Nº de graus de liberdade: 158

Desvio padrão da regressão: $3,059 \times 10^{-2}$

Modelo da Regressão

$$1/SN3 = 0,02768 + 83401 / RC3$$

Modelo para a Variável Dependente

$$SN = 1 / (0,02768 + 83401 / RC3)^{1/3}$$

Correlação do Modelo

Coefficiente de correlação (R): 0,9253

Valor t calculado: 30,67

Valor t tabelado (t crítico): 1,287 (para o nível de significância de 20,0 %)

Coefficiente de determinação (R²): 0,8562

Coefficiente de determinação ajustado r²: 0,8553

Classificação: Correlação Fortíssima

Análise da Variância

Significância do modelo igual a $-1,1 \times 10^{-17}$ %

Aceita-se a hipótese de existência da regressão.

Gráfico da Regressão (figura 3)

Calculados no ponto médio da amostra, para:

RC = 107,494

Figura 3 – gráfico da regressão calculada para o centro médio da amostra da correlação Rc x SN para pavimentos com revestimento de CBUQ e base+sub-base granular.

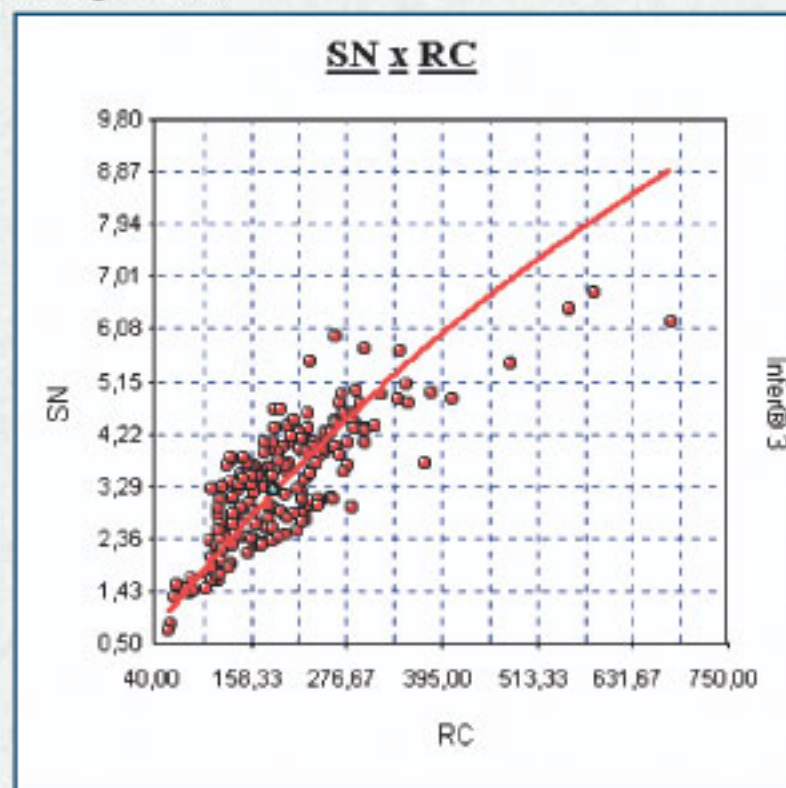
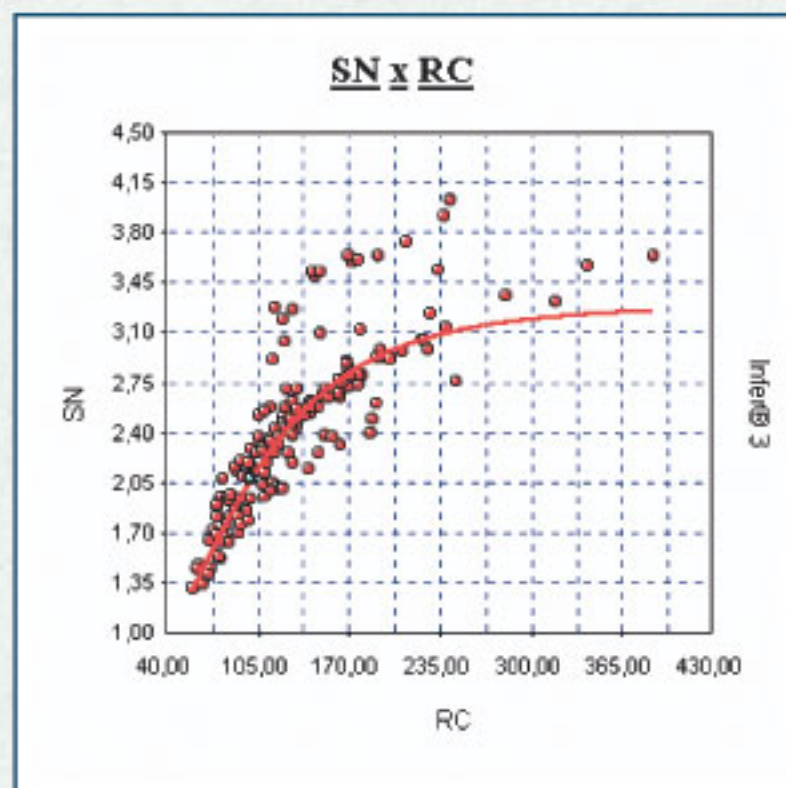


