

REVISTA

ABPV

Associação Brasileira de Pavimentação



# PAVIMENTAÇÃO

Ano V – Nº 20 – Mar / Abr / Mai de 2011 – [www.abpv.org.br](http://www.abpv.org.br) – ISSN 1809-4865



**Avaliação do dano  
em reforços de pavimentos**

**Manuel J. C. Minhoto  
Jorge País**

# 17ª

18 a 20 | outubro | 2011

Hotel Plaza São Rafael  
Porto Alegre | RS

## REUNIÃO DE

# PAVIMENTAÇÃO URBANA



Participe e conheça as novidades em materiais, técnicas e estudos da pavimentação!

### Temas:

- Financiamento a municípios;
- Materiais para pavimentação;
- Estudos e projetos de pavimentos;
- Manutenção, restauração e gerência de vias;
- Técnica de construção e controle de qualidade de pavimentos;
- Segurança e meio ambiente em vias;
- Abertura e reaterro de valas de redes subterrâneas;
- SMS (Saúde do Trabalho, Meio Ambiente e Segurança do Trabalhador);
- Preparação das cidades para a Copa 2014.

### Trabalhos:

- 15/04 - entrega de resumo, enviar para: [17rpubana@gmail.com](mailto:17rpubana@gmail.com)
- 30/04 - notificação de aceite do resumo
- 17/06 - prazo final para entrega de trabalho em Word
- 31/07 - notificação de aceite de trabalho
- 27/08 - prazo final para trabalho revisto

Para acessar o arquivo padrão de trabalho técnico acesse o endereço abaixo:

[http://www.rpu.org.br/Normas\\_de\\_Trabalhos\\_ABPv17RPU.doc](http://www.rpu.org.br/Normas_de_Trabalhos_ABPv17RPU.doc)



Realização



Nossa cidade, nosso futuro.

Secretaria Executiva



Informações

51 3231.0311

[rpu17@specialitaeventos.com.br](mailto:rpu17@specialitaeventos.com.br)

[www.rpu.org.br](http://www.rpu.org.br)



Rua Miguel Couto, 105 – Sobrelojas 204 e 205  
20070-030 – Rio de Janeiro – RJ  
Tel: (21) 2233-2020 / 2263-5794 – Fax: (21) 2233-0709

**CONSELHO EDITORIAL**  
Diretoria da ABPv

COORDENAÇÃO GERAL JORNALISTA RESPONSÁVEL  
Arq<sup>ta</sup> Georgina Libório Azevedo Jean Pierre M. Santiago  
georgina@abpv.org.br MTb 27170-RJ  
redacao@revistapavimentacao.org.br

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA  
DE PAVIMENTAÇÃO**

Presidente: Eng<sup>o</sup> JOSÉ PEDRO DOS SANTOS VIEIRA COSTA  
Vice-Presidente: Eng<sup>o</sup> EDUARDO ALBERTO RICCI  
Diretor Administrativo: Eng<sup>o</sup> FERNANDO AUGUSTO JÚNIOR  
Diretor Técnico: Eng<sup>o</sup> MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE  
Diretor Financeiro: Arq<sup>ta</sup> GEORGINA LIBÓRIO AZEVEDO  
Diretor de Divulgação: Eng<sup>o</sup> CRISTIANO DA COSTA MOREIRA

**COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO**

Eng<sup>o</sup> Alfredo Monteiro de Castro Neto; Eng<sup>o</sup> Antônio Fortunato Marcon; Eng<sup>o</sup> Armando Morilha Junior; Eng<sup>o</sup> Atahualpa Schmitz da S. Prego; Eng<sup>o</sup> Carlos Yukio Suzuki; Eng<sup>o</sup> Cássio Eduardo Lima de Paiva; Eng<sup>o</sup> Cristiano da Costa Moreira; Eng<sup>o</sup> Djalma Rocha A. M. Pereira; Eng<sup>o</sup> Douglas Fadul Villibor; Eng<sup>o</sup> Dultevir Guerreiro Vilar de Melo; Eng<sup>o</sup> Edinaldo Afonso Marques de Mélo; Eng<sup>o</sup> Eduardo Alberto Ricci; Eng<sup>o</sup> Fernando Augusto Jr.; Eng<sup>o</sup> Genésio Almeida da Silva; Arq<sup>ta</sup> Gilda Collet Bruna; Eng<sup>o</sup> Glicério Trichês; Eng<sup>o</sup> Heitor Roberto Giampaglia; Eng<sup>o</sup> Jacques de Medina; Eng<sup>o</sup> João Menezes Fabrício; Eng<sup>o</sup> João Virgílio Merighi; Eng<sup>o</sup> Jorge Augusto Pereira Ceratti; Eng<sup>o</sup> José Pedro dos Santos Vieira Costa; Eng<sup>o</sup> José Leomar Fernandes Junior; Eng<sup>o</sup> José Tadeu Balbo; Eng<sup>o</sup> Laura M<sup>a</sup> Goretii da Motta; Eng<sup>o</sup> Leni F. M. Leite; Eng<sup>o</sup> Leto Momm; Eng<sup>o</sup> Liedi Legi B. Bernucci; Eng<sup>o</sup> Luciana Nogueira Dantas; Eng<sup>o</sup> Luiz Miguel de Miranda; Eng<sup>o</sup> Marcello Roberto Rangel Pestana; Eng<sup>o</sup> Márcio Muniz de Farias; Eng<sup>o</sup> Marçalio Augusto Neves; Eng<sup>o</sup> Maria da Conceição M. Azevedo; Eng<sup>o</sup> Michéle Dal Toé Casagrande; Eng<sup>o</sup> Nilton de Souza Campelo; Eng<sup>o</sup> Paulo Romeu Assunção Gontijo; Eng<sup>o</sup> Prepredigna D. E. Almeida da Silva; Eng<sup>o</sup> Rita Moura Fortes; Eng<sup>o</sup> Silvío Rodrigues Filho; Eng<sup>o</sup> Saul Birman; Eng<sup>o</sup> Walter Canales Sant'ana; Eng<sup>o</sup> Washington Pérez Nuñez.

Tradução: Mariana Ricci

Editoração: MURO Produções Gráficas

Revisão: Ellis Pinheiro

Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda

Periodicidade: Trimestral – Tiragem: 5.000 exemplares



**Nossa capa:**

SP-123 – Rodovia Floriano  
Rodrigues Pinheiro.  
Campos do Jordão, SP.

