

COMPORTAMENTO E DESEMPENHO DE WTUD SOBRE PAVIMENTO ASFÁLTICO DELGADO

Deividi da Silva Pereira

José Tadeu Balbo

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Escola Politécnica

Universidade de São Paulo

RESUMO

Dados referentes a temperaturas e diferenciais térmicos em pista experimental com *whitetopping* ultradelgado (WTUD) instrumentado no campus da Universidade de São Paulo (USP) obtidos durante as quatro estações de um ano são apresentados e discutidos. Discorre-se também sobre as provas de carga, estática e dinâmica, realizadas sobre os pavimentos, bem como suas implicações em termos de projeto de WTUD. Verificou-se após um ano de avaliações que os efeitos de gradientes térmicos sobre placas de concreto ultradelgadas podem ser negligenciados. As provas de carga dinâmica resultaram em valores de tensões nas placas próximos aqueles obtidos por modelagem numérica.

ABSTRACT

Field data concerning temperatures and thermal differentials in an ultra-thin whitetopped (UTW) pavement achieved during four seasons are presented and discussed herein, fulfilling a previous and preliminary analysis presented by the authors. Present results are complemented by load tests over the pavements which allowed to verify field stresses as well as numerical analysis coherence for design of such a kind of composite pavement. The results pointed out the unnecessary consideration of curling effects on stresses as well as sustained the adequacy of a recent developed numerical-based criteria for analysis of stresses and fatigue in UTW pavements.

1. INTRODUÇÃO

Whitetopping Ultradelgado (WTUD) é uma possível técnica de restauração de pavimentos asfálticos quando deformações plásticas nas trilhas de roda configuram-se no principal defeito do pavimento, sem que redução na capacidade estrutural desta via seja percebida, inexistindo, portanto, fissuras por fadiga no revestimento betuminoso ou outro tipo de deterioração da base. Entre outras particularidades necessárias à implantação do WTUD, destaca-se a espessura remanescente de camada asfáltica após a fresagem que, conforme Hawbaker (1996), Mack *et al.*(1993) e ACPA (1996), deve ser no mínimo igual a 75 mm, em harmonia com Mack *et al.* (1998), Cole *et al.* (1998) e ACPA (1998). Tão importante quanto esta espessura de concreto asfáltico (CA) remanescente será a aderência entre o concreto de cimento Portland (CCP) e o CA, o que conferirá um comportamento estrutural de pavimento composto, modificando a posição da linha neutra no interior da placa de CCP, reduzindo as tensões de tração na flexão neste material.

Desde o início da difusão da utilização do WTUD no mundo, engenheiros reconhecem que a aplicação desta técnica pode ser restringida devido à presença, em vários países, de vias urbanas construídas com camadas delgadas de misturas asfálticas, raramente superiores a 70 mm, conforme Balbo *et al.* (2001). Para evitar mudanças significativas no gabarito vertical destas vias, seria necessária a fresagem de uma razoável espessura de CA, configurando-se uma situação em que o limite mínimo de espessura requerida internacionalmente não seria alcançado.

Neste caso enquadram-se perfeitamente os corredores exclusivos de ônibus urbanos da cidade de São Paulo, conforme Balbo *et al.* (2001). Usando revestimentos de concreto de cimento Portland em tais corredores, poder-se-ia evitar prematuros e constantes afundamentos nas trilhas de roda devido à canalização do tráfego. Todavia, o WTUD tem sua aplicação limitada

pela restrição do nível topográfico da via, caso esta camada seja colocada de maneira sobreposta. Geralmente, nestes corredores, a espessura da camada asfáltica é superior a 100 mm podendo atingir em muitos casos 150 mm; porém, como regra geral, espessuras inferiores a 150 mm são padrão comum. A única solução para implementação do WTUD nestes casos seria analisar, experimentalmente, o *whitetopping* ultradelgado, levando-se em consideração as típicas condições técnicas das faixas exclusivas de ônibus no Brasil. Tal pesquisa poderia considerar todas as dificuldades, gerando subsídios técnicos necessários à indicação ou não desta alternativa de restauração de pavimentos asfálticos que, posteriormente, serviriam de suporte para projetistas e agências viárias.

Todo o processo de escolha, execução e instrumentação da pista experimental de WTUD construída no campus da Universidade de São Paulo, na capital do Estado de São Paulo, pode ser encontrado, pormenorizado, em Pereira (2001) bem como em Pereira e Balbo (2001). Recordando brevemente, o WTUD experimental foi construído com uma extensão total de 9,8 metros com espessura de 95 mm, sendo dividido em duas seções com placas de largura de 0,60 m (seção A) e 1,0 m (seção B) sobre 40 mm de espessura remanescente de CA após fresagem superficial; a base do pavimento existente não apresentava problemas de degradação.

A parada de ônibus escolhida para a construção do WTUD está localizada na Rua do Matão, uma via com pista simples, de uma faixa por sentido. Inúmeros locais para a implementação da pista experimental foram considerados, sendo escolhido exatamente a parada de ônibus por se tratar do local crítico em uma via exclusiva de ônibus devido à ação de frenagem e aceleração dos veículos, ações que trariam uma maior sollicitação de cisalhamento na interface CCP/CA.

