

Resultados de Recentes Pesquisas sobre *Whitetopping* Ultradelgado no Brasil

José Tadeu BALBO

Prof. Associado

Escola Politécnica – USP – Laboratório de Mecânica de Pavimentos

e-mail: jotbalbo@usp.br

Márcio da Rocha PITTA

Assessor Técnico da Presidência

Associação Brasileira de Cimento Portland

e-mail: pavement@mandic.com.br

RESUMO

Apresenta-se neste artigo os modelos de cálculo de tensões de tração na flexão para desenvolvidos no Brasil bem como um modelo semi-empírico de fadiga para concretos de alto desempenho construído com base na análise desempenho do primeiro experimento realizado no país.

São discutidas as condições para emprego do *whitetopping* ultradelgado e sua potencialidade como alternativa de manutenção para pavimentos asfálticos inclusive para vias de volume de tráfego elevado.

ABSTRACT

This paper deals with models for computing flexural stresses on ultra-thin whitetoppings as well as the means for designing such composite pavements taking a mechanistic fatigue model also recently developed in Brazil.

Field conditions for the employment of ultra-thin whitetopping are discussed and its suitability as maintenance technique for aged asphalt pavement surfaces including high volume urban streets.

1. Introdução

O primeiro experimento brasileiro com emprego de *whitetopping* ultradelgado (WTUD) foi realizado na rodovia SP-280, no Estado de São Paulo, por meio de iniciativa conjunta entre a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP), em outubro de 1997. As seções experimentais foram construídas em um trecho de 546 m próximo ao km 156 da rodovia, na pista Interior-Capital, na faixa de veículos comerciais. A construção empregou o sistema encaixado precedido de fresagem a frio do revestimento em concreto asfáltico (CA) existente. Na Tabela 1 são apresentadas as características das seções experimentais construídas.

Tabela 1 Espessuras e dimensões das placas de WTUD

Trecho	Seção	Espessura de UTW (mm)	Dimensão do WTUD (m)	Espessura de CA (mm)
1	A	80	~1,15	50
1	B	80	~0,80	50
1	C	80	~0,65	50
2	A	100	~1,63	40
2	B	100	~1,15	40
2	C	100	~0,80	40

Tal experimento se diferenciou sobremaneira de outros experimentos realizados no exterior em especial no que diz respeito ao tráfego intenso de veículos comerciais existentes na rodovia, consistindo em grande parte de caminhões pesados (cerca de 3.500 caminhões por dia sobre o trecho experimental), com cargas sobre eixos excedendo os limites legais em vigência no país, quando as experiências estrangeiras via de regra relatam experimentos com WTUD em vias de baixo volume de tráfego.

As características do concreto de cimento Portland empregado em pista foram definidas com base em dosagens preliminares realizadas pela ABCP. O controle tecnológico durante a execução da obra indicou as seguintes resistências médias à tração na flexão para o concreto empregado: 3,5 MPa aos 3 dias; 5,0 MPa aos 7 dias; e 6,1 MPa aos 28 dias. Amostras do concreto endurecido com idade aproximada de 365 dias, recolhidas em pista e ensaiadas na EPUSP, indicaram resistência à tração na flexão média de 6,0 MPa e módulo de deformação de 30.229 MPa, podendo-se afirmar portanto que o WTUD de fato foi constituído por um concreto de alto desempenho (CAD).

2. Análise de Desempenho do WTUD

A análise de desempenho do WTUD foi realizada com base no inventário de defeitos, em especial de fissuras, que se manifestaram em pista ao longo de 160 dias de solicitações de tráfego. O padrão básico de fissuras ocorridas foi, como em experimentos realizados no exterior, a formação de fissuras de canto. Nove campanhas

de campo permitiram a descrição do desenvolvimento de tais fissuras, conforme apresentado na Figura 1.

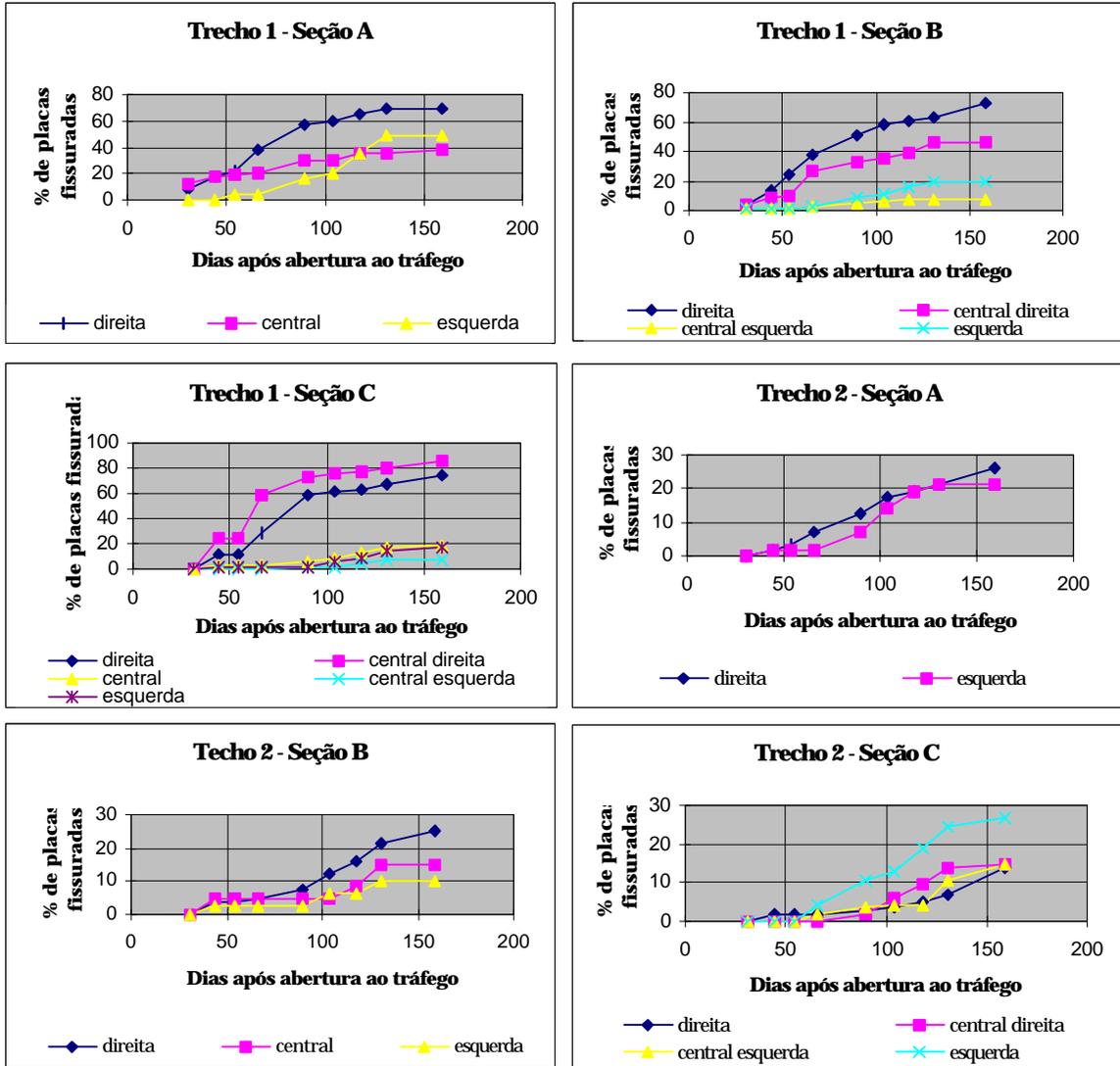


Figura 1 Evolução das fissuras de canto ao longo do experimento

2.1 Desempenho do Trecho 1

Os painéis centrais e externos no Trecho 1 apresentaram algumas peculiaridades, sobretudo para as seções 1A e 1B; após 160 dias de teste o índice de fissuração (para fissuras de canto) atingiu valores acima de 70%. Os painéis internos das seções 1B e 1C resultaram em índices de até 20% e 10%, respectivamente. Tais discrepâncias foram entendidas com base nas deflexões medidas em ambas as trilhas de roda em

campo; para a trilha externa tais deflexões eram cerca de 80% superiores às medidas na trilha interna.

Da análise dos resultados de monitoração fica evidente que, para os painéis internos, os desempenhos apresentados pelas seções 1B e 1C foram superiores ao desempenho da seção 1A, denotando portanto melhor expectativa de desempenho para placas com menores espaçamentos entre juntas.

2.2 Desempenho do Trecho 2

O desempenho do Trecho 2, tomados os mesmos padrões de análise, foi de fato superior; após 160 dias o índice de fissuração não excedeu 30%. Também se evidenciou nesse caso o fato de placas com juntas menos espaçadas apresentarem melhor desempenho, comparando-se as seções 2B e 2C, que apresentaram índices não superiores a 15% com a seção 2^A que desenvolveu fissuração de 27%. Confrontando os Trechos 1 e 2, os resultados apontaram melhor desempenho conjunto para placas com juntas menos espaçadas e de maior espessura..

2.3 Condição de Aderência

Após dois meses de testes, um levantamento em campo empregando sondagens rotativas permitiu a verificação que estaria ocorrendo perda de aderência entre o WTUD e o CA. As investigações puderam apontar para quase 50% de placas não mais aderidas no Trecho 1 e quase 70% no caso do Trecho 2.

Tal perda de aderência, embora necessitando ainda de análise mecanicista com modelagem em três dimensões para a compreensão racional de tal fenômeno, pode ser atribuída a dois fatores: degradação das ligações na interface WTUD-CA somada à progressiva percolação de água nestas interfaces motivada pela presença de juntas não seladas, técnica tipicamente empregada em WTUD nos países de clima temperado.

2.4 Monitoração do Tráfego

A análise mecanicista de desempenho realizada necessitava de dados precisos sobre tipos de eixos e cargas sobre eixos de veículos comerciais. Durante uma campanha de pesagem de um dia, uma amostra de 273 eixos foi realizada. Estabelecido o índice de fissuração de 10% como ponto de ruptura por fadiga de cada seção, foi computado o número de eixos que solicitaram as seções experimentais, com base em contagens volumétricas e classificatórias previamente realizadas, sendo que na Tabela 2 são apresentados os volumes de eixos solicitantes para cada seção experimental em WTUD.

Tabela 2 Número de eixos por seção para um prazo de 10% de índice de fissuração

Tipo de eixo	Seção de Teste					
	1B	1C	1A	2A	2C	2B
Roda Simples	21.086	28.543	55.103	158.897	167.171	175.389
Rodas Duplas	11.389	15.416	29.761	85.820	90.289	94.728
Tandem Duplo	9.139	12.371	23.882	68.866	72.452	76.014
Tandem Triplo	8.727	11.814	22.807	65.767	69.192	72.594

3. Geração de Modelos Numéricos para Cálculo de Tensões

Com base em estudos anteriores e em experiências práticas, incluída aquela realizada pioneiramente no Brasil, a geração de modelos numérico-estatísticos para o cômputo de tensões de tração na flexão em WTUD foi realizada para cargas de canto e na face superior de placas de concreto, com emprego programa por elementos finitos FEACONS versão 4.1, modificada pelo Laboratório de Mecânica de Pavimentos.

O trabalho de modelagem de tensões em WTUD foi realizado através de pesquisa conjunta entre a ABCP e o LMP-EPUSP, no ano de 1998, limitando-se a placas de dimensões planas de 1,20 m; atualmente, uma nova pesquisa se iniciou, através das mesmas entidades, para a expansão de tais modelos para uma faixa de espaçamento entre juntas variando entre 0,60 m e 1,20 m.

Vários refinamentos de malhas de elementos finitos foram preliminarmente testados para garantir uma discretização que levasse à valores de tensões de cálculo os mais precisos possíveis. As simulações compreenderam 2.520 rodadas do programa por elementos finitos, e após uma análise estatística aprofundada dos resultados, foi possível a construção do seguinte modelo teórico-estatístico genérico:

$$\log_{10} \sigma_w = a + b \cdot e_w + c \cdot \log_{10} Q \quad [1]$$

onde σ_w é a tensão de tração na flexão de canto em topos da placa de WTUD, e_w sua espessura e Q a carga total sobre o eixo de rodas duplas, sendo a , b e c as constantes de regressão múltipla para a melhor função encontrada.

Na Tabela 3 são apresentadas as constantes para emprego da equação [1] para várias espessuras remanescentes de CA após sua fresagem (independente de sistema encaixado ou sobreposto) e ampla faixa de valores de módulo de reação do sistema de apoio do WTUD, de maneira que fosse possível a consideração de pavimentos existentes com pequena capacidade estrutural até elevada capacidade estrutural. Ressalta-se que tais modelos referem-se a camadas de CA que apresentem condições estruturais adequadas para os propósitos de um WTUD, com módulos resilientes em torno de 3.000 MPa. Os pormenores sobre o desenvolvimento de tais modelos são encontrados na referência [1].

Tabela 3 Coeficientes para emprego da equação [1] para cálculo de tensões em WTUD

Espessura de CA (m)	k (MPa/m)	I	X ₁	X ₂
0,07	30	0,024820	-6,231075	0,462327
	60	0,008586	-5,789584	0,446956
	90	0,015457	-5,520703	0,426781
	120	0,023645	-5,378814	0,412213
	150	0,029726	-5,178959	0,397300
	180	0,035303	-5,120979	0,387623
	200	0,035823	-5,047217	0,381851
0,08	30	-0,088997	-5,514213	0,468917
	60	-0,076598	-5,244558	0,446388
	90	-0,076024	-5,001487	0,4313349
	120	-0,071549	-4,837353	0,418613
	150	-0,061891	-4,738900	0,405714
	180	-0,063641	-4,644628	0,399173
	200	-0,053714	-4,540121	0,387677
0,09	30	-0,191848	-4,908032	0,474510
	60	-0,172026	-4,790005	0,454847
	90	-0,160687	-4,586312	0,436733
	120	-0,166944	-4,360725	0,427317
	150	-0,155392	-4,307448	0,415500
	180	-0,147842	-4,192171	0,403758
	200	-0,142022	-4,156120	0,397578
0,10	30	-0,271880	-4,407561	0,472716
	60	-0,266092	-4,259487	0,459712
	90	-0,249722	-4,164994	0,444047
	120	-0,241413	-4,026299	0,430537
	150	-0,234525	-3,947564	0,420810
	180	-0,242902	-3,871266	0,418526
	200	-0,221639	-3,805094	0,403570
0,11	30	-0,350883	-4,002271	0,474847
	60	-0,337178	-3,932713	0,461068
	90	-0,346685	-3,835554	0,458646
	120	-0,331815	-3,701668	0,442883
	150	-0,308358	-3,602103	0,424165
	180	-0,302876	-3,542466	0,416461
	200	-0,305207	-3,490703	0,413964
0,12	30	-0,427128	-3,708646	0,480530
	60	-0,418931	-3,569332	0,467474
	90	-0,402576	-3,514176	0,454205
	120	-0,391515	-3,468629	0,443637
	150	-0,388613	-3,339188	0,434909
	180	-0,368314	-3,333692	0,421764
	200	-0,365914	-3,267390	0,416329

4. Análise Mecanicista de Fadiga na Pista Experimental

A monitoração do experimento com WTUD realizada possibilitou a busca e construção de um modelo semi-empírico de fadiga para o CAD empregado, o que foi realizado com base na seguinte metodologia:

- Definir, um limite de ruptura por fadiga, por meio observacional, o que como já se referiu anteriormente foi tomado como sendo o evento para 10% de placas fissuradas ocorrerem em uma mesma seção de teste;
- Avaliar o número de eixos, seus tipos e cargas, para cada seção de teste, que teria solicitado os pavimentos até que o evento acima mencionado tivesse ocorrido;
- Simular, empregando técnicas de elementos finitos, cada tipo de carga que teria solicitado cada tipo de placa em WTUD, para o cálculo das respectivas tensões de tração na flexão às quais teriam sido solicitadas as placas de concreto;
- Aplicar como válida a regra de Miner para o cômputo total de dano por fadiga (tomado como limite o valor de 100%), sendo o número de repetições admissível para cada carga durante o experimento definido pela função $N = a \cdot (1 / RT)^b$, onde RT é a relação entre a tensão ocorrida e a tensão de ruptura de tração em flexão do concreto, sendo a e b constantes a serem resolvidas numericamente, pela análise simultânea de fadiga de duas seções simultaneamente tomadas entre as seções experimentais descritas.

Aplicando-se este último passo às seções 1A e 2B, com largura de 1,15 m e espessuras de 80 e 100 mm, respectivamente. Desta forma, um sistema não-linear de duas equações a duas incógnitas foi montado, permitindo a solução descrever o seguinte modelo de fadiga para o concreto de alto desempenho empregado:

$$N = 29.745 \times (1 / SSR)^{3,338} \quad [2]$$

Naturalmente, o modelo semi-empírico de fadiga acima indicado carrega intrinsecamente fatores associados às condições de pista como o deslocamento lateral de eixos (fluxo não canalizado), bem como efeitos térmicos ocorridos sobre as placas de concreto durante o experimento. Maiores detalhes sobre a formulação completa de tal modelo são descritos na referência [2].

5. Exploração dos Resultados Teóricos e Experimentais

Com base nos modelos teóricos e empíricos atualmente já formulados no país, torna-se possível a elaboração, de modo mais racional, de projetos de WTUD, limitando-se neste momento para placas com espaçamento entre juntas de 1,20 m. A aplicabilidade do WTUD como alternativa de manutenção, possivelmente de longa duração, para inúmeras situações de vias de rodagem, pode também ser avaliada a partir dos modelos já desenvolvidos e apresentados neste artigo.

Para se exemplificar, imagine-se que um corredor urbano de ônibus necessite de recapeamento por apresentar afundamentos em trilhas de roda das misturas asfálticas existentes. Suponha-se que em tal corredor os eixos sejam reduzidos a eixos simples de rodas duplas com 80 kN de carga máxima total, e que o módulo de reação do pavimento existente, após fresagem, seja algo estimado em torno de 60 MPa/m. Na Tabela 4 são apresentados os números de repetições de eixos permitidos, para o

consumo de resistência à fadiga do CCP, para CADs de 5 a 9 MPa de módulo de ruptura em flexão.

Observa-se de tal análise que a espessura de CA remanescente exerce um papel importante no desempenho do WTUD. Ainda na Tabela 4 é apresentada, para o caso de emprego de espessura de WTUD de 100 mm, uma análise para períodos de projeto de 20 e de 10 anos.

Dos resultados apresentados é evidente que, com base inclusive nos fundamentos práticos derivados do primeiro experimento brasileiro com WTUD, inclusive vias com tráfego intenso de ônibus poderiam ser contempladas com a alternativa, o que dependerá, dentre os vários fatores em jogo, da possibilidade de se garantir um CAD em pista, fato que o próprio experimento realizado demonstrou ser plenamente possível.

Há que se considerar ainda que menores espaçamentos entre juntas resultam em menores valores de tensões solicitantes, o que torna recorrente um maior otimismo do WTUD como alternativa de manutenção de pavimentos asfálticos baseada em critérios de reforço e não apenas preventivos (de formação de trilhas de roda, por exemplo). Contudo, estimativas adequadas de tensões em placas de menores dimensões encontram-se ainda em desenvolvimento, o que justifica neste momento, para fins de projeto, análises diretas com programas de elementos finitos em duas dimensões.

Tabela 4 Número de repetições e volumes diários permissíveis no corredor de ônibus

Condições de Análise para Projeto						Número admissível de ônibus			
MR do CCP (MPa)	Espes-sura de CA (m)	Espessura de WTUD (m)				20 anos de análise		10 anos de análise	
		0,07	0,08	0,09	0,1	por ano	por dia	por ano	por dia
5,0	0,07	2,0E+05	3,1E+05	4,8E+05	7,4E+05	37.167	102	74.333	204
	0,09	4,1E+05	5,9E+05	8,5E+05	1,2E+06	61.553	169	123.106	337
	0,11	8,0E+05	1,1E+06	1,5E+06	2,0E+06	99.299	272	198.597	544
6,0	0,07	3,6E+05	5,6E+05	8,8E+05	1,4E+06	68.306	187	136.613	374
	0,09	7,5E+05	1,1E+06	1,6E+06	2,3E+06	113.125	310	226.249	620
	0,11	1,5E+06	2,0E+06	2,7E+06	3,6E+06	182.495	500	364.989	1.000
7,0	0,07	6,0E+05	9,4E+05	1,5E+06	2,3E+06	114.269	313	228.539	626
	0,09	1,3E+06	1,8E+06	2,6E+06	3,8E+06	189.246	518	378.491	1.037
	0,11	2,5E+06	3,3E+06	4,5E+06	6,1E+06	305.294	836	610.588	1.673
8,0	0,07	9,4E+05	1,5E+06	2,3E+06	3,6E+06	178.446	489	356.892	978
	0,09	2,0E+06	2,8E+06	4,1E+06	5,9E+06	295.531	810	591.062	1.619
	0,11	3,9E+06	5,2E+06	7,0E+06	9,5E+06	476.755	1.306	953.510	2.612
9,0	0,07	1,4E+06	2,2E+06	3,4E+06	5,3E+06	264.396	724	528.791	1.449
	0,09	2,9E+06	4,2E+06	6,1E+06	8,8E+06	437.875	1.200	875.749	2.399
	0,11	5,7E+06	7,7E+06	1,0E+07	1,4E+07	706.387	1.935	1412.773	3.871

Conclusões

Apresentaram-se modelos teóricos para o cálculo de tensões de tração na flexão em WTUD, desenvolvidos com base em modelos bastante elaborados por elementos finitos, que simplificam o processo de cálculo e análise expedita, para finalidades de projeto.

Encontra-se já também desenvolvido e disponível um modelo semi-empírico de fadiga para concretos de alto desempenho, construído com base na análise de desempenho do primeiro experimento com WTUD no país, realizado na SP-280, em São Paulo.

Tais elementos de projeto são já disponíveis para o emprego da tecnologia no país tendo-se por base metodologias racionais. A ampliação de tais modelos é trabalho de pesquisa que continua em desenvolvimento conjunto pela ABCP e pelo LMP-EPUSP.

Com base nesses modelos, e em uma simulação de condições típicas de carregamento de corredores urbanos de ônibus, verificou-se que a alternativa em WTUD poderá ser bastante promissora, inclusive para vias de tráfego elevado, desde que determinadas condições estruturais básicas para o WTUD sejam reconhecidas, em especial no tocante às condições do CA e às possibilidades de emprego de CAD.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos aos pesquisadores do Laboratório de Mecânica de Pavimentos e aos técnicos da Associação Brasileira de Cimento Portland que tornaram possível, sob vários aspectos, o desenvolvimento dos modelos apresentados neste artigo.

Referências

- [1] EPUSP-LMP/ABCP (1998) *Pesquisa para o desenvolvimento de subsídios de projeto para a tecnologia emergente de reforços de pavimentos flexíveis com camadas ultradelgadas de concreto de cimento Portland - whitetopping ultradelgado – fase I*. Relatório Final, LMP-EPUSP/ABCP, 145 p., São Paulo.
- [2] 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) para o concurso de Professor Associado, EPUSP, 195 p., São Paulo.