Foto: Georgina Libório Azevedo

# Sumário

- 2 Editorial
- 3 SALOMÃO PINTO  
O adeus ao ilustre engenheiro
- 5 Seção de notas
- ESPAÇO JURÍDICO**
- 6 Precaução, um princípio inócuo?  
*Victor Athayde*
- ARTIGOS TÉCNICOS**
- 8 Avaliação do dano em reforços  
de pavimentos  
*Manuel J. C. Minhoto e Jorge Pais*
- 19 Avaliação da resistência ao dano por  
umidade em misturas asfálticas por meio de  
métodos adotados no Brasil e na Espanha  
*Edeildo Almeida Ribeiro, Wellington Lorrán Gaia  
Ferreira, Verônica T. F. Castelo Branco, Sandra Aguiar  
Soares, Jorge Barbosa Soares e Angel Mateos*
- 30 Utilização de resíduos oleosos em camadas  
estabilizadas de bases e sub-bases  
de pavimentos rodoviários  
*Cláudio Batista dos Santos, Adriano Elísio de Figueiredo  
Lopes Lucena, André Wesley Barbosa Rodrigues  
e John Kennedy Guedes Rodrigues*
- 38 Contribuição ao uso de análise paramétrica  
para dimensionamento de pavimentos  
flexíveis utilizando valores  
estimados de módulo de resiliências  
*Clauber J. B. da Costa e Adson Viana Alecrim*
- CARTAS**
- 50 Cartas dos leitores

# Editorial

---

A Revista PAVIMENTAÇÃO, em sua edição de número 20, apresenta quatro artigos inéditos aprovados pelo Comitê Técnico-Científico. Com temáticas abrangentes, estes artigos oriundos de experimentos e pesquisas fornecem ao leitor um estudo seguro e qualitativo, reforçando a busca pela excelência na técnica.

Avaliação do Dano em Reforços de Pavimentos é o título do artigo internacional de capa. Trata-se de um estudo dos professores Manuel J. C. Minhoto, do Instituto Politécnico de Bragança, e Jorge Pais, professor associado da Universidade do Minho, Portugal. Um trabalho estrangeiro de qualidade é importante para ensinar o intercâmbio e a transferência de tecnologia, aspecto propulsor do desenvolvimento.

O segundo artigo refere-se a um estudo de avaliação da resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas por meio de métodos adotados no Brasil e na Espanha. Trabalho elaborado pelos pesquisadores Edeildo Almeida Ribeiro, Wellington Lorrain Gaia Ferreira, Verônica T. F. Castelo Branco, Sandra Aguiar Soares, Jorge Barbosa Soares e Angel Mateos.

Do Estado da Paraíba vem o artigo Utilização de Resíduos Oleosos em Camadas Estabilizadas de Bases e Sub-Bases de Pavimentos Rodoviários. Este trabalho resultou dos estudos de Cláudio Batista dos Santos, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, André Wesley Barbosa Rodrigues e John Kennedy Guedes Rodrigues.

O quarto e último artigo, dos autores Cláudio J. B. da Costa e Adson Viana Alecrim, trata da contribuição ao uso de análise paramétrica para dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizando valores estimados de módulo de resiliência.

No espaço jurídico, o advogado Victor Athayde fala sobre o princípio da precaução.

Esta edição cumpre o dever de homenagear um dos grandes nomes da engenharia rodoviária brasileira que nos deixou recentemente, o engenheiro Salomão Pinto. Sócio da ABPv desde 1969, o emérito professor foi e continuará sendo uma referência para os profissionais e para o meio acadêmico, pois seu legado é de grande importância.

A todos os leitores, os nossos votos de apreço e bons estudos a partir dos temas aqui abordados.

Conselho Editorial

# SALOMÃO PINTO

## O adeus ao ilustre engenheiro

\*01/10/1937 †03/03/2011



No dia 03 de março de 2011, a engenharia civil brasileira, especificamente a rodoviária, perdeu um de seus maiores expoentes, o engenheiro Salomão Pinto.

Doutor em engenharia civil, foi um profissional que conquistou respeito e notoriedade entre seus colegas e também no mun-

do acadêmico. Dono de um currículo brilhante na área rodoviária, o legado de Salomão Pinto é uma referência. Dedicou mais de 40 anos à pavimentação, tendo publicado diversos trabalhos no Brasil e no exterior. Morou em Lisboa e na Suíça, onde desenvolveu pesquisas de grande relevância que hoje se transformaram em métodos, normas e procedimentos usados como modelo em toda a comunidade rodoviária do País.

Era membro da Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás desde 1994. Professor da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e do Instituto Militar de Engenharia (IME), Engenheiro do DNIT (desde o DNER) ocupando diversas funções de chefia e direção. Autor de diversos livros, artigos e trabalhos na área de pavimentação, o que lhe rendeu diversos prêmios, dentre eles a Medalha do Pacificador – Duque de Caxias, o Mérito Mauá, o Prêmio Pontes Corrêa, da Associação Brasileira de Pavimentação. Das mãos do então Presidente da República Fernando Henrique Cardoso recebeu a Medalha de Honra ao Mérito. No exterior desenvolveu no início da década de 1980 pesquisas na École Polytechnique Fédérale, em Zurique e na

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça. Em 1990, desenvolveu trabalhos no Soil Mechanics and Bituminous Materials Laboratory, Berkeley, na Califórnia, Estados Unidos.

Na ABPv, o engenheiro Salomão Pinto ingressou como sócio em junho de 1969. Com forte atuação, foi membro da diretoria em seis gestões. Também membro da Comissão Organizadora e Técnico Científica da 40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, em 2010, membro do Comitê Técnico-Científico da Revista PAVIMENTAÇÃO, desde sua criação, em 2006, membro da COMECPAV – Comissão de Mecânica dos Pavimentos. Foi um dos idealizadores, juntamente com Eng<sup>a</sup> Mario Kabalem Restom, das alterações feitas na logomarca da ABPv, em 1993, foi Coordenador da Comissão de Avaliação de Pavimentos, em 1994, co-autor do Boletim Técnico nº 13 – Teses Universitárias de Mecânica dos Pavimentos pela COMECPAV – Comissão de Mecânica dos Pavimentos, e do Boletim Técnico nº 16 – Catálogo de Curvas de Fadiga pela COMECPAV – Comissão de Mecânica dos Pavimentos, em 1995. Também foi Prof<sup>a</sup> de diversos cursos promovidos pela ABPv.

No âmbito pessoal, sua família exaltou sua vida e obra em eloquente e emocionante discurso proferido na cerimônia de adeus, cujo trecho destacamos:

*“(...) Amigo, profissional exemplar, um Maestro no Brasil e exterior. Como falar desta personalidade tão importante e presente em nossas vidas?”*

*Salomão, de nome intenso, grande homem em sua essência; de atitudes certas na defesa dos seus e daqueles que se fizeram presentes em seu caminho. Transformava-se em um leão raivoso, quando qualquer perigo se aproximava e ameaçava aqueles que estavam sob sua proteção. Contudo, por dentro deste leão,*

existia um homem com um excelente coração e de uma enorme vontade de ajudar o próximo.

Com suas palavras e repetições, insistindo em suas convicções, vencia qualquer argumento, fosse por razão ou pela insistência que lhe era tão peculiar.

Para nós, filhos, sua obstinação marcou uma tática de vida. Na voz, uma direção a seguir, no carinho, um aconchego tímido, mas seguro. Sua atenção intensa e incondicional nos mostrou o valor da amizade, seu olhar para o compromisso semeou em nós responsabilidade.

Com a certeza de que tudo sempre acabaria bem, planejou em nossa existência um sentimento positivo para a vida: o de que somos e seremos sempre vencedores. Sua marca maior sempre foi a bondade, preocupação, atenção e disponibilidade com os que vinham solicitar qualquer ajuda.

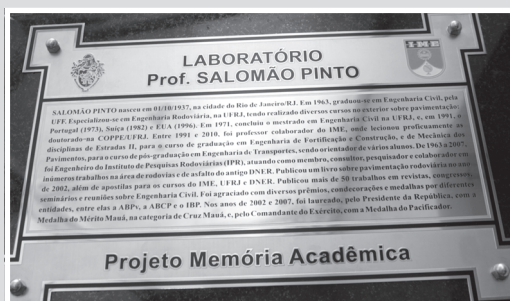
Salomão foi exemplar como marido. Durante 45 anos mostrou-se presente à esposa, sempre oferecendo apoio, força e dedicação. Criou seus três filhos com a dignidade de um Profeta. Instituiu regras a serem alcançadas para a

garantia de suas próprias inquietações, eternizando assim sua proteção paterna ao incentivá-los à busca pela segurança eterna do Estado. Sandra, psicóloga do Estado, Isaac, engenheiro civil e professor federal, e André, juiz de Direito. A proteção do pai eterno, transferida pela escolha destas profissões! (...)

(...) Salomão, também pai orgulhoso, engraçado, exagerado, instruiu seus filhos guiando-os por caminhos que trocam passos com seu roteiro de vida. Este pai será lembrado em nossos gestos, atitudes e palavras que assim foram internalizadas e que serão a repetição desta história escrita nas batidas de nossos corações.

Mais uma vez nosso agradecimento, pai! Nosso agradecimento é infinito a este mestre, amigo e companheiro. (...) Descanse em paz! (...) Dos filhos, família Pinto”.

Esta página é a dedicação da ABPv ao seu ilustre associado. A Revista PAVIMENTAÇÃO escreve com muito orgulho a história desse profissional e amigo, cuja memória não morrerá.



## IME homenageia o Engenheiro Salomão Pinto

O Instituto Militar de Engenharia – IME – no dia 1º de abril, prestou homenagem ao seu grande e ilustre professor da área de pavimentação, engenheiro Salomão Pinto.

Em cerimônia com a presença de familiares e muitos convidados, foi inaugurada uma placa de homenagem póstuma no Laboratório de Ligantes e Materiais Betuminosos, que passou a se chamar Laboratório Prof. Salomão Pinto.

# Seção de notas da Revista PAVIMENTAÇÃO

## Sinalização e Segurança Viária

A ABPv promoveu nos dias 29 e 30 de março o curso de Sinalização e Segurança Viária, em sua sede, no Rio de Janeiro. O curso, que foi ministrado pelo engenheiro



Nelson Mattos, teve ainda a colaboração do engenheiro Hélio Moreira.

Para os próximos meses a ABPv oferecerá vários cursos. Mais informações no site da [www.abpv.org.br](http://www.abpv.org.br).

.....

## GIF – Global Infrastructure Forum Brazil 2011

A UBM Sienna em parceria com a UBM Internacional trará para o Brasil em 2011, como parte integrante ao Concrete Show South America, o Global Infrastructure Forum, maior fórum internacional de debates. O GIF reunirá renomados palestrantes de várias partes do mundo que dissertarão sobre os investimentos para o desenvolvimento rápido e eficaz de infraestrutura no Brasil. O evento, que conta com o apoio da ABPv, acontecerá nos dias 1 e 2 de setembro no Centro de Exposições Imigrantes São Paulo.

## Brazil Road Expo 2011

Entre os dias 4 e 6 de abril, no Expocenter Norte, em São Paulo, foi realizada a primeira edição da Brazil Road Expo 2011, uma grande feira de encontro de especialistas, empresários e autoridades do setor de infraestrutura viária.

A feira contou com a participação de 170 expositores nacionais e internacionais que trouxeram lançamentos de novas tecnologias em equipamentos, produtos e serviços para os seguimentos de construção e infraestrutura.

A preocupação com a qualidade e a segurança das estradas brasileiras torna-se um fator decisivo para viabilizar o crescimento econômico do País. Hoje, são mais de 218 mil quilômetros de rodovias pavimentadas que conduzem grande parte da nossa riqueza, o que demanda asfalto de qualidade e muito mais resistente.

A abertura do evento teve a presença do Superintendente da Quartier, empresa organizadora do evento, Aldair Colombo; do Diretor-Executivo, Guilherme Ramos; do Diretor da ANTT, Mário Rodrigues; do Presidente da ABEDA, Eder Vianna, do Presidente da ABECE, Eduardo Barros Millen; do Presidente da ANEOR, José Alberto Pereira Ribeiro do Presidente da ABRASFE, Haroldo Miller Jr; do Presidente da ABCR, Moacyr Servilha Duarte, a ABPv esteve representada pelo Vice-Presidente, Eduardo Alberto Ricci, Diretora Financeira, Georgina Libório Azevedo e Diretor de Divulgação, Cristiano Costa Moreira, entre outras autoridades que abrilhantaram o evento.

.....

## XVI CILA

De 10 a 25 de novembro de 2011, no Rio de Janeiro, será realizado a 16ª edição do Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto. A chamada dos trabalhos técnicos já está em execução. Mais informações no site [www.xvicila.com.br](http://www.xvicila.com.br).

# Precaução, um princípio inócuo?



Victor Athayde\*

O Sistema Jurídico assim o é em função da necessidade ontológica de funcionar de forma harmônica.

Nada deveria se confrontar. As espécies, de diversas escalas hierárquicas,

de atos normativos não deveriam, em tese, se contradizer. Nesse contexto, localizam-se princípios constitucionais e outros que regem o sistema jurídico, inclusive não explícitos em lei.

Os princípios, então, num enfoque eminentemente jurídico, são espécies normativas que detêm primazia em relação a outras.

Nesse ponto, objetivamente, o Professor de Direito Administrativo e Constitucional, Celso Antônio Bandeira de Mello, ensina de forma definitiva que:

“Violar um princípio é muito mais grave do que transgredir uma norma. A desatenção ao princípio implica ofensa não apenas a um específico mandamento obrigatório, mas a todo o sistema de comandos. É a mais grave forma de ilegalidade ou inconstitucionalidade, conforme o escalão do princípio atingido, porque representa insurgência contra todo o sistema, subversão de seus valores fundamentais, contumélia irremissível a seu arcabouço lógico e corrosão de sua estrutura mestra.” (MELLO, Celso Antônio Bandeira de. Curso de Direito Administrativo. São Paulo: Malheiros, 12 edição, 2000. P. 747-748).

O que se quis demonstrar até aqui, principalmente para o leitor pouco habituado com o Direito, é que no

Sistema Jurídico há hierarquia que dá parâmetros para: o aplicador da lei; o legislador e executor dos atos administrativos (Judiciário; Legislativo e Executivo, respectivamente) para atuar, inclusive, quando a lei não tenha previsto casos objetos de decisão.

Um exemplo do princípio como balizador de atos, ainda para os que não se dedicam aos estudos jurídicos, seria um projeto de lei (em trâmite no Legislativo Federal) ou um decreto municipal (ato do prefeito) que determinasse que os auxílios-alimentação de determinado grupo de servidores fosse diferenciado entre homens e mulheres, sob o pretexto de que as pessoas de sexo masculino precisam de mais alimento para satisfazerem suas necessidades.

Sem dúvida que, nessa ilustração esdrúxula, haveria uma inconstitucionalidade material por ofensa ao princípio da igualdade (art. 5º, *caput*, da CF/88).

Em relação ao Direito Ambiental, a Política Nacional<sup>1</sup> do Meio Ambiente (Lei 6.938/1981) define os princípios que regem a administração ambiental no Brasil, mas não havia previsto um princípio já há muito proclamado no meio doutrinário: o da precaução.

Perceba leitor, e o remeto ao início do texto: o princípio da precaução, até a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (art. 6º, I da Lei 12.305/2010), era um princípio implícito, não expresso na Legislação Ordinária Federal, mas, mesmo assim, sempre foi considerado.

Pois bem, o referido princípio impõe ao administrador o dever de não autorizar empreendimentos dos quais não se tenha pleno conhecimento sobre riscos e danos que possam gerar. Mas, em verdade, e aqui vai

\* Advogado militante na Área de Direito Ambiental, Professor de Pós-Graduação em Perícia Ambiental Judicial, ex-Assessor Jurídico do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo – IEMA, idealizador do Blog [www.direitodomeioambiente.blogspot.com/](http://www.direitodomeioambiente.blogspot.com/) e e-mail: [victorathayde@walmirbarroso.com.br](mailto:victorathayde@walmirbarroso.com.br)

<sup>1</sup> Já fiz pequena explanação sobre o papel das Políticas Nacionais num contexto sociojurídico na Revista da ABPv nº 18.

uma opinião pessoal, nem os riscos conhecidos têm consequências previsíveis<sup>2</sup>.

Feita essa definição, voltemos os olhos para mundo material.

Os fatos abaixo são relacionados à infraestrutura nacional que retratam de forma concreta o princípio que aqui se faz breve explanação, vamos a eles.

Está em evidência a construção da Usina Hidroelétrica de Belo Monte, no Rio Xingu, no Pará, envolta em polêmicas judiciais e internacionais<sup>3</sup>.

Ressalvo que não opino sobre o mérito do empreendimento, mas, tão só, utilizo-a como exemplo da aplicabilidade do princípio.

Há uma guerra de liminares que ou impedem o licenciamento do empreendimento ou permitem.

Em liminar de abril de 2010, o magistrado da Justiça Federal do Pará fundamentou sua decisão, justamente, no Princípio da Precaução, alegando que o EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório) do processo de licenciamento seria inconsistente, no que refere aos impactos do empreendimento.

É uma batalha entre a Advocacia Geral da União e o Ministério Público Federal e ONGs.

O fato é que a licença de instalação do empreendimento já foi concedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Ibama.

É importante fazer uma reflexão que, repito, não me faz contrário ou favorável ao empreendimento, até mesmo por desconhecer os exatos termos do procedimento de licenciamento.

Como se sabe, o recente desastre natural ocorrido no Japão pôs o país em alerta máximo de risco nuclear, em virtude dos danos na Usina Atômica de Fukushima. Lamentamos e nos solidarizamos a respeito.

Primeiramente, é bom advertir que o Princípio da Precaução é de alcance mundial, sua idéia está presen-

te em diversos tratados internacionais<sup>4</sup>, logo, é premissa (ao menos deveria ser) de toda e qualquer instalação potencialmente degradadora, em todo o mundo.

Logo, não se diga que não é aplicável à realidade japonesa. Tampouco, se diga que a Usina começou a ser construída em 1967, e que, àquela época, não se fazia exigências ambientais tão rigorosas, porque, se ela operou até antes do desastre, sempre esteve sujeita a controle ambiental.

O fato que quero chamar a atenção é que sempre se soube que no Japão há intensa atividade sísmológica, como é que se permite, então, com o perdão da pergunta retórica, a instalação e manutenção de empreendimento de alto risco naquele país?

Onde anda a Precaução?

É fato que o Japão é um dos países mais desenvolvidos do mundo, inclusive no campo tecnológico, por isso mais uma vez indago, será que todo o risco é sempre conhecido antes da instalação de um empreendimento?

Fukushima é a prova de fato de que não há esse conhecimento. Esse tipo de constatação deixa a Precaução (para alguns, a Prevenção), em posição delicada, pois o fato é que todos os riscos jamais serão conhecidos antes da instalação de um empreendimento.

Isso é humanamente impossível.

Evidente que não se deve, com isso, paralisar todos os empreendimentos ou engessar a sociedade, aliás, isso já foi dito em julgado do Tribunal Regional Federal da 4ª Região (Proc. 0401016742, DJU 02.09.98) que “toda atividade humana pode causar danos ao meio ambiente; não há ‘poluição zero’, de forma que a idéia de natureza intocada é um mito moderno”.

Muito pelo contrário, o fato de não se haver certeza técnica das consequências de determinado empreendimento (Princípio da Precaução) deve ser razão para o aprofundamento dos estudos sobre o mesmo, não para sua negativa definitiva.

<sup>2</sup> Estaria aí a diferença entre os Princípios da Prevenção e Precaução. Enquanto aquele dá conta dos riscos conhecidos, este, dos desconhecidos. Entendo, em verdade, que um complementa o outro e que os riscos de danos, em verdade, nunca são totalmente conhecidos, mesmo que se trate de uma atividade licenciada com certa frequência.

<sup>3</sup> Como foi amplamente divulgado pelos meios de imprensa, a Organização dos Estados Americanos pediu, em 5 de abril de 2001, que o Brasil paralisasse o processo de licenciamento da Hidrelétrica de Belo Monte, por razões relacionadas a Direitos Humanos dos Indígenas, não essencialmente ambientais, mas que compõe uma avaliação do meio antrópico, que também é feita em um EIA/RIMA. Há aí princípios fundamentais envolvidos, como o da dignidade da pessoa humana, mas não o da precaução. O Governo Brasileiro reagiu com perplexidade.

