

---

# ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND E CONCRETOS ASFÁLTICOS PARA FINS DE UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS DE *WHITETOPPING* ULTRADELGADO

---

Rita Moura Fortes\*

José Tadeu Balbo\*\*

## Resumo

Neste trabalho é apresentada a pesquisa desenvolvida por Fortes,<sup>15</sup> na qual foi avaliada a capacidade de resistência da interface aderida entre o concreto de cimento Portland (CCP) e o concreto asfáltico (CA) para fins de pavimentos compostos, em especial no que tange ao emprego de reforços ultradelgados de concreto de cimento Portland sobre antigos revestimentos asfálticos denominados *whitetoppings* ultradelgados (WTUD).

A aderência entre ambos os materiais, que devem trabalhar monoliticamente para garantir uma redução significativa dos esforços de tração na flexão do concreto de cimento Portland, é tomada como a principal hipótese de cálculo dessas estruturas de pavimento composto, sendo que sua ausência (inicial ou tardia) traria drásticas conseqüências para o desempenho das placas delgadas de concreto.

Os estudos experimentais realizados em laboratório permitiram a inferência de valores de resistência ao cisalhamento dessa interface aderida, bem como avaliar a perda potencial dessa aderência quando a interface é submetida à ação de esforços de cisalhamento repetidos em níveis de tensões inferiores à tensão de ruptura.

---

\* Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Departamento de Engenharia Civil. E-mail: [rmfortes@mackenzie.com.br](mailto:rmfortes@mackenzie.com.br).

\*\* Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade de São Paulo. E-mail: [jotbalbo@usp.br](mailto:jotbalbo@usp.br).

Com apoio em modelagem numérica de tensões de cisalhamento em interfaces aderidas de concreto de cimento Portland e concreto asfáltico, foi possível delinear melhor em que situações o emprego de *whitetopping* ultradelgado apresentaria desempenho favorável como alternativa de manutenção.

### **Abstract**

This work presents a research on the bond strength between Portland cement concrete and hot asphalt mixtures for composite pavements, with special concern to ultra-thin concrete overlay or inlay for old asphalt pavement surfaces (ultra-thin whitetopping).

Bond interface for such materials is taken as the key for ultra-thin whitetopping once this condition allows significant reduction of bending stresses on the concrete slab, and the early loss of adherence would drastically commit the pavement performance.

In order to clarify the behavior of bond interface under shear stresses a laboratorial research was carried out employing static and dynamics solicitations and through the results it was identified loss of bond for a low number of load repetitions.

Supported both by numerical simulations of shear stresses on composite pavements and experimental results it becomes possible to better identify the current conditions for using ultra-thin whitetopping as a attractive maintenance alternative.

# 1 INTRODUÇÃO

Voltando-se o relógio do tempo algumas décadas atrás e observando-se as necessidades políticas e econômicas dos organismos públicos gestores da malha viária do Brasil, quando os baixos custos de implantação norteavam suas decisões, os pavimentos de concreto de cimento Portland eram preteridos em relação aos pavimentos asfálticos, por apresentarem elevado custo inicial.

Hoje, quando a política brasileira tem difundido a concessão de rodovias, o pavimento de concreto de cimento Portland é visto por outro prisma e tem sido apontado como solução para atender o usuário da rodovia, proporcionando-lhe pavimentos de boa qualidade quanto ao conforto e ao rolamento, a um custo de implantação e de manutenção compatível com as necessidades de quem gerencia uma via.

No entanto, mais do que a construção de novos pavimentos é necessário reabilitar os existentes. O emprego do concreto de cimento Portland pode ser promissor para a recuperação da malha viária, predominantemente constituída de pavimentos asfálticos.

Uma maneira de se utilizar o pavimento de concreto de cimento Portland na recuperação da malha viária de pavimentos com revestimento de misturas asfálticas é a realização do recapeamento de concreto de cimento Portland sobre pavimentos asfálticos, o que tem sido empregado nos Estados Unidos da América (EUA) desde 1918, com o nome de *whitetopping* (WT), que consiste na moldagem de uma camada de concreto de cimento Portland sobreposto ao concreto asfáltico existente.

Na última década, a aplicação da técnica do WT evoluiu para a utilização do *whitetopping* ultradelgado (WTUD), que pode ser definido como um pavimento ultradelgado de concreto de cimento Portland sobreposto a uma camada de concreto asfáltico, sendo que a espessura do recobrimento pode variar de 50 a 100mm, com juntas pouco espaçadas, segundo Balbo<sup>8</sup> com distância inferior a 1,20m. Deve-se considerar essencial a aderência desta placa ao pavimento asfáltico subjacente, criando-se assim uma estrutura de pavimento composta pela camada subjacente de concreto asfáltico e pela camada de concreto de cimento Portland.

## 1.1 Objetivo da pesquisa

A pesquisa desenvolvida por Fortes<sup>15</sup> concentrou seus esforços no estudo do fenômeno de aderência entre a camada subjacente de concreto asfáltico e a camada sobreposta de concreto de cimento Portland, uma das principais responsáveis pelo sucesso ou insucesso do *whitetopping* ultradelgado, tendo por objetivo:

- estudar o fenômeno de aderência, verificando a influência do tratamento entre a interface de concreto asfáltico e a concreto de cimento Portland;
- desenvolver um método de ensaio estático para determinação da resistência ao cisalhamento, analisando o desempenho dos tratamentos efetuados na interface da placa de concreto asfáltico, verificando as potencialidades do método proposto;
- por meio de ensaio de dinâmico, avaliar o potencial da perda da aderência na interface dos corpos-de-prova quando submetidos a um número de ciclos repetidos;
- comparar os resultados de laboratório com as tensões de cisalhamento esperadas para a interface *whitetopping* ultradelgado – concreto asfáltico – estimadas por meio de teoria adequada.

O desenvolvimento dessa pesquisa seguiu a linha de ensaios laboratoriais. Complementando-se esta linha de pesquisas, o Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP) está atualmente avaliando as questões relacionadas à aderência na interface em campo, em pista experimental construída em via urbana.\*

Realizou-se em laboratório a moldagem de corpos-de-prova em placas de  $180 \times 500 \times 50$ mm de concreto asfáltico, que foram recobertas com 60mm de concreto de cimento Portland, atendendo aos seguintes quesitos e etapas:

- Moldagem das placas: com a intenção de melhor conhecer a influência de diversos tratamentos na interface de concreto asfáltico e concreto de cimento Portland. As placas foram moldadas, introduzindo-se tratamentos diferenciados na superfície da placa de concreto asfáltico, antes da moldagem do concreto fresco; tais tratamentos foram a fresagem manual, a aplicação de resina epóxica sem fresagem, a fresagem manual seguida da aplicação de resina epóxica e a fresagem com fresadora 1000 C da Wirtgen, utilizada em fresagem de pavimentos a frio.
- Controle tecnológico dos materiais empregados. Foram efetuados diversos ensaios de controle de materiais empregados.
- Ensaio de cisalhamento estático. Quando se buscou um método de ensaio simples, que utilizasse equipamentos disponíveis nos laboratórios nacionais na área de engenharia civil e oferecesse resultados confiáveis, foi desenvolvido e proposto um ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento na interface do concreto de cimento Portland e concreto asfáltico. Vários ensaios foram realizados e compararam-se os valores obtidos com os apresentados na literatura existente sobre o assunto. Os resultados observados, variando-se o tipo de tratamento da interface, também foram analisados, na busca de esclarecimentos sobre a melhoria da aderência entre concreto asfáltico e concreto de cimento Portland.
- Ensaio de carga repetida para verificar se ocorria ou não a perda de aderência na interface do concreto asfáltico e do concreto de cimento Portland quando o pavimento era solicitado por aplicação de cargas repetidas. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com carregamento cíclico, simi-

\* Trata-se de um projeto de pesquisa, fomentado pela FAPESP, com placa de WTUD instrumentadas.

lar ao efetuado para determinação da resistência ao cisalhamento direto estático, procurando-se observar o comportamento da resistência na interface aderida do corpo-de-prova, quando solicitados a aplicações repetidas. Tais ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP (LMR-PMI).

- Efetuou-se uma avaliação teórica das tensões de cisalhamento em *whitetopping* ultradelgado, partindo-se da análise de placas quadradas e  $1,20 \times 1,20\text{m}$ , utilizando-se o programa de análise numérica para pavimentos de concreto FEACONS 4.1 SI, do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da EPUSP (LMP-EPUSP).

## 2 TRAJETÓRIA DE UMA DÉCADA DA UTILIZAÇÃO DO *WHITETOPPING* ULTRADELGADO

### 2.1 Revestimentos de CCP ultradelgados (*whitetopping* ultradelgado)

#### 2.1.1 Definição do *whitetopping* ultradelgado

Cole,<sup>11</sup> Armaghani & Tu,<sup>3, 4</sup> Lord,<sup>18</sup> Mack et al.,<sup>20</sup> Cole & Mack,<sup>12</sup> Cole et al.,<sup>13</sup> Silfwerbrand,<sup>25</sup> Balbo & Rodolfo,<sup>7</sup> ACPA<sup>1</sup> e Gucunski et al.<sup>16</sup> definiram o *whitetopping* ultradelgado como um pavimento de concreto de cimento Portland de elevada resistência e com ou sem adição de fibras, sobreposto a uma camada de concreto asfáltico com função estrutural, sendo a espessura do recobrimento de 50 a 100mm, com juntas pouco espaçadas (espaçamento menor que o usual em placas de CCP), aderido à camada asfáltica subjacente.

#### 2.1.2 Histórico de pavimentos com *whitetopping* ultradelgado

##### 2.1.2.1 Experiência norte-americana

Segundo Risser et al.,<sup>22</sup> Cole,<sup>11</sup> Crawley & Peper,<sup>14</sup> Armaghani & Tu<sup>4</sup> e Gucunski et al.,<sup>16</sup> para se examinar a aplicabilidade do concreto de cimento Portland sobreposto, com menos de 100mm de espessura, sobre camada de concreto asfáltico, foi realizado em Louisville, Kentucky, nos EUA, o primeiro projeto experimental, que teve início em setembro de 1991.

De acordo com Cole et al.,<sup>13</sup> desde o projeto de Louisville, mais de 100 projetos de *whitetopping* ultradelgado foram construídos nos EUA. A ACPA<sup>1</sup> afirmou que cerca de 1 milhão de metros quadrados foram executados, apresentando bom desempenho sob a solicitação de tráfego leve, como ruas de bairros residenciais.

#### 2.1.2.2 Experiência sueca

Silfwerbrand<sup>25</sup> relata que, em 1993, uma extensão de 375m de *whitetopping* ultradelgado foi executado na Rodovia Nacional Sueca, localizada 50km ao norte de Estocolmo.

Sobre o pavimento asfáltico fresado foi executada uma camada de concreto de cimento Portland com adição de fibras de polipropileno, com espessura de 70 a 90mm. A resistência à compressão era de cerca de 80MPa. O pavimento foi executado com apenas seis ou sete juntas.

#### 2.1.2.3 Experiência mexicana

Salcedo<sup>24</sup> relatou que a primeira experiência com a aplicação do *whitetopping* ultradelgado no México foi em 1993. Posteriormente, mais de 600.000m<sup>2</sup> de pavimentos asfálticos deteriorados foram reabilitados com *whitetopping* ultradelgado.

#### 2.1.2.4 Experiência brasileira

Segundo Balbo,<sup>8</sup> a primeira experiência da aplicação de pavimento tipo *whitetopping* ultradelgado encaixado (*inlay*) em rodovia foi realizada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e DER-SP, próximo ao quilômetro 156 da Rodovia Castelo Branco, na faixa da direita da pista no sentido interior-capital.

Em novembro de 1999, foi construído um pavimento experimental dentro do campus da Universidade de São Paulo, que está sendo monitorado por meio de instrumentação pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Escola Politécnica.

#### 2.1.2.5 Experiência francesa

De acordo com Chambon et al.,<sup>10</sup> os franceses, que também vêm se preocupando com a aderência entre o pavimento asfáltico remanescente e o concreto de cimento Portland, apresentaram uma adaptação do *whitetopping* ultradelgado, que denominaram concreto de cimento Portland ultradelgado aderido – *very thin bonded cement concrete* (VTBCC).

A espessura do VTBCC é da ordem de 40 a 100mm, atendendo às normas francesas – carga legal de 127kN/ESRD, baixo nível de ruído, etc. – e apresenta boa aderência entre as camadas, juntas com pequena abertura, oferecendo uma estética de um pano único.

Os autores relataram que a primeira aplicação do VTBCC foi em 11 de dezembro de 1996, próximo a Paris, e depois em Aire des Châtagniers.

## 2.2 Modificações do *whitetopping* ultradelgado

O fato de a aderência entre o concreto de cimento Portland e o concreto asfáltico no *whitetopping* ultradelgado ser tão relevante está conduzindo os usuários dessa técnica a procurar maneiras de melhorar o seu efeito, aliando-a também ao *whitetopping*, o que leva a uma diminuição da sua espessura usual.

Para Cole & Mack<sup>12</sup> e Cole et al.,<sup>13</sup> a aderência para o sucesso da utilização do *whitetopping* ultradelgado seria tão importante que eles apresentaram uma nova tecnologia denominada de *thin composite whitetopping* (TCW), que poderia ser definida como um concreto de cimento Portland sobreposto, aderido intencionalmente à camada de concreto asfáltico, para criar uma seção de pavimento conjunto (concreto de cimento Portland e concreto asfáltico), com espessuras de 100 a 175mm, para receber tráfego pesado. As juntas seriam espaçadas em curtos intervalos para reduzir tensões no concreto sobreposto.

Os autores relataram que três experimentos desse tipo de pavimento foram construídos para elevado volume de tráfego nas rodovias interestaduais I-495 próximo a Boston, Massachusetts, I-20 próximo a Bolton, Mississippi, e I-94 próximo a Otsego, Minnesota, como parte do programa de avaliação do MnROAD de pavimento.

## 2.3 Desempenho do *whitetopping* ultradelgado

### 2.3.1 Conceitos fundamentais

Para Cole & Mack,<sup>12</sup> Mack et al.<sup>20</sup> e Cole et al.,<sup>13</sup> os fatores a seguir são a chave para o bom desempenho do *whitetopping* ultradelgado. A aderência entre o concreto de cimento Portland sobreposto e a camada asfáltica remanescente; segundo Balbo<sup>8</sup>, esta questão é crucial. Uma boa aderência pode ser obtida pela fresagem, limpeza e remoção do material solto da camada asfáltica subjacente, antes da execução do recobrimento com concreto de cimento Portland.

- a) Pequeno espaçamento das juntas; além de reduzir o carregamento de veículos e conseqüentemente o momento fletor, também minora o efeito de empenamento das placas.
- b) Concretos de liberação rápida ao tráfego. Segundo a ACPA,<sup>1</sup> o concreto deveria apresentar resistência à compressão de pelo menos 20MPa em 24 horas, ao que Balbo & Rodolfo<sup>9</sup> acrescentaram que deve apresentar ganho acelerado de resistência para liberação ao tráfego, não se podendo, segundo Lord<sup>18</sup> colocar, descuidar-se da cura do concreto.
- c) Espessura apropriada da camada asfáltica remanescente; de acordo com a ACPA,<sup>1</sup> a camada asfáltica proporcionaria uma camada de suporte resistente e não erodível para a placa de concreto.

## 2.4 Aderência entre o concreto de cimento Portland e o concreto asfáltico

### 2.4.1 Ensaios para determinação da resistência à aderência

Existem diversos ensaios para medir a resistência à aderência:

- a) Ensaio de arrancamento (*pull-off test method*).
- b) Ensaio de cisalhamento oblíquo (*slant shear test*).
- c) Método de ensaio de Grzybowska.
- d) Método do repique (*impacto-echo method*).
- e) Método de cisalhamento (*wedge splitting test*).
- f) Método de tração direta (*pure tension*).
- g) Método de Iowa 406 (*test collar*).
- h) Ensaio de cisalhamento de Ancona (*Ancona shear Testing*).

## 3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

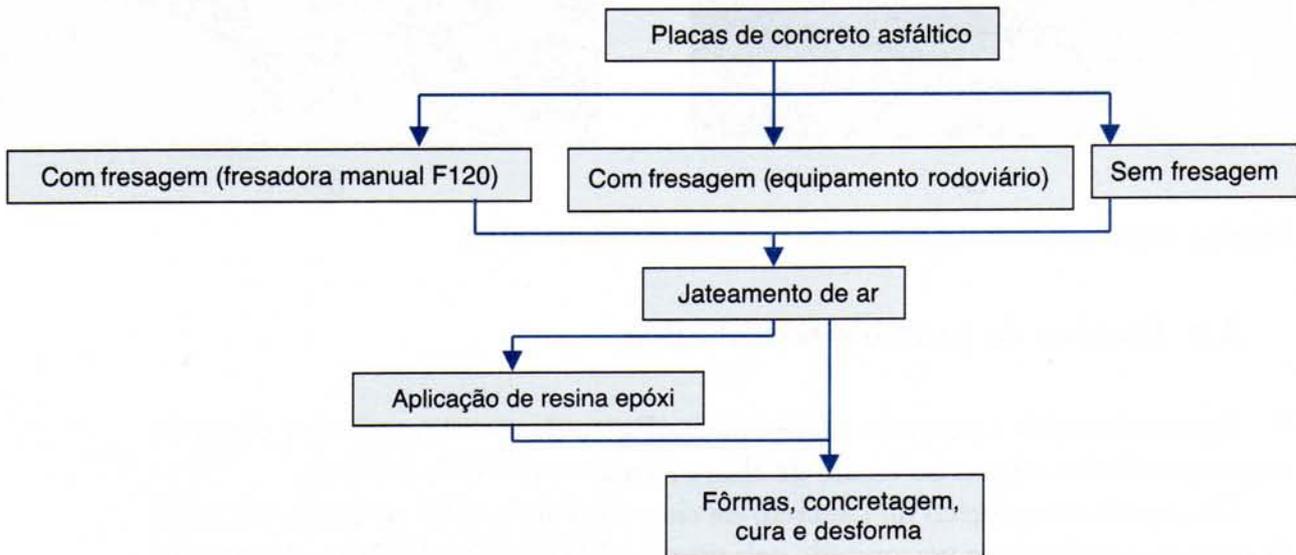
Com a finalidade de estudar as características da aderência na interface do concreto de cimento Portland e do concreto asfáltico, foi desenvolvida esta pesquisa, em que placas de concreto asfáltico de cerca de  $180 \times 500 \times 50$ mm receberam quatro tratamentos superficiais diferentes: sem fresagem; com fresagem e jateamento de ar; com fresagem, jateamento de ar e aplicação de resina tipo epóxi; e sem fresagem e aplicação da resina do tipo epóxi. Tais placas foram recobertas com concreto fresco de cimento Portland com aproximadamente 60mm de espessura.

A aplicação desse tratamento simula situações que podem ocorrer na execução de placas ultradelgadas de concreto de cimento Portland aplicadas como reforço de pavimentos asfálticos, ou seja, o recobrimento de pavimentos de concreto asfáltico com a execução de placas delgadas (50 a 100mm de espessura) de concreto de cimento Portland, que são geralmente fresadas e limpas com jato de ar, mas que eventualmente podem apresentar falhas na fresagem (sem fresagem).

As demais opções (aplicação de resinas do tipo epóxi) tem a finalidade de ampliar as opções para tratamento superficial na melhoria da aderência. Helene,<sup>17</sup> estudando sobre reparos de estrutura de concreto, verificou que a aplicação de resinas epóxicas, como elementos facilitadores de pontes de aderência, é a que resulta em melhor desempenho do conjunto.

### 3.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram moldados conforme esquematizado na Figura 1. Cabe observar que as amostras que foram fresadas e receberam pintura com resina do tipo epóxi na interface receberam fresagem manual. Todas as placas antes da concretagem foram limpas com aplicação de jato de ar.



**Figura 1** Esquema da execução das placas de *whitetopping* ultradelgado para ensaios de laboratório

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, fresagem de placas com fresadora manual (a) e com fresadora 1000 C (b); placa após a fresagem (a) e a limpeza com jato de ar (b).



(a)

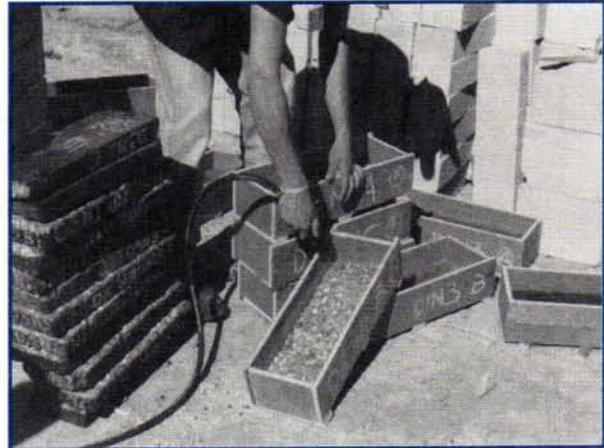


(b)

**Figura 2** Fresagem de placas com fresadora manual (a) e com a fresadora 1000 C (b)



(a)



(b)

**Figura 3** Placa após a fresagem (a) e a limpeza com jato de ar (b)

### 3.2 Ensaios de controle tecnológico

Foram efetuados ensaios de controle tecnológico da macrotextura das placas de concreto asfáltico através do ensaio de altura de areia (ASTM E-965/96).

O controle tecnológico do concreto de cimento Portland foi realizado por meio de ensaios, atendendo ao preconizado pela norma ABNT NBR 12821/93 (Preparação de concreto em laboratório) e a ABNT NBR 6118/80 (Projeto e execução de obras de concreto armado). Além dos ensaios usuais realizados com o concreto fresco e endurecido, foi determinado o módulo de deformação estático em corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos.

Obteve-se uma resistência à compressão média de 50,2MPa e à tração na flexão de 6,8MPa para o espaço de tempo de 28 dias. O módulo de deformação do concreto de cimento Portland foi de aproximadamente 33,7GPa.

## 4 ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND E O CONCRETO ASFÁLTICO

Devido à dificuldade de obtenção de valores representativos da resistência ao cisalhamento, da dificuldade de moldagem do corpo-de-prova ou disponibilidade de equipamento, foi desenvolvido um método de ensaio simples e de fácil exequibilidade pelos laboratórios que atuam na área de construção civil.

### 4.1 Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram cortados, conforme mostrado na Figura 4 e colados conforme mostrado na Figura 5.

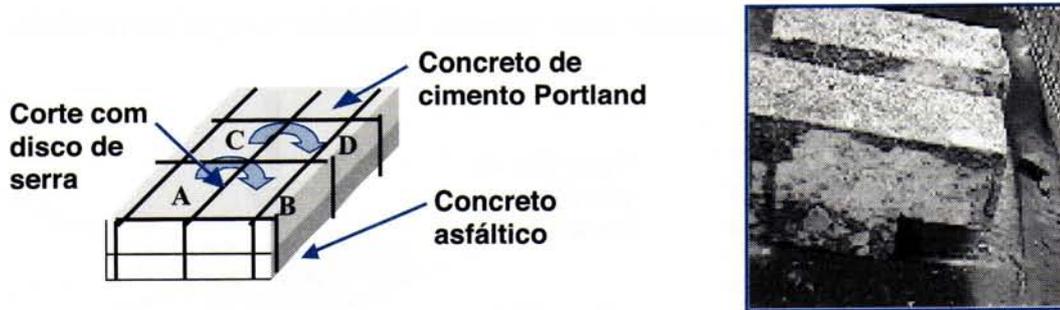


Figura 4 Corte dos corpos-de-prova

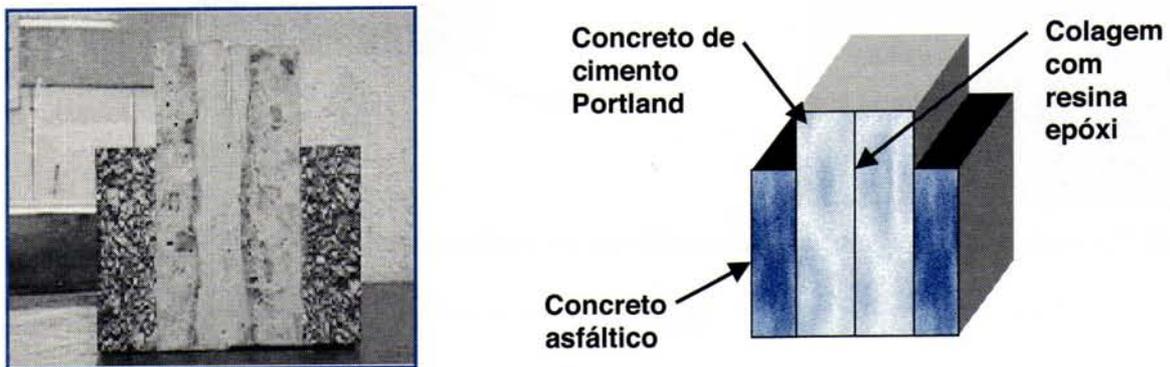


Figura 5 Colagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram capeados de maneira a corrigir pequenas imperfeições oriundas do corte da amostra e a garantir a aplicação axial sobre superfícies opostas paralelas. O capeamento foi realizado conforme esquema da Figura 6.

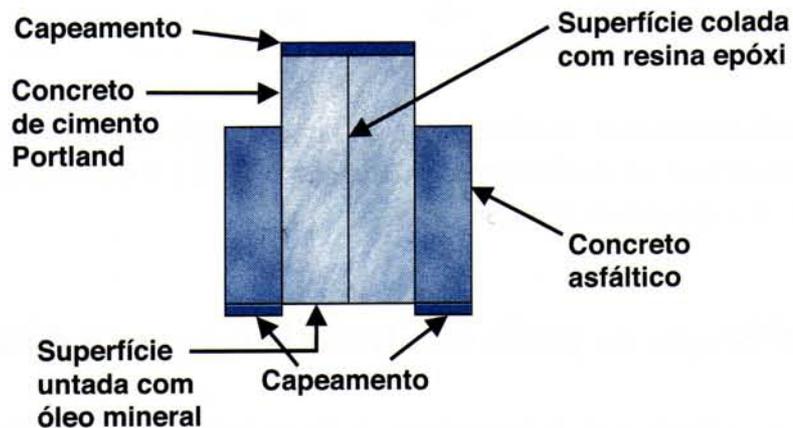


Figura 6 Capeamento do corpo-de-prova

## 4.2 Ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento estática

Foram realizados ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento estática utilizando uma máquina de ensaio com sistema hidráulico servo controlado, denominada MTS.

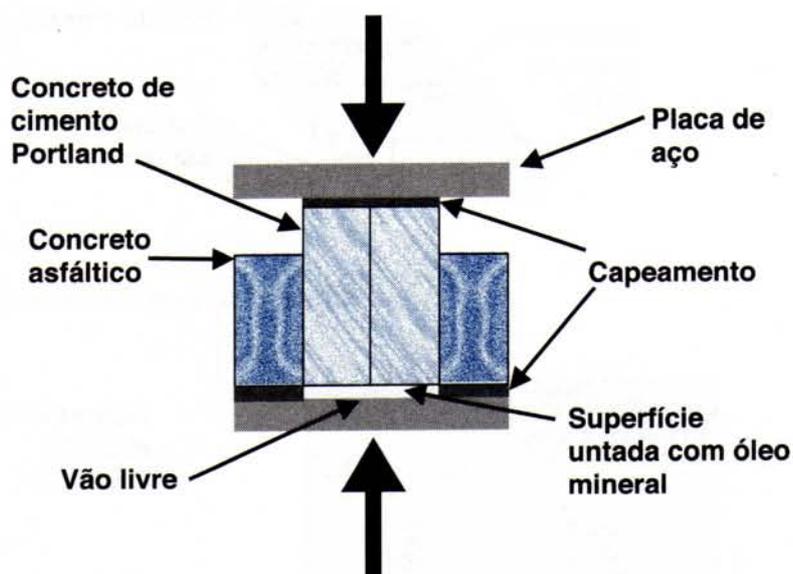
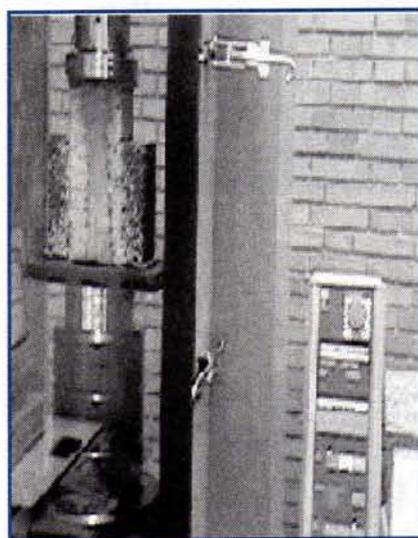