O CCP utilizado (um concreto de alto desempenho com sílica ativa) apresentou uma resistência à tração na flexão de 5,2 MPa decorridas 48 horas de sua execução, 7,0 MPa aos 7 dias e 7,2 MPa aos 28 dias. O módulo de elasticidade deste material, ensaiado aos 28 dias, foi de 38 GPa.

O tráfego mensal solicitante é, conforme últimos dados de contagem de tráfego, de 2.574 ônibus urbanos e 135 caminhões, além de 12.000 veículos de passeio. As análises encaminhadas neste artigo referem-se a dados coletados em pista entre maio de 2000 e janeiro de 2001, dando complemento final às análises de temperaturas para todas as estações de um ano. O pavimento foi liberado ao tráfego no dia 7 de novembro de 2000 (5 dias após sua execução).

2. RESULTADOS OBTIDOS

2.1. Temperaturas e Diferenciais Térmicos

As medidas de temperaturas e diferenciais térmicos tiveram início em maio de 2000. A coleta de dados era continuamente realizada, durante dias seqüenciais, com intervalos constantes de 10 min entre leituras consecutivas. Até meados do ano 2001, foram registrados 31 dias de outono, 81 dias de inverno, 57 dias de primavera e 15 dias de verão.

Com intuito de verificar as possíveis diferenças entre temperaturas e diferenciais térmicos em diferentes posições de placas e também a influência da localização dos pares de PT-100 nos

resultados, foram realizadas inúmeras comutações de leituras. As comutações eram necessárias uma vez que o sistema de aquisição de dados utilizados permitia coletar informações de 32 instrumentos de uma única vez, sendo o esquema de coleta organizado para a leitura simultânea de todos os instrumentos na seção A ou B.

A comparação dos dados apresentados na Tabela 1 demonstra que a temperatura de topo é sempre a mesma, independentemente da dimensão das placas (0,6 x 0,6 m ou 1,0 x 1,0 m). O mesmo ocorreria para as diferentes posições em planta dos PT-100, conforme Pereira (2001). Chega-se à mesma conclusão em relação à temperatura de fundo. Os diferenciais térmicos são obtidos pela diferença entre as temperaturas de topo e fundo da placa, em cada par de PT-100. As mínimas diferenças observadas estão relacionadas à precisão dos termo-resistores bem como a pequenos desvios em suas posições relativas.

Tabela 1: Temperaturas e diferenciais térmicos nas seções A e B no mesmo instante, em °C

| Seção | Temp. Média Topo | Temp. Média Fundo | Diferencial Térmico Médio |
|-------|------------------|-------------------|---------------------------|
| A | 42,9 | 32,6 | 10,5 |
| B | 44,9 | 33,9 | 11,0 |

Para a determinação das condições típicas de comportamento das temperaturas nas placas de WTUD durante as estações do ano, foram coletadas seqüências de dados referentes às máximas temperaturas de topo e as correspondentes de fundo, bem como as mínimas temperaturas de topo e suas correspondentes de fundo; estes valores possibilitaram a determinação dos diferenciais térmicos em cada instante. Durante semanas típicas de cada estação climática do ano, as máximas, mínimas e médias temperaturas puderam ser registradas para topo e fundo das placas bem como seus respectivos diferenciais térmicos não-retificados. O termo diferencial térmico (não retificado) refere-se à diferença algébrica entre a temperatura medida pelo PT-100 de topo e aquele correspondente de fundo uma vez que o diferencial térmico total ocorre ao longo de toda a espessura do CCP (devendo-se portanto, para defini-lo, extrapolar os valores lidos para a superfície e fundo reais da placa).

Tais resultados são apresentados na Tabela 2 da qual infere-se que há uma sensível mudança na temperatura superficial do CCP durante as estações. Os máximos valores de temperatura variam de 25,4 °C durante o inverno a 48,3 °C no verão, neste último caso próximo aos 53,5 °C registrados em janeiro de 2001, no Rio de Janeiro, posteriormente por Silva (2001). Os valores médios das temperaturas máximas também sofreram oscilação.

Tabela 2: Temperaturas de topo e diferenciais térmicos durante dias típicos de cada estação

| | Temperaturas Máximas (°C) | | | | Temperaturas Mínimas (°C) | | | |
|-----------|------------------------------------|---------|-----------|-------|------------------------------------|---------|-----------|-------|
| | outono | inverno | primavera | verão | outono | inverno | primavera | verão |
| Máximo | 29,7 | 25,4 | 40,0 | 48,3 | 14,3 | 15,2 | 20,1 | 22,8 |
| Mínimo | 26,5 | 17,3 | 25,2 | 38,9 | 10,2 | 5,4 | 16,5 | 20,3 |
| Média | 28,0 | 22,4 | 33,3 | 43,1 | 12,4 | 11,1 | 17,9 | 21,6 |
| Des. Pad. | 0,9 | 2,7 | 6,4 | 3,6 | 1,2 | 3,4 | 1,5 | 0,9 |
| | Diferenciais Térmicos Máximos (°C) | | | | Diferenciais Térmicos Mínimos (°C) | | | |
| | outono | inverno | primavera | verão | outono | inverno | primavera | verão |
| Máximo | 8,4 | 7,8 | 9,4 | 11,7 | -1,3 | -1,1 | -1,7 | -1,9 |
| Mínimo | 5,4 | 2,2 | 0,4 | 7,6 | -3,1 | -2,4 | -4,2 | -3,6 |
| Média | 7,4 | 5,6 | 6,1 | 9,6 | -2,1 | -1,8 | -2,8 | -2,4 |
| Des. Pad. | 0,8 | 2,2 | 4,2 | 1,6 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,6 |

No entanto, em relação às temperaturas mínimas no topo, não ocorreram mudanças significativas durante outono e inverno, quando as máximas temperaturas de 14,3 °C e 15,2 °C foram registradas, respectivamente, sendo as médias de 12,4 °C e 11,1 °C na mesma ordem. Da primavera para o verão percebeu-se mudanças mais significativas quando os valores mínimos médios evoluíram de 17,9 °C para 21,6 °C.