<sup>4</sup> Um exemplo é que é o Princípio Nº 15 da Declaração do Rio (ECO/92), antes disso, Paulo Afonso Leme Machado, em “Direito Ambiental Brasileiro” (16ª Edição, Malheiros Editores, p. 65), ensina que esse princípio já está previsto no Direito Alemão desde os anos 1970.

Este espaço destina-se à publicação de artigos encaminhados à Revista pelos profissionais que se dispõem a colaborar promovendo com os demais técnicos o debate de diversos temas atuais e relevantes. Os artigos devem ser enviados para [redacao@revistapavimentacao.org.br](mailto:redacao@revistapavimentacao.org.br) de acordo com as normas vigentes no sítio [www.revistapavimentacao.org.br](http://www.revistapavimentacao.org.br).

Os trabalhos são apresentados na íntegra, sendo de responsabilidade do autor toda a informação nele contida.

# Avaliação do dano em reforços de pavimentos

**Manuel J. C. Minhoto**

[minhoto@ipb.pt](mailto:minhoto@ipb.pt)

**Jorge Pais**

[jpais@civil.uminho.pt](mailto:jpais@civil.uminho.pt)

## RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma simulação numérica do comportamento à reflexão de fendas num reforço de pavimento tendo como objectivo a avaliação do dano acumulado, ao longo de um período de tempo, considerando a ação conjunta das ações do tráfego e da temperatura, de modo a concluir sobre o seu comportamento. O estudo baseou-se no estabelecimento de situações tipo de evolução diária da temperatura do ar, para as quais foram determinados os esforços no pavimento em ciclos com periodicidade diária, constantes e repetitivos, ao longo de um determinado período de tempo (mensal ou anual).

A simulação numérica do comportamento do reforço de pavimento conduziu à avaliação dos estados de tensão/deformação no reforço, associados a cada situação de carregamento (tráfego e variações de temperatura) e para dois tipos de materiais betuminosos considerados constituintes do reforço do pavimento: mistura betuminosa con-

vencional e mistura betuminosa com betume modificado com borracha. A avaliação dos estados de tensão/deformação no reforço serviram de base à avaliação do dano horário associado às situações de carregamento, sendo este calculado com base no tráfego efetivamente observado numa seção de estudo, bem como na distribuição anual e mensal de temperatura.

Com base no dano horário foi calculado o dano acumulado para determinados meses do ano e para um ano completo, de modo a concluir sobre o comportamento daqueles dois tipos de misturas betuminosas, quando usadas num reforço de pavimentos, perante condições de carregamento térmico conjugado com carregamento do tráfego.

## PALAVRAS-CHAVE

Reforço de pavimentos, reflexão de fendas, variações de temperatura, tráfego, misturas betuminosas.

## 1. Introdução

A reabilitação de pavimentos fendilhados através de soluções de reforço do pavimento, baseadas no uso de misturas betuminosas, tem sido uma das principais solu-

ções adotadas pelas administrações rodoviárias. No entanto, verifica-se, com relevante frequência, o aparecimento prematuro de fendilhamento nos reforços de pavimento, resultante da reflexão das fendas existentes no pavimento antigo, degradado, verificando-se, na maioria

dos casos, que a expectativa de tempo de vida dos reforços de pavimentos, dimensionados com base em procedimentos e em modelos atualmente em uso, nem sempre corresponde ao realmente observado (TSCHEGG *et al.*, 2000). Em muitos casos, constata-se que as fendas se propagam através das novas camadas de reforço (Figura 1) particularmente durante os primeiros anos de serviço do reforço.

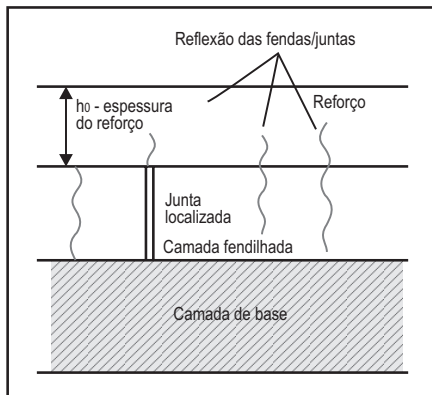


Figura 1 – Propagação do fendilhamento pelo reforço de pavimento

O fenômeno de reflexão das fendas nas camadas de reforço deve-se, sobretudo, à elevada concentração de tensões que se verifica na proximidade da fenda provocando a iniciação e propagação do fendilhamento, por reflexão das fendas. Estes elevados estados de tensão no interior dos reforços de pavimento são o resultado da atuação de determinados mecanismos de degradação que se manifestam através de movimentos diferenciais, horizontais e verticais, dos bordos das fendas existentes na camada do pavimento antigo e que são dependentes dos principais tipos solicitações a que está sujeito, em particular do tráfego e das variações de temperatura (MARTIN-PÉREZ & MOHAMED, 2000). O papel das solicitações na atuação dos mecanismos de degradação é influenciado por outros fatores, tais como: a geometria das camadas, as propriedades dos materiais constituintes das camadas, as características da fundação, as características das fendas e a ligação entre camadas.

Os principais tipos de solicitações suscetíveis de provocar movimentos nos bordos das fendas, produzindo abertura e fecho das fendas e, conseqüentemente,

um potencial de reflexão de fendas (de Bondt, 2000; Colombier, 1997; de BONDT *et al.*, 1995) são os seguintes:

- a ação do tráfego;
- a ação das variações de temperatura;
- a ação resultante dos movimentos de expansão/retração do solo de fundação.

A ação do tráfego, considerada a mais gravosa para a reflexão de fendas (MOLENAAR & POTTER, 1997), reflete-se num considerável incremento de tensões, localizado imediatamente acima de uma fenda, como resultado da passagem de uma carga na sua vizinhança. Este incremento no estado de tensão resulta sobretudo do efeito dos deslocamentos relativos dos bordos dessa fenda, designados por atividade de fendas (PAIS, 1999).

As variações de temperatura diárias e sazonais (entre Verão e Inverno) provocam nas camadas betuminosas, de reforço, e nas subjacentes movimentos de retração e de expansão horizontais dos bordos das fendas, produzindo ações de abertura e fecho das fendas, ou seja, uma atividade horizontal das fendas. As variações de temperatura conduzem ainda à variação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas, sobretudo da sua rigidez, refletindo-se no estado de tensão na zona acima da fenda (MINHOTO, 2007).

Os movimentos do solo de fundação estão normalmente associados às variações do seu estado hídrico, o qual provoca alterações volumétricas que conduzem à expansão e à retração da fundação, induzindo, indiretamente, movimentos de abertura e fecho das fendas que interferem nos estados de tensão nas zonas do reforço junto às fendas.

