

ARTIGO

INSTRUMENTAÇÃO DA PISTA CIRCULAR EXPERIMENTAL DO IPR/DNER

Prepredígna D. E. Almeida da Silva

DNER

Programa de Engenharia Civil

COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro

Laura Maria Goretti da Motta

Programa de Engenharia Civil

COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Faz-se uma breve abordagem sobre as principais experiências brasileiras em instrumentação de pavimentos no campo. Apresenta-se ainda, a instrumentação da Pista Circular Experimental do IPR/DNER, realizada em 1998 através de convênio firmado entre o DNER e a ABCP, para estudar o recapeamento de pavimentos flexíveis com concreto - *whitetopping*. Esta instrumentação foi composta de seis extensômetros e duas células de carga embutidos nas camadas do pavimento e os registros das medições destes sensores foram comparados com valores calculados utilizando os programas computacionais: ELSYM5, DIPLOMAT, ILSL2 e KENSLABS, obtendo resultados aproximados nesta comparação, principalmente com os programas ELSYM5 e DIPLOMAT (com aderência).

ABSTRACT

This work consists of a brief summary about the main Brazilian experiences in field pavement instrumentation. It also presents the IPR/DNER Experimental Circular Track, accomplished in 1998 through agreement between DNER and ABCP, to study the overlay

of flexible pavements with concrete - whitetopping. This instrumentation was composed of six strain gages and two load cells embedded within the pavement layers. Recorded measurements of these sensors were compared to calculated values using the following computer programs: ELSYM5, DIPLOMAT, ILSL2 and KENSLABS, obtaining approximate results in this comparison, mainly with the programs ELSYM5 e DIPLOMAT (with adherence).

1. INTRODUÇÃO

A primeira vez que no Brasil um pavimento rodoviário foi instrumentado foi em 1976, visando avaliar o desempenho de misturas pozolânicas em um trecho experimental, construído pelo 16° DRF/DNER no Estado de Santa Catarina, BR 101, na localidade de Nova Brasília, Município de Imbituba. O trecho construído para estudar as misturas pozolânicas, tinha 1km de comprimento e 12 seções de teste em tangente, de 54m cada, perfazendo um total de 650m de pavimento a ser testado, e mais os acessos norte e sul.

Duas seções, com espessuras diferentes de bases de mistura pozolânica, foram instrumentadas ao longo de 6 seções transversais. De acordo com Pinto et al. (1977) foram instaladas 12 células de pressão total para medir as tensões verticais provocadas pelas cargas dos veículos, em cada camada do pavimento e subleito, 19 sensores para medir deformações relativas de cada camada e 24 termopares para medir a temperatura das camadas. Foram também instalados medidores de recalque no subleito e na sub-base de todas as seções do trecho experimental. Os sensores de deformação não funcionaram; as células de pressão funcionaram bem durante apenas 4 meses e os termopares apresentaram um bom desempenho durante todo o período de acompanhamento da pista (aproximadamente 3 anos).

Motta (1979) estudou a influência da temperatura de revestimentos betuminosos no comportamento de pavimentos flexíveis através de um painel de pavimento construído na COPPE/UFRJ e também com os dados dos termopares da pista experimental de Santa Catarina. O painel foi dividido em duas partes de 4 x 8 metros cada, sendo cada

uma com duas espessuras de revestimento diferentes. Em uma parte foram instalados os termopares e a outra parte foi destinada a medição de deflexões e provas de carga. Estes termopares tiveram bom desempenho nas medições de temperatura do painel.

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER (1993) através de convênio com a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP executaram uma pesquisa sobre concreto rolado - CR na Pista Circular Experimental do IPR/DNER. A pista foi dividida em duas seções distintas: concreto rolado como base e revestimento e concreto rolado como base e revestimento betuminoso. Cada uma dessas seções foi dividida em 4 subseções (s1, s2, s3, e s4 com revestimento de CBUQ e s5, s6, s7 e s8 com revestimento de CR) sendo instalados nas seções s3 e s7 os seguintes sensores: 12 extensômetros de resistência elétrica, 6 termopares e 4 células de pressão. As células de pressão mediram a pressão vertical na superfície do subleito, sendo 2 em cada seção (s3 e s7) do pavimento. Segundo o DNER (1993) foi feita uma análise comparativa dos dados medidos in situ e calculados usando o programa ELSYM5 e os resultados foram bastantes próximos. Os 12 extensômetros foram usados para obter as deformações horizontais na superfície do CR, sendo 6 no CR com função de base e revestimento (seção s7) e 6 no CR com função apenas de base (seção s3). As medidas de temperatura foram feitas com termopares localizados nas partes superior, média e inferior da camada de CR nas seções s3 e s7.

