

ANÁLISE DE BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS PARA O CONTROLE DE CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Jorge Barbosa Soares⁽¹⁾
Laura Maria Goretta da Motta⁽²⁾
Roberto Firmeza Soares⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Ceará – UFC

⁽²⁾ Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

RESUMO

Apresenta-se um estudo das linhas de influência ou bacias deflectométricas do pátio de estacionamento das aeronaves de grande porte da Base Aérea de Fortaleza. A viga Benkelman foi usada para controle de execução na camada de base e na determinação das bacias deflectométricas no binder em toda a extensão do pátio. As medidas foram realizadas no sentido longitudinal da pavimentação e compactação bem como no sentido transversal, de modo a verificar o efeito da direção nos valores das deflexões. Os módulos de resiliência dos materiais de pavimentação foram determinados através de ensaios de carga repetida.

ABSTRACT

It is presented a study on the influence lines or deflection basins at an aircraft parking lot in the Airbase from Fortaleza. The Benkelman beam was used for construction control in the base layer and for determining the deflection basins in the binder throughout the parking lot. The deflection measurements were taken in the paving and compaction longitudinal direction as well as in the transverse direction, in such a way to investigate the effect of the direction in the deflection values. The resilient moduli of the pavement materials were determined in dynamic laboratory tests.

1. INTRODUÇÃO

Medidas deflectométricas têm sido utilizadas há vários anos para avaliação da condição estrutural de pavimentos. Na medição das bacias deflectométricas pode-se usar para o carregamento do pavimento (Albernaz, 1997): ensaios de placa (carregamento estático); viga Benkelman convencional ou com leitura contínua e automatizada – deflectógrafo Lacroix (carregamento quase-estático); Dynaflect ou Road Rate (carregamento vibratório); e FWD (carregamento pela queda livre de um peso). Este último vem sendo usado com frequência mais recentemente, principalmente nas regiões sul e sudeste do país (Suzuki et al., 1991; Preussler et al., 1991). Não existe uma correlação única entre as deflexões medidas por estes diferentes equipamentos. Embora os equipamentos mais modernos tenham maior precisão e rapidez, considera-se que a viga Benkelman, pela sua simplicidade, baixo custo e larga divulgação no país ainda possa e deva ser usada, especialmente na versão automatizada (Medina et al., 1994).

Trabalhos pioneiros no Brasil com a viga Benkelman incluem Aratangy (1962), Aratangy e Andreatini (1969), Carneiro (1965), Oliveira e Fabrício (1968) e Andreatini (1967, 1970), entre outros. O uso da viga Benkelman como meio de controlar a construção de pavimentos é relativamente mais recente (Porto, 1978; Motta et al., 1995; Koeler et al., 1997; Ramos et al., 2000). Porto (1978), no conhecimento dos autores, o pioneiro a divulgar resultados de controle de construção com a viga no Brasil, relata a experiência de uso na construção da Rodovia dos Bandeirantes, obra de grande vulto, concluindo pelo sucesso do emprego das deflexões na liberação de camadas bem como na correção de eventuais defeitos. Ramos et al. (2000) relatam que a Prefeitura do Rio de Janeiro vem utilizando o controle construtivo com a viga desde 1985, embora reconhecendo que durante algum tempo houve resistência do meio técnico para aceitar este procedimento, que passou a ser exigência formal em todas as obras a

partir de 1995 para a base e o revestimento (Resolução nº 640 da Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura do Rio de Janeiro de 16/12/1995).

No presente estudo, apresenta-se uma análise de bacias deflectométricas realizadas durante a construção de um pátio de estacionamento de aeronaves da Base Aérea de Fortaleza (B-707 com peso bruto total de 333.600 lb = 151,3 tf como aeronave crítica). As medidas foram realizadas de acordo com a norma DNER-ME 061/94 para delineamento da linha de influência por intermédio da viga Benkelman. Além do levantamento das linhas de influência, ou bacias, no sentido longitudinal da pavimentação e compactação, foram levantadas bacias transversais nos mesmos locais de modo a possibilitar a comparação das deflexões nos dois sentidos. Tal comparação, pioneira de acordo com o conhecimento dos autores, é de grande importância uma vez que pode ajudar a definir a direção mais adequada das faixas de pavimentação/compactação no caso de grandes pátios, caso haja diferença significativa de comportamento nas direções de compactação e transversal a esta. A escolha seria função da direção crítica do fluxo de tráfego que preferencialmente deveria ser a mesma da bacia com menores deflexões elásticas, e conseqüentemente com menor potencial para trincamento.

A medição de deflexões, em particular de bacias deflectométricas, é de vital importância na Mecânica dos Pavimentos, onde a deformabilidade elástica é associada ao trincamento dos revestimentos. Caso o dimensionamento da estrutura tenha sido feito mecanisticamente (o que não foi o caso da obra analisada), o controle de construção camada a camada pode indicar eventuais deficiências ou não concordâncias entre o comportamento previsto dos materiais e o comportamento obtido no campo, permitindo eventuais ajustes. Por ser um ensaio não destrutivo e rápido, o controle de campo pode ser muito mais detalhado, com liberação mais rápida das camadas e com possibilidade de correções de defeitos localizados. Além disso, as bacias deflectométricas medidas em campo permitem, através da retroanálise, que sejam estimados os módulos de resiliência dos materiais das diferentes camadas do pavimento e comparados com os valores de projeto.

2. DADOS DO PÁTIO ANALISADO E MATERIAIS UTILIZADOS

As obras de pavimentação das novas instalações da Base Aérea de Fortaleza foram iniciadas em 1999 e contam com um pátio de hangares e um pátio de aeronaves de grande porte. Em ambos os pátios, nas áreas onde ficarão estacionadas as aeronaves, utilizou-se placas de concreto de cimento Portland e nas outras áreas de circulação o pavimento é asfáltico. A Figura 1 mostra (não em escala) a disposição dos pátios no local bem como as dimensões do pátio das aeronaves de grande porte tratado no presente estudo. O pavimento do pátio analisado é constituído por duas camadas de brita graduada de 15 cm cada, uma camada de 6 cm de binder, e uma camada de 6 cm de CBUQ. As bacias deflectométricas medidas são referentes ao sistema composto pelas camadas de brita e pelo binder. Ainda não foram realizadas medidas de deflexão após a execução da capa final de 6 cm em CBUQ.