A ação de corte no reforço, resultante da atuação do tráfego, é a principal responsável pela propagação do fendilhamento, embora se possa concluir da importância de tomar em devida consideração o efeito das variações de temperatura no fenômeno da reflexão de fendas. A situação de ocorrência simultânea da ação do tráfego e das ações de variações de temperatura constitui, também, uma situação de carregamento considerada crítica, em termos do fenômeno da reflexão de fendas (CHANG, 1976) (JOSEPH, 1987).

A ocorrência de variações de temperatura ao longo de um determinado intervalo de tempo induz no reforço

de pavimento, concretamente numa zona do reforço localizada acima de uma fenda, um estado contínuo de tensão de longa duração, de valor variável, para além de influenciar na variação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas. A este estado de tensão, sobrepõem-se, com determinada frequência, repetidos estados de tensão, de muito curta duração, resultantes de cada carregamento devido passagem de um eixo, conforme se ilustra na Figura 2.

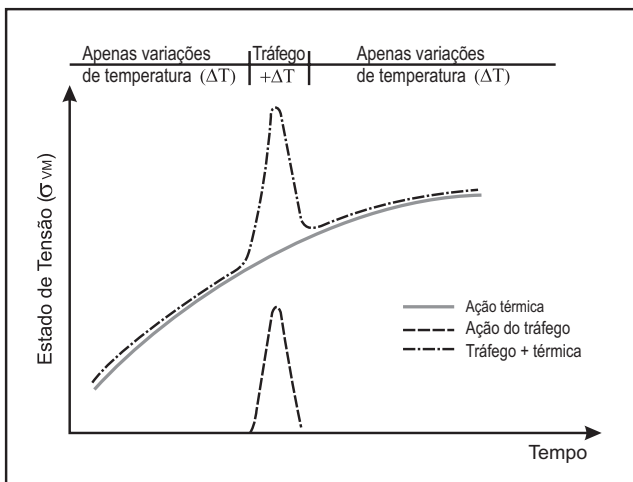


Figura 2 – Evolução do estado de tensão no reforço devido à ação do tráfego e das variações de temperatura

O estado de tensão de origem térmica é induzido no reforço, principalmente nas zonas ativas localizadas acima de uma fenda, através de dois mecanismos, que atuam simultaneamente num pavimento reforçado: i) uma retração térmica restringida da camada de reforço; ii) a indução de tensões na camada de reforço resultante de uma ação repetitiva de abertura e fecho das fendas da camada subjacente ao reforço (MINHOTO, 2007). O primeiro mecanismo conduz a um acréscimo de tensões de tração no reforço, predominantemente horizontais, resultantes da ocorrência de retrações térmicas restringidas associadas às variações de temperatura. O segundo mecanismo está associado a uma ação, repetitiva, de abertura e fecho das fendas, resultante das variações volumétricas dos blocos de pavimento fendilhado.

As variações de temperatura apresentam também uma influência significativa no efeito de transferência de carga entre os bordos de uma fenda constatando-

se que, à medida que a temperatura diminui, a largura da fenda aumenta, reduzindo o efeito de transferência de carga. À medida que o efeito de transferência de carga diminui agravam-se as condições de propagação das fendas pelo reforço. Neste sentido considera-se que a consideração do efeito das variações de temperatura combinada com o efeito do tráfego conduz a uma situação desfavorável em termos de reflexão de fendas.

A abordagem tradicional do problema da propagação das fendas por reflexão de fendas baseia-se no uso de conceitos da mecânica da fratura e foi estabelecida por Paris & Erdogan (1963), embora se reconheça que as condições de homogeneidade, isotropia e linearidade não estão suficientemente cumpridas para a aplicação indiscutível desta lei, verificando-se, geralmente, uma grande dispersão dos resultados obtidos com esta lei.

As metodologias baseadas na utilização tensões/extensões deviatórias revelam-se pertinentes para a avaliação do fenómeno de reflexão de fendas em reforços de pavimento. No presente trabalho adotou-se a metodologia empírico-mecanicista, que também integra uma abordagem do tipo “banda enfraquecida”, desenvolvida por Sousa *et al.* (2002), para avaliação da influência das variações de temperatura na reflexão de fendas em reforços de pavimentos. Trata-se duma metodologia que baseia o seu funcionamento em ensaios experimentais de utilização corrente por parte dos projetistas, como é o caso dos ensaios de fadiga, mas com abordagem teórica similar às abordagens baseadas na mecânica da fratura, usando estados de tensão deviatórios.

O presente estudo baseou-se na realização duma simulação numérica representativa do comportamento à reflexão de fendas do reforço de um pavimento, quando sujeito à ação do tráfego e de variações de temperatura. A simulação baseou-se na utilização da metodologia dos elementos finitos para modelação do comportamento do pavimento tendo em vista a avaliação dos estados de tensão e de extensão associados à ocorrência três situações de carregamento (Figura 3): i) apenas tráfego; ii) tráfego conjugado com as variações de temperatura; iii) apenas variações de temperatura.

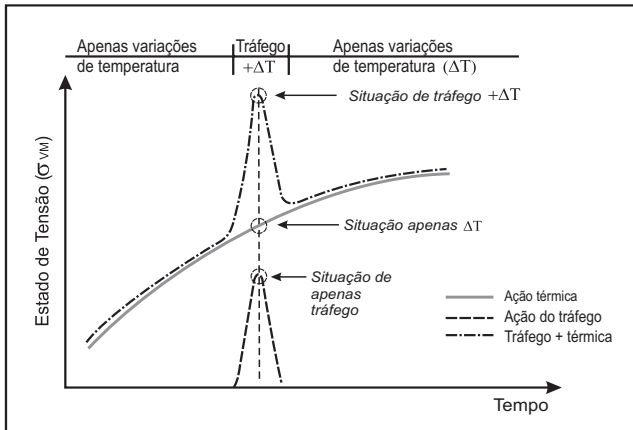


Figura 3 – Situações de carregamento consideradas na simulação numérica

A referida simulação numérica consistiu, por um lado, numa modelação mecânica do pavimento orientada para simulação da ação das variações de temperatura, da qual se destaca a modelação de longa duração do carregamento, com o comportamento mecânico das misturas resultante essencialmente dos efeitos da retração térmica e da componente de relaxação. Por outro lado, foi realizada uma modelação mecânica do pavimento orientada para simulação da ação do tráfego, da qual se destaca a modelação de curta duração do carregamento, ou seja, do comportamento elástico.

A modelação descrita visou, essencialmente, a avaliação dos estados de tensão e de extensão associados à ocorrência das referidas solicitações, a partir dos quais foi avaliada a resistência do reforço do pavimento à reflexão de fendas, através da obtenção da vida previsível, para as diferentes situações de carregamento.

A determinação da vida previsível do reforço, para cada caso de carregamento, foi realizada a partir do uso de leis de fadiga, obtidas em ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos, sob condições de extensão controlada, considerando para tal a extensão de Von Mises,  $\epsilon_{VM}$ , como parâmetro de controle da reflexão de fendas, de acordo com a metodologia empírico-mecanicista, proposta por Sousa *et al.* (2002).

A partir da avaliação do número de eixos admissíveis, determinado para cada hora do período de análise, e conhecido o número de eixos observados, através das contagens de tráfego para as mesmas horas em análise, foi avaliado o rácio de resistência que se

gasta em cada hora, normalmente designado por dano, com a seguinte expressão:

$$D_{h,e} = \frac{N_{h,e}}{N_{adm,h,e}}$$

onde:

$D_{h,e}$  = dano horário do eixo e, durante a hora h;

$N_{h,e}$  = número de passagens de um eixo e observados na hora h;

$N_{adm,h,e}$  = número de passagens admissíveis de um eixo e para as condições da hora h.

## 2. Descrição do estudo

O estudo envolveu uma simulação numérica de avaliação do dano verificado num reforço de pavimento resultante da ocorrência de variações térmicas no pavimento associadas ao carregamento do tráfego, baseando-se no estabelecimento de situações padrão para as variações da temperatura no reforço do pavimento e correspondentes esforços no pavimento, em ciclos com periodicidade diária, constantes e repetitivos, ao longo de um determinado período de tempo (mensal ou anual).

A simulação numérica do comportamento do reforço de pavimento conduziu à avaliação dos estados de tensão/deformação teóricos no reforço, associados a cada situação de carregamento e para dois tipos de materiais betuminosos para o reforço do pavimento: mistura betuminosa convencional (MCD) e mistura betuminosa com betume modificado com borraça (BMB).

O conhecimento dos estados de tensão e deformação no reforço permitiu realizar uma avaliação do dano horário associado às situações de carregamento, sendo este calculado com base no tráfego efetivamente observado numa seção de estudo bem como na distribuição anual e mensal das solicitações térmicas.

O dano resultante desta análise permitiu calcular o dano acumulado durante determinados meses do ano e ao fim de um ano completo, permitindo assim concluir sobre o comportamento daqueles dois tipos de misturas betuminosas quando usadas num reforço de pavimentos,

perante condições de carregamento de térmico associado ao carregamento do tráfego.

Para a persecução do objetivo proposto, este estudo foi desenvolvido tendo por base as seguintes fases:

- estabelecimento das condições de simulação do tráfego e das variações de temperatura;
- avaliação do estado térmico do pavimento para cada situação de carregamento padrão;
- avaliação do estado de tensão/deformação, com a combinação dos efeitos do tráfego e das variações de temperatura, para cada situação padrão;
- avaliação do dano horário, mensal e anual associados a cada situação de carregamento.

Os dados obtidos do estudo apresentado foram comparados com o mesmo tipo de danos obtidos numa simulação numérica, considerando o carregamento efetivamente observado em um reforço de pavimento ao longo de um ano completo.

### 3. Condições de simulação

Na primeira fase do estudo procedeu-se ao estabelecimento dos valores dos parâmetros necessários à ca-

racterização do estado térmico do pavimento associado a cada situação de carregamento, de acordo com os procedimentos indicados na Figura 4, com os quais foram estabelecidas as condições de carregamento térmico no pavimento.

As situações padrão de carregamento são referenciadas através da adoção de dois valores da temperatura do ar, definidas pelo par de valores  $(T_{ref}, \Delta T)$ , sendo  $T_{ref}$  a temperatura de referência correspondente à temperatura máxima do ar no ciclo diário, sendo este caracterizado por uma variação sinusoidal, e  $\Delta T$  a variação diária da temperatura, ficando, com este último valor, implicitamente definida uma temperatura mínima diária do ar.

Os valores adotados para a temperatura de referência do ar,  $T_{ref}$ , variam num intervalo compreendido entre 5 °C e 35 °C, com incrementos de 5 °C. O intervalo de valores adotado corresponde a uma gama de temperaturas do ar verificadas no pavimento em estudo. Os valores adotados para as variações de temperatura,  $\Delta T$ , variaram entre -5 °C e -35 °C, com incrementos de -5 °C, resultando um conjunto de 49 possíveis situações de carregamento. Destas 49 situações excluí-

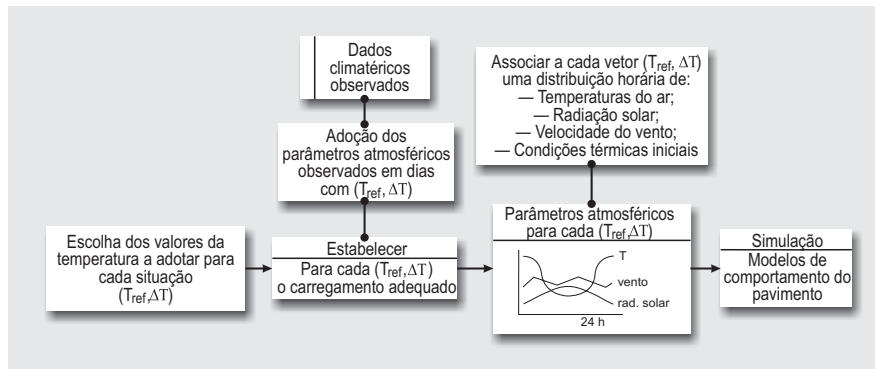


Figura 4. Procedimento para definição dos parâmetros para a simulação numérica

Tabela 1. Conjunto de temperaturas do ar consideradas na simulação (°C)

$T_{ref}$	$\Delta T$	$T_{min}$	$T_{ref}$	$\Delta T$	$T_{min}$	$T_{ref}$	$\Delta T$	$T_{min}$	$T_{ref}$	$\Delta T$	$T_{min}$	$T_{ref}$	$\Delta T$	$T_{min}$	$T_{ref}$	$\Delta T$	$T_{min}$	$T_{ref}$	$\Delta T$	$T_{min}$	
35	-5	30	30	-5	25	25	-5	20	20	-5	15	15	-5	10	10	-5	5	5	-5	0	0
	-10	25		-10	20		-10	15		-10	10		-10	5		-10	0				
	-15	20		-15	15		-15	10		-15	5		-15	0		-15	-5				
	-20	15		-20	10		-20	5		-20	0		-20	-5							
	-25	10		-25	5		-25	0		-25	-5										
	-30	5		-30	0		-30	-5													
-35	0	-35	-5																		

ram-se as situações de carregamento térmico que conduzissem a temperaturas mínimas do ar inferiores a  $-5^{\circ}\text{C}$ , por se tratar de situações de ocorrência pouco verosímil na região, resultando o conjunto de temperaturas que se apresenta na Tabela 1.