Gonçalves et al. (1998) apresentaram resultados preliminares de medidas de deformação vertical realizadas no subleito de seções experimentais construídas na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Serão efetuadas, numa segunda etapa desta instrumentação, medições de deformações horizontais na fibra inferior do revestimento asfáltico utilizando sensores do tipo H-gage.

Em 1998, o DNER novamente através de convênio com a ABCP instrumentou a Pista Circular Experimental do IPR/DNER para estudar o recapeamento de pavimentos flexíveis com concreto -

whitetopping. Este trabalho descreve de maneira mais detalhada esta instrumentação.

2. INSTRUMENTAÇÃO DA PISTA CIRCULAR EXPERIMENTAL DO IPR/DNER

A Pista Circular Experimental foi construída há aproximadamente 20 anos no Centro Rodoviário do DNER localizado em Parada de Lucas - km 163 da Rodovia Presidente Dutra - Rio de Janeiro. Sua concepção foi baseada na pista circular, do tipo carrossel, existente na Universidade de Washington - EUA.

A estrutura metálica do trem de prova é composta de três sub-estruturas treliçadas, com raio de 12,7m e apresentando na extremidade um conjunto de rodas duplas que recebe uma carga fixa de aproximadamente 57kN, portanto a estrutura pesa 171kN. O equipamento de comando está instalado na sala de controle, construída adjacente à pista de modo a permitir a sua visão completa. O centro do trem de prova é constituído por uma armadura hexagonal e sob esta armadura está montado o mecanismo do excêntrico que permite o deslocamento lateral do trem de prova, a cada giro deste, em amplitude regulável de 0 a 0,83m. A velocidade máxima do trem de prova é de 80km/h, com uma velocidade média de operação de 40km/h. Nesta velocidade, são aplicadas ao pavimento, pelos três conjuntos de rodas, aproximadamente 1500 carregamentos por hora. Para que se tenha uma cobertura completa da área transversal útil do pavimento, o centro de rotação da estrutura pode ser colocado excêntricamente à pista girando lentamente e retornando ao mesmo ponto a cada 760 giros do carrossel na pista.

A Pista Circular Experimental desta pesquisa, está assentada sobre um terreno natural constituído de areia cinza e a camada final de terraplenagem (CFT) é constituída de um aterro de argila amarela, com altura de 1,2m, compactado em subcamadas de 20cm de espessura. A areia cinza do terreno natural apresenta as seguintes características: não plástica, massa específica aparente seca (máxima) $\gamma_s = 1873\text{g/dm}^3$, umidade ótima de 12,3%, expansão de 0,4% e CBR de 9%. A argila amarela, solo residual de gnaiss, proveniente de um

corte localizado no km 111 da BR 040/RJ, lado direito, apresenta os seguintes resultados de ensaios: LL = 51,9%, IP = 28,8%, $\gamma_s = 1610 \text{ g/dm}^3$, $h_{\text{ót.}} = 22,0\%$ (EN), CBR = 8% e expansão de 0,45%. A base é composta por brita graduada, proveniente da pedreira Vigné, com as seguintes características: $\gamma_s = 2056 \text{ g/dm}^3$, $h_{\text{ót.}} = 7,6\%$ (EM), CBR = 118%. O CBUQ usado no revestimento foi proveniente da usina EBTE, apresentando granulometria na faixa "C" e percentagem de asfalto de 6% (CAP40).

A pesquisa sobre *whitetopping* foi planejada para ser executada em duas etapas. A primeira etapa constituiu da aplicação do simulador de tráfego para degradação do pavimento flexível composto de 20cm de base e 5cm de CBUQ. O número total de giros desta etapa foi 20.543 que corresponde aproximadamente a um número de repetições de eixo padrão de 82kN, utilizando o fator de carga do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (Souza, 1979), de $3,6 \times 10^5$, que provocou deformações permanentes da ordem de 15mm em alguns pontos e deflexão característica medida com a viga Benkelman de 84×10^{-2} mm. Visualmente a superfície do revestimento não apresentava defeitos graves tais como trincas de fadiga, panelas ou exsudações. Foi decidido interromper a solicitação portanto só pelo afundamento de 15mm medido em algumas seções transversais.

Na segunda etapa executou-se um reforço tipo *whitetopping* de 15cm de espessura, sendo a pista dividida em duas partes: uma parte com concreto com fibra e a outra com concreto sem fibra. Nesta fase aplicou-se aproximadamente 130.000 giros do simulador de tráfego. Observou-se o comportamento do pavimento (com *whitetopping*) sob a passagem do trem de prova através da instrumentação da pista com duas células de carga e seis extensômetros.