2.1. Subleito

A camada final de terraplenagem no pátio (aqui denominada subleito) é composta por uma argila amarela cujas características médias (granulometria, densidade máxima, umidade ótima e CBR) estão indicadas na Tabela 1. A densidade máxima foi obtida através do ensaio Proctor Modificado (NBR 7182), conforme exigido nas especificações para obras aeroportuárias.

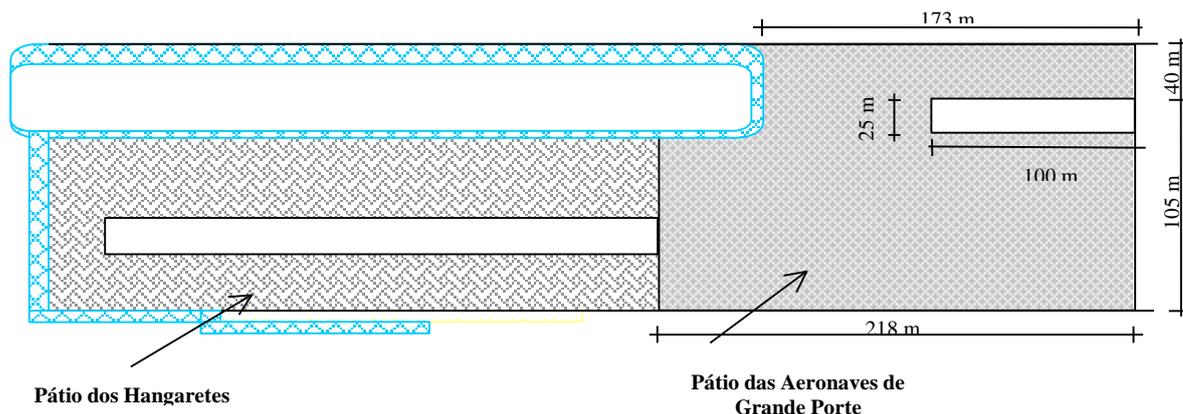


Figura 1: Pátios das novas instalações da Base Aérea de Fortaleza

Tabela 1: Caracterização do subleito

| Peneira | No. 4 | No. 10 | No. 40 | No. 200 |
|--|-------|--------|--------|---------|
| % Passando | 100 | 99,6 | 83,3 | 39,0 |
| Densidade máxima (Kgf/m ³) | 1.996 | | | |
| Umidade ótima (%) | 11,3 | | | |
| CBR (%) | 23 | | | |

A fim de possibilitar uma análise das tensões no pavimento, amostras da argila foram submetidas ao ensaio de módulo de resiliência (MR) no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. O material foi coletado no pátio através da abertura de janelas na primeira camada da base de brita graduada já executada. Foram escolhidos cinco furos distintos no pátio para a coleta do material em locais sujeitos a tensões de cisalhamento críticas (onde as aeronaves realizam curvas). Os resultados dos ensaios correspondentes aos materiais dos cinco furos são apresentados na Tabela 2, de acordo com o modelo $MR = k_1 \sigma_3^{k_2}$, sendo σ_3 a tensão confinante (valores de MR em kgf/cm²). Os valores de MR variam pouco com a tensão confinante, o que pode ser observado pelos baixos valores de k_2 . O fato do material de subleito ser pouco sensível ao estado de tensões reflete-se na homogeneidade das deflexões medidas como poderá ser visto na análise apresentada mais adiante.

Tabela 2: Parâmetros do módulo de resiliência do subleito e da base (MR em kgf/cm²)

| Amostra | Subleito | | Base de brita | |
|---------------|----------|---------|---------------|--------|
| | k_1 | k_2 | k_1 | k_2 |
| 1 | 4.861 | 0,0287 | 4.572 | 0,6256 |
| 2 | 4.560 | 0,2453 | 4.391 | 0,7015 |
| 3 | 4.218 | 0,2278 | 4.202 | 0,7714 |
| 4 | 4.265 | -0,0476 | 4.530 | 0,6811 |
| 5 | 5.038 | 0,0626 | 4.704 | 0,6294 |
| Média | 4.588 | 0,1034 | 4.480 | 0,6818 |
| Desvio padrão | 360 | 0,1281 | 191 | 0,0598 |

2.2. Base de brita graduada

A brita graduada usada na camada de base se encaixa na Faixa 2 das especificações para obras aeroportuárias sendo compactada a 100% do Proctor Modificado. Durante a execução da primeira camada de 15 cm verificou-se que, apesar dos limites das diversas peneiras estarem sendo atendidos, a diferença entre as porcentagens que passavam na peneira No. 4 e No. 40

estavam abaixo do limite exigido nas especificações (entre 20% e 30%). Como pode ser visto na Tabela 3, antes do devido ajuste, havia uma quantidade aquém da necessária passando na peneira No. 4 e retida na No. 40, ficando a referida diferença em aproximadamente 12%. Portanto, durante a execução, houve necessidade de uma adição de pó-de-pedra para enquadramento da faixa. Foi interessante verificar a pertinência da exigência, uma vez que foi verificada uma melhor compactação após o ajuste da faixa granulométrica. Surgiu então a preocupação de que a adição de pó de pedra durante a execução tornasse a camada heterogênea de uma faixa da camada de base para outra.

