

ARTIGO

GRADIENTES TÉRMICOS EM WHITETOPPING ULTRADELGADO NA PISTA EXPERIMENTAL INSTRUMENTADA NA USP

Deividi da Silva Pereira

José Tadeu Balbo

Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho apresenta, primeiramente, uma sucinta descrição da execução de um trecho experimental de *Whitetopping* Ultradelgado (WTUD) no campus da Universidade de São Paulo (USP) bem como de sua instrumentação. São apresentados e discutidos os resultados referentes a temperaturas obtidos por esta instrumentação durante o outono, analisando as diferenças encontradas nos diferenciais térmicos para placas de diferentes dimensões, obtidos por termoresistores instalados nos cantos, bordas e centro das mesmas. Com base em medidas de deformação obtidas por *strain-gages* são avaliados valores típicos das tensões induzidas no WTUD pelo efeito isolado do gradiente térmico sobre as placas de concreto de cimento Portland (CCP).

ABSTRACT

This paper presents a summarized description of the construction and instrumentation of a Ultra-Thin Whitetopping (UTW) test section at the University of Sao Paulo (USP). Typical data of temperatures during the fall are presented, as well as an analysis of the influence of slab dimensions on the results for corners, borders and center slabs temperature differentials measured by thermal resistors. On the basis of deformation measurements, it is presented an evaluation of the induced stresses by thermal gradients on UTW.

1. INTRODUÇÃO

O WTUD é um pavimento do tipo composto em que as placas CCP trabalham de forma aderida ao concreto asfáltico (CA) existente. Justamente por tratar-se de um pavimento composto é que torna-se possível o emprego de placas ultradelgadas de CCP, quando o CA trabalha em flexão absorvendo parte dos esforços oriundos de cargas e gradientes térmicos.

O emprego do WTUD surgiu nos Estados Unidos da América no ano de 1991 quando a *American Concrete Pavement Association* (ACPA) aplicou esta técnica em uma via com tráfego de 500 caminhões diários próximo à cidade de *Louisville*, no estado de *Kentucky*. (Risser et al., 1993; Cole et al., 1998).

As pequenas dimensões em planta das placas de CCP (geralmente variando entre 0,6 e 1,2 m) adicionadas ao emprego de CCP de alta resistência à tração na flexão são fatores essenciais para um desempenho favorável desta técnica, que habilita-se como uma alternativa de manutenção preventiva de pavimentos que possuem recorrentes deficiências funcionais e são solicitadas por um tráfego de leve a moderado.

Envidando esforços para o estudo desta recente tecnologia de manutenção de pavimentos nas condições do Brasil, o Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da USP (LMP), com suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), concebeu um projeto que contemplou a execução de uma pista experimental com WTUD, devidamente instrumentada com medidores de deformações e de temperaturas, dentro do Campus da Cidade Universitária na capital do Estado.

A instrumentação em pista vem permitir a análise do empenamento oriundo do gradiente térmico presente nas placas durante as diversas estações climáticas bem como, potencializar a realização de provas de carga, cujo objetivo maior, no futuro, será a calibração de modelos numéricos para cálculo de tensões em WTUD, já desenvolvidos pelo LMP.

2. EXECUÇÃO DA PISTA

Para a execução da pista experimental foram analisados vários locais dentro do Campus da USP a fim de encontrar um ponto que atendesse melhor algumas premissas importantes quando da utilização desta técnica. Estes pontos compreendiam espessura de CA remanescente que conduzisse a aproximadamente 50 mm, após a fresagem; base que apresentasse uma condição de não contaminação de finos; boa capacidade de suporte das camadas integrantes do pavimento e disponibilidade de água para a cura do concreto. Outros aspectos de cunho não técnico, mas operacional, foram levados em consideração, tais como a segurança para que as leituras de dados pudessem ser realizadas nos diversos períodos do dia e da noite e a presença de sombras sobre a pista experimental.

A pista foi executada durante primeira semana de novembro de 1999. A execução contemplou uma fresagem superficial de aproximadamente 10 mm, a fim de auxiliar no processo de aderência entre o CA e o CCP. Após esta etapa, procedeu-se a retirada do material solto sobre o pavimento fresado e posterior lavagem do mesmo para que algum resíduo de óleo e material pulverulento fossem retirados visando uma melhor condição de exposição do agregado da mistura asfáltica. As fôrmas foram executadas no local, sendo afixadas ao pavimento asfáltico por meio de pregos de aço. Depois, os instrumentos medidores de deformação (*strain-gages*) e de temperatura (termoresistores do tipo PT-100) foram instalados de acordo com o projeto de instrumentação.

O CCP utilizado na pista experimental apresentou, conforme especificado, uma resistência de tração na flexão de 5 MPa após 48 h, e de 7 MPa após 7 dias. O CCP utilizado apresentava adição de microssílica, num consumo aproximado de 6% do peso de cimento Portland.

O emprego deste tipo de CCP obrigou a realização da chamada serragem “verde” das juntas para evitar o surgimento de fissuras por retração hidráulica durante as reações de hidratação do cimento Portland (Armaghani e Tu, 1998). Tal etapa foi executada entre 2 e 3 h após a concretagem, sendo que as placas quadradas de WTUD

resultaram com 95 mm de espessura, com dimensões em planta de 0,6 e de 1,0 m, todas aderidas a uma camada asfáltica de aproximadamente 45 mm. A cura do CCP foi realizada, primeiramente, com auxílio de um produto químico de pigmentação branca à base de PVA e posteriormente por via úmida com emprego de manta de polietileno, durante três dias consecutivos.

A pista experimental com WTUD foi liberada ao tráfego após 6 dias de sua concretagem. Desde o mês de novembro de 1999 até o presente momento, o WTUD tem suportado sem sinais de ruína um tráfego diário de cerca de 130 ônibus e 15 caminhões.

3. INSTRUMENTAÇÃO DO WTUD

Mack et al. (1998) e Balbo e Rodolfo (1998b) evidenciaram numericamente, em modelagem por elementos finitos, que a posição crítica da carga, sob o ponto de vista de tensão de tração no CCP, encontra-se no canto das placas de WTUD, sendo este submetido às máximas tensões de tração em suas fibras superiores.

Para o caso dos eixos tandem em uso corrente nas rodovias brasileiras, Balbo e Rodolfo (1998a) concluem que somente um eixo dos seus dois ou três eixos tandem solicitariam a placa de WTUD caso esta tenha as dimensões máximas em planta de 1,2 m, e ainda que ao menos uma das placas de CCP estaria sendo solicitada na posição crítica, numa faixa de rolamento com seção transversal entre 2,5 e 3,6 m.

Com o intuito de verificar quais seriam os níveis de deformação atuantes no CCP quando da solicitação de diferentes cargas e posterior transformação destes valores em tensões, procedeu-se a instrumentação da pista experimental, sendo as posições para a colocação dos *strain-gages* escolhidas de forma a contemplar bordas transversais e longitudinais, canto e centro das placas, próximo ao topo e fundo das mesmas, sendo as deformações medidas na direção do tráfego (X) e na direção transversal (Y). Assim, ter-se-iam várias posições instrumentadas capazes de fornecer informações quanto à posição da linha neutra (LN) em diferentes fases da vida útil deste

tipo de pavimento, uma vez que o posicionamento da LN acusaria uma eventual perda de aderência ao longo do tempo.

A pista experimental permite também a mensuração do efeito do gradiente térmico (sob a forma de diferenciais térmicos) sobre o empenamento das placas de WTUD, através da análise conjugada de deformações e temperaturas, visto a presença de termoresistores do tipo PT-100, próximos à superfície e ao fundo do CCP, nas posições de canto, centro e bordas longitudinal e transversal.

Balbo (1996) mencionava a importância do empenamento sobre o comportamento à fadiga do CCP, uma vez que este induz tensões nas placas de CCP, seja este convencional ou do tipo WTUD, alterando o nível de tensão a que o pavimento poderá estar submetido quando do efeito conjunto de carregamento, oriundo do tráfego, e do gradiente térmico. Em projetos de pavimentos de CCP este efeito é desconsiderado.

Além de alterar as tensões impostas ao CCP, o empenamento pode provocar a perda de aderência entre o CA e o CCP, desconfigurando então o comportamento composto assumido, fato que elevará significativamente as tensões nas placas de CCP, levando à ruína precoce do WTUD (Nishizawa et al., 1999).

A pista de WTUD executada no campus da USP na cidade de São Paulo possui a extensão de 9,8 m, com 3,0 m de largura, com um total de 48 *strain-gages* e 18 PT-100. O projeto da pista bem como a posição dos instrumentos em planta e perfil são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3.

Os *strain-gages* foram instalados com auxílio de uma estrutura construída em aço de construção civil de 5 mm de diâmetro. Tomou-se o cuidado de utilizar o menor diâmetro possível capaz de fornecer a firmeza necessária ao conjunto uma vez que esta deveria suportar os esforços oriundos da concretagem, sem que, no entanto, este suporte enrijecesse de forma acentuada a região onde as leituras de deformação seriam realizadas (Figura 4).

Em relação ao suporte dos PT-100, pensou-se inicialmente em afixá-los com auxílio de chapas de aço. Tal idéia foi abolida uma vez que o aço possui propriedades de condução térmica muito diferentes das do CCP, podendo assim interferir sobre as leituras de temperatura. Optou-se então pelo emprego de PVC como material constituinte do suporte dos PT-100 (Figura 4). Todos suportes dos instrumentos foram fixados no CA fresado com pregos e ganchos de aço.

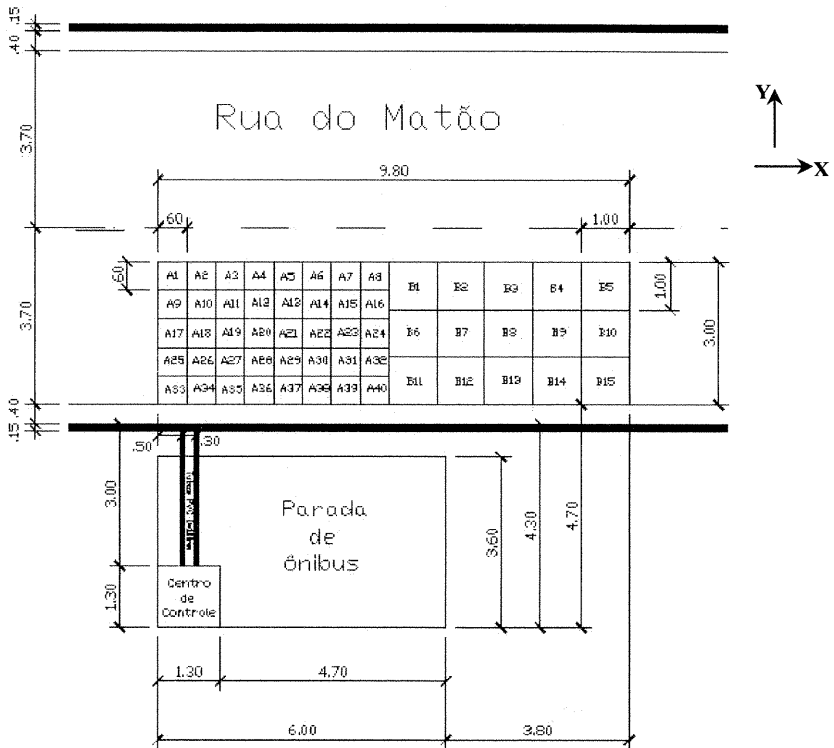


Figura 1: Projeto geométrico da pista experimental

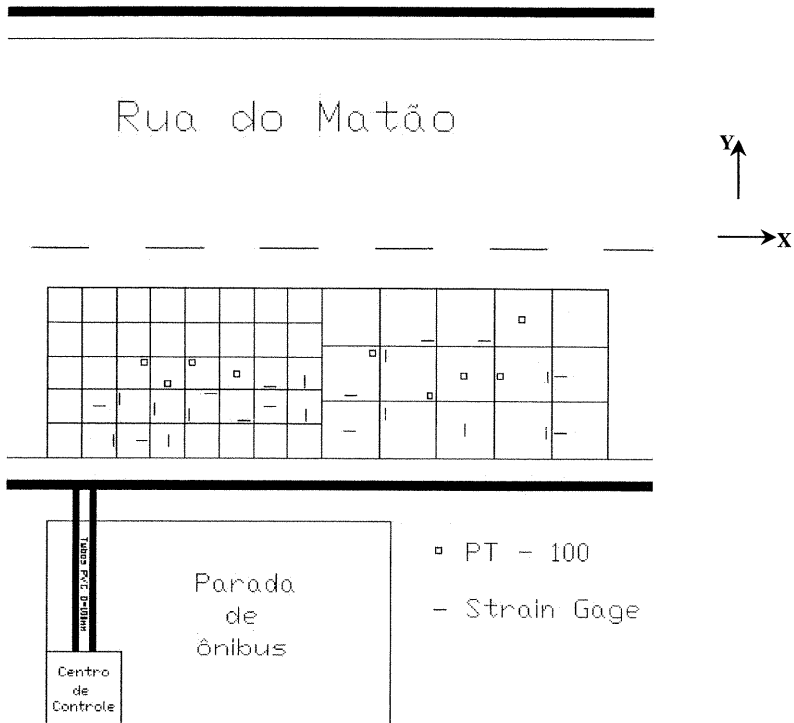


Figura 2: Localização dos instrumentos

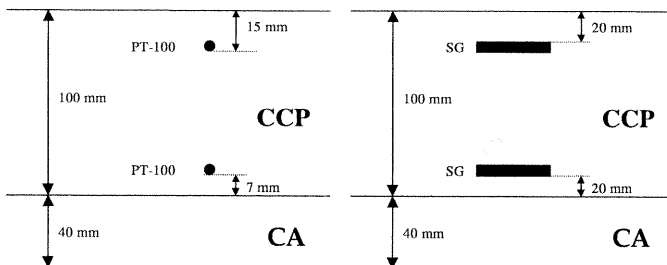


Figura 3: Localização em perfil dos PT-100 e *strain-gages*



Figura 4: Detalhe da fixação dos *strain-gages* e dos PT-100

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Temperaturas e Gradientes Térmicos

A coleta de dados tem permitido a análise da variação diária da temperatura no WTUD bem como a variação das deformações para diferentes valores de gradientes térmicos uma vez que vem sendo empregado um sistema contínuo de leituras.

As Tabelas 1, 2, 3 e 4 mostram como as temperaturas e, por consequência, os gradientes térmicos oscilam para condições climáticas típicas do outono tropical, tendo variantes as posições dos medidores de temperatura e as dimensões em planta das placas de

CCP sobreposto ao CA. As variações típicas de temperatura e gradiente térmico durante um dia típico de outono em São Paulo são apresentadas graficamente nas Figuras 5 e 6.

Tabela 1: Temperaturas típicas de outono no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m

Data	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)				Temperaturas Médias (°C)			
	Global	B. Long	Canto	Centro	Global	B. Long	Canto	Centro	Global	B. Long	Canto	Centro
31/05	27,1	21,3	27,1	26,3	15,9	16,8	16,3	15,9	19,6	18,8	19,4	19,5
01/06	18,8	16,9	16,4	16,8	13,5	14,5	13,6	13,5	15,3	15,5	14,6	14,9
02/06	24,0	21,5	24,0	23,9	12,3	13,4	12,4	12,3	16,4	16,4	15,9	16,1
03/06	25,0	24,1	24,5	25,0	11,7	13,2	12,3	11,7	16,8	16,9	16,3	16,5
04/06	28,1	26,7	27,8	28,1	14,3	15,1	14,3	14,5	18,4	18,4	17,9	18,1
05/06	27,5	26,5	27,5	27,5	12,9	14,4	13,6	12,9	17,9	17,8	17,4	17,5
06/06	26,8	25,8	26,8	26,5	12,3	13,6	12,6	12,3	17,4	17,3	17,1	17,0
07/06	28,9	27,4	28,9	28,1	12,2	13,5	12,5	12,2	16,2	16,2	15,8	15,9
MÁX	28,9	27,4	28,9	28,1	15,9	16,8	16,3	15,9	19,6	18,8	19,4	19,5
MÍN	18,8	16,9	16,4	16,8	11,7	13,2	12,3	11,7	15,3	15,5	14,6	14,9
MÉD	25,8	23,8	25,4	25,3	13,1	14,3	13,5	13,2	17,3	17,2	16,8	16,9

Tabela 2: Diferenciais térmicos típicos de outono no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m

Data	Diferenciais Máximos (°C)				Diferenciais Mínimos (°C)				Diferenciais Médios (°C)			
	Global	B. Long	Canto	Centro	Global	B. Long	Canto	Centro	Global	B. Long	Canto	Centro
31/05	5,8	1,8	5,8	3,2	-1,4	0,1	-0,2	-1,4	0,4	1,0	0,9	-0,7
01/06	1,5	1,5	1,1	0,1	-2,9	0,0	-0,6	-2,9	0,0	0,6	0,2	-0,9
02/06	6,3	4,7	6,3	4,7	-1,6	0,0	-0,4	-1,6	0,6	1,2	1,0	-0,2
03/06	7,0	7,0	6,6	5,9	-1,7	-0,2	-0,4	-1,7	0,7	1,2	1,0	-0,2
04/06	7,3	7,1	7,3	6,1	-1,6	-0,3	-0,6	-1,6	0,9	1,4	1,2	0,1
05/06	7,3	7,3	7,1	6,3	-1,7	-0,3	-0,6	-1,7	0,7	1,2	1,0	0,0
06/06	7,4	7,4	7,0	6,3	-1,6	-0,2	-0,6	-1,6	0,7	1,1	0,9	0,0
07/06	8,4	8,4	8,0	7,2	-1,6	-0,3	-0,6	-1,6	1,1	1,4	1,5	0,5
MÁX	8,4	8,4	8,0	7,2	-1,4	0,1	-0,2	-1,4	1,1	1,4	1,5	0,5
MÍN	1,5	1,5	1,1	0,1	-2,9	-0,3	-0,6	-2,9	0,0	0,6	0,2	-0,9
MÉD	6,4	5,7	6,2	5,0	-1,8	-0,2	-0,5	-1,8	0,6	1,1	1,0	-0,2

Tabela 3: Temperaturas típicas de outono no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m

Data	Temperaturas Máximas (°C)					Temperaturas Mínimas (°C)				
	Global	Centro	Canto	Centro	B.Tran	Global	Centro	Canto	Centro	B.Tran
20/05	22,1	22,1	19,5	20,4	S.L	13,5	15,1	13,5	13,7	S.L
21/05	27,7	27,7	21,7	26,1	S.L	13,4	15,3	13,4	13,7	S.L
22/05	31,9	31,9	21,0	29,4	S.L	11,7	13,7	11,7	11,9	S.L
23/05	31,4	31,4	21,3	28,5	S.L	12,5	14,8	12,5	13,2	S.L
24/05	30,7	30,7	20,2	27,6	S.L	11,8	13,9	11,8	12,2	S.L
25/05	31,4	31,4	20,3	28,1	26,0	10,6	13,7	11,6	12,1	10,6
26/05	32,1	32,1	21,8	29,0	26,7	11,2	14,5	12,4	12,8	11,2
27/05	21,3	21,3	19,3	19,8	18,9	12,9	16,0	13,8	14,4	12,9
28/05	32,6	32,6	18,3	28,4	26,7	10,1	13,0	11,0	11,6	10,1
29/05	29,3	29,3	16,9	25,4	23,7	7,1	10,5	8,1	8,5	7,1
08/06	29,7	29,7	19,7	27,4	24,9	10,2	13,6	11,3	11,9	10,2
09/06	27,6	27,6	20,3	26,2	24,3	10,5	14,2	11,6	12,2	10,5
10/06	26,5	26,5	22,5	26,1	24,2	13,1	16,5	13,8	14,7	13,1
11/06	28,4	28,4	21,6	25,6	24,0	12,2	15,8	13,4	13,8	12,2
12/06	27,8	27,8	19,9	25,2	23,5	12,1	15,3	13,4	13,7	12,1
13/06	27,8	27,8	21,2	25,9	23,4	10,9	14,6	12,3	12,6	10,9
MÁX	32,6	32,6	22,5	29,4	26,7	13,5	16,5	13,8	14,7	13,1
MÍN	21,3	21,3	16,9	19,8	18,9	7,1	10,5	8,1	8,5	7,1
MÉD	28,6	28,6	20,3	26,2	24,2	11,5	14,4	12,2	12,7	11,0

Data	Temperaturas Médias (°C)				
	Global	Centro	Canto	Centro	B.Tran
20/05	16,5	18,0	15,4	16,0	S.L
21/05	17,3	19,1	15,7	16,9	S.L
22/05	17,0	19,1	14,7	16,9	S.L
23/05	17,7	19,8	15,6	17,5	S.L
24/05	17,3	19,3	15,1	17,0	S.L
25/05	17,0	19,4	14,8	17,1	16,5
26/05	17,8	20,3	15,7	17,8	17,2
27/05	16,9	18,8	16,0	16,6	16,2
28/05	16,3	18,9	13,9	16,3	15,7
29/05	13,9	16,6	11,2	13,7	13,3
08/06	16,7	19,2	14,3	16,6	15,9
09/06	17,0	19,3	14,9	16,8	16,2
10/06	18,1	20,3	16,7	17,9	17,3
11/06	17,8	20,1	16,2	17,5	17,0
12/06	17,5	19,8	16,0	17,2	16,6
13/06	17,0	19,5	15,4	16,6	16,1
MÁX	18,1	20,3	16,7	17,9	17,3
MÍN	13,9	16,6	11,2	13,7	13,3
MÉD	17,0	19,2	15,1	16,8	16,2

S.L = Sem Leituras

Tabela 4: Diferenciais térmicos típicos de outono no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m

Data	Diferenciais Máximos (°C)					Diferenciais Mínimos (°C)				
	Global	Centro	Canto	Centro	B.Tran	Global	Centro	Canto	Centro	B.Tran
20/05	3,8	3,3	3,5	3,8	S.L	-2,0	-2,0	-0,5	-1,0	S.L
21/05	7,3	6,4	4,3	7,3	S.L	-2,0	-2,0	-0,6	-1,2	S.L
22/05	8,6	7,3	6,1	8,6	S.L	-2,1	-2,1	-0,7	-1,1	S.L
23/05	7,5	6,3	4,7	7,5	S.L	-2,0	-2,0	-0,5	-1,0	S.L
24/05	7,6	6,6	4,2	7,6	1,6	-3,1	-2,0	-0,5	-1,0	-3,1
25/05	8,0	7,0	3,9	8,0	5,8	-3,0	-1,9	-0,4	-0,8	-3,0
26/05	8,1	6,8	4,7	8,1	5,8	-3,0	-1,8	-0,4	-0,8	-3,0
27/05	2,4	1,1	2,4	2,2	-0,1	-2,9	-1,7	-0,3	-0,7	-2,9
28/05	8,9	7,6	3,7	8,9	6,7	-3,7	-2,6	-1,0	-1,5	-3,7
29/05	8,5	7,1	4,3	8,5	6,2	-3,7	-2,6	-1,1	-1,5	-3,7
08/06	8,4	7,5	4,8	8,4	6,1	-3,1	-1,8	-0,2	-0,7	-3,1
09/06	7,5	6,3	4,4	7,5	5,2	-3,0	-1,8	-0,2	-0,7	-3,0
10/06	5,4	4,2	4,5	5,4	3,1	-2,9	-1,9	-0,1	-0,6	-2,9
11/06	7,4	6,6	3,9	7,4	5,2	-2,9	-1,8	-0,1	-0,6	-2,9
12/06	6,9	5,9	3,1	6,9	4,6	-2,8	-1,7	-0,1	-0,6	-2,8
13/06	7,4	6,5	4,2	7,4	5,1	-3,1	-1,8	-0,2	-0,6	-3,1
MÁX	8,9	7,6	6,1	8,9	6,7	-2,0	-1,7	-0,1	-0,6	-2,8
MÍN	2,4	1,1	2,4	2,2	-0,1	-3,7	-2,6	-1,1	-1,5	-3,7
MÉD	7,1	6,0	4,2	7,1	4,6	-2,8	-2,0	-0,4	-0,9	-3,1

Data	Diferenciais Médios (°C)				
	Global	Centro	Canto	Centro	B.Tran
20/05	0,0	-0,7	0,5	0,1	S.L
21/05	0,3	-0,2	0,7	0,6	S.L
22/05	0,2	-0,2	0,5	0,6	S.L
23/05	0,3	-0,1	0,7	0,7	S.L
24/05	0,0	-0,3	0,5	0,6	-0,9
25/05	-0,1	-0,2	0,6	0,7	-1,4
26/05	0,1	0,0	0,8	0,8	-1,3
27/05	-0,2	-0,5	0,8	0,5	-1,7
28/05	-0,5	-0,5	0,1	0,4	-1,8
29/05	-0,6	-0,7	0,0	0,2	-2,0
08/06	0,1	-0,1	0,9	0,8	-1,4
09/06	0,2	-0,1	1,0	0,9	-1,3
10/06	0,2	0,0	1,2	0,9	-1,3
11/06	0,1	-0,1	1,0	0,8	-1,4
12/06	0,0	-0,2	1,0	0,7	-1,4
13/06	-0,1	-0,2	0,9	0,6	-1,6
MÁX	0,3	0,0	1,2	0,9	-0,9
MÍN	-0,6	-0,7	0,0	0,1	-2,0
MÉD	0,0	-0,3	0,7	0,6	-1,5