2.1. Instrumentação da pista - extensômetros e células de carga

Os extensômetros de resistência (120 Ω) e sensibilidade de 7×10^{-6} m/m, fabricados pela KYOWA, foram instalados de forma a medir as deformações atuantes a cerca de 2cm acima da camada de CBUQ ficando imersos no concreto, mas o mais próximo possível da fibra inferior (contato entre CCP e CBUQ) e no centro da faixa de

rolamento do carrossel. Os extensômetros SG-1, SG-2 e SG-3 foram instalados em forma de roseta, para posterior determinação da direção e do valor das tensões principais naquele ponto. Os demais sensores (SG-4, SG-5 e SG-6) foram instalados na direção longitudinal à pista.

Os cabos de ligação dos extensômetros aos instrumentos de medição foram protegidos por eletrodutos metálicos, com a finalidade de proteger as ligações elétricas da umidade do solo e minimizar as interferências eletro-magnéticas. A extremidade dos eletrodutos foi vedada com silicone para evitar que a umidade do solo sobre as ligações elétricas viesse a causar problemas de ruído no sinal. Os seis extensômetros embutidos na camada de WT resistiram satisfatoriamente aos esforços na fase de construção e as solicitações devido ao carregamento externo e fatores ambientais, entretanto o período de registro das medições foi de aproximadamente três meses, período considerado muito curto para permitir concluir sobre a vida útil destes sensores uma vez que foram submetidos a um número relativamente reduzido de repetições.

Foram instaladas duas células de carga, fabricadas pela empresa KRATOS e com sensibilidade de 0,0001MPa de forma a medir os esforços exercidos pela placa de concreto sobre a superfície da camada de CBUQ e no centro da faixa de rolamento do carrossel. As células foram dimensionadas para suportar carga até 50kN, sendo seus cabos de ligação protegidos por eletrodutos metálicos para minimizar interferências eletro-magnéticas causadas pelo sistema de acionamento das treliças.

Os sinais provenientes dos sensores foram amplificados e filtrados em um condicionador de sinais com seis canais, da marca KYOWA, sendo registrados através de sistema de aquisição de dados gerenciado por computador. O conversor analógico/digital com oito canais da marca National e o software NIDAQ, específicos para digitalização e aquisição de sinais analógicos foram utilizados. Durante a realização das medições os resultados podiam ser monitorados através de gráficos disponíveis nas telas de um computador Pentium, 200Mhz.

Foram realizadas 12 campanhas de medições no período de 3 meses que permitiram observar que as medidas de deformação específica mencionadas não variavam com o número de aplicações do trem de prova.

2.2. Resultados obtidos de deformação específica

Foram realizadas medições com as rodas das treliças variando de posição em relação à posição de instalação dos sensores (SG-1, SG-2 e SG-3). O esquema da Figura 1 mostra as posições das rodas dentro da faixa de cobertura da pista (rii-roda na posição interna-interna; ric-roda na posição interna-central; rie-roda na posição interna-externa à faixa de rolamento da pista; rc-roda no centro da faixa de rolamento; rei-roda na posição externa-interna; rec-roda na posição externa-central; ree-roda na posição externa-externa à faixa de rolamento).

Observa-se que a posição das rodas das treliças em relação à posição de instalação dos sensores exerce influência nos valores de deformação específica medidos, assim: comprova-se que as deformações aumentam à medida que as rodas se aproximam dos sensores atingindo valor máximo quando estão sobre os sensores e as deformações são maiores no SG-1 (longitudinal) seguido pelo SG-2 (45°) e pelo SG-3 (transversal) respectivamente.

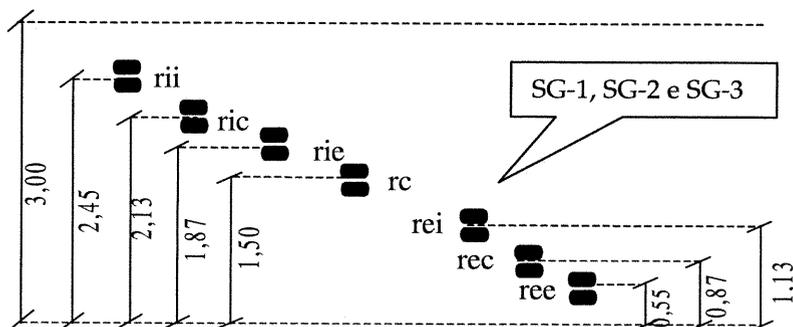


Figura 1: Esquema da posição das rodas das treliças (em centímetros) em relação à posição dos sensores

2.3. Cálculo das deformações e tensões principais

Com três extensômetros instalados em forma de roseta: SG-1 - fixado com $\theta_{SG1} = 0^\circ$, SG2 - $\theta_{SG2} = 45^\circ$ e SG-3 - $\theta_{SG3} = 90^\circ$, pode-se determinar o estado de tensão e deformação.