As médias dos diferenciais térmicos positivos não-retificados durante o período diurno (Tabela 2) não sofreram significativas variações durante o outono, inverno e primavera, cujos valores são de 7,4 °C, 5,6 °C e 6,1 °C, respectivamente. Os diferenciais térmicos de verão alcançaram valores mais elevados, com média de 9,6 °C e máximo valor isolado de 11,7 °C. É importante ressaltar que os valores típicos de diferenciais térmicos durante o verão podem ser encontrados na primavera, como evidenciado na Tabela 2 (valor máximo: 9,4 °C).

Os diferenciais térmicos noturnos (negativos) não se alteraram durante as quatro estações climáticas do ano, como observa-se dos valores médios de diferenciais térmicos mínimos na Tabela 2. O diferencial térmico negativo mínimo foi coletado na primavera alcançando um valor de -4,2 °C, quando considerados dias sem precipitação atmosférica.

Os diferenciais térmicos máximos (diferenciais térmicos diurnos) ocorreram entre 12h e 13h30min, enquanto que os diferenciais térmicos mínimos foram registrados entre às 6h e 7h. Convém informar que todas as leituras estão referidas ao horário solar para todas as épocas.

Conforme salientam e Balbo *et al.* (2001) um aspecto interessante de se analisar em relação à instrumentação do WTUD refere-se à temperatura média de fundo (próximo à interface CCP/CA) ao longo das estações do ano. A Tabela 3 permite concluir que a temperatura do revestimento asfáltico durante dias frios e quentes nas regiões tropicais pode cair brutalmente com a presença do WTUD na superfície do pavimento, sobretudo no verão. Dados presentes na literatura apontam para temperaturas do CA, constituinte de pavimentos asfálticos convencionais, de 40 °C (para o outono e inverno) e 65 °C (durante a primavera e verão), valores muito diferentes dos coletados durante o experimento em questão. Esta informação é relevante para futuros estudos de degradação do CA sob o WTUD.

A importância desta temperatura relaciona-se com a potencial ocorrência de deformações permanentes no CA, que para o caso de CA sob WTUD seriam evidentemente menos significativas (inclusive em função de tais resultados, somados à forma de distribuição de cargas na interface CA/WTUD); todavia, tratando-se um material termo-suscetível, as condições de resistência a processos de fadiga são muito alteradas por efeitos térmicos. Apesar disso, a principal implicação desta constatação refere-se à possível perda de aderência entre WTUD e CA, o que torna-se menos preocupante uma vez que o fenômeno se manifesta mais claramente a temperaturas superiores àquelas presentemente observadas em comparação com estudos experimentais conduzidos por Noda *et al.* (1998).

Tabela 3: Temperaturas médias no fundo das placas de WTUD

| Estação Climática | Período Diurno | Período Noturno |
|-------------------|----------------|-----------------|
| Outono | 20,6 | 14,5 |
| Inverno | 16,8 | 12,9 |
| Primavera | 27,2 | 20,7 |
| Verão | 33,5 | 24,0 |

A Tabela 4 apresenta a relação entre os diferenciais térmicos e a distância vertical entre pares de termo-resistores de fundo e topo (gradientes térmicos) encontrados durante as estações, bem como a correção dos valores mencionados pela extrapolação linear dos diferenciais térmicos atuantes em toda espessura de CCP.

Tabela 4: Relações entre diferenciais térmicos e espessura de WTUD (gradiente)

| Estação Climática | ΔT (°C) | $\Delta T/t$ (°C/mm) | Retificado ΔT (°C) |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| <i>Diferenciais Térmicos Diurnos</i> | | | |
| Outono | 8,4 | 0,115 | 10,9 |
| Inverno | 7,8 | 0,107 | 10,2 |
| Primavera | 9,4 | 0,129 | 12,2 |
| Verão | 11,7 | 0,160 | 15,2 |
| <i>Diferenciais Térmicos Noturnos</i> | | | |
| Outono | -3,1 | -0,042 | -4,0 |
| Inverno | -2,4 | -0,033 | -3,1 |
| Primavera | -4,2 | -0,058 | -5,3 |
| Verão | -3,6 | -0,049 | -4,7 |

Nestes dados, a mais significativa variação dos gradientes térmicos diurnos durante as estações é de 0,160 °C/mm durante o verão para 0,107 °C/mm no inverno. Não obstante, a retificação dos diferenciais térmicos conduz a um diferencial térmico máximo de 15,2 °C que pode ser considerado um valor muito elevado para efeitos de empenamento em placas de WTUD com dimensões ultrapassando 1,6 m, encontradas em experimentos internacionais.