S.L = Sem Leituras

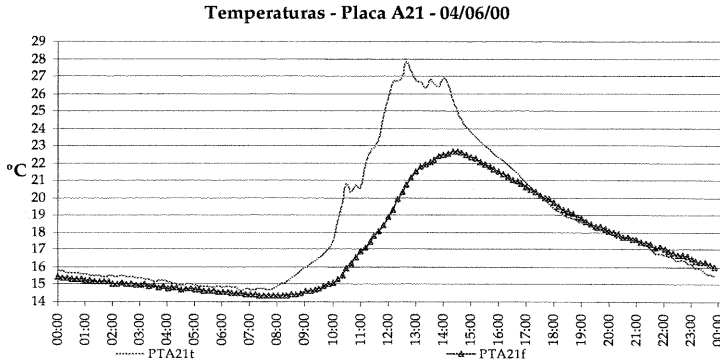


Figura 5: Variação diária da temperatura no WTUD

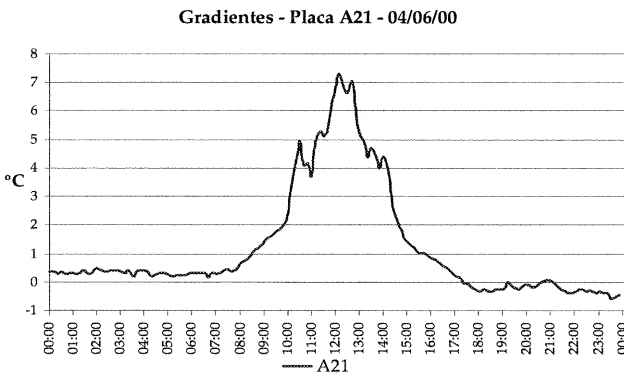


Figura 6: Variação diária do diferencial térmico no WTUD

4.2. Deformações típicas observadas

As deformações medidas pelos *strain-gages* colocados em diferentes posições foram gravadas intermitentemente, tornando possível a visualização de suas variações frente às oscilações de gradientes térmicos. A Figura 7 mostra como a deformação na direção Y no canto (topo) da placa A32 varia com os gradientes térmicos ao longo de um dia.

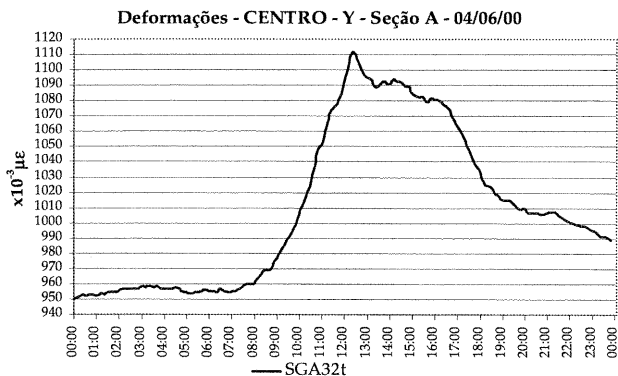


Figura 7: Variação da deformação de topo na direção Y da placa A32

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Seção A (0,6 x 0,6 m)

Os diferenciais térmicos máximos encontrados na seção cujas placas possuem dimensões de 0,6 x 0,6 m e espessura de 95 mm situaram-se próximo aos 8,5 °C, e ocorreram no dia em que a temperatura máxima registrada no CCP foi de 28,9 °C. Na maioria das vezes observa-se uma variação menor que 1,5 °C entre os diferenciais térmicos máximos encontrados nas três posições analisadas.

Conforme fica claro na Figura 8, a pista experimental encontra-se perfeitamente alinhada com a direção leste-oeste. No outono, o sol não incide na pista de forma direta, visto existir um ângulo entre a linha do horizonte e o sol de 44°, às 12h, provocando as sombras já relatadas. No entanto, no final da primavera e no verão, este incidirá diretamente sobre as placas, ficando estas submetidas à insolação direta, durante o período diurno, sem as interferências constatadas no outono. Nestas condições, chegar-se-á à conclusões mais precisas sobre deformações induzidas por gradientes térmicos nos WTUD.