Para inferir a homogeneidade da camada e verificar a sua capacidade estrutural foi realizado um levantamento com a viga Benkelman na base de brita em parte do pátio das aeronaves de grande porte. As deflexões máximas foram medidas, de 20 em 20 m, no centro das faixas de espalhamento do material (66 medidas), bem como nas emendas destas faixas (59 medidas). Os resultados foram os seguintes: (a) centro das faixas – média de 38,9 (0,01 mm) e desvio padrão de 10,1 (0,01 mm); e (b) emendas – média de 41,4 (0,01 mm) e desvio padrão de 12,1 (0,01 mm). O valor médio incluindo todas as deflexões máximas foi de 40,0 (0,01 mm) e o desvio padrão 11,1 (0,01 mm). A construção da segunda camada de brita, já com a granulometria corrigida, não foi acompanhada de medidas de deflexão, que voltaram a ser realizadas sobre a camada de binder.

Tabela 3: Percentual passando da brita graduada (1ª camada antes do ajuste)

| Peneira | % Passando | Limites - Faixa 2 |
|---------|------------|-------------------|
| 2" | 100 | 100 |
| 1 ½" | 92,9 | 90-100 |
| ¾" | 42,1 | 40-70 |
| 3/8" | 34,5 | 20-40 |
| No. 4 | 20,0 | 4-30 |
| No. 40 | 7,9 | 0-10 |
| No. 200 | 1,1 | 0-2 |

Nos mesmos cinco furos anteriormente mencionados, retirou-se material da primeira camada de brita graduada executada para realização de ensaios de resiliência. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para as cinco amostras. Observa-se que o MR da brita foi correlacionado com a tensão confinante (σ_3) e apresentou coeficiente k_2 bastante elevado em todas as amostras (modelo $MR = k_1 \sigma_3^{k_2}$), indicando grande não-linearidade e, portanto, grande influência do grau de compactação e do estado de confinamento, mais preocupante neste caso devido as dimensões do pátio.

2.3. Binder

O binder é composto pelo CAP 50/60 e os seguintes agregados: brita 1" (18,0% em peso) e brita 3/4" (36,0%) como agregado graúdo; pó de pedra (14,3%) e areia de campo (28,7%) como agregado miúdo; e carbonato de cálcio como filer (3,0%). Foi mantida a relação 2:1 entre as britas, bem como entre o pó-de-pedra e a areia de campo. O teor ótimo, ou teor de projeto, foi determinado de acordo com a dosagem Marshall, sendo encontrado um valor de 4,1%. A Tabela 4 mostra a granulometria média dos agregados, com o percentual em peso que passa em cada peneira. A faixa eixo de projeto situa-se totalmente dentro da Faixa 7 das especificações para obras aeroportuárias (X_{\min} e X_{\max}). A mistura foi ainda projetada de modo

que as tolerâncias P_{\min} e P_{\max} na Tabela 4, na medida do possível, também se encontrassem dentro da Faixa 7.

Tabela 4: Granulometria dos agregados do binder

| Peneira | Brita 1" | Brita 3/4"100 | Pó de pedra | Areia de campo | Fíler | P_{\min} | Eixo de projeto | P_{\max} | Faixa 7 | |
|---------|----------|---------------|-------------|----------------|-------|------------|-----------------|------------|------------|------------|
| | | | | | | | | | X_{\min} | X_{\max} |
| 1" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3/4" | 40 | 100 | 100 | 100 | 100 | 82 | 89 | 96 | 72 | 96 |
| 1/2" | 0 | 71 | 100 | 100 | 100 | 65 | 72 | 79 | 61 | 89 |
| 3/8" | 0 | 58 | 100 | 100 | 100 | 60 | 67 | 74 | 52* | 80* |
| Nº 4 | 0 | 25 | 99 | 100 | 100 | 50 | 55 | 60 | 38 | 66 |
| Nº 10 | 0 | 9 | 86 | 93 | 100 | 40 | 45 | 50 | 25 | 50 |
| Nº 40 | 0 | 4 | 39 | 46 | 100 | 18 | 23 | 28 | 12 | 28 |
| Nº 80 | 0 | 2 | 18 | 14 | 100 | 7 | 10 | 13 | 7 | 18 |
| Nº 200 | 0 | 0 | 5 | 0 | 99 | 2 | 4 | 6 | 3 | 7 |

*Valores não especificados foram interpolados linearmente

Para a análise das tensões do sistema de camadas sem a capa final (uma vez que foram realizadas até o momento medições deflectométricas somente até a camada do binder), o valor do módulo de resiliência do binder (MR) foi estimado a partir de ensaios de resistência à tração estática (RT). As misturas asfálticas apresentam a seguinte relação entre módulo de resiliência (MR) e resistência à tração estática (RT): $MR = 3.000 RT$ (Soares et al., 1999a). Relações desta ordem são válidas para misturas com CAP de petróleo Bachaquero e misturas com CAP 50/60 de petróleo Boscan (MR/RT de 2.610). A relação é maior para CAP de outros petróleos (Pinto, 1991; Motta, 1998). CAP provenientes dos petróleos venezuelanos apresentam relações MR/RT mais baixas que os demais petróleos, mas ainda superiores às apresentadas por asfaltos modificados por polímero (Leite, 1999).

Foram ensaiados seis corpos de prova do binder, obtendo-se $11,88 \text{ kgf/cm}^2$, como resultado médio dos valores de RT e $0,38 \text{ kgf/cm}^2$ de desvio padrão. Portanto, o MR estimado é de 35.000 kgf/cm^2 . Os valores encontrados estão compatíveis com os valores obtidos até então nos ensaios de carga repetida para misturas asfálticas com o CAP 50/60 usadas no estado do Ceará (Soares et al. 1999a, 1999b). A mistura asfáltica para a capa final apresentou $RT = 11,03 \text{ kgf/cm}^2$ e $0,13 \text{ kgf/cm}^2$ de desvio padrão. Estes valores serão usados posteriormente na análise da estrutura final completa, cuja bacia deflectométrica será comparada com novas medições de bacias na capa final.