Durante o outono a temperatura de topo de 32,6 °C ocorreu no dia 28 de maio, próximo às 13h, com a temperatura de fundo de 25,1 °C, resultando em um diferencial térmico de 7,5 °C; no último dia de inverno, 21 de setembro, a temperatura de topo era de 43,8 °C e o diferencial térmico positivo registrado foi de 9,1 °C, às 14h. Tais valores exemplificam as similaridades de temperaturas entre o final de outono, inverno e início de primavera, associadas às condições típicas de temperatura do ar e umidade características da cidade de São Paulo (temperaturas amenas e clima seco).

A Tabela 5 foi construída a partir de 184 dias ininterruptos de leitura de temperaturas até o dia 31 de dezembro de 2000. Os dados estatísticos consolidam-se como uma tentativa de classificar a distribuição dos diferenciais térmicos diurnos e noturnos ao longo das estações em faixas de ocorrências dos quais torna-se possível concluir que a ocorrência de diferentes faixas de diferenciais térmicos pode ser tomada, por simplicidade, em dois blocos: outono/inverno e primavera/verão, conforme Pereira (2001). Balbo *et al.* (2001) complementam, afirmando, que a origem provável destes resultados reside no fato de parte da primavera ter as mesmas condições climáticas do verão, sucedendo o mesmo fenômeno durante o outono e o inverno; aliás, a radiação solar nestes dois blocos também é semelhante.

Tabela 5: Distribuição de freqüências de diferenciais térmicos ao longo das estações, em %

| Faixa de diferenciais térmicos | Outono | Inverno | Primavera | Verão | Ano |
|---|--------|---------|-----------|-------|-------|
| Menos que $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,1 |
| Entre -6 e $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 1,1 | 0,8 | 4,1 | 1,0 | 1,9 |
| Entre -3 e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 49,2 | 49,7 | 58,9 | 59,5 | 53,3 |
| Entre 0 e $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 40,0 | 37,7 | 18,9 | 18,7 | 30,5 |
| Entre 3 e $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 7,3 | 6,0 | 9,4 | 10,8 | 7,7 |
| Entre 6 e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 2,4 | 4,6 | 5,9 | 7,8 | 5,0 |
| Maior que $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 0,0 | 1,2 | 2,6 | 2,1 | 1,6 |
| Σ | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Para o bloco outono/inverno, as placas de WTUD estão submetidas, grande parte do tempo, aproximadamente 50% do dia (12h por dia), a diferenciais térmicos entre $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na faixa entre $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, no outono/inverno, as placas ficam submetidas em 90% do dia. Em relação aos diferenciais térmicos noturnos (menores que $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$), extrai-se da Tabela 5 uma menor importância para os dois blocos. Para o período primavera/verão, a freqüência de diferenciais térmicos entre $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é de 60%, enquanto diferenciais térmicos entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ estão presentes em 20% do tempo.

Tais resultados, revelam uma importante diferença entre as distribuições dos diferenciais térmicos em distintas condições climáticas. Infere-se dos mesmos também que as faixas de maior ocorrência de diferenciais térmicos nas placas estudadas não possuem significativa influência sobre as tensões de tração no CCP, sobretudo para as pequenas dimensões de placas.

Os números apresentados na Tabela 5 convergem para o fato de existir, durante a primavera/verão, uma grande incidência de diferenciais térmicos negativos, maior que no período frio, isto é, no outono/inverno. Em contrapartida, na primavera e no verão, ocorrem elevados valores de diferenciais térmicos positivos. Se diferenciais térmicos positivos são importantes acima de $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, pode-se dizer que para condições climáticas semelhantes ao caso em estudo, não haverá necessidade de avaliação de tensões devidas aos diferenciais térmicos para WTUD com dimensões até 1,2 m.

Fundamentando-se em todas as medidas realizadas no ano de 2000 pode-se concluir de modo muito seguro sobre a possibilidade de tratamento dos dados em dois blocos distintos. Para encerrar esta discussão, apresentam-se as médias encontradas para as temperaturas de topo e diferenciais térmicos durante todos os dias de leituras em cada estação, e não somente para as respectivas semanas típicas, conforme consta na Tabela 2.

- Média das máximas temperaturas de topo (meio-dia): $27,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (outono); $28,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (inverno); $39,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (primavera); e $41,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (verão);
- Média das mínimas temperaturas de topo (manhã): $12,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (outono); $12,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (inverno); $19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (primavera); e $21,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (verão);
- Média dos máximos diferenciais térmicos (diurno): $6,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (outono); $7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (inverno); $8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (primavera); e $9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (verão);

- Média dos mínimos diferenciais térmicos (noturnos): -2,2 °C (outono); -2,3 °C (inverno); -3,8 °C (primavera); e -3,1 °C (verão).

No que diz respeito aos diferenciais térmicos máximos negativos, o estudo constatou que o efeito das chuvas tropicais é o principal fator interveniente no processo. A Figura 1 traduz graficamente o efeito deste tipo de precipitação atmosférica sobre os diferenciais térmicos nas placas. No exemplo, a chuva ocorreu no dia 24 de dezembro de 2000, iniciando às 15h16 e prolongando-se até às 16h26. O diferencial térmico positivo pouco antes do início da precipitação era de 8,1 °C, às 14h 46min. Com a chuva, uma queda acentuada na temperatura de topo foi verificada, com conseqüente inversão entre a temperatura de topo e fundo. Cessada a precipitação, às 16h26, o diferencial térmico passou a ser -7,4 °C.