Neste caso:

$$\begin{cases} \epsilon_{SG1} = \epsilon_x & (1) \\ \epsilon_{SG2} = \frac{1}{2}(\epsilon_x + \epsilon_y + \gamma_{xy}) & (2) \\ \epsilon_{SG3} = \epsilon_y & (3) \\ \text{onde } \gamma_{xy} = 2\epsilon_{xy} \end{cases}$$

Maiores explicações para o desenvolvimento das equações da mecânica dos materiais podem ser obtidas em Dally *et al.* (1978).

As deformações ϵ_{SG1} , ϵ_{SG2} e ϵ_{SG3} foram medidas para a condição em que as rodas das treliças estavam sobre os sensores a uma velocidade de 40km/h. Como os extensômetros foram colocados a 13cm da superfície da camada de CCP, considerou-se o diagrama de tensões em relação à profundidade triangular e por proporção calculou-se os valores de deformação na face inferior do WT que são:

$$\epsilon_x = \epsilon_{SG1} = -37,75 \times 10^{-6} \text{ m/m} \quad (4)$$

$$\epsilon_{SG2} = -28,94 \times 10^{-6} \text{ m/m} \therefore \gamma_{xy} = 37,75 \times 10^{-6} + 18,10 \times 10^{-6} - 2 \times 28,94 \times 10^{-6} = -2,03 \times 10^{-6} \text{ m/m} \quad (5)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_{SG3} = -18,10 \times 10^{-6} \text{ m/m} \quad (6)$$

As deformações principais são:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2}(\epsilon_x + \epsilon_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} = -18,04 \times 10^{-6} \frac{m}{m} \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2}(\epsilon_x + \epsilon_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} = -37,80 \times 10^{-6} \frac{m}{m} \quad (8)$$

O ângulo entre o eixo principal e o eixo x é dado por:

$$\text{tg } 2\phi = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} = 0,103 \therefore \phi = 2,95^\circ \quad (9)$$

Utilizando-se o módulo de elasticidade obtido através de correlação com a resistência média à compressão aos 28 dias (ABNT, 1978) - $E = 33700\text{MPa}$ e o coeficiente de Poisson - $\nu = 0,20$ (ABNT, 1978), tem-se as seguintes tensões principais para o estado plano de tensão:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \times (\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) = -0,90\text{MPa} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} \times (\nu\epsilon_1 + \epsilon_2) = -1,45\text{MPa} \quad (11)$$

A tensão σ_x é aproximadamente igual a σ_2 e σ_y é aproximadamente igual a σ_1 .

2.4. Análise das deformações específicas

As medições de deformação efetuadas em um período de 8 segundos, tempo superior ao necessário para que o carrossel complete, a 40km/h, uma volta na pista, permitiram determinar os valores das deformações de pico em todos os extensômetros. Os valores típicos para cada um dos extensômetros monitorados no momento da passagem das rodas - interno à pista estão na Tabela 1.

Tabela 1: Deformações específicas máximas, para velocidade de 40km/h e 5km/h, das rodas na posição interna da faixa de cobertura de 1,05m.

| Extensômetro | Concreto | Direção | Deformação específica ($\times 10^{-6}$ m/m) | |
|--------------|------------|--------------|--|-------|
| | | | 40km/h | 5km/h |
| SG-1 | sem fibras | Longitudinal | 33 a 35 | 45 |
| SG-2 | sem fibras | 45° | 22 a 24 | 37 |
| SG-3 | sem fibras | Transversal | 21 a 25 | 25 |
| SG-4 | sem fibras | Longitudinal | 30 a 35 | - |
| SG-5 | com fibras | Longitudinal | 17 a 21 | 35 |
| SG-6 | com fibras | Longitudinal | 21 a 24 | 40 |

Com os valores de deformação específica apresentados na Tabela 1 e utilizando-se os valores de módulos de elasticidade obtidos através de correlações com a resistência média à compressão aos 28 dias, isto é: concreto sem fibra $E \approx 33700\text{MPa}$ e concreto com fibra $E \approx$

37100MPa, pode-se calcular as tensões de tração indicadas na Tabela 2.

As resistências à tração do projeto de dosagem dos concretos utilizados nesta pesquisa são de 4,5MPa para o concreto sem fibra (SG-1, 2, 3 e 4) e 5,0MPa para o concreto com fibra (SG-5 e 6). Pode-se concluir portanto que os valores de tensões gerados pelo carregamento, apresentados na Tabela 2, são bastante inferiores aos valores de resistência do concreto sem fibra (4,5MPa) e do com fibra (5,0MPa) o que indica que a placa de WT não vai romper. Vale destacar, entretanto, que os extensômetros foram instalados apenas no centro das placas o que impediu a verificação das tensões críticas nas bordas transversais e longitudinais e nos cantos das placas.