Figura 4 – gráfico da regressão calculado para o centro médio da amostra da correlação Rc x SN para pavimentos com revestimento de TSD e base+sub-base granular



Quadro 10 - Inferência estatística para pavimentos revestidos com TSD

TRECHO	NÚMERO ELEMENTOS	DESVIO PADRÃO	MODELO REGRESSÃO	COEFICIENTES	
				CORRELAÇÃO - R	DETERMINAÇÃO - R ²
201	27	0.106	$SN = 0,4868 + 1,4249 \times 10^{-2} \times R_c$	0.9263	0.8581
719	8	$6,565 \times 10^{-2}$	$SN = -3,6601 + 1,2419 \times \ln(R_c)$	0.9952	0.9905
753	58	$5,420 \times 10^{-1}$	$SN = 1 / (0,21935 + 23,927 / R_c)$	0.9962	0.9925
218	41	$3,770 \times 10^{-2}$	$SN = 1 / (0,23449 + 23,051 / R_c)$	0.8152	0.6645
207	16	0.144	$SN = 2,3463 + 6,9079 \times 10^{-3} \times R_c$	0.8962	0.8033
717	10	$9,471 \times 10^{-2}$	$SN = -2,6009 + 0,9806 \times \ln(R_c)$	0.9786	0.9577

Coefficiente de correlação (R): 0,8521
 Coeficiente de determinação (R²):
 0,7261

Pavimentos com revestimento de TSD
 e Base + Sub-base granular:

$$SN = \frac{1}{\sqrt[3]{(0,02768 + \frac{83401}{R_c^3})}} \quad (52)$$

Coefficiente de correlação (R): 0,9253
 Coeficiente de determinação (R²):
 0,8562

Estas correlações entre Raio de Curvatura e Número Estrutural facilitam o trabalho em projetos de restauração e previsão de desempenho na gerência de pavimentos.

Conforme descrito, o Raio de Curvatura é facilmente calculado através da equação matemática da parábola de 2º grau, adotado pelo DNER, quando se têm as deflexões D₀ (máxima) e D₂₅ (a 25cm da aplicação de uma carga). Estas deflexões são facilmente obtidas com precisão, por equipamentos que realizam ensaios não destrutíveis, como o FWD, pois com apenas dois geofones (transdutores de velocidade), um para medir a deflexão máxima D₀ (no ponto de aplicação da carga) e o outro posicionado exatamente à 25cm do ponto de aplicação da carga D₂₅, obtém-se o Raio de curvatura.

O Número Estrutural pode ser facilmente calculado com aproximação, através das correlações acima descritas, sem a utilização de retroanálises.

7. BIBLIOGRAFIA

- AASHTO (1993), AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials – Washington – DC/USA –chapter 2 – Design Requirements - pp. II-5 – II-67.
- ALBERNAZ, C. (1994), Retroanálise do Módulo de Resiliência de Pavimentos Flexíveis e de Subleitos Para Fins de Anteprojeto, Análise Estrutural e Gerência de Pavimentos - 28a Reunião Anual de Pavimentação – ABPV – B. Horizonte – MG – pp. 626 – 657.
- ELMOD 4, (1998), Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design – Training Course Manual - Dynatest International Consulting Inc. São Paulo – SP.
- FABRÍCIO J.M., FABRÍCIO O. F., GONÇALVES E. A. (1988), Metodologia Não Destrutiva para Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis através da Interpretação das Bacias de Deformação. 23a. Reunião Anual de Pavimentação – Florianópolis – SC – 28 pp.
- INFER 3, (1999) Estatística para Engenharia de Avaliações – Módulo de Estatística – Manual de Operação - Área Sistemas de Informática - Belo Horizonte – MG – 180 pp.
- MOREIRA, M., R.P.(1977), Um método de Avaliação de Pavimentos Flexíveis com base no Raio de Curvatura da Linha Elástica de Deflexões – 13º Reunião Anual de Pavimentação ABPV – Curitiba pp. 319-336.
- PAIVA, C.E.L., CAUSSIM, P.B. (2000), Estudo de Avaliações das Condições Estruturais de Um Pavimento a Partir de Bacias de Deformação – 32a Reunião Anual de Pavimentação – ABPV – Brasília – DF, pp. 298-307
- RADA G.R., WITCZAK M.W., & RABINOW S.D., Comparison of AASHTO Structural Evaluation Techniques Using Nondestructive Deflection Testing - Transportation Research Record 1207.
- ULLIDTZ, P. (1987), Pavement Analysys - Developments in Civil Engineering, 19 - Amsterdam: Elsevier – 318 pp.

Marlova Grazziotin Johnston é engenheira do DAER/Rio Grande do Sul

Jorge Augusto Pereira Ceratti é Prof. Dr. do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRS.