

PROVAS DE CARGA DINÂMICA EM PLACAS INSTRUMENTADAS DE WTUD ASSENTES SOBRE CAMADA ASFÁLTICA DELGADA

Deividi da Silva Pereira

ECOSUL - Empresa Concessionária de Rodovias do Sul S/A

José Tadeu Balbo

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Escola Politécnica

Universidade de São Paulo

RESUMO

Duas seções de *whitetopping* ultradelgado (WTUD), instrumentadas, com placas de 0,6 e 1,0 m de largura foram construídas junto a uma parada de ônibus, em uma via urbana, com tráfego diário composto de 120 ônibus urbanos, 10 caminhões e cerca de 500 veículos de passeio. As seções experimentais foram abertas ao tráfego no início de novembro de 1999, e provas de carga dinâmica são regularmente realizadas com o objetivo de determinar os valores de deformações impostas pelas cargas ao concreto de alto desempenho empregado nas placas delgadas, do tipo de liberação rápida, pela primeira vez no país. Os resultados de tensões induzidas pelas cargas calculadas a partir das medidas de campo têm mostrado a impossibilidade de camadas asfálticas delgadas reduzirem as tensões nas placas de concreto; o comportamento mecânico do pavimento sobreposto ao antigo pavimento asfáltico foi avaliado a partir das medidas de deformações e de deflexões, incluídas simulações de frenagem do veículo de teste em pista.

ABSTRACT

Two instrumented sections with UTW panels 0,6 and 1,0 m wide were built in a bus stop in an urban street; daily traffic comprises 120 urban buses, 10 trucks and around 500 cars per day at the experimental section. The test sections were opened to traffic in early November, 1999, and dynamic load tests are regularly performed in order to achieve values of strains in the fast-track high performance concrete employed for the thin slabs for the first time in the country. Results of induced load stresses calculated from field measurements are shown stressing the impossibility of a thin asphalt layer to decrease stresses on concrete slabs; mechanical behavior of whitetopped old asphalt pavements was evaluated through both strains and deflection measurements, included effects of load breaking.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as perspectivas de implementação do WTUD para restauração de camadas degradadas de pavimento asfálticos, conforme diretrizes apresentadas em ACPA (1998) e Mack *et al.* (1998), são pequenas, devido à impossibilidade de se encontrar, em vias urbanas, camadas asfálticas com espessuras superiores a 150 mm. Se considerada a necessidade de construção de placas encaixadas, a fim de garantir pouca alteração do greide e manutenção dos sistemas de drenagens, a fresagem se faz mandatária e, espessuras remanescentes de concreto asfáltico (CA) menores que 50 mm serão corriqueiramente encontradas. Esta assertiva, somada ao relativo insucesso ocorrido quando da primeira utilização do WTUD no país (Balbo, 2003), proporcionado por deficiências na fase de projeto, motivaram o estudo desta incipiente técnica de restauração de pavimentos asfálticos degradados.

O emprego de análises numéricas podem trazer contribuições apreciáveis a respeito do assunto, mas a falta de informações de desempenho requer experimentos de campo com intuito de obter-se o perfeito entendimento quanto a desempenho e respostas mecânicas deste tipo de pavimento e, desta maneira, difundir a tecnologia adaptada às condições nacionais de utilização, distinta daquela preconizada pela literatura internacional. O objetivo deste trabalho é a apresentação e discussão de respostas mecânicas obtidas pelo pavimento composto nas condições brasileiras, expondo a maneira pela qual a camada delgada de CA efetivamente contribui para a redução das tensões nas placas de WTUD, assim como, avaliar o efeito da frenagem sob as tensões induzidas no concreto de cimento Portland (CCP).

2. SEÇÕES EXPERIMENTAIS INSTRUMENTADAS

A parada de ônibus escolhida para construção do WTUD está localizada no campus da Universidade de São Paulo, e já foi objeto de estudo apresentado por Pereira e Balbo (2001). A escolha da localização exata da pista experimental prendeu-se ao fato de a parada de ônibus ser o local crítico de ação de forças horizontais de frenagem. O CA apresentava espessura de 50 mm, com módulo de resiliência retroanalísado de 3.500 MPa. A base é de macadame, com 100 mm de espessura, sem evidências de contaminação por finos. O WTUD foi construído com placas quadradas de 0,6 m (seção A) e 1,0 m (seção B), dispostas conforme Figura 1, tendo ambas as seções, espessura de 95 mm. Antes da execução das placas de CCP, o CA sofreu uma fresagem superficial (aprox. 5 mm), seguida de lavagem com escovação.

O CCP foi dosado com 476 kg/m³ de cimento de alta resistência inicial, 28,5 kg/m³ de sílica ativa, 642 kg/m³ de areia, 1,029 kg/m³ de brita (diâmetro máximo de 19 mm), relação água/cimento de 0,4, e consumos de plastificante e superplastificante de 1,43 e 2,38 L/m³, respectivamente. As resistências à tração na flexão obtidas foram de 5,2; 7,0 e 7,2 MPa, para 48 h, 7 e 28 dias, respectivamente. O módulo de elasticidade determinado laboratorialmente foi de 38 GPa. Maiores detalhes podem ser obtidos em Balbo *et al.* (2001). A instrumentação das placas de WTUD compreendeu a instalação de *strain-gages* (medidores de deformação) e PT-100 (termo-resistores medidores de temperatura), todos imersos ao concreto, dispostos conforme Figuras 2 e 3.

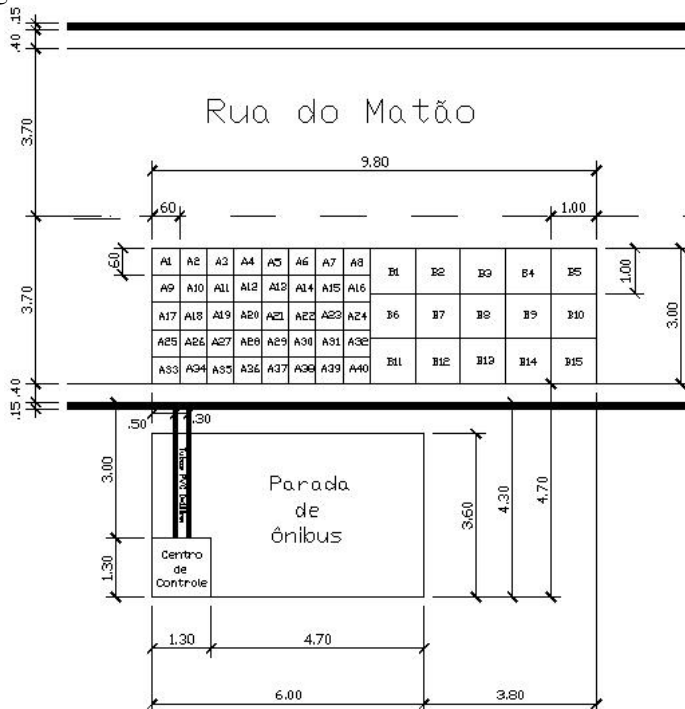


Figura 1 Projeto Geométrico do WTUD (Pereira e Balbo, 2001)



Figura 2 Localização dos Instrumentos – *strain-gages* e PT-100 (Pereira e Balbo, 2001)

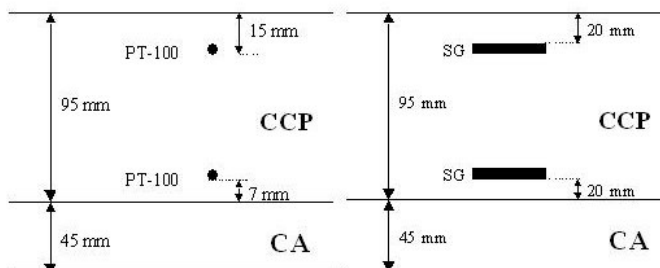


Figura 3 Posição dos instrumentos – em perfil (Pereira e Balbo, 2001)

3. PROVAS DE CARGA DINÂMICA

Os testes de campo para medida das deformações permitiram a definição dos níveis de tensões nas placas de WTUD, convertida de deformações para tensões pelo módulo de elasticidade do CCP. Um caminhão basculante, dotado de um eixo simples de rodas simples (ESRS) e outro simples de rodas duplas (ESRD) foi utilizado para realização dos testes. As demais características do veículo estão representadas na Figura 4.

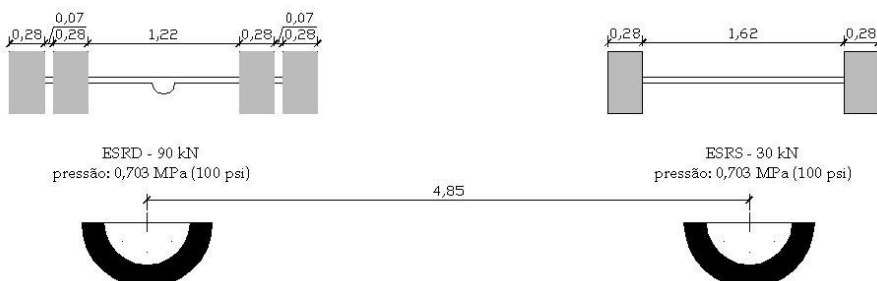


Figura 4 Características do veículo-teste (Pereira, 2003)

As deflexões medidas sobre o WTUD revelam uma mudança no comportamento da estrutura original do pavimento. A Figura 5 apresenta as bacias de deflexões para as seções de WTUD. Pode-se notar uma elevada redução na deflexão máxima, para carga no centro da placa: 43% para as placas com 0,6 m e 55% para aquelas com 1,0 m. A diferença pode ser atribuída pelo trabalho mecânico análogo a um sistema de blocos, no caso das placas menores. Desta maneira, infere-se que o WTUD atua como um reforço estrutural do pavimento, reduzindo as deflexões máximas, sendo que, pela observação das bacias de deformação, melhora substancialmente o comportamento mecânico da estrutura, fazendo com que o antigo pavimento, com comportamento flexível, apresente uma resposta estrutural de pavimento semi-rígido.

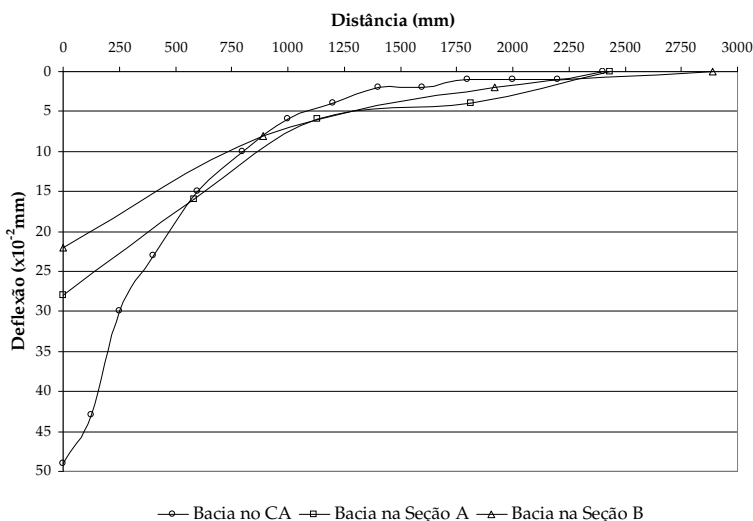


Figura 5 Bacias de Deflexão – antes e depois do WTUD

A real posição das cargas sobre as placas de concreto, necessária à análise das provas de carga dinâmica, foram obtidas através do emprego de filmagem em VHS e fotografias digitais, possibilitando, desta maneira, a definição das distâncias entre os pneus as juntas das placas. Um total de 26 provas de carga dinâmica foram realizadas, sendo que para cada uma delas, todo o sistema de instrumentos foi previamente calibrado. Foi empregada uma frequência de aquisição de dados igual a 20Hz. Para o cômputo das tensões, foi considerada a média das deformações mínimas (antes e depois da excitação dos *strain-gages* devido à carga dinâmica). A deformação total é obtida a partir da subtração entre a deformação máxima (de pico) e a média das deformações mínimas, conforme expressão analítica abaixo, graficamente apresentada na Figura 6.

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{\max} - \frac{\epsilon_{\text{PatamarA}} + \epsilon_{\text{PatamarB}}}{2} \quad [1]$$

onde $\Delta \epsilon$ é a deformação total, ϵ_{\max} é a máxima deformação registrada durante o teste, $\epsilon_{\text{PatamarA}}$ e $\epsilon_{\text{PatamarB}}$ são as médias das deformações antes e depois da passagem da carga, respectivamente. As tensões correspondentes às medidas de deformação foram calculadas a partir da adoção da Lei de Hooke simplificada, uma vez que eram disponíveis medidas físicas da deformação em duas direções perpendiculares a partir de um ponto, sendo intangível o

cálculo da deformação no ponto de origem já que as deformações referem-se aos centros dos *strain-gages* (limitação resultante de não emprego de rosetas no teste); assim o cálculo da tensão correspondente foi feito de acordo com a expressão $\sigma = \Delta \epsilon \times E$, onde σ é a tensão na flexão na direção do *strain-gage* (positivo indica tração e negativo corresponde à tensão de compressão na flexão) e E é ao módulo de elasticidade do CCP.

Tal simplificação não se constitui uma limitação para as análises propostas no presente estudo uma vez que as comparações são sempre realizadas entre *strain-gages* de topo e de fundo, posicionados na mesma direção (mas exatamente opostos), de maneira que se há compressão no topo, no fundo seria tração (*e vice-versa*), porém mantidas as componentes perpendiculares à direção considerada, tanto em topo quanto em fundo, proporcionais às componentes de deformação na direção considerada. Tal hipótese foi previamente confirmada por análises por elementos finitos de placas para estado plano de tensões, para as seções de pavimento estudadas.

Cabe ressaltar que mantida a condição de continuidade na interface aderida, ou seja, igualdade de deformação entre a fibra inferior do CCP e a fibra superior do CA, considerada a relação entre os módulos resilientes de ambos os materiais (já indicados), a tensão no CA seria inferior a 10% (nominalmente) que a tensão no CCP (que é muito rígido e frágil, sofrendo deformações muito pequenas – 2‰ – antes de sua ruptura).

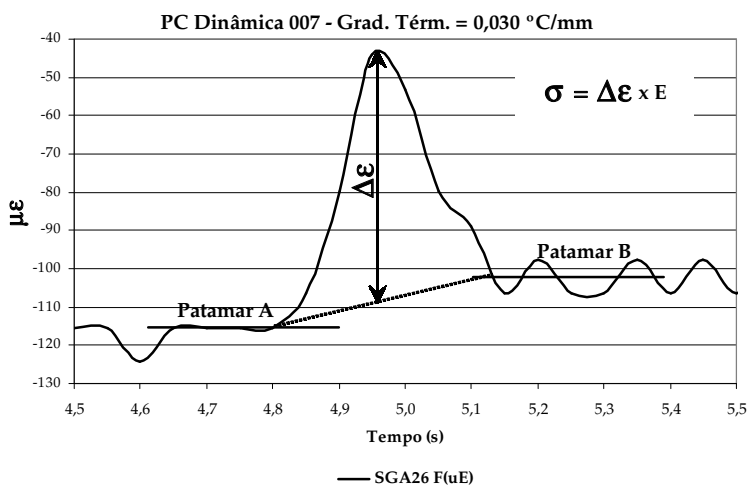


Figura 6 Cálculo das máximas tensões na flexão

4. RESULTADOS E ANÁLISES DAS PROVAS DE CARGA DINÂMICA

Nas Figuras 7,8 e 9 estão apresentados exemplos de leituras de deformação medidas durante algumas provas de carga nos *strain-gages* de topo e fundo, simultaneamente. O primeiro pico de deformação corresponde à passagem do ESRS, enquanto que o segundo refere-se ao ESRD. Uma vez que os instrumentos de topo e fundo encontram-se na mesma posição horizontal e direção, torna-se evidente que enquanto um sensor no topo registra tração na flexão, o outro, no fundo, registra esforços de compressão na flexão (ou *vice-versa*) e, ainda, os valores máximos encontrados para cada um dos eixos são muito próximos, em módulo.

Cabe ressaltar que, para os casos que o ESRS impôs deformações maiores que as induzidas pelo ESRD, o diferente posicionamento dos eixos foi o único motivo para tal acontecimento.

O posicionamento da linha neutra no interior da placa foi determinado pela interpretação de pares de *strain-gages* localizados na mesma posição em planta da placa, mas um no topo e outro próximo ao fundo da mesma, conforme ilustrado na Figuras 2 e 3. Para cada prova de carga, os registros de deformações no topo e no fundo possibilitaram a mensuração da verdadeira posição da linha neutra, plano imaginário da placa onde as deformações de flexão são nulas. Na Tabela 1, são apresentados os valores das tensões, calculadas conforme explicitado anteriormente, e a distância do fundo da placa de CCP onde, supostamente, as deformações são nulas (linha neutra).

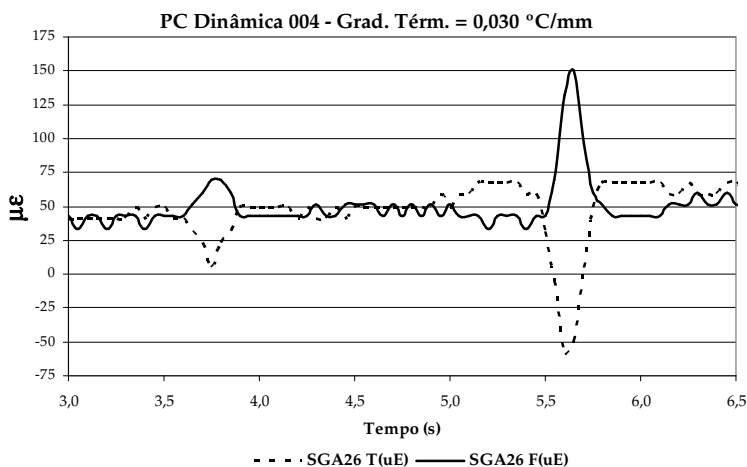


Figura 7 Exemplo de registros de deformações durante os testes – Placa A26

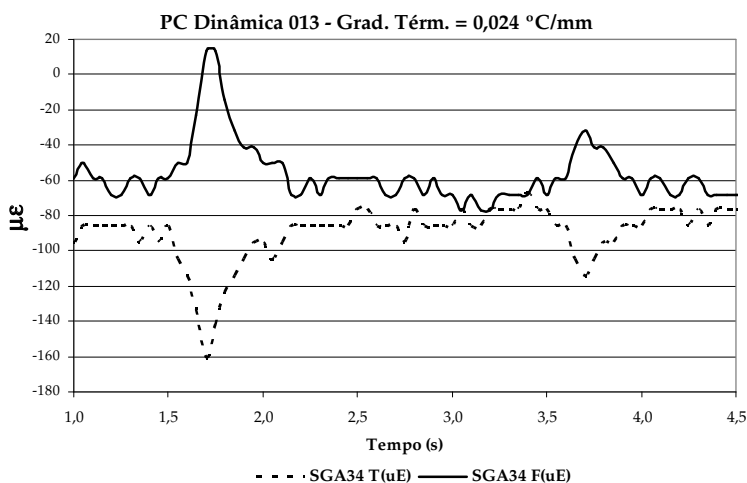


Figura 8 Exemplo de registros de deformações durante os testes – Placa A34

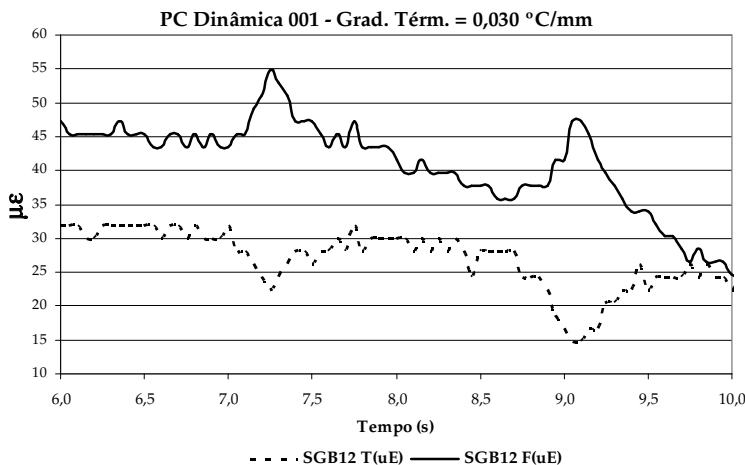


Figura 9 Exemplo de registros de deformações durante os testes – Placa B12

A posição da linha neutra no interior da placa de WTUD foi deduzida a partir da equação abaixo, considerando uma distribuição linear de tensões ao longo da espessura da placa (ver Figura 10).

$$LN = 20 + \frac{55}{\left| \frac{\sigma_{sgT}}{\sigma_{sgF}} \right| + 1} \quad [2]$$

onde: LN é a distância do fundo da placa de CCP até a linha neutra, em mm; σ_{sgT} é a tensão medida no *strain-gage* de topo; e σ_{sgF} é a tensão medida no *strain-gage* de fundo.

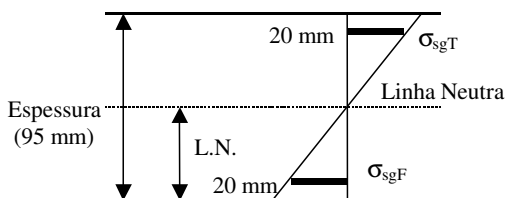


Figura 10 Tensões no Topo e no Fundo - dedução da posição da linha neutra

Na Tabela 1, estão apresentados os dados obtidos durante as provas de carga dinâmica, perfazendo um total de 52 leituras de deformações para o ESRs e 87 para o ESRD. Por exemplo, durante a prova de carga 001, na placa A26, o ESRs induziu uma tensão de compressão na flexão de -1,72 MPa, no topo da placa (σ_{sgT}) e de 1,36 MPa de tração na

flexão no fundo da placa (σ_{sgB}). Por meio da Eq. [2], obtém-se a posição da linha neutra à 44,30 mm do fundo do CCP.

Tabela 1: Tensões e posicionamento da LN no interior das placas de CCP

Prova de Carga Dinâmica	Placa	ESRS			ESRD			Gradiente Térmico (°C/mm)
		Tensões (MPa)		Posição da LN (mm)	Tensões (MPa)		Posição da LN (mm)	
		Topo	Fundo		Fundo	Topo		
001	A26	-1,72	1,36	44,30	-4,47	3,75	45,07	0,030
001	A34	-0,36	0,36	47,76	-2,50	2,55	47,76	0,030
001	B7				0,36	-0,29	44,62	0,030
001	B12	-0,29	0,29	47,43	-0,36	0,36	47,43	0,030
002	A26	-1,72	1,36	44,26	-3,78	3,05	44,57	0,030
002	A34				-1,25	1,41	49,17	0,030
002	B7	0,14	-0,15	47,64	0,31	-0,29	46,72	0,030
002	B12	-0,50	0,65	50,91	-0,36	0,36	47,48	0,030
003	A26	-1,36	1,02	43,48	-3,41	2,37	42,55	0,030
003	A34	-1,07	1,07	47,58	-3,55	3,10	45,63	0,030
003	A36	-1,07	0,71	42,01	-2,13	2,49	49,62	0,030
003	B7				0,43	-0,29	42,20	0,030
003	B12				0,14	-0,22	52,94	0,030
004	A26	-1,37	1,02	43,49	-4,45	4,43	47,42	0,030
004	A34				-1,42	1,38	47,07	0,030
004	B7	0,14	-0,14	47,65	0,36	-0,22	40,77	0,030
004	B12	-0,43	0,43	47,45	-0,22	0,29	51,39	0,030
005	A26	-0,69	1,02	52,79	-2,76	1,69	40,94	0,030
005	A34	-2,88	3,12	48,63	-1,80	1,74	47,01	0,030
005	A36	-1,79	1,77	47,33				0,030
005	B7	0,22	-0,22	47,67				0,030
005	B12	-0,18	0,14	44,51	-0,32	0,22	42,08	0,030
006	A26	-1,37	1,18	45,51	-3,93	3,38	45,42	0,030
006	B7				-0,50	0,44	45,57	0,030
007	A26	-1,03	1,02	47,28	-3,10	2,71	45,66	0,030
007	B7				-0,29	0,22	43,80	0,030
007	B12				0,22	-0,29	51,40	0,030
008	A26	-1,71	1,35	44,28	-4,79	4,39	46,32	0,003
008	B7	0,21	-0,22	47,69	0,22	-0,22	47,67	0,003
008	B12				0,36	-0,21	40,51	0,003
009	A26	-0,85	0,84	47,40	-2,55	2,36	46,46	-0,026
009	B7	-0,50	0,54	48,62	-0,29	0,25	45,84	-0,026
010	A26	-1,38	1,52	48,88	-3,96	3,72	46,65	0,012
010	B12				0,25	-0,25	47,48	0,012
011	A34	-0,89	1,21	51,70	-0,89	1,39	53,47	-0,036
011	B7				0,50	-0,29	40,17	-0,036
011	B12				0,18	-0,22	49,77	-0,036
012	A26				-2,07	1,69	44,69	0,024
012	A34	-0,71	1,04	52,63	-1,42	1,73	50,18	0,024
012	A36				-1,05	1,40	51,34	0,024
012	B7	0,14	-0,15	47,72	0,14	-0,15	47,72	0,024
012	B12				0,29	-0,29	47,48	0,024
013	A26	-0,69	0,68	47,24				0,024
013	A34	-2,86	3,09	48,59	-1,43	1,37	46,97	0,024
013	A36	-1,80	1,91	48,33	-1,08	1,04	47,02	0,024
013	B7	0,14	-0,15	47,75	0,14	-0,15	47,75	0,024
013	B12				0,29	-0,22	43,61	0,024

A média das distâncias entre o fundo da placa até a linha neutra, mostrada na Tabela 1, apresenta pequena diferença para cada um dos eixos: para o ESRS a média foi de 47,33 mm (com desvio-padrão de 2,52 mm e coeficiente de variação de 5,32%); a média encontrada para o ESRD foi de 46,66 mm, com desvio-padrão de 3,04 mm e 6,52% de coeficiente de variação. Considerando-se todos os dados levantados, para ambos os eixos, a média para o

deslocamento da linha neutra em relação ao fundo da placa de CCP foi igual a 46,91 mm. Desta maneira, dada a proximidade de resultados, 47 mm pode ser tomado como representativo da distância entre a linha neutra e o fundo do CCP.

Tabela 1: Tensões e posicionamento da LN no interior das placas de CCP (*continuação*)

Prova de Carga Dinâmica	Placa	ESRS			ESRD			Gradiente Térmico (°C/mm)
		Tensões (MPa)		Posição da LN (mm)	Tensões (MPa)		Posição da LN (mm)	
		Topo	Fundo		Fundo	Topo		
014	A26				-3,10	2,03	41,77	-0,011
014	A34	-2,13	2,61	50,28	-1,77	2,09	49,72	-0,011
014	A36	-1,39	1,75	50,62	-1,39	1,74	50,62	-0,011
014	B7	0,14	-0,15	47,68	0,50	-0,29	40,16	-0,011
015	A26	-3,10	2,71	45,67	-6,88	6,43	46,58	-0,033
015	A34				0,71	-0,70	47,23	-0,033
015	A36				1,42	-1,04	43,24	-0,033
015	B7				0,43	-0,29	42,19	-0,033
015	B12	-0,14	0,14	47,46	-0,43	0,43	47,50	-0,033
016	A26	-3,45	3,41	47,32	-6,56	6,14	46,58	-0,033
016	A36				0,89	-0,86	47,02	-0,033
016	B7	0,14	-0,15	47,68	0,36	-0,29	44,60	-0,033
016	B12				-0,55	0,72	51,23	-0,033
017	A26	-1,72	1,70	47,32	-4,48	3,74	45,03	-0,028
017	A34				-1,60	1,73	48,58	-0,028
017	B12	-0,29	0,32	48,93				-0,028
018	A26				-4,15	3,91	46,70	0,007
018	A34				-1,97	1,75	45,89	0,007
018	B12	-0,33	0,32	47,31	-0,44	0,38	45,51	0,007
019	A26	-1,38	1,02	43,39	-3,79	3,06	44,57	-0,027
019	A34				-2,50	3,45	51,89	-0,027
019	A36				-1,77	1,92	48,60	-0,027
019	B7	0,10	-0,15	52,83	0,43	-0,25	40,40	-0,027
019	B12				-0,29	0,29	47,34	-0,027
020	A26	-1,02	1,02	47,42	-3,75	3,05	44,66	-0,027
020	A34				-2,82	3,47	50,36	-0,027
020	A36				-2,09	2,26	48,55	-0,027
020	B12				-0,39	0,47	49,81	-0,027
021	A26	-1,89	1,35	42,92	-3,78	3,04	44,51	-0,025
021	A34				-1,24	1,38	48,94	-0,025
021	B7				0,29	-0,25	45,86	-0,025
021	B12				-0,50	0,58	49,35	-0,025
022	A26	-1,54	1,18	43,83	-5,13	4,20	44,76	-0,012
022	A34				-1,77	1,75	47,33	-0,012
022	B7				0,43	-0,29	42,14	-0,012
022	B12				-0,57	0,72	50,63	-0,012
023	A26				-4,11	4,08	47,38	0,009
023	A34				-1,79	2,07	49,53	0,009
023	B7	0,14	-0,14	47,61				0,009
024	A26	-2,23	1,70	43,76	-5,49	5,09	46,45	0,014
024	B12	-0,32	0,40	50,18				0,014
025	A26	-1,38	1,19	45,48	-2,99	3,39	49,24	0,018
025	A34				-2,31	2,76	49,94	0,018
025	B12	-0,28	0,29	47,72				0,018
026	A26	-1,03	1,02	47,31	-3,78	3,39	45,99	-0,026
026	A34				-2,51	2,80	49,00	-0,026
026	A36				-1,09	1,04	46,91	-0,026
Estatística por Eixo		Média (mm)		47,33	Média (mm)		46,66	
		Desvio-Padrão (mm)		2,52	Desvio-Padrão (mm)		3,04	
		Coeficiente de Variação (%)		5,32	Coeficiente de Variação (%)		6,52	
Estatística para todas as Provas de Carga Dinâmica				Média (mm)		46,91		
				Desvio-Padrão (mm)		2,87		
				Coeficiente de Variação (%)		6,11		