Figura 7 Ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento estática

TABELA 1

Resultados médios da resistência ao cisalhamento estática

Tipo de tratamento	$\tau$ (kPa)	sd (kPa)	CVA (%)	Nº de cp ensalados	Laboratório
Nenhum tratamento	1.637	427	26	4	LMR-PMI
Fresada manualmente	1.647	132	8	8	LMR-PMI
Fresada com 1000 C	1.868	299	16	16	LMR-PMI
Só resina	2.540	148	44	6	LMR-PMI
Fresada mais resina	2.616	402	15	6	LMR-PMI

Os resultados médios da resistência ao cisalhamento estão apresentados na Tabela 1, onde:  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento média em kPa; sd é o desvio padrão; e CVA é o coeficiente de variação da amostra ( $sd/\tau$ ).

## 4.3 Verificação da perda de aderência em ensaio dinâmico

Mack et al.,<sup>19</sup> Noda et al.,<sup>21</sup> Armaghani & Tu,<sup>3,4</sup> Balbo et al.<sup>7</sup> e Balbo<sup>8</sup> destacaram a necessidade de se pesquisar mais sobre a perda de aderência ou durabilidade da

aderência na interface das camadas, o que influenciaria sobremaneira o dimensionamento e o desempenho do WTUD.

Como se almejava verificar se ocorreria a perda de aderência entre o concreto de cimento Portland e o concreto asfáltico, deu-se seqüência aos testes empregando-se amostras preparadas conforme o ensaio de cisalhamento direto, aplicando-se cargas repetidas com níveis de tensão de cisalhamento na interface aderida, inferiores à tensão média de ruptura anteriormente determinada em ensaio de cisalhamento direto.

Este ensaio foi realizado na máquina de ensaio MTS, sendo o registro de dados (cargas e deslocamento) e o controle de carga aplicada automáticos e informatizados. O ensaio de carga repetida foi conduzido colocando-se o corpo-de-prova na máquina de ensaio e simulando-se aplicações de carga. Para uma mesma freqüência foram realizados ensaios com três níveis de tensões diferentes, procurando-se definir o número de ciclos de carga permissíveis até a ruptura da interface aderida. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos.

TABELA 2

Resultados obtidos no ensaio para verificação da perda de aderência

Corpo-de-prova	Carga máxima aplicada (kN)	Número de ciclos	Freqüência (Hz)	Tensão máxima aplicada (kPa)	Número médio de ciclos	Observação
70 C-D	8	$8,3 \times 10^4$	5	312,50	-	Não rompeu
81 A-B	8	$2,3 \times 10^5$	5	312,50	$2,3 \times 10^5$	Rompeu
76 A-B	15	$5,145 \times 10^3$	5	585,94	$5,145 \times 10^3$	Rompeu
70 A-B	15	$2,05 \times 10^3$	5	585,94	$2,05 \times 10^3$	Não rompeu
76 C-D	20	$1,93 \times 10^3$	5	769,00	$1,93 \times 10^3$	Rompeu
66 C-D	25	530	5	976,56	530	Rompeu
68 A-B	30	29	1	1.172	25	Rompeu
68 C-D	30	21	1	1.172		Rompeu

Embora a quantidade de ensaios dinâmicos realizados tenha sido pequena, os resultados permitem uma clara idéia de que, mesmo em níveis de tensão bastante inferiores à tensão de ruptura da interface aderida, a perda de aderência (ruptura da interface) ocorria após determinado número de ciclos de carregamento. Esses números de ciclos obtidos nos ensaios realizados apontam para dois aspectos muito importantes:

- Caso o corpo-de-prova fosse somente de concreto de cimento Portland, solicitado em um nível muito baixo de tensão, ele seria levado eventualmente à degradação após um número de ciclos muito maior do que aqueles verificados. Tal fato foi constatado em corpos-de-prova que “encostaram” no prato da prensa. Cabe relatar que os corpos-de-prova, após a ruptura, sempre apresentavam mistura asfáltica aderida ao concreto de cimento Portland na interface; forte indício de que a ruptura na interface aderida ocorria na zona de concreto asfáltico, um material que notoriamente a qualquer nível de tensões sofre processo de fadiga associado à deformações visco-plásticas.

- Com relação ao baixo número de repetições de carga obtido com os ensaios realizados, torna-se difícil recomendar a utilização de *whitetopping* ultradelgado em vias que possuam elevado volume de tráfego comercial.

## 5 AVALIAÇÃO NUMÉRICA DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO EM *WHITETOPPING* ULTRADELGADO

Com a finalidade de comparar valores de resistência obtidos com valores de tensão esperados, foi realizada esta avaliação, para diversas condições de análise. Esta análise compõe parte do trabalho de pesquisa em desenvolvimento pelo LMP-EPUSP e pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Para as 720 simulações, considerou-se aderência plena, sem efeitos de transmissão de cargas em juntas, ocorrência de uma fissura ao longo das juntas do *whitetopping* ultradelgado na profundidade do pavimento composto, coeficiente de Poisson de 0,15, módulo de reação do sistema de apoio de 25, 75, 125 e 175MPa/m.

Utilizando placas quadradas de 1,20m, a tensão crítica de análise ocorreu quando a carga se encontrava próxima do canto da placa. A análise foi desenvolvida para eixo simples, roda dupla com pressão mínima típica de 638kPa, com carregamentos de 60, 80, 100, 120 e 140kN (Rodolfo et al.).<sup>23</sup>

Foram realizadas avaliações para o concreto asfáltico com módulo resiliente de 2.000 e de 3.000MPa e espessura de 70, 100 e 120 milímetros. Considerou-se o módulo de deformação do concreto de cimento Portland de 30.000MPa e espessuras de camada de 50 a 100mm.