2.2. Deformações devidas ao empenamento e a cargas

Deformações devidas exclusivamente a diferenciais térmicos nas placas de WTUD foram extremamente difíceis de analisar face à necessidade de dividi-las em duas parcelas: deformação registrada pelo *strain-gage* induzida pela temperatura e deformação no *strain-gage* devida ao empenamento. Com este propósito, foi necessário proceder a uma calibração dos *strain-gages*, simulando exclusivamente mudanças de resistência elétrica devida à temperatura, que oscilou entre 0 °C e 50 °C (faixa de trabalho dos *strain-gages*). Mesmo com o extremo cuidado com que foi realizada a calibração, nenhum resultado quantitativo satisfatório foi passível de se obter com este tipo de procedimento, comprovando ter este tipo de abordagem grande dificuldade ante aos inúmeros fatores intervenientes.

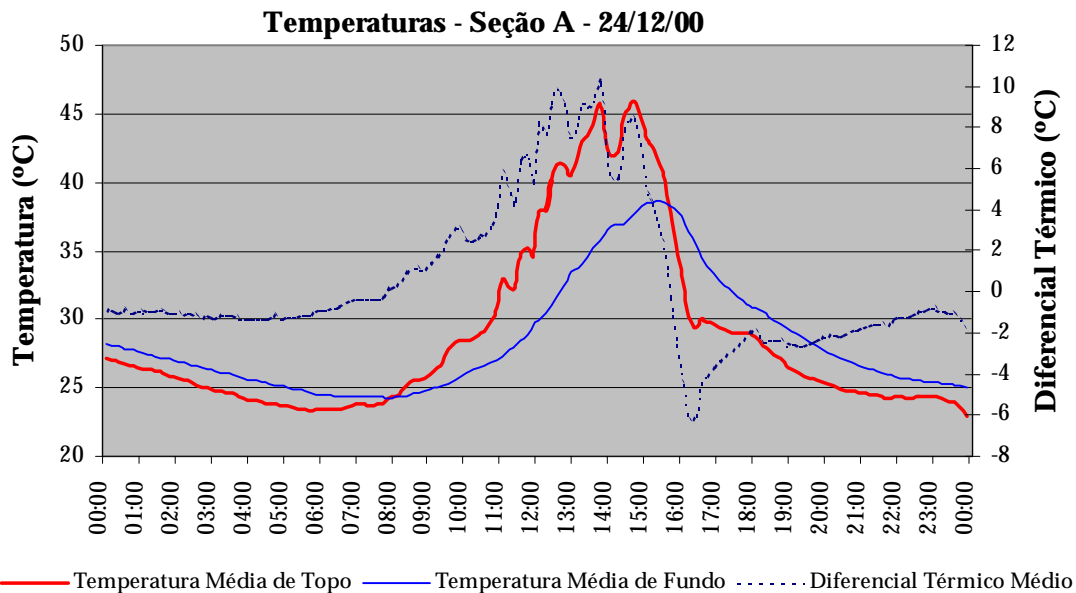


Figura 1: Comportamento das temperaturas e diferenciais térmicos ante uma chuva tropical

Os níveis típicos de tensões induzidas nas placas de concreto de cimento Portland por efeito de temperatura variam entre 0,0015 e 0,0025 MPa, concorrendo para a pouca importância deste fenômeno no comportamento à fadiga das do CCP, conforme simulações por elementos finitos, para diferenciais térmicos de 15,2 °C atuantes nas placas de 0,6 x 0,6 m e 1,0 x 1,0 m, respectivamente.

Este tipo de dificuldade foi, anteriormente, observado por Barenberg e Zollinger (1990) em estudos nos Estados Unidos. A Figura 2 traduz graficamente a típica variação diária da temperatura de topo e as medidas de deformações. As respostas dos *strain-gages* acompanham perfeitamente a temperatura de topo da placa, tanto para os picos máximos quanto mínimos.

Por outro lado, as medidas de deformações (com *strain-gages*) no CCP induzidas por cargas foram muito consistentes tanto para provas de carga estática quanto para provas de carga dinâmica, sendo que as últimas apresentaram melhor definição. O banco de dados completo dos testes estáticos encontra-se em Pereira (2001), sendo alguns dos resultados obtidos indicados na Tabela 6, para tensões causadas por pneus calibrados com 0,621 MPa onde são também indicados os resultados esperados por modelagem numérica do problema.