Admitindo a validação estatística dos resultados obtidos, uma vez que os valores de coeficiente de variação estiveram sempre abaixo de 7%, infere-se sobre o excelente funcionamento dos sensores de medidas de deformação, assim como a relativa homogeneidade do concreto de cimento Portland. A média dos resultados experimentais, validados estatisticamente, comprovam que os 45 mm de CA alteram a posição da linha neutra em apenas 1,2%, quando tomada como referência o caso de inexistência de aderência entre CCP e CA, cuja linha neutra encontraria-se a meia-altura da placa de concreto de cimento Portland.

Portanto, levando-se em consideração a espessura das placas de CCP (95 mm), minuciosamente controlada durante a construção da pista, e a hipótese de trabalho não-monolítico entre CCP e CA, ter-se-ia a linha neutra distante 47,5 mm do fundo do CCP. Os resultados, definitivamente, evidenciam a incapacidade de delgadas camadas remanescentes de concreto asfáltico em reduzir, de maneira significativa, as tensões impostas ao CCP durante a passagem de cargas viárias dinâmicas.

Porém, a aderência, assegurada pelo processo de fresagem da camada antiga de CA, não pode ser desconsiderada nos projetos de WTUD, sob pena de permitir deslocamentos diferenciais entre placas adjacentes que resultariam no comprometimento do comportamento mecânico das placas, assim como, em desempenho funcional insuficiente das mesmas.

Uma outra bateria de testes conduzidas na pista experimental consistiu na mensuração do efeito de frenagem abrupta e posterior retorno em marcha ré do veículo-teste, sobre as deformações nas placas de CCP. Estas provas de carga permitiram a comparação entre as tensões induzidas pela frenagem do veículo e àquelas oriundas do simples movimento uniforme do mesmo.

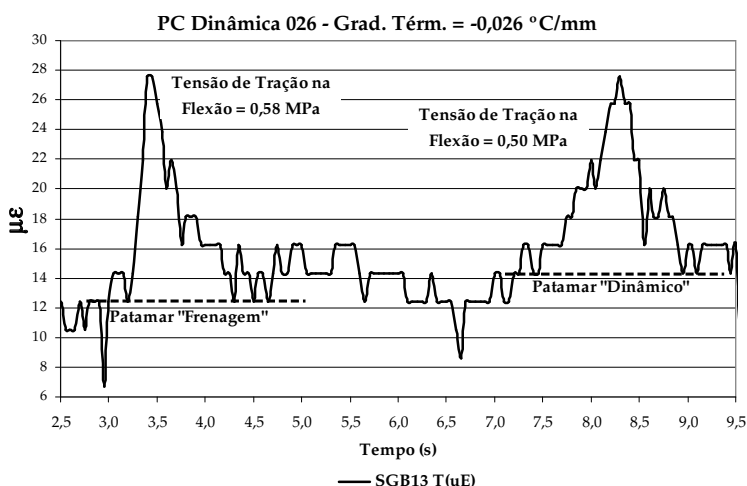


Figura 11 Comparação entre os efeitos de frenagem e dinâmico das cargas – Placa B13

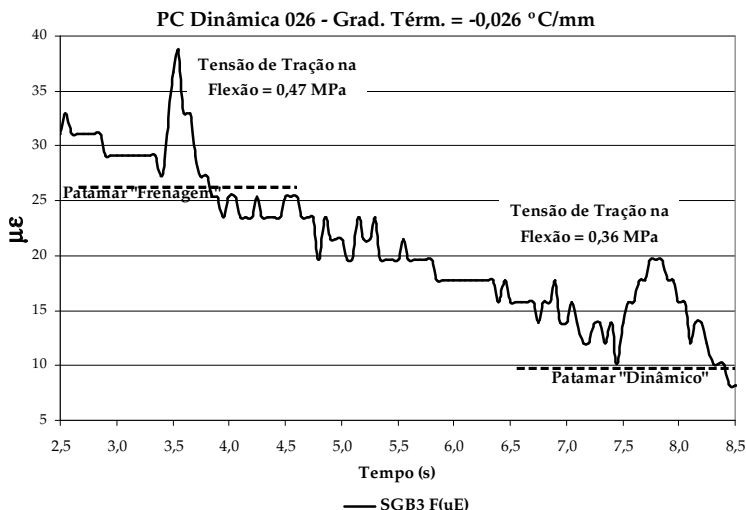


Figura 12 Comparação entre os efeitos de frenagem e dinâmico das cargas – Placa B3

As Figuras 11 e 12 demonstram o efeito destes testes de frenagem e retorno do caminhão. Conforme ilustram as figuras, as tensões registradas nos *strain-gages* para os casos de frenagem são 16% e 30,5 % superiores àquelas mensuradas durante o retorno do veículo. No entanto, é desnecessário o emprego de fatores de segurança que incrementem as tensões calculadas para o WTUD, uma vez que validações mecanicistas, apresentadas em Balbo *et al.* (2002), baseadas em modelos analíticos e numéricos, geralmente conduzem a resultados conservadores de tensões (tensões elevadas), quando comparados com as medidas relacionadas neste trabalho. Por outro lado, os modelos teóricos de previsão de tensões em WTUD devem, necessariamente, ser ajustados por um fator de calibração de tensões medidas em campo.