3. RESULTADOS DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS

Foi realizado um levantamento com a viga Benkelman sobre o binder por toda a extensão do pátio das aeronaves de grande porte, obtendo-se as linhas de influência da aplicação de carga em pontos afastados ao longo de um mesmo eixo horizontal (DNER-ME 061/94). Para o levantamento com a viga, o pátio foi dividido em 45 faixas no sentido da pavimentação, cada uma com largura de 3 m e extensão de 200 m (faixas horizontais 1 a 45 na Figura 2 – não em escala). Para cada uma das 45 faixas foram feitas leituras das bacias deflectométricas de 20 em 20 m, iniciando-se a 10 m do começo da faixa e terminando-se a 10 m do final, para permitir a passagem do caminhão, totalizando 9 medidas de bacia por faixa (correspondentes as estacas 1-9 na Figura 2). No total foram 331 medidas de bacias deflectométricas no pavimento do pátio. Deixou-se de fazer algumas medições onde não foi possível a manobra do caminhão. As faixas 1, 2 e 3, possuem apenas 5 medidas, pois ainda havia 100 m não

pavimentados com o binder à época das medições. As faixas de 14 a 22 só possuem 4 medidas, pois coincidem com as placas de concreto de cimento Portland existentes.

Além das medidas das bacias deflectométricas no sentido longitudinal, a viga Benkelman foi também passada no sentido transversal à direção da pavimentação e compactação (direção vertical perpendicular às faixas na Figura 2), a fim de verificar possíveis diferenças nas bacias ortogonais. Foram feitas 41 medidas de bacias transversais em locais que coincidem com as bacias medidas no sentido longitudinal. Os 41 pontos onde foram levantadas as bacias nos dois sentidos estão ilustrados por pontos na Figura 2. Devido à quantidade de dados coletados, resolveu-se analisar primeiramente as bacias deflectométricas longitudinais de um modo geral (331 bacias). Em seguida, para fins comparativos, é feita uma análise do conjunto de 41 bacias longitudinais onde existem também 41 medidas de bacias correspondentes no sentido transversal.

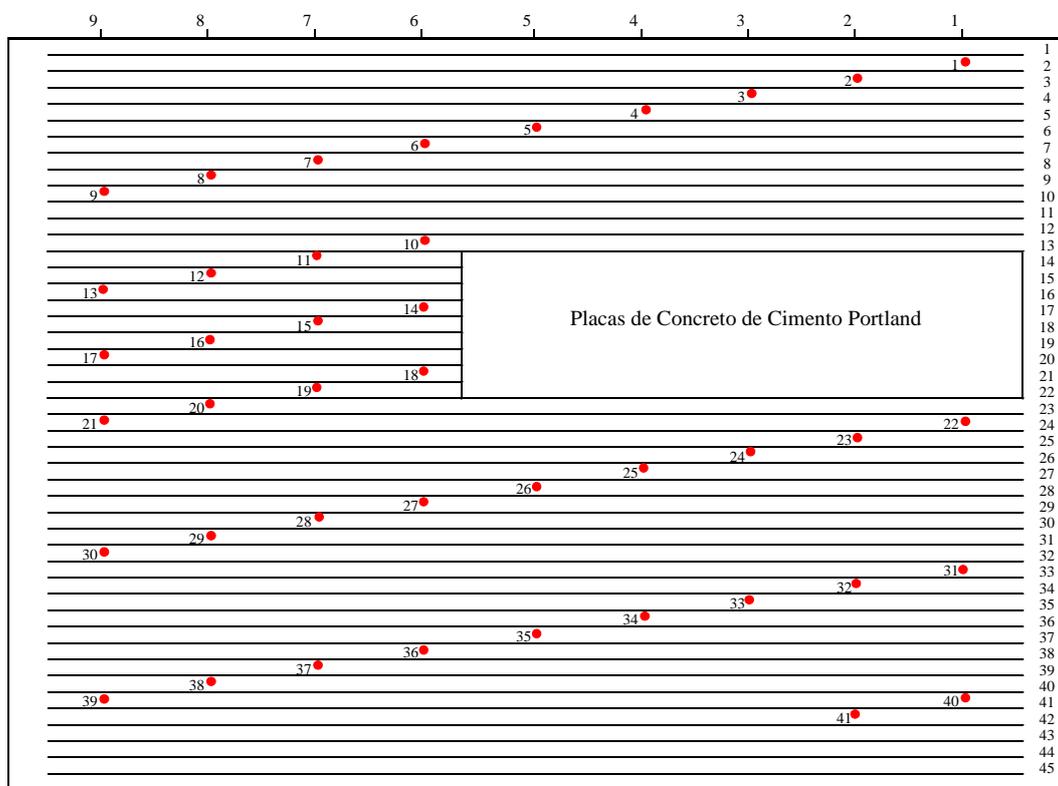


Figura 2: Pátio das aeronaves de grande porte

3.1. Deflexões no sentido longitudinal

Calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) de cada medida de deflexão das 331 bacias deflectométricas. São 16 medidas por bacia, devido à aplicação da carga em pontos afastados. Note-se na Tabela 5 que as distâncias da carga são ligeiramente diferentes daquelas recomendadas pelo DNER. A medida no ponto 0,00 m é onde ocorre a deflexão máxima e a 2,97 m, a deflexão mínima ou nula. O valor médio das deflexões máximas foi de 34,5 (0,01 mm), com um desvio padrão de 2,5 (0,01 mm), portanto, 15% abaixo da deflexão de 40,0 (0,01 mm) obtida quando apenas a primeira camada de brita havia sido executada. Sabe-se que quanto mais baixa a deflexão, mais difícil reduzi-la com acréscimo de outra camada, princípio este utilizado para gerar a expressão usada no método

PRO 11 de cálculo de reforço, que tem origem em Ruiz (1964) e que mostra uma relação log entre as deflexões medidas sobre camadas de base e as medidas sobre o revestimento.