Tabela 2: Valores de tensão de tração

| Extensômetro | Concreto | Direção | Deformação específica ($\times 10^{-6}m/m$) | E (MPa) | Tensão de tração na face inferior do WT (MPa) |
|--------------|------------|--------------|---|---------|---|
| SG-1 | Sem fibras | Longitudinal | 33 a 35 | 33700 | 1,29 a 1,36 |
| SG-2 | Sem fibras | 45° | 22 a 24 | 33700 | 0,85 a 0,93 |
| SG-3 | Sem fibras | Transversal | 21 a 25 | 33700 | 0,82 a 0,97 |
| SG-4 | Sem fibras | Longitudinal | 30 a 35 | 33700 | 1,17 a 1,36 |
| SG-5 | Com fibras | Longitudinal | 17 a 21 | 37100 | 0,73 a 0,90 |
| SG-6 | Com fibras | Longitudinal | 21 a 24 | 37100 | 0,90 a 1,03 |

2.5. Resultados obtidos de medição de pressão

Variaram-se as posições das rodas dentro da faixa de cobertura da pista, de acordo com o esquema da Figura 1, para observar a influência da posição das rodas das treliças, a velocidade de 30km/h, nos valores de tensão vertical nas células 1 e 2. Os registros gráficos obtidos durante estas medições permitiram as seguintes conclusões:

- As tensões verticais na célula 1 aumentam à medida que as rodas se aproximam desta célula, atingindo valores de tensões máximos quando estão sobre elas. Acredita-se que a célula 2 sofreu um deslocamento devido a recalques do sub-leito pelo fato dos valores das tensões verticais em pontos simétricos serem tão discrepantes.

- A célula 1 sofre compressão na passagem das rodas sobre ela, e uma pequena tração de $(-0,0010\text{MPa})$ imediatamente antes e após a passagem das rodas.

- A 30km/h a tensão vertical máxima é de aproximadamente 0,014MPa.

Os registros de valores máximos de tensão vertical sobre a camada de CBUQ para a velocidade de 4km/h e rodas posicionadas sobre as células de carga foram:

- Trecho de concreto com fibra $\rightarrow 0,039\text{MPa}$

- Trecho de concreto sem fibra $\rightarrow 0,041\text{MPa}$

Maiores detalhes da instrumentação podem ser vistos no Manual de *Whitetopping* (DNER, 1999) e Silva (1999).

3. ANÁLISE NUMÉRICA DA PISTA CIRCULAR EXPERIMENTAL DO IPR/DNER

Com o objetivo de avaliar e comparar as medidas de deformação e tensão realizadas na Pista Circular Experimental, com resultados calculados teoricamente foram utilizados os seguintes programas computacionais neste trabalho: FEPAVE2 (Silva, 1995), ELSYM5 (FHWA, 1978), DIPLOMAT (Khazanovich e Ioannides, 1995), ILSL2 (Ioannides, 1984) e KENSLABS (Huang, 1993).

A Figura 2, apresenta o perfil da Pista Circular Experimental do IPR/DNER com os dados de entrada necessários para executar o programa FEPAVE2 que permite considerar a não linearidade das camadas dos materiais, pois os módulos de elasticidade dos materiais utilizados neste experimento são dependentes das tensões e

variam dentro da camada de ponto para ponto.

As áreas e os pesos das duas rodas de cada treliça da pista foram medidos. As áreas foram medidas através da impressão dos pneus em cartolina para os pneus calibrados com 0,74MPa (105psi). Com exceção do módulo da areia cinza que foi adotado de acordo com pesquisas anteriores realizadas na Pista Circular, os demais módulos foram obtidos através de ensaios feitos no laboratório de geotecnia da COPPE/UFRJ.

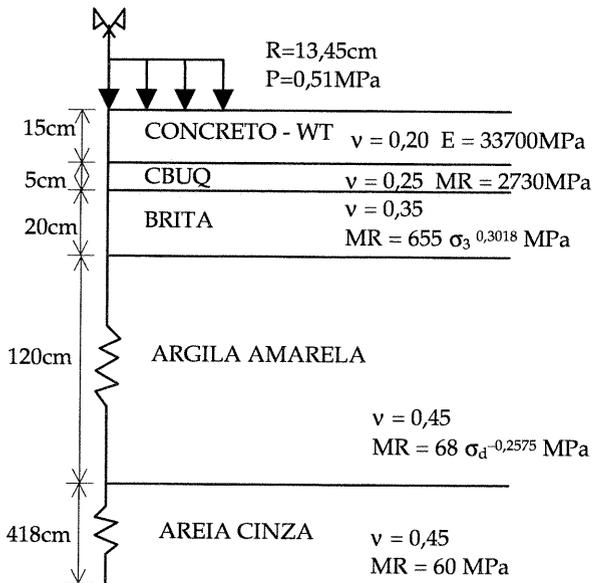


Figura 2: Perfil da Pista Circular Experimental com os dados de entrada para o programa FEPAVE2

Os resultados do FEPAVE2 possibilitaram analisar o comportamento dos módulos resilientes radial e verticalmente. Os valores dos módulos dos elementos, da malha de elementos finitos do programa, localizados no meio da camada de brita graduada e sob o carregamento, variam de 106,3 a 87,5MPa e no meio da camada de argila amarela variam de 200 a 181,3MPa independente da posição em relação à carga aplicada.