Ainda, um modelo mecanicista completo, capaz de prever o desempenho destas placas delgadas de CCP, ajustado às condições brasileiras de utilização do WTUD, somente será passível de obtenção após o surgimento de fissuras por fadiga, bem como a perda de aderência entre a camada asfáltica e as placas de concreto de cimento Portland da pista experimental. Como até a atualidade, nenhum tipo de defeito citado acima foi observado nas seções experimentais, campanhas periódicas de levantamentos continuarão sendo realizadas, até que as informações necessárias à modelagem pretendida sejam obtidas. Transcorridos quase cinco anos, após a abertura ao tráfego da pista experimental, mais de 312.000 ônibus e caminhões já trafegaram sobre o pavimento composto.

5. CONCLUSÕES

Uma pista experimental em WTUD, assente sobre uma camada delgada de concreto asfáltico (45 mm) foi construída, empregando-se a fresagem como único agente promotor de aderência entre o CA e o CCP. Tratou-se do primeiro pavimento de concreto do tipo *fast-track* executado no país. Medidas de deformação nas placas permitiram verificar que a contribuição estrutural do CA para o decréscimo das tensões no CCP é muito pequena quando a camada

asfáltica apresenta pequena espessura. No entanto, a aderência entre as duas camadas é fundamental ao desempenho do WTUD porque impede movimentos relativos das placas de CCP. A execução de placas delgadas de CCP foi responsável por importantes mudanças na distribuição das tensões oriundas do semi-eixo simples de rodas duplas na camada de concreto asfáltico, conferindo um comportamento semi-rígido ao pavimento. Então, apesar de o CA não atuar na redução das tensões nas placas de CCP, o sistema de camadas resultante deste tipo de restauração, o denominado *whitotopping* ultradelgado, pode propiciar a preservação de toda a estrutura do pavimento.

A aderência entre o CCP e a camada delgada de CA alterou em apenas 1,2% a posição da linha neutra, não contribuindo, desta forma, para uma redução significativa das tensões nas placas de concreto de cimento Portland, podendo, inclusive, ser desprezada sua contribuição, tornando compulsivo o emprego de CCP de elevadas resistências à tração na flexão. No entanto, a aderência entre ambas as camadas é condição indispensável para impedir movimentação diferencial entre as placas, o que poderia gerar diversos problemas estruturais e funcionais. As provas de carga têm permitido a verificação do efeito da frenagem sobre as deformações sofridas pelas placas de CCP, apontando para elevações da ordem de 30%, sugerindo cuidados especiais para os casos de WTUD aplicado em corredores urbanos.

É difícil estabelecer, neste instante, contudo, qual entre duas situações mais explicaria o efeito de acréscimo de deformações durante a frenagem: um possível aumento no esforço horizontal por reação da superfície ou um efeito de sobrecarga temporária do eixo dianteiro. Tal dúvida poderia ser sanada com emprego de acelerômetro acoplado à suspensão do veículo em estudos futuros.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACPA (1998) *Whitotopping: state of the practice*. Engineering Bulletin, American Concrete Pavement Association.
- Balbo (2003) Performance in fatigue crack of high strength concrete as utw. In: Proceedings (Cdrom) of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- 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.
- Balbo, J.T.; Tia, M.; Pitta, M. R. (2002) Development of a model for stress calculation in ultra-thin whitotopping based on 2-D finite element method. In: International Journal of Pavements, Editor: Waheed Uddin, vol. 1, n. 3, pp.69-80, São Paulo.
- Mack, J.W.; Hawbaker, L.D. e Cole, L.W. (1998) *Ultra-thin whitotopping (UTW): the state-of-the-practice for thin concrete overlays of asphalt*. Paper presented for the TRB meeting of 1998, Washington, D.C.
- Pereira, D. S. (2003) *Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre placa de concreto e base cimentada ou asfáltica*. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 299p, São Paulo.
- Pereira, D. S. e Balbo, J. T. (2001) *Gradientes térmicos em Whitotopping ultradelgado na pista experimental instrumentada na USP*. Transportes, v. 9, n. 1, p. 69-87, Rio de Janeiro.

ECOSUL - Empresa Concessionária de Rodovias do Sul S/A
Av. Fernando Osório, 815 - Três Vendas - Pelotas/RS
96.065-000
Fone:(53) 284.2800 Fax: (53) 284.2801
dsp@usp.br

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 jotbalbo@usp.br