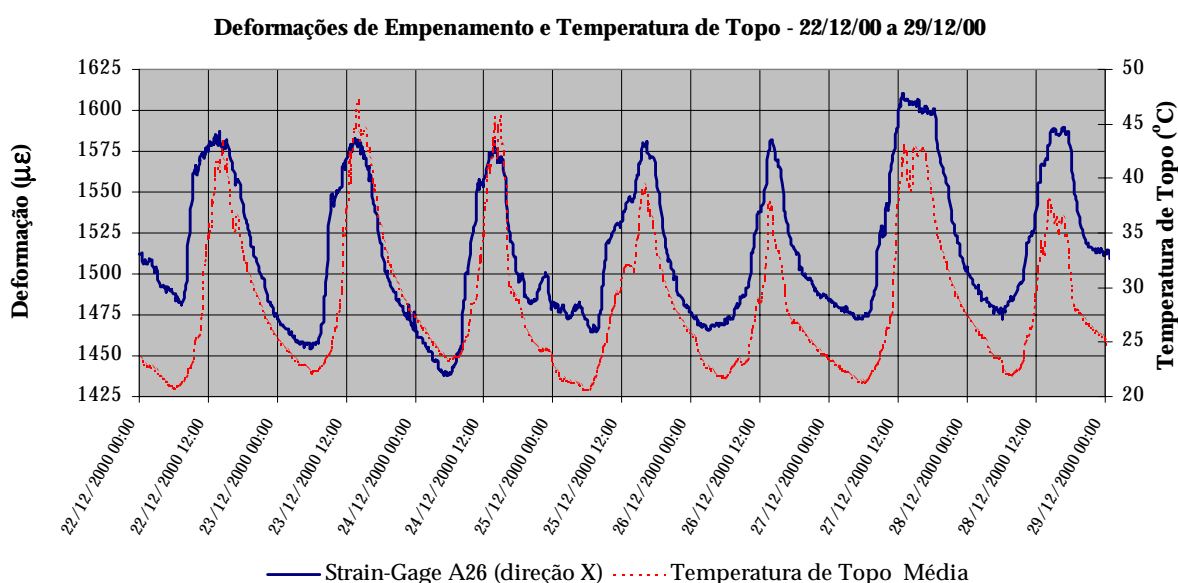


Figura 2: Variação das temperaturas de topo e das respostas dos *strain-gages* durante uma semana típica de verão

Tabela 6: Confronto entre tensões oriundas de provas de carga estática *versus* modelagem numérica

| Placas | Tensões (MPa) devido ao ESRS (31,6 kN) | | | | Tensões (MPa) devido ao ESRD (87,0 kN) | | | |
|--------|--|-------|----------|-------|--|-------|----------|-------|
| | TOPO | | FUNDO | | TOPO | | FUNDO | |
| | Numérico | Campo | Numérico | Campo | Numérico | Campo | Numérico | Campo |
| A23 | | | | | | | 0,96 | 1,60 |
| A26 | | | 0,52 | 0,90 | | | 0,80 | 1,90 |
| A28 | -0,81 | -0,40 | | | | | | |
| A29 | | | 0,33 | 0,20 | | | | |
| A31 | | | 0,53 | 0,60 | | | | |
| A32 | -0,70 | -0,30 | | | | | | |
| A34 | -0,77 | -0,20 | 0,72 | 0,50 | 0,27 | 0,20 | | |
| B02 | 0,41 | 0,90 | | | | | | |
| B03 | | | | | -0,06 | -0,40 | 0,05 | 0,40 |
| B06 | -0,55 | -0,60 | | | | | | |
| B07 | -0,65 | -0,30 | | | -0,40 | -0,50 | | |
| B12 | | | | | -0,69 | -0,80 | | |
| B13 | -0,94 | -0,50 | | | | | | |
| B15 | | | | | -0,20 | -0,80 | | |

Os valores calculados numericamente foram obtidos a partir de simulações por elementos finitos com auxílio do programa FEACONS 4.1 SI. As deformações medidas nos *strain-gages* foram transformadas em tensões pelo módulo de elasticidade do CCP empregado nas placas que resultou em 38 GPa. O módulo de reação do subleito adotado nas análises foi de 65 MPa/m por tratar-se de solo laterítico argiloso pouco resiliente.

É oportuno comentar que as tensões apresentadas anteriormente não correspondem, necessariamente, às máximas tensões de tração (+) e compressão (-) no interior do CCP, mas às tensões na posição exata de cada um dos *strain-gages*.

Alguns resultados díspares constantes na Tabela 6 podem ser atribuídos à temperatura, uma vez que esta afeta intensamente a resistência elétrica dos *strain-gages* e, por conseguinte, as medidas de deformação. A variação em 1 °C da temperatura no *strain-gage* provoca uma oscilação nas leituras da mesma ordem de grandeza das deformações obtidas pela ação do carregamento rodoviário (Pereira, 2001). No entanto, os valores indicados na Tabela 6 apresentam discrepâncias inferiores a outros encontrados na literatura internacional, como é o caso do artigo publicado por Mack *et al.* (1993). Na ocasião, as tensões máximas de tração na borda resultantes de análise numérica foram de 2,29 e 3,70 MPa, para as placas de 51 e 89 mm, respectivamente, ambas com largura de 1,83 m. Na mesma ordem, os valores experimentais obtidos (em pista) foram de 2,95 e 1,12 MPa.

Em relação ao posicionamento da linha neutra, conforme esperava-se por análise numérica, verificou-se muito leve deslocamento da mesma para baixo do plano médio da placa de CCP. A modelagem por elementos finitos conduziu para o posicionamento da linha neutra a 44,6 mm do fundo da placa de WTUD, enquanto as provas de carga conduziram a valores próximos a 47,5 mm do fundo (Pereira, 2001).