Com os valores dos módulos resilientes médios das camadas de brita e argila amarela, executou-se os programas ELSYM5 e DIPLOMAT que são elástico lineares e admitem a utilização de múltiplas cargas. Os valores dos módulos resilientes foram obtidos dos elementos localizados no meio da camada de brita e da camada de argila amarela e os valores são respectivamente 90,3MPa e 192,8 MPa. A Figura 3, apresenta os dados de entrada necessários para executar os programas ELSYM5 e DIPLOMAT. A convenção de sinais utilizada pelos programas ELSYM5 e DIPLOMAT é: compressão negativa e tração positiva. O programa DIPLOMAT foi executado com e sem consideração de aderência nas interfaces das camadas.

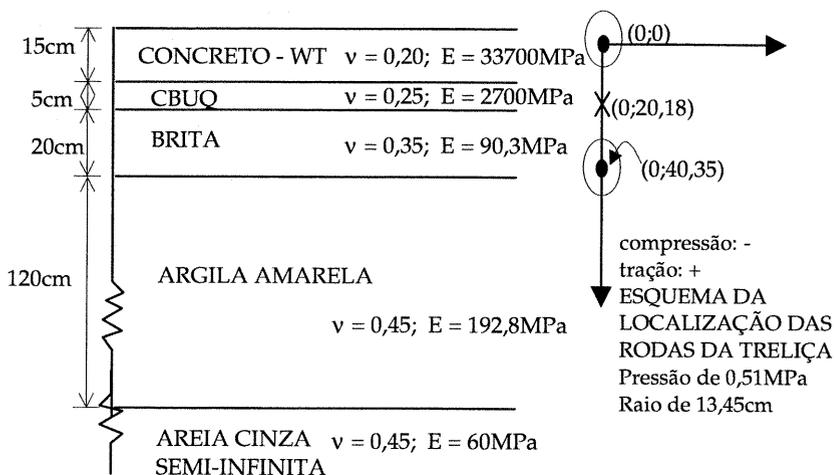


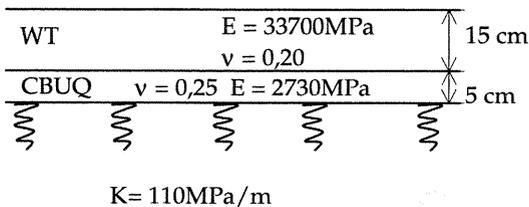
Figura 3: Dados de entrada para o programa ELSYM5 e DIPLOMAT

A Tabela 3, mostra os resultados de comparação entre o programa ELSYM5 e DIPLOMAT - considerando camadas isotrópicas com aderência nas interfaces. Os valores encontrados de tensões e deslocamentos, para pontos situados sob uma roda, foram bastante próximos nos dois programas.

Tabela 3: Comparação entre os programas ELSYM5 e DIPLOMAT

| Prof. (Z) (cm) | Tensão σ_{xx} Sob uma roda (MPa) ELSYM5 | Tensão σ_{xx} sob uma roda (MPa) DIPLOMAT | Tensão Vertical sob uma roda (MPa) ELSYM5 | Tensão Vertical sob uma roda (MPa) DIPLOMAT | U_z (sob uma roda) (cm) ELSYM5 | U_z (sob uma roda) (cm) DIPLOMAT |
|-------------------|--|--|--|--|---|---|
| 0 | -1,939E+00 | -1,930E+00 | -5,034E-01 | -5,050E-01 | 2,94E-02 | 2,970E-02 |
| 2,5 | -1,275E+00 | -1,270E+00 | -4,805E-01 | -4,820E-01 | 2,995E-02 | 2,970E-02 |
| 15 | 1,661E+00 | 1,640E+00 | -4,639E-02 | -5,620E-02 | 2,983E-02 | 2,960E-02 |
| 17,5 | 1,673E-01 | 1,660E-01 | -3,388E-02 | -3,370E-02 | 2,973E-02 | 2,950E-02 |
| 30 | -6,762E-03 | -6,910E-03 | -2,491E-02 | -2,500E-02 | 2,725E-02 | 2,700E-02 |
| 50 | -4,968E-03 | -5,290E-03 | -1,937E-02 | -1,950E-02 | 2,446E-02 | 2,420E-02 |
| 70 | -1,830E-03 | -2,100E-03 | -1,484E-02 | -1,500E-02 | 2,303E-02 | 2,280E-02 |
| 90 | 2,370E-04 | 5,550E-05 | -1,120E-02 | -1,130E-02 | 2,180E-02 | 2,160E-02 |
| 110 | 1,905E-03 | 1,830E-03 | -8,420E-03 | -8,450E-03 | 2,067E-02 | 2,050E-02 |
| 130 | 3,586E-03 | 3,630E-03 | -6,275E-03 | -6,250E-03 | 1,966E-02 | 1,950E-02 |
| 150 | 5,632E-03 | 5,810E-03 | -4,811E-03 | -4,730E-03 | 1,868E-02 | 1,850E-02 |