Tabela 5: Deflexões no sentido longitudinal (0,01 mm)

| Distância da carga (m) | 0,00 | 0,12 | 0,37 | 0,57 | 0,77 | 0,97 | 1,17 | 1,37 | 1,57 | 1,77 | 1,97 | 2,17 | 2,37 | 2,57 | 2,77 | 2,97 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Deflexão média | 34,5 | 30,9 | 26,4 | 21,3 | 16,8 | 12,2 | 6,4 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 2,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Desvio padrão | 2,5 | 2,7 | 3,2 | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 1,4 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| CV (%) | 7,2 | 8,7 | 12,1 | 13,1 | 16,7 | 23,8 | 21,9 | 18,0 | 18,0 | 18,0 | 18,0 | 18,0 | 52,4 | - | - | - |

Nota-se que os coeficientes de variação (CV's) tendem a aumentar para as medições referentes às cargas mais distantes da ponta de prova. Estes dados corroboram a noção de que as leituras mais precisas da viga são aquelas obtidas mais próximas à aplicação da carga (Rocha Filho e Rodrigues, 1998). O CV das deflexões máximas do presente estudo foi superior aos valores reportados por Rocha Filho e Rodrigues (1998) no estudo em pavimento flexível aeroportuário já construído e em uso: 3,9% para levantamento com viga Benkelman e 0,5% para levantamento com FWD. No entanto, os CV's aqui reportados foram bem menores do que os encontrados para medidas com a viga no controle tecnológico de construção da Rodovia Carvalho Pinto, que apresentaram CV's de 8 a 29% na CFT, de 16 a 50% na camada de brita graduada, e de 16 a 26% na camada de binder, entre as seções-teste. Nestes mesmos trechos-teste, levantamentos com o FWD apresentaram CV's de 6 a 26% na CFT, 10 a 28% na camada de brita e 16 a 18% no binder (Macêdo, 1996). No caso do controle do Lote 7 da Rodovia Carvalho Pinto os CV's foram ainda maiores (Motta et al., 1995). Ramos et al. (2000) mostram CV's bastante maiores, da ordem de 20 a 30%, como possíveis nas camadas de base. No presente estudo, o Raio de Curvatura, $R_c = 6250/[2(D_0-D_{25})]$, foi determinado tomando-se como D_{25} um valor interpolado linearmente entre D_{12} e D_{37} . Das 331 bacias, obteve-se um R_c médio de 570 m, com desvio padrão de 163 m, portanto, um CV de 28,6%, inferior ao valor de 39,4% com viga Benkelman e bem acima do valor de 3,26% com FWD reportados no estudo de Rocha Filho e Rodrigues (1998).

No presente estudo, não foi extraído material da segunda camada de brita executada para determinação do módulo de resiliência. Apesar de semelhante ao material da primeira camada, o módulo da brita da segunda camada pode ter uma dependência diferente do estado de tensões em virtude do ajuste granulométrico. Assumindo-se módulos semelhantes, é bem possível que a segunda camada de brita possa ter aumentado a deflexão visto que o material apresenta módulo muito dependente do estado de tensões. Este aumento foi verificado em análise computacional no programa FEPAVE2, onde foi comparado um sistema com uma camada de 15 cm de brita sobre o subleito, e outro com duas camadas de brita (15 cm cada) sobre o subleito. Na análise as camadas de brita foram consideradas com valores de módulos iguais (Tabela 2). O sistema com 2 camadas de brita possui deflexões superiores ao sistema com uma única camada de brita. Uma análise computacional mais detalhada para comparação com os dados de campo será objeto de outro trabalho dos autores.

Outro aspecto importante a ser comentado é que a medida de deflexão feita sobre camadas granulares e de solos com a viga (no meio das duas rodas) se refere a um estado especial no qual o ponto de medida não reflete o ponto de maior deformada que deve ser sobre cada roda individualmente. Por não ter estes materiais o efeito de placa, haverá certamente uma acentuada curvatura da deformada logo abaixo da carga e que se reflete no ponto de medida

como uma deflexão aparentemente baixa. Veja por exemplo as deflexões admissíveis para controle de obra da Rodovia Carvalho Pinto: para a camada final de terraplanagem (CFT) foram de 51 (0,01 mm) para controle com a viga, e de 90 (0,01mm) para controle com o FWD (Campos et al., 1995; Motta et al.,1995). Porto (1978) indica como limites admissíveis de deflexão das camadas os seguintes valores: (a) 200 (0,01mm) para o subleito ou CFT; (b) 80 (0,01mm) para o topo da subbase; (c) não tem valor especificado sobre a brita graduada, alegando dificuldades de leitura sobre esta camada; (d) 40 (0,01mm) sobre a camada de BGTC; (e) também não indica valor no binder, alegando dificuldades de medições; e (f) 20 (0,01mm) na superfície acabada da capa. Ressalte-se que neste caso foi usada carga de 10 tf no eixo traseiro do caminhão e não o eixo padrão. Ramos et al. (2000) utilizam a fórmula de cálculo de espessura do reforço do PRO 11/94 para calcular a deflexão admissível no topo da camada de base considerando que se conhece a espessura de capa a ser implantada e que no topo da capa deve ser obtida a deflexão calculada pela expressão de deflexão admissível para o N de projeto. Ramos et al. têm admitido também que o controle deve ser feito pela deflexão máxima medida no trecho e não por controle estatístico.

Ainda considerando o conjunto das 331 bacias longitudinais, e um intervalo de confiança de 90% (1,645 desvio padrão), valores de deflexões máximas de 30,4 (0,01 mm) a 38,6 (0,01 mm) são ilustrados na Figura 3. As linhas horizontais superior e inferior correspondem respectivamente aos limites máximos e mínimos do intervalo de confiança. Somente em 12 pontos dos 331 levantados, foram medidas deflexões acima do limite superior do intervalo de confiança, representando talvez pontos que podem vir a ter problemas mais rapidamente, especialmente se estiverem localizados em trilhas de roda, caso persistam fora do padrão após a colocação da capa. Vale lembrar que este pátio vai suportar peso de aeronaves, bem maiores que os pesos rodoviários, estes da mesma ordem de grandeza do eixo padrão usado para medição com a viga Benkelman.

Considerando os dados das bacias longitudinais agrupadas por faixa ilustrada na Figura 2, foi determinada a média das deflexões máximas de cada uma das 45 faixas. Os CV's das medidas de deflexão agrupados por faixa foram, em média, ligeiramente menores que o CV calculado quando se considerou o conjunto das 331 bacias. No caso da deflexão máxima, a média dos CV's por faixa foi de 6,3%.