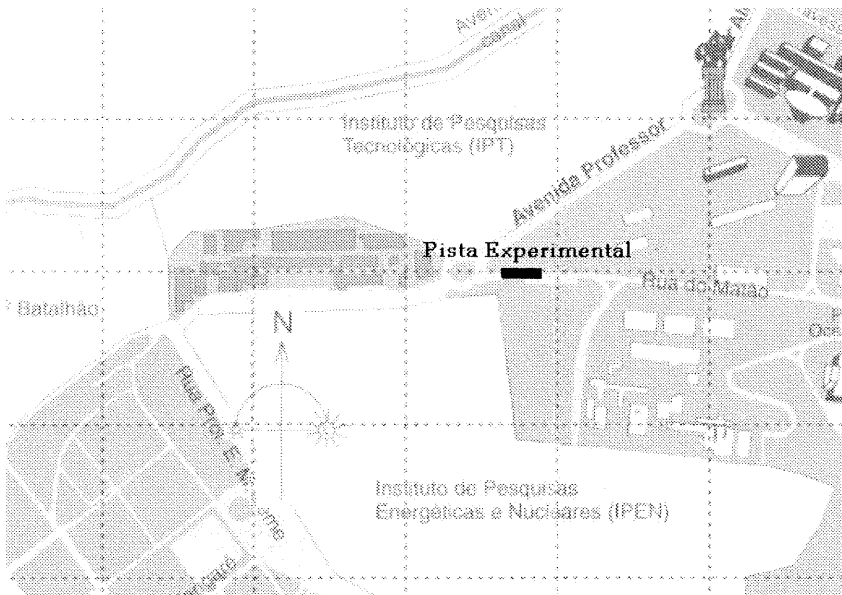


Figura 8: Posição solar da pista experimental de WTUD

Em levantamento realizado no dia 14 de junho de 2000, das 9h às 17h15min, para determinação da maneira pela qual as sombras de árvores e da cobertura da parada de ônibus inibiam a exposição ao sol das placas de WTUD em certos períodos diurnos, constatou-se que as diferenças mencionadas anteriormente, tanto de gradiente térmico como de temperaturas máximas podem ser atribuídas, na íntegra, a este fenômeno.

A placa A20 que alcança suas maiores temperaturas e gradientes antes das demais, por volta das 11h 30min, compensa sua menor temperatura superior por apresentar também uma menor temperatura inferior, uma vez que o pavimento ainda não recebeu o máximo da irradiação solar, fazendo com que o gradiente tenha a mesma ordem de grandeza daqueles encontrados nas outras placas, um pouco mais tarde, quando mais energia foi repassada ao pavimento sob forma de calor, elevando a temperatura no topo e na base do WTUD.

Os gradientes térmicos máximos ocorrem um pouco antes ou juntos às máximas temperaturas nas placas, sendo que o gradiente térmico máximo positivo no outono ocorre, na grande maioria das vezes, entre às 11h 30min e 12h 30min. As placas A21 e A22, que possuem incidências de sol idênticas, apresentaram sempre gradientes térmicos máximos no mesmo instante em que as temperaturas máximas nestas placas foram atingidas.

Em relação aos diferenciais térmicos negativos, o máximo valor absoluto registrado foi de 2,9 °C ocorrido quando a temperatura no topo da placa era de 13,6 °C e no fundo de 16,5 °C. As leituras de diferenciais térmicos proporcionados pelos PT-100 localizados no centro das placas têm conferido os máximos valores de gradientes negativos, em números absolutos.

As temperaturas médias encontradas no CCP são muito próximas, não havendo distinção entre a posição geométrica em planta dos medidores de temperatura; contudo verifica-se um diferencial médio medido no centro da placa (-0,2 °C) bem inferior aos encontrados na borda longitudinal e canto da mesma, que são de 1,1 e 1,0 °C, respectivamente.

As temperaturas extremas do WTUD ocorrem no topo das placas em quase a totalidade dos casos observados, salvo um dia em que a temperatura ambiente encontrava-se muito baixa. Tal fato pode ser explicado em parte pela melhor condição de conservação de calor encontrada junto ao CA, região que está menos suscetível às rápidas oscilações de temperatura. Portanto, o fundo das placas de CCP conservam sua temperatura por mais tempo devido às trocas de energia térmica entre este material e a camada asfáltica.

A Tabela 5 revela como tem sido a distribuição percentual dos diferentes diferenciais térmicos ocorridos na seção A da pista experimental nos meses do outono de 2000.

Tabela 5: Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos
(placas de 0,6 x 0,6 m)

Intervalos de Diferenciais Térmicos	%
Menor que $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0
Entre -6 e $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0
Entre -3 e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	42,2
Entre 0 e $3\text{ }^{\circ}\text{C}$	46,6
Entre 3 e $6\text{ }^{\circ}\text{C}$	8,4
Entre 6 e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,8
Maior que $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0

5.2. Seção B (1,0 x 1,0 m)

O máximo diferencial térmico encontrado nas placas que possuem 1,0 m de largura no período de outono foi de $8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ no dia 28 de maio de 2000, cuja temperatura máxima registrada nesta placa foi de $28,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo os diferenciais máximos encontrados, quase em sua totalidade, no centro das placas de CCP. A máxima variação média dos máximos diferenciais térmicos observadas foi de $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, superior ao encontrado na seção A. Em relação aos diferenciais térmicos negativos, o máximo valor absoluto encontrado foi de $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Todas as observações realizadas para as leituras da seção A são válidas para esta seção. Na Tabela 6 são apresentadas as frequências de ocorrência de intervalos de diferenciais para as placas da seção B.