Realizou-se uma análise estrutural da Pista Circular Experimental utilizando os programas ILSL2 e KENSLABS. A estrutura do pavimento foi modelada considerando a placa de WT e a camada de CBUQ assentes sobre uma fundação do tipo líquido denso, como mostra a Figura 4. O módulo de reação do suporte das camadas de WT e CBUQ foi obtido através de ensaio de placa realizado na Pista Circular Experimental e o valor utilizado como dado de entrada nos programas foi 110MPa/m.

**Figura 4:** Modelagem estrutural da Pista Circular Experimental para o programa ILSL2 e KENSLABS

O carregamento considerado foi um semi-eixo simples de rodas duplas, cuja carga total foi 57,5kN. As dimensões do semi-eixo estão na Figura 5.

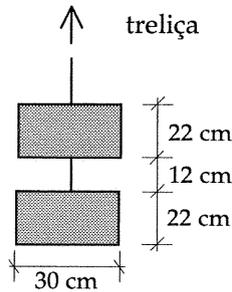


Figura 5: Configurações do semi-eixo utilizado como carregamento

A condição de interface entre a camada de WT e a de CBUQ foi considerada aderida e não aderida. As dimensões da placa são 3,60m de comprimento por 3m de largura. Segundo Huang (1993), devido ao sistema de transferência de carga nas juntas transversais ser por intertravamento dos agregados, pode-se usar a constante da mola nas juntas de 690MPa. As tensões e deslocamentos foram calculados para posição de carregamento no interior da placa. Destaca-se que tanto na execução do ILSL2 quanto do KENSLABS, considerou-se contato pleno do CBUQ, com a fundação. Esta consideração é válida quando não existe empenamento das placas devido à temperatura e quando não existem descontinuidades iniciais entre as placas e a fundação.

3.1. Comparação dos resultados da instrumentação e da análise numérica da Pista Circular Experimental do IPR/DNER

Com os valores obtidos da instrumentação nos três extensômetros (SG-1, SG-2 e SG-3), localizados no fundo da camada de WT e considerando que a velocidade das treliças durante a aquisição destes dados era de 40 km/h, tem-se de acordo com a Seção 2.3:

$$\varepsilon_1 = -18,04 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

$$\varepsilon_2 = -37,80 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

$$\sigma_1 = -0,90 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = -1,45 \text{ MPa}$$

A Tabela 4, apresenta um resumo comparativo dos valores obtidos pela instrumentação e pelos diversos programas para carregamento

no interior da placa. As tensões e deformações foram calculadas para o ponto localizado no meio das duas rodas e a uma profundidade de 15cm do topo da camada de CCP. A convenção de sinal adotada na Tabela 4 é: tração negativa e compressão positiva.

Tabela 4: Resultados da instrumentação e das análises numéricas

| Instrumentação | ELSYM5 | DIPLOMAT | | ILSL2 | | KENSLABS | | |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | Sem Aderência | Com Aderência | Sem Aderência | Com Aderência | Sem Aderência | Com Aderência | |
| ϵ_x (m/m) | -37,8 × 10 ⁻⁶ | -42,2 × 10 ⁻⁶ | -53,8 × 10 ⁻⁶ | -42,4 × 10 ⁻⁶ | -55,5 × 10 ⁻⁶ | -48,0 × 10 ⁻⁶ | -49,5 × 10 ⁻⁶ | -43,2 × 10 ⁻⁶ |
| ϵ_y (m/m) | -18,1 × 10 ⁻⁶ | -19,9 × 10 ⁻⁶ | -27,3 × 10 ⁻⁶ | -20,8 × 10 ⁻⁶ | -38,8 × 10 ⁻⁶ | -37,8 × 10 ⁻⁶ | -35,9 × 10 ⁻⁶ | -31,8 × 10 ⁻⁶ |
| σ_x (MPa) | -1,45 | -1,61 | -2,07 | -1,63 | -2,22 | -1,92 | -1,99 | -1,74 |
| σ_y (MPa) | -0,90 | -0,99 | -1,33 | -1,02 | -1,75 | -1,52 | -1,61 | -1,42 |
| σ_z (MPa) | 0,041 | 0,033 | 0,028 | 0,034 | - | - | - | - |

Os valores obtidos pelos programas ILSL2 e KENSLABS para a condição de interface (WT × CBUQ) com aderência foram mais próximos aos medidos que os valores para a condição sem aderência, mesmo assim os valores calculados de ϵ_y e σ_y pelo programa ILSL2 foram quase o dobro dos medidos. Com relação aos valores de ϵ_x , ϵ_y , σ_x e σ_y , calculados pelos programas ELSYM5 e DIPLOMAT (com aderência), foram bastante próximos dos valores registrados pela instrumentação. Em termos de σ_z os valores calculados foram menores que os medidos.