3.2. Deflexões no sentido transversal

Foi passada a viga Benkelman também no sentido transversal às faixas da Figura 2 para efeito de comparação com as bacias longitudinais. Nesse caso foram medidas 41 bacias deflectométricas. Foi medida uma bacia por faixa iniciando a partir da faixa 2 e sempre saltando para a faixa seguinte e um ponto à frente, de 20 em 20 m. A Tabela 6 apresenta a média das 41 medidas em cada ponto distante da carga, os respectivos desvios padrão e CV's. Notou-se a mesma ordem de grandeza dos CV's por medida de deflexão, e a tendência de aumento para medidas mais distantes do ponto de aplicação da carga encontradas nas bacias longitudinais. Das 41 bacias transversais, obteve-se um R_c médio de 514 m com desvio padrão de 134 m, portanto um CV de 26,1%, valores próximos aos obtidos nas bacias longitudinais.

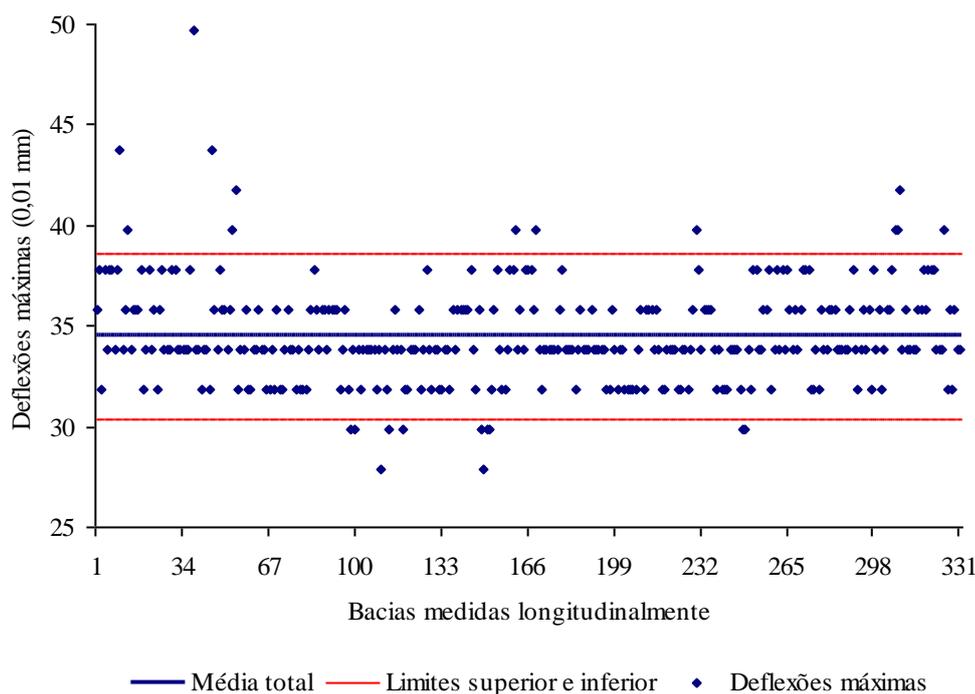


Figura 3: Dispersão das deflexões máximas medidas longitudinalmente

Tabela 6: Deflexões transversais (0,01 mm)

| Distância da carga (m) | 0,00 | 0,12 | 0,37 | 0,57 | 0,77 | 0,97 | 1,17 | 1,37 | 1,57 | 1,77 | 1,97 | 2,17 | 2,37 | 2,57 | 2,77 | 2,97 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| Deflexão média | 35,2 | 31,5 | 26,2 | 18,7 | 13,0 | 9,5 | 7,1 | 4,5 | 3,4 | 3,0 | 2,9 | 2,9 | 1,6 | 1,1 | 0,5 | 0,0 |
| Desvio padrão | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,8 | 3,0 | 1,9 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 0,9 | 0,0 |
| CV (%) | 7,7 | 9,2 | 11,5 | 16,6 | 29,2 | 31,6 | 26,8 | 37,8 | 50,0 | 56,7 | 51,7 | 51,7 | 87,5 | 118,2 | 180,0 | - |

3.3. Comparação das bacias longitudinais e transversais

Analisa-se a seguir os 41 pontos onde existem bacias deflectométricas nos sentidos longitudinal e transversal. Considerando novamente um intervalo de confiança de 90%, a Figura 4 mostra os valores das deflexões médias e dos limites superior e inferior do intervalo. Nota-se que os valores são bem similares na região próxima à aplicação da carga, exatamente onde se tem maior precisão nas medidas de deflexão com a viga Benkelman.

Para uma comparação mais quantitativa entre as bacias longitudinal e transversal, foi realizada uma análise estatística para testar a igualdade das médias de cada uma das medidas de deflexão associadas às bacias deflectométricas. A análise é realizada só até a medida de deflexão distante 2,17 m da carga, uma vez que a partir daí as medidas passam a ser bastante imprecisas conforme dados das Tabelas 5 e 6. Primeiramente testa-se a equivalência entre as variâncias de cada par de deflexões medidas a uma determinada distância da carga, para em seguida testar-se a igualdade das médias destas deflexões.

O teste de hipótese entre duas variâncias é da seguinte forma: $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$; $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$, onde H_0 é a hipótese nula e H_1 a hipótese alternativa. σ_1^2 e σ_2^2 são as variâncias das populações consideradas, neste caso deflexões das bacias longitudinal e transversal a uma

determinada distância da carga. A decisão é de rejeitar H_0 ou não através da observação de um parâmetro estatístico $F = S_1^2 / S_2^2$, aonde S_1^2 e S_2^2 são estimativas não tendenciosas das variâncias das populações σ_1^2 e σ_2^2 , respectivamente. Como H_0 é frequentemente não rejeitada neste teste, é sugerido que o teste seja feito com um valor alto de α , sendo α a probabilidade de cometer-se um erro do Tipo I, ou seja, rejeitar-se H_0 quando esta é verdadeira. Neste estudo foi adotado um α de 0,20 conforme recomendação de Milton e Arnold (1990). A Tabela 7 apresenta o resultado do teste F para as variâncias (E = equivalentes; D = diferentes).