As provas de carga dinâmica mostraram-se muito coerentes face às deformações obtidas desta maneira, onde a temperatura, por razões óbvias, não teria influência no registro rápido de uma deformação transiente devida a carregamento. Para exemplificar, na Figura 3 são apresentados

os registros de deformações na placa A27 quando o mesmo caminhão utilizado nas provas de carga estática solicitava tal placa a 20 km/h, adquiridas a uma frequência de 250 Hz.

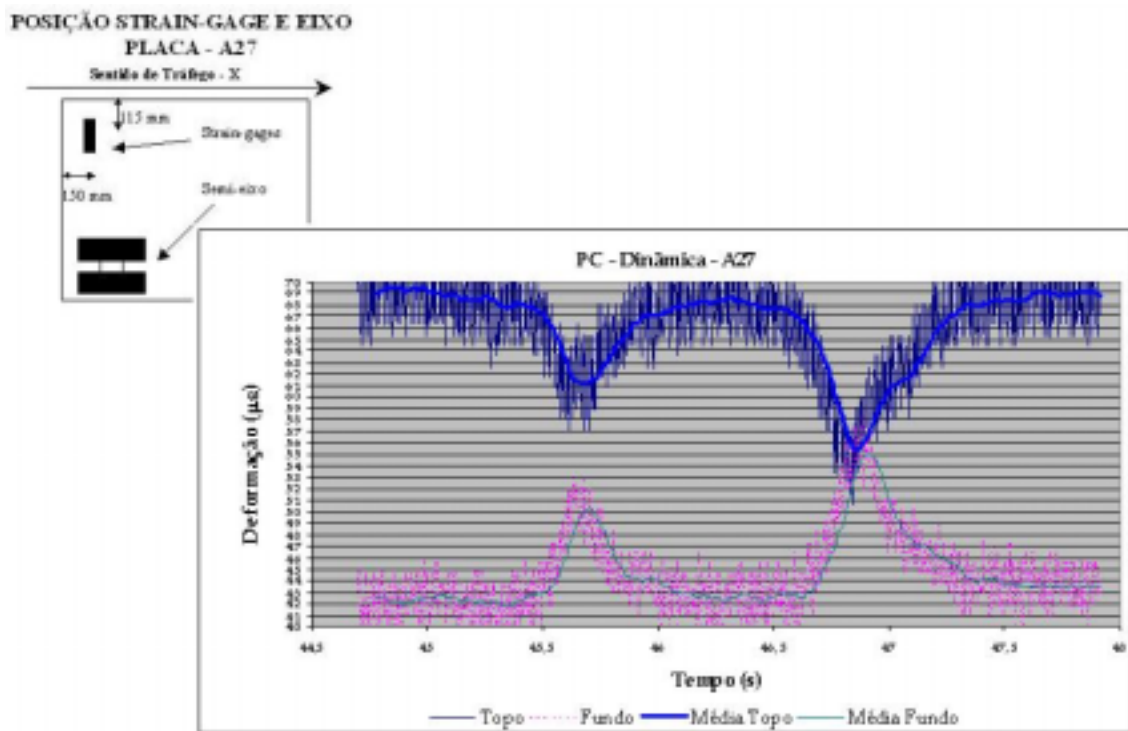


Figura 3: Linhas de influência dos eixos sobre as deformações nos *strain-gages* da placa A27

O ESRS causou uma tensão de 0,29 MPa (tração) no topo da placa e de -0,30 MPa (compressão) no fundo. Por sua vez, o ESRD causou esforços de tração no CCP de 0,47 MPa e de compressão, nas fibras inferiores nesse caso, de -0,51 MPa. Da mesma maneira que encontrado durante as análises das provas de carga estática, as dinâmicas conduziram, para o caso exposto, a um posicionamento da linha neutra a 49,5 mm do fundo do WTUD.

2.3. Desempenho observado

Desde aberto ao tráfego, em novembro de 1999, aproximadamente 143.000 eixos de ônibus e caminhões médios solicitaram o WTUD. O ICP manteve-se constante desde a execução do pavimento, quando apresentava na seção A, um valor de 99, ocasionado por dois pequenos esborcinamentos nas placas A39 e A40, e duas fissuras de retração plásticas, não superiores a 100 mm nas placas A25 e A33. Nenhuma evolução de defeitos foi percebida em sucessivos levantamentos realizados no trecho experimental que ocorrem com uma periodicidade mensal. A seção cujas placas apresentam uma maior dimensão em planta (B de 1,0 x 1,0 m), prosseguem com ICP igual a 100, que classificam ambas seções como excelente. Não se observa até o momento qualquer movimentação entre placas que pudesse refletir perda de aderência entre CA e WTUD.

Aplicando os resultados obtidos neste estudo experimental como parâmetros de entrada do programa computacional WTUD v.1.0 (ABCP, 2001), duas situações puderam ser verificadas para as seções estudadas, tomando-se um período de projeto de 20 anos e taxa de crescimento

linear anual de 0,5% do tráfego. Foram considerados os efeitos de eixos dianteiros (ESRS de 50 kN) e traseiros (ESRD de 80 kN) na análise. As placas com 0,6 m de lado suportariam uma solicitação média diária de 930 ônibus, com consumo final de resistência à fadiga de 100%. As placas de 1,0 x 1,0 m, por sua vez, suportariam um VDM de 240 ônibus, com o mesmo consumo do caso de resistência à fadiga do caso anterior. Em ambas as situações, uma longa vida de serviço é esperada para as seções experimentais nas condições reais de carregamento.