4. CONCLUSÕES

Da instrumentação da Pista Circular Experimental do IPR/DNER para a pesquisa de *whitetopping*, destacam-se os seguintes pontos:

- Os seis extensômetros embutidos na camada de WT resistiram satisfatoriamente aos esforços na fase de construção e às solicitações devidas ao carregamento externo e fatores ambientais, entretanto o período de registro das medições foi de aproximadamente três meses, período considerado muito curto para permitir concluir sobre a vida útil destes sensores uma vez que foram submetidos a um número relativamente reduzido de

repetições;

- Com os valores de deformação registrados pelos extensômetros foi possível calcular as tensões de tração na face inferior do WT. Pode-se então observar que os valores de tensão gerados pelo carregamento foram bastante inferiores aos valores de resistência do projeto de dosagem dos concretos (com e sem fibra) utilizados nesta pesquisa o que indica que não vai romper. Vale destacar, entretanto, que os extensômetros foram instalados apenas no centro das placas o que impediu a verificação das tensões críticas nas bordas transversais e longitudinais e nos cantos das placas;
- As maiores deformações ocorreram quando as rodas das treliças estavam no centro da faixa de cobertura, isto é, sobre os sensores (posição da roda central) e a baixa velocidade (4km/h). O extensômetro SG-1 (longitudinal) apresentou valores de deformação maiores que os SG-2 (45°) e SG-3 (transversal);
- Observou-se que o número de aplicações do trem de prova não influenciou os valores de deformações;
- No que diz respeito às simulações numéricas do comportamento estrutural do pavimento da Pista Circular Experimental do IPR/DNER através do uso de programas computacionais: FEPAVE2, ELSYM5, DIPLOMAT, ILSL2 e KENSLABS, obteve-se, de maneira geral, resultados de tensões e deformações satisfatórios quando comparados com os resultados adquiridos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1978) *Projeto e execução de obras de concreto armado* - NBR6118. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- DNER (1999) *Manual de Whitetopping*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1993) *Manual de Pavimentos de Concreto Rolado* - vol. 3. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Dally, W. e W.F. Riley (1978) *Experimental stress analysis*. Ed. International Student Edition, Rio de Janeiro.
- FHWA (1978) *Manual do usuário do ELSYM5*. Federal Highway Administration n.: FHWA-TS-87-206.
- Gonçalves, F.P.; J. Silveira; W.P. Nuñez e J.A. Ceratti (1998) Avaliação de medidas de deformação vertical no subleito de

- uma estrutura flexível. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, Brasília, v. 1, p. 609-614.
- Huang, H.Y. (1993) *Pavement analysis and design*. Ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Ioannides, A.M. (1984) *Analysis of slabs-on-grade for a variety of loading and support conditions*. Tese de Doutorado da Universidade de Illinois - Urbana - Champaign.
- Khazanovich, L. e A.M. Ioannides (1995) Diplomat: Analysis program for bituminous and concrete pavements. *Transportation Research Record* n.1482, p. 52-66.
- Motta, L.M.G. (1979) *O estudo da temperatura em revestimentos betuminosos*. Tese de M.Sc. da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Pinto, S.; J. Nardi e A. Marcon (1977) Misturas do tipo areia cal cinzas volantes - Pista Experimental de Santa Catarina. *Anais da 13ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv*, Curitiba.
- Silva, P. (1999) *Instrumentação de Pavimentos - O caso da Pista Experimental Circular do IPR/DNER na pesquisa de whitetopping*. Seminário de qualificação acadêmica para candidatura ao doutorado da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Silva, P. (1995) *Contribuição ao aperfeiçoamento do emprego programa FEPAVE2 em estudos e projetos de pavimentos flexíveis*. Tese de M.Sc. da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Souza, M.L. (1979) *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Publicação n.667, IPR/DNER.

Endereço dos autores:

Prepredígna D. E. Almeida da Silva
Laura Maria Goretti da Motta
UFRJ/COPPE - CP 68506 Rio de Janeiro - RJ
E-mail: pre@geotec.coppe.ufrj.br
laura@geotec.coppe.ufrj.br