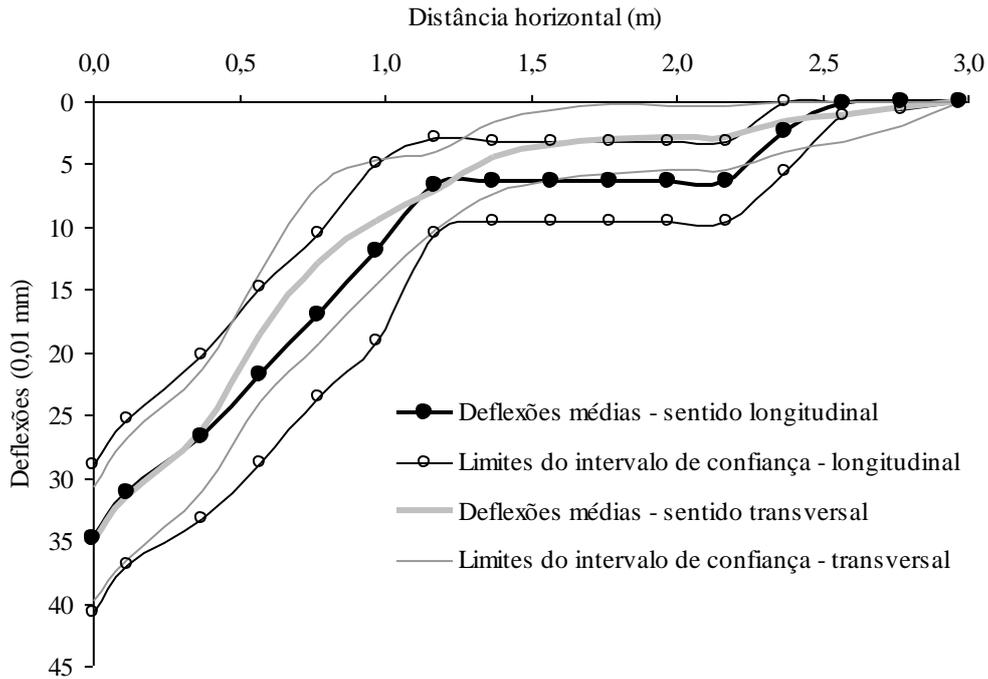


Figura 4: Comparação das deflexões transversais e longitudinais

O próximo passo é testar se as médias das deflexões são diferentes. Para isto, utiliza-se o teste estatístico T. O objetivo é determinar se as médias populacionais (μ_1 e μ_2) são diferentes (teste bi-caldal). Portanto, o teste de hipótese toma a seguinte forma: $H_0: \mu_1 = \mu_2$; $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$. A hipótese nula H_0 é rejeitada quando $P(T \leq T_{cr})$ for inferior ao nível de significância pré-estabelecido do teste (valor P). No presente estudo, o valor P, que é o menor valor que poderíamos ter fixado α e ainda ter rejeitado H_0 , é adotado como 0,01. A Tabela 7 contém os valores da estatística T observada e de $P(T \leq T_{cr})$, bem como a conclusão do teste. O T_{cr} neste tipo de teste é função dos dados (um T_{cr} de 1,99 foi encontrado em todos os casos, variando só a terceira casa decimal).

Tabela 7: Teste estatístico para comparação das médias

| Distância da carga (m) | 0,00 | 0,12 | 0,37 | 0,57 | 0,77 | 0,97 | 1,17 | 1,37 | 1,57 | 1,77 | 1,97 | 2,17 |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Variâncias | D | E | D | D | E | D | D | E | E | E | D | D |
| T | -0,217 | -0,620 | 0,622 | 3,796 | 4,723 | 2,971 | -0,706 | 4,549 | 7,298 | 8,503 | 9,035 | 9,035 |
| $P(T \leq T_{cr})$ | 0,829 | 0,537 | 0,536 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,482 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Conclusão | E | E | E | D | D | D | E | D | D | D | D | D |

* E = equivalentes; D = diferentes

De acordo com os dados da Tabela 7, as medidas de deflexão das faixas longitudinal e transversal são equivalentes quando consideradas próximas à carga. Em apenas um ponto (1,17 m) as medidas foram equivalentes quando consideradas em distâncias maiores que 0,37 m da carga. Notou-se que as médias das deflexões, a partir de 0,37 m, das bacias transversais são inferiores às médias das bacias longitudinais. Caso esta tendência se repita ao ser colocada a capa, pode-se inferir que a hipótese inicial de que houvesse diferença no comportamento em função do sentido de compactação não se confirme, para as posições mais próximas da carga, que são responsáveis pelas deformações críticas de tração do revestimento e, portanto, não haveria diferença de comportamento quanto à fadiga. As diferenças na parte final da bacia podem indicar uma certa anisotropia de comportamento nas camadas inferiores de brita ou subleito, talvez ligadas às tensões residuais de compactação. Vale notar que o efeito da direção no presente estudo é avaliado no sentido estrutural através da bacia deflectométrica elástica. Não foi avaliado o efeito da direção de pavimentação/compactação no conforto de rolamento, até mesmo por tratar-se de um pátio onde as velocidades são pequenas e, portanto, onde a presença de emendas não é tão relevante.

Em alguns pontos no pátio das aeronaves de grande porte, foram extraídos corpos de prova do binder para determinação em laboratório da densidade aparente. Foi extraído um corpo de prova em cada uma das 45 faixas da Figura 2, a exceção das faixas 22 (devido a uma vala de drenagem no local) e 42 (dados perdidos). A média das densidades foi de $2,280 \text{ Kg/m}^3$, o desvio padrão de $0,029 \text{ Kg/m}^3$, valores máximos e mínimos de $2,334$ e $2,227 \text{ Kg/m}^3$, respectivamente. Procurou-se verificar se os pontos de densidade mais baixa correspondiam a valores de deflexões mais elevadas. Nenhuma tendência neste sentido foi verificada, confirmando que as deflexões dependem muito mais da estrutura do pavimento como um todo do que somente das camadas asfálticas.