A partir da análise numérica foram estudados os efeitos de variação dos diversos parâmetros nas tensões na interface aderida, obtendo-se resultados cujo resumo está apresentado na Tabela 3.

Das análises efetuadas, fixando-se o módulo de reação do sistema de apoio, a espessura da camada de concreto asfáltica e da camada de concreto de cimento Portland, conclui-se que, quanto maior o módulo resiliente do concreto asfáltico, menor será a tensão de cisalhamento na interface aderida, e que a espessura da camada de concreto asfáltica afeta mais os valores da tensão de cisalhamento do que o módulo resiliente desse material.

TABELA 3

Avaliação dos gráficos da tensão de cisalhamento pela espessura de whitetopping ultradelgado

$E_{CA}$ (MPa)	$t_{CA}$ (m)	Carregamento (kN) k	$t_{WTUD}$	$p/\tau_{max}$ (m)	Tensão de cisalhamento (kPa) valores máximos					Espessura mínima do WTUD para a tensão de cisalhamento $\leq 1.400kPa$				
					60	80	100	120	140	140	60	80	100	120
2.000	0,07	25	0,05	1.450	1.700	1.900	2.100	2.300	0,06	0,075	0,085	0,09	Não atende	
		75	1.300	1.500	1.700	1.850	1.900	1.900	0,05	0,065	0,08	0,09	0,095	
	125	1.250	1.350	1.500	1.650	1.800	1.800	0,05	0,05	0,075	0,085	0,095		
	175	1.190	1.320	1.450	1.550	1.650	1.650	0,05	0,05	0,065	0,08	0,09		
3.000	0,10	25	0,07	800	930	1.050	1.150	1.250	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
		75	770	880	980	1.080	1.170	1.170	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
	125	640	840	940	1.030	1.110	1.110	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
	175	720	810	905	980	1.060	1.060	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
3.000	0,12	25	0,08	580	670	750	830	900	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
		75	565	650	760	800	860	860	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
	125	545	640	705	770	830	830	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
	175	530	620	690	750	810	810	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
3.000	0,07	25	0,06	1.030	1.205	1.350	1.500	1.640	0,05	0,05	0,05	0,05	0,085	
		75	960	1.105	1.250	1.370	1.490	1.490	0,05	0,05	0,05	0,05	0,075	
	125	910	1.040	1.160	1.270	1.370	1.370	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
	175	880	990	1.100	1.200	1.300	1.300	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
3.000	0,10	25	0,08	560	650	770	810	870	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
		75	540	630	705	770	840	840	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
	125	530	610	680	740	805	805	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
	175	520	595	660	750	770	770	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
3.000	0,12	25	0,09	405	470	530	575	630	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
		75	400	460	520	560	610	610	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
	125	390	450	505	550	600	600	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
	175	380	445	495	545	580	580	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		

onde:  $E_{CA}$  é o módulo resiliente da camada asfáltica;  $t_{CA}$  é a espessura da camada asfáltica; K é o módulo de reação do sistema de apoio;  $t_{WTUD}$  é a espessura da camada de WTUD.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Resistência à ruptura por cisalhamento na interface aderida: observou-se que a resistência ao cisalhamento de amostra sem nenhum tratamento na interface e de amostra fresada sofreu acréscimo de apenas 1% na resistência. Já a fresagem com equipamento rodoviário (1000 C) significou um acréscimo de 14% em relação à sem fresar.
- Potencial de perda de aderência: ocorreu o risco de perda de aderência mesmo em níveis de tensão muito baixos, e quanto menor o nível de tensão, maior o número de ciclos. Verificou-se que a danificação da interface foi motivada pela deformação plástica do concreto asfáltico.
- Da análise numérica verificou-se que o concreto asfáltico fresado para uma carga de 80kN apresentou tensão abaixo da resistência ao cisalhamento. Observou-se também que, quanto menor o módulo resiliente do concreto asfáltico, maior a tensão de cisalhamento atuante, quanto menor a espessura do *whitetopping* ultradelgado e da camada asfáltica, maior a tensão de cisalhamento e, finalmente, que, como é do nosso conhecimento, a espessura da camada asfáltica é a variável mais importante do ponto de vista da tensão à tração na flexão e que também sob o aspecto da aderência é o fator-chave para a redução da tensão de cisalhamento, desde que mantidas as condições de integridade da mistura asfáltica.

Concluída esta pesquisa cria-se a expectativa de emprego da tecnologia para vias de baixo volume de eixos comerciais e utilização como solução preventiva, de maneira a preservar a camada asfáltica das deformações plásticas.

O uso da resina tipo epóxi como ponte de aderência é promissor do ponto de vista técnico, porém aumenta o custo em cerca de R\$ 24,50/m<sup>2</sup>.

Como principais recomendações para estudos futuros, ao final deste trabalho, são apontadas as seguintes ações:

- Monitorar, por meio de instrumentos adequados em pista (escala real), a modificação da posição da linha neutra em função do tempo de serviço do pavimento composto, como um indicativo da ocorrência da perda de aderência, o que no momento está sendo desenvolvido pelo LMP-EPUSP.
- Elaborar estudos aplicando-se outros produtos e tipos de tratamento da superfície que permitam melhorar de forma significativa a resistência da superfície aderida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. *Whitetopping – state of the practice. Engineering Bulletin – EB210P*. ACPA, Skokie, Illinois, EUA, 1998, p.45-66.
2. AMERICAN STANDARD TEST MATERIALS. *Standard test method for measuring surface macrotexture depth using a volumetric technique – E 965*. ASTM. EUA, 1987, p.707-709. (reapproved 1995).
3. ARMAGHANI, J.M., TU, D. INTERNACIONAL PURDUE CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND MATERIALS FOR HIGH PERFORMANCE, 6<sup>TH</sup>, 1997, Indianapolis, Indiana, Purdue University, EUA, *Proceedings Performance of ultra-thin whitetopping in Florida*, v.2, p.189-206.
4. ARMAGHANI, J.M., TU, D. Rehabilitation of Ellaville Weigh Station with ultra-thin whitetopping. *Paper submitted for presentation and publication at the 78<sup>th</sup> annual meeting of the TRB*, p.30, Washington D.C., jan. 1999.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12821 – *Preparação de concreto em laboratório*. Rio de Janeiro, 1993.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – *Projeto e execução de obras de concreto armado*. Rio de Janeiro, 1980.
7. BALBO, J.T., RODOLFO, M.P. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS, AIPCR-CEMBUREAU, 8<sup>TH</sup>. Theme IV – Maintenance and rehabilitation, Lisboa, Portugal, 1998. *Proceedings concrete requirements for ultra-thin concrete overlays (whitotopping) for flexible pavements*. p.27-32.
8. BALBO, J.T. *Contribuição à análise estrutural de reforços com camadas ultradelgadas de concreto de cimento Portland sobre pavimentos asfálticos (whitotopping ultradelgado)*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. 195 p. (Tese de Livre Docência).
9. BALBO, J.T., PITTA, M.R., RODOLFO, M.P. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 31<sup>a</sup>, ABPv, São Paulo, Brasil, 1998. *Anais, Whitotopping ultradelgado – conceitos básicos sobre uma tecnologia emergente*, v.2, p.646-663.
10. CHAMBON, M., CHRISTORY, P., DALLEMAGNEAND, M., GROB, M. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS, AIPCR-CEMBUREAU, 8<sup>th</sup>, Lisboa, Portugal, 1998. *Proceedings very thin bonded cement concrete (VTBCC): a new quality surfacing*. p.165-172. (Theme IV – Maintenance and Rehabilitation).
11. COLE, L. W. INTERNACIONAL PURDUE CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND MATERIALS FOR HIGH PERFORMANCE, 6<sup>th</sup>, Purdue University, Indiana, EUA, 1997. *Proceedings pavement condition surveys of ultrathin whitotopping projects*. v.2, p.175-188.
12. COLE, L.W., MACK, J.W. *Thin bonded concrete overlays of asphalt pavement. concrete intersections: A guide for design and construction*, Skokie, IL, 1997. (Artigo não publicado).
13. COLE, L., MACK, J., PACKARD, R. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS, – AIPCR-CEMBUREAU, 8<sup>th</sup>, Lisboa, Portugal, 1998. *Proceedings whitotopping and ultra-thin whitotopping – the U.S. experience*. p.203-18. (Theme IV – Maintenance and rehabilitation).

14. CRAWLEY, A.B., PEPPER, J.M. ANNUAL MEETING OF THE TRB, 78<sup>th</sup>, Washington D.C., jan. 1999. *Application of fiber reinforced concrete for thin and ultra-thin whitetopping on I-20*, p.15.
15. FORTES, R.M. *Estudo da aderência entre placas de concreto de cimento Portland e concretos asfálticos para fins de reforços ultradelgados de pavimentos*, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.1999. 335 p. (Tese de Doutorado).
16. GUCUNSKI, N., GANJI, V., VITILLO, N., TABRIZI, K. & MAHER, A. ANNUAL MEETING OF THE TRB, 78<sup>th</sup>, Washington D.C., jan. 1999. *FE Analysis based prediction equations for ultra thin whitetopping (UTW)*. p.26. (Paper submitted for presentation and publication).
17. HELENE, P.R.L. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. São Paulo, 1988. Tecnologia de edificações. *Ensaio para controle de adesivos epóxi destinados a estruturas de concreto*.
18. LORD, J. *Interactive presentation* [on-line]. Ultra-thin whitetopping, 1998. Disponível na Internet: <<http://www.irmca.com/utw/index.html>>.
19. MACK, J.W., COLE, L.W. & MOHSEN, J.P. Analytical considerations for thin concrete overlays on asphalt. *Transportation Research Record*, n.1388, 1993, p.167-173.
20. MACK, J.W., HAWBAKER, L.D. & COLE, L.W. Ultra-thin Whitetopping (UTW): The State-of-the-Practice for thin Concrete Overlays of Asphalt. Washington D.C., Paper n.980445, 1998. (Paper presented for the TRB meeting).
21. NODA, E. KONG, Y. & KASAHARA, Y. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS, AIPCR-CEMBUREAU, 8<sup>th</sup>, Lisboa, Portugal, 1998. *Proceedings Fundamentals study on bonded ultrathin whitetopping*. (Theme IV – Maintenance and rehabilitation, p.67-76).
22. RISSER, R.J., LAHUE, S.P., VOIGT, G.F., MACK, J.W. INTERNACIONAL CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND REHABILITATION, 5<sup>th</sup>, Indiana, Purdue University, West Lafayette, EUA, 1993. *Proceedings ultra-thin concrete overlays on existing asphalt pavement*. v.2, p.247-254.
23. RODOLFO, M.P et al. 2º CONGRESSO INTERAMERICANO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO, 2000. *Development of a model for stress calculations in ultra-thin whitetopping based on 2-D finite element method*, p.19. (No prelo).
24. SALCEDO, M.A. *Rehabilitación de pavimentos flexibles mediante losas delgadas de concreto*. Buenos Aires: FICEM – Federación Interamericana del Cemento, v.I, p.1-15, 1996.
25. SILFWERBRAND, J. INTERNATIONAL PURDUE CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND MATERIALS FOR HIGH PERFORMANCE, 6<sup>th</sup>, The Purdue University, Indianapolis, Indiana, EUA, 1997. *Proceedings whitetopping – swedish field tests and recommendations*. v.2, p.231-243.
26. SILFWERBRAND, J. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS – AIPCR-CEMBUREAU, 8<sup>th</sup>, Lisboa, Portugal, 1998. *Proceedings whitetoppings – Long term performance and recommendations*, p.139-148. (Theme IV – Maintenance and rehabilitation).