3. CONCLUSÕES

No que tange à esfera de temperaturas e, principalmente, diferenciais térmicos, parece estar encerrada a discussão para placas de WTUD com dimensões máximas de 1,2 m, quanto à importância ou não de se considerar tensões motivadas por empenamento destas pequenas placas delgadas. Tal assertiva fundamenta-se nas análises numéricas realizadas com o propósito de quantificar o efeito dos diferenciais térmicos sobre as tensões críticas nas placas de CCP bem como pelas análises realizadas em pista, embora ocorra enorme dificuldade de mensuração de deformações de empenamento registrada por instrumentos.

Além da possibilidade de desconsideração dos diferenciais térmicos de acordo com o exposto anteriormente, verificou-se, experimentalmente, a adequação de emprego dos modelos numéricos para previsão de tensões críticas no WTUD desenvolvidos pelo Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LMP) da Escola Politécnica da USP, que acabaram por dar origem ao programa “*Whitetopping Ultradelgado, versão 1.0 - WTUD v.1.0*” (ABCP, 2001).

As provas de carga estáticas convergiram para a necessidade de um considerável número de instrumentos, sobretudo *strain-gages*, para obtenção de resultados médios confiáveis. É importante focar de maneira mais intensa as potencialidades das provas de carga dinâmicas como meio eficiente e confiável de mensuração das tensões atuantes no interior do concreto de cimento Portland.

Quando do emprego do WTUD sobre camadas de concreto asfáltico de pequenas espessuras, como se aferiu tanto numérica quanto experimentalmente, não obtém-se contribuição da camada asfáltica na redução das tensões de tração nas placas de CCP, conforme seria desejável para um sistema composto (com rebaixamento da linha neutra na placa de CCP).

A continuidade do monitoramento das seções experimentais, com avaliação do processo de fissuração por fadiga do concreto, futuramente, poderá servir de base para validação/ajuste do critério de dimensionamento de WTUD disponível no país (ABCP, 2001).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado e, posteriormente, de doutorado concedida ao autor principal do artigo, bem como pelo auxílio individual à pesquisa concedido ao co-autor, apoio sem o qual teria sido muito mais penoso a execução do estudo em pista experimental relatado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP (2001) *Programa Whitetopping Ultradelgado versão 1.0 – WTUD v.1.0*. (CD-ROM) Associação Brasileira de Cimento Portland e Universidade de São Paulo, Laboratório de Mecânica de Pavimentos, Escola Politécnica, Registro no. 000.004 em 16.01.2001, Biblioteca Nacional, São Paulo.
- ACPA (1996) *Ultra-thin whitetopping - new choice for pavement overlay*. <http://www.irmca.com/utw/>.
- ACPA (1998) *Whitetopping: state of the practice*. Engineering Bulletin, American Concrete Pavement Association.
- Balbo, J. T. (1999) *Contribuição à análise estrutural de reforços com camadas ultradelgadas de concreto de cimento Portland sobre pavimentos asfálticos (whitetopping ultradelgado)*. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 195p, São Paulo.
- Balbo, J. T.; Pereira, D. S. e Severi, A. A. (2001) *Behavior and performance of UTW on thin asphalt pavement*. 7th International Conference on Concrete Pavements, pp. 825-837, Orlando.
- Barenberg, E.J. e Zollinger, D.G. (1990) *Validation of concrete pavement responses using instrumented pavements*. Transportation Research Record 1286, pp.67-77, Washington D.C.
- Cole, L. W., Mack, J. e Packard, R. (1998) *Whitetopping and ultrathin whitetopping - the U.S. experience*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 203-218, Lisbon.
- Hawbaker, L. (1996) *Summary report of UTW in North America 1988-1995*. National Ready Mix Concrete Association & American Concrete Pavement Association.
- Mack, J.W, Cole, L. W. e Mohsen, J. P. (1993) *Analytical considerations for thin concrete overlays on asphalt*. Transportation Research Record No. 1388, pp. 167-173, Washington, D.C.
- Mack, J.W.; Hawbaker, L.D. e Cole, L.W. (1998) *Utra-thin whitetopping (UTW): the state-of-the-practice for thin concrete overlays of asphalt*. Paper presented for the TRB meeting of 1998, Washington, D.C.
- Noda, E.; Kong, Y. e Kasahara, Y. (1998) *Fundamental study on bonded ultrathin whitetopping*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 67-76, Lisbon.
- Pereira, D. S. (2001) *Estudo de gradientes térmicos e deformações em whitetopping ultradelgado*. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 172p, São Paulo.
- Pereira, D. S. e Balbo, J. T. (2001) *Gradientes térmicos em Whitetopping ultradelgado na pista experimental instrumentada na USP*. Transportes, v. 9, n. 1, p. 69-87, Rio de Janeiro.
- Silva, P. D. E. A. (2001) *Estudo do reforço de concreto de cimento (whitetopping) na pista circular experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias*. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, 358p, Rio de Janeiro.

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PTR

Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2, nº 83

Cidade Universitária – São Paulo

CEP 05.508-900

Fone: (11) 3091-5306

Fax: (11) 3091-5716

<http://www.ptr.usp.br/lmp>

e-mail: dsp@usp.br

jotbalbo@usp.br