4. CONCLUSÕES

Não é prática no estado do Ceará o controle da execução das camadas em obras viárias com instrumentos de medição deflectométrica. A viga Benkelman, um equipamento simples e de largo uso no Brasil, pode ser facilmente usada no controle da construção de um pavimento. No presente estudo, ela foi usada para verificar a capacidade de uma camada de base de brita graduada que, apesar de ligeiramente fora de especificação quanto a granulometria, pôde ser mantida uma vez que apresentou deflexões baixas. Devido a um subleito com módulo praticamente constante, obteve-se boa homogeneidade nas medidas de deflexões nas camadas em relação a outras medidas de literatura de obras rodoviárias. Observou-se que após a colocação de uma segunda camada de brita graduada e de revestimento asfáltico (binder), as deflexões diminuíram 15% em relação à primeira camada de brita. Numa comparação pioneira entre bacias deflectométricas nos sentidos longitudinal e transversal, não se encontrou diferença marcante que justifique uma preocupação com a direção e o sentido da compactação até a fase do binder. Ressalta-se que tal assertiva refere-se a deflexões elásticas, não havendo sido feita consideração quanto ao conforto de rolamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a toda a equipe envolvida nas obras das novas instalações da Base Aérea de Fortaleza que deu grande apoio a este estudo. A segunda autora agradece ao engenheiro Dultevir G.V. de Melo o envio da referência Porto (1978) e todas as ótimas e ilustrativas conversas que pode ter com este experiente homem da prática (que nem por isso se cansa de estudar e evoluir) ao longo de várias oportunidades nos eventos técnicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albernaz, C.A.V. (1997) Método Simplificado de Retroanálise de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Andreatini, L.P.V. (1967) Um método para a análise e interpretação das deflexões em pavimentos flexíveis. III Simpósio Sobre Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.
- Andreatini, L.P.V. (1970) Um método para a análise e interpretação das deflexões em pavimentos flexíveis. Publicação n. 439, IPR/DNER.
- Aratagy, N.J. (1962) Medida de deformação dos pavimentos de solo-cimento. 3ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Rio de Janeiro.
- Aratagy, N.J. e Andreatini, L.P.V. (1969) Um método para a análise e interpretação das deflexões em pavimentos flexíveis. Publicação n. 315, IPR/DNER.
- Campos, O.S., Guimarães, S. R. R., e Rodrigues, R.M. (1995) Avaliação Estrutural dos Pavimentos da Rodovia Governador Carvalho Pinto. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Cuiabá
- Carneiro, F.B.L. (1965) Viga Benkelman - Instrumento auxiliar do Engenheiro de Conservação. 1º Simpósio de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro. Republicada em 1966 no HRR n. 129, EUA.
- Farias, M.M., Monteiro, S.A. (1996) Utilização de modelos elásticos lineares e não-lineares na retroanálise de propriedades de pavimentos. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, p. 791-809.
- Koehler, L.F.S, Silva, L.M.M. e Fernandes W.F. (1996) Emprego da deflectometria no controle da qualidade de serviços de pavimentação. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, p. 840-869.
- Leite, L.F.M. (1999) Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero, Tese de Doutorado, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Macêdo, J.A.G. (1996) Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Medina, J., Macêdo, J.A.G., Motta, L.M.G. e Albernaz, C.A.V. (1994) Utilização de ensaios deflectométricos e de laboratório para a avaliação estrutural de pavimentos. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Belo Horizonte, p. 596-625.
- Milton, J.S. e Arnold, J.C. (1990) Introduction to Probability and Statistics (2ª Edição). McGraw-Hill, Inc., New York.
- Motta, L.M.G., Macêdo, J.A.G., Medina, J., Vianna, A.A.D. e Rabaça, S.R. (1995) Avaliação estrutural de trechos experimentais na Rodovia Carvalho Pinto – análise preliminar. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Cuiabá.
- Oliveira, S.T. e Fabrício, J.M. (1968) Variações mensais de deflexões medidas com viga Benkelman. Publicação n. 428, IPR/DNER.
- 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.
- Porto, P.J.P. (1978) Viga Benkelman na execução do pavimento. Simpósio sobre a Rodovia dos Bandeirantes, DERSA, São Paulo.
- Preussler, E.S., Rodrigues, R.M. e Espechit, A.M.L. (1991) Análise do pátio de concreto do Aeroporto Internacional de Brasília. 25ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Volume IV, São Paulo.
- Ramos, C.R., Tizo Láo, V.L.E.S., Schilling, A.B.Z.K., Pereira, M.T.T.Q. e Conceição, M.G.L.B. (2000) Controle tecnológico com a viga Benkelman no município do Rio de Janeiro. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico, Universidade Mackenzie, São Paulo.
- Rocha Filho, N.R. e Rodrigues, R.M. (1998) Levantamentos deflectométricos: fatores que influenciam na previsão de desempenho de pavimentos. 31ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, São Paulo, p. 752-777.
- Ruiz, C.L. (1964) Sobre el calculo de espesores de refuerzo de pavimentos. 5ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Rio de Janeiro.
- Soares, J.B., Motta, L.M., Leite, L.M. e Branco, J.V.C. (1999a) O efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas. XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Volume I, São Carlos, p. 115-125.
- Soares, J.B., Motta, L.M. e Leite, L.M. (1999b) Quatro anos de observação da pista experimental do Ceará. XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Volume I, São Carlos, p. 263-272.
- Suzuki, C.Y., Fabbro, E.D., Souza, P.R.B., Mofomatsu, R.K., Franzoi, S. e Ribeiro, W.S.C. (1991) Trecho experimental de pavimento invertido, ligação Campinas-Sorocaba (SP-75). 25ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Volume IV, São Paulo.