Tabela 6: Frequência de ocorrência dos diferenciais térmicos
(placas de 1,0 x 1,0 m)

Intervalos de Diferenciais Térmicos	%
Menor que $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0
Entre -6 e $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,5
Entre -3 e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	58,8
Entre 0 e $3\text{ }^{\circ}\text{C}$	30,2
Entre 3 e $6\text{ }^{\circ}\text{C}$	6,0
Entre 6 e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,4
Maior que $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0

5.3. Deformações Típicas

Do gráfico da Figura 7 podem ser extraídos valores aproximados de deformações específicas de 1.048×10^{-3} mm/mm e de 1.110×10^{-3} mm/mm respectivamente para as 17h 30min (diferencial nulo) e 12h 30min (diferencial positivo de 7,5 °C).

A diferença entre as deformações lidas resulta em 88×10^{-3} mm/mm; isto significa uma tensão de 1,74 kPa no *strain-gage* e 2,36 kPa no concreto (assumindo-se o módulo de deformação de 38.000 MPa aferido em laboratório).

Tais resultados apontam para baixos valores de tensões nas placas de WTUD devido, exclusivamente, ao efeito do gradiente térmico. Entretanto, uma conclusão definitiva da importância ou não da consideração do empenamento oriundo do gradiente térmico somente será possível após a análise das quatro estações climáticas do ano e, quando os estudos da correta interpretação das leituras de deformação devido ao gradiente térmico estiverem concluídos.

6. CONCLUSÕES

Verifica-se no experimento a equivalência entre os valores médios registrados nas duas seções, sejam valores correspondentes à média dos máximos e mínimos diferenciais térmicos, bem como dos valores médios encontrados para as temperaturas. Conclui-se então que as dimensões em planta do WTUD pouco interferem nos gradientes térmicos.

Os máximos diferenciais térmicos encontrados para a estação do ano em análise não se diferenciam daqueles valores máximos obtidas em *Missouri* que indicam 7,2°C para placas de 89 mm nos meses de maio e setembro (Mack et al., 1997); -5,0 °C e 12 °C para placas de 102 mm em *Denver*, em um dia do mês de agosto em que a temperatura ambiente oscilou entre 10 °C e 38 °C e a máxima temperatura registrada no CA foi de 49 °C (Wu et al., 1998); 9 °C no Japão, onde as leituras também eram contínuas durante as quatro estações do ano (Noda et al., 1998).

Cabe salientar que se espera um acréscimo nos valores de gradientes negativos no inverno e nos positivos durante o verão, ficando claro que os gradientes térmicos encontrados no outono tropical assemelham-se aos valores máximos obtidos em estações mais quentes ou mais frias de outros países, enfatizando a importância deste estudo sob as condições brasileiras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado concedida ao autor principal do artigo e pelo auxílio individual à pesquisa, concedido ao co-autor do artigo, viabilizando a execução da pista experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armaghani, J. e D. Tu (1998). *Implementation of ultra-thin whitetopping in Florida*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 183-202, Lisbon.
- Balbo, J. T. e M. P. Rodolfo (1998a). *Slab Geometry and Load Effects on Ultra-Thin Whitetoppings: Considerations based on Numerical Solution*. Proceedings of the 4th International Workshop on Design theories and their verification of concrete slabs for pavements and railroads, CROW, Buçaco.
- Balbo, J. T. e M. P. Rodolfo (1998b). *Concrete requirements for ultra-thin concrete (whitetopping) for flexible pavements*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 27-32, Lisbon.
- Balbo, J.T. (1996). *Practical Considerations for Concrete Pavement Design Based on Numerical Model*. 1er Congresso Interamericano de Pavimentos Rígidos, Federación Interamericana del Cemento, Buenos Aires.
- Cole, L. W.; J. Mack e R. Packard (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.
- Mack, J.; C-L. Wu; S. Tarr e T. Refai (1997). *Model development and interim design procedure guidelines for ultra-thin whitetopping*

- pavements*. Proceedings of the 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance. Purdue University, Vol. II, pp. 231-256, Indianapolis.
- Mack, J.W.; L.D. Hawbaker e L.W. Cole (1998) *Ultra-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.
- Nishizawa T; T. Fukute e S. Kokubun (1999). *Study on an analysis method for mechanical behavior of composite*. Paper presented for the TRB meeting of 1999, Washington, D.C..
- Noda, E.; Y. Kong e Y. Kasahara (1998). *Fundamental study on bonded ultrathin whitetopping*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 67-76, Lisbon.
- Risser, R.J.; S.P. LaHue; G.F. Voigt e J.W. Mack (1993). *Ultra-thin concrete overlays on existing asphalt pavement*. Preprint for the 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, West Lafayette.
- Wu, C.L.; S.M. Tarr; A. Ardani e M.J. Sheehan (1998). *Instrumentation and field testing of ultrathin whitetopping pavement*. Paper presented for the TRB meeting of 1998, Washington, D.C.

Endereço dos autores:

Deividi da Silva Pereira

José Tadeu Balbo

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Departamento de Engenharia de Transportes

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

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

Cidade Universitária – São Paulo - CEP 05508-900

E-mail: dsp@usp.br

jotbalbo@usp.br

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