Para cada uma das situações padrão adotadas ( $T_{ref}$ ,  $\Delta T$ ) foi definida uma distribuição horária para um período de 24 horas (diário) dos principais parâmetros atmosféricos que influenciam o estado térmico do pavimento, concretamente: a evolução da temperatura do ar, a evolução da radiação solar, a velocidade média do vento e a distribuição em profundidade das temperaturas no pavimento para a hora inicial correspondente à hora em que ocorre a máxima temperatura no pavimento (14H00). Estes parâmetros foram estabelecidos através de uma análise exaustiva das distribuições dos mesmos, em dias que apresentaram uma temperatura máxima igual a  $T_{ref}$  e uma temperatura mínima igual a  $T_{ref} + \Delta T$ .

A evolução da radiação solar ao longo do dia foi definida, para cada situação, partindo de uma avaliação da variação da radiação solar diária nos dias que apresentavam como temperaturas máxima e mínima valores correspondentes às das situações de carregamento adotadas. O estado térmico do pavimento, no momento inicial de cada simulação, é definido pela imposição dos valores das temperaturas a várias profundidades do pavimento, tendo os valores sido obtidos pela análise exaustiva das condições iniciais observadas nos dias que apresentam as temperaturas máxima e mínima, coincidentes com as situações de

carregamento adoptadas. Estes parâmetros utilizados para a definição das situações padrão podem ser obtidos em Minhoto (2007).

#### 4. Simulação numérica

O procedimento adotado para a determinação do estado mecânico do pavimento seguiu os passos que se apresentam na Figura 5, envolvendo o uso dos modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos, orientados para a simulação térmica e mecânica do pavimento. Estes modelos envolvem uma componente de avaliação térmica, através dos modelos MDTP e MDTTP, e uma componente mecânica, através dos modelos de avaliação do estado de tensão/deformação do pavimento, concretamente o modelo MMTRF de avaliação do estado de tensão/deformação devido ao tráfego e modelo MMTER de avaliação do estado de tensão/deformação devido às variações de temperatura.

Para a obtenção do estado mecânico no pavimento foi indispensável a realização prévia de uma avaliação do estado térmico do mesmo, no sentido deste constituir uma solicitação para a avaliação mecânica do pavimento. Neste sentido realizou-se, em primeiro lugar, a simulação numérica das condições atmosféricas, tendo em vista a obtenção das temperaturas em todo o domínio geométrico do pavimento. Esta simulação numérica foi realizada, para um período diário de cada situação padrão, pelo modelo térmico transiente MDTTP, tendo como solicitações os parâmetros estabelecidos anteriormente para cada situação padrão. Este modelo,

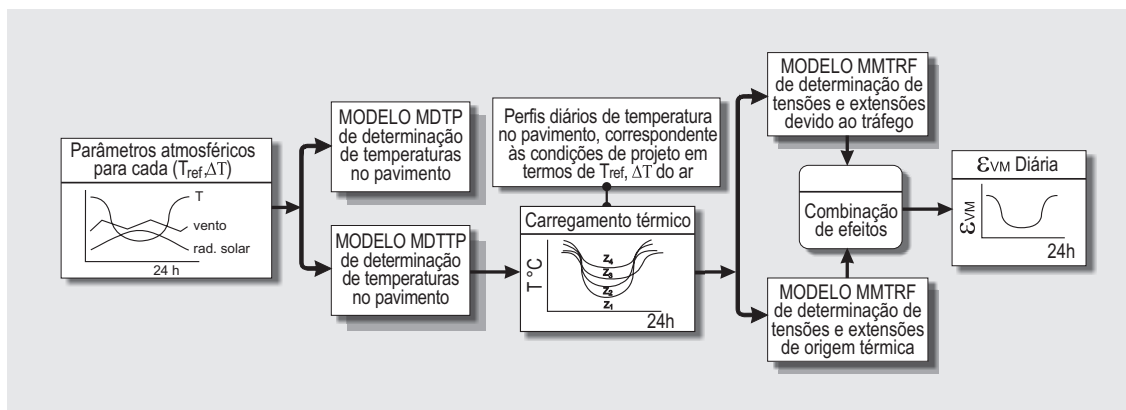


Figura 5. Procedimentos para determinação do estado mecânico do pavimento

baseado na metodologia dos elementos finitos (Figura 6), realiza uma avaliação transiente da evolução das temperaturas no pavimento ao longo do período de 24 horas. As condições iniciais de simulação térmica são obtidas através do modelo MDTP, para todo o domínio geométrico do pavimento, a partir da distribuição discreta das temperaturas iniciais.

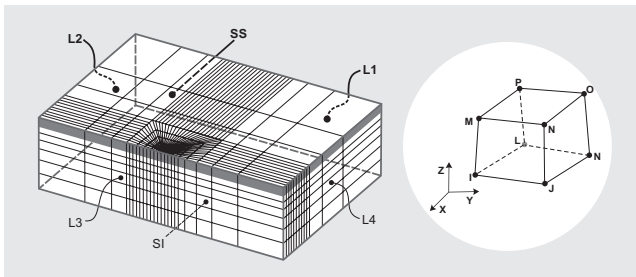


Figura 6. Modelo de elementos finitos utilizado na modelação

O estado térmico do pavimento, obtido para cada situação padrão, constituiu uma solicitação para os modelos de base termomecânica, de avaliação do estado de tensão/deformação no reforço. Com base no estado térmico transiente do pavimento, procedeu-se, através da simulação numérica, à avaliação do estado mecânico (tensões e extensões) no reforço associado às variações de temperatura e ao carregamento do tráfego, para cada tipo de mistura betuminosa. Esta avaliação é realizada pelos modelos MMTRF e MMTER, sendo o primeiro orientado para avaliação, em estado estacionário, da ação do tráfego (eixo de 130 kN) e o segundo orientado para a avaliação do efeito transiente das variações de temperatura.

Com base nos estados de tensão/deformação para cada situação padrão e associados a cada tipo de ação, concretamente a ação dos diversos tipos de eixos do tráfego e das variações de temperatura, procedeu-se de seguida à combinação dos efeitos destas ações com a finalidade de serem obtidos os valores horários do estado de extensão caracterizado pela extensão média de Von Mises acima da zona da fenda, para um período de 24 horas da situação padrão. Esta combinação de ações foi realizada somando as extensões, em cada nó, associadas a cada tipo de ação.

O pavimento modelado e respectivo reforço apresentam as espessuras e características mecânicas (mó-

dulo de rigidez para análise linear, características visco-elásticas para análise transiente e características de fadiga) indicadas em Minhoto e Pais (2009).

Nas Figuras 7 e 8 apresentam-se valores da extensão de Von Mises ( $\epsilon_{VM}$ ) na zona do reforço sobre as fendas para as situações padrão com temperatura de referência de 35 °C, para os dois tipos de materiais considerados e para a combinação de carregamento do tráfego e das variações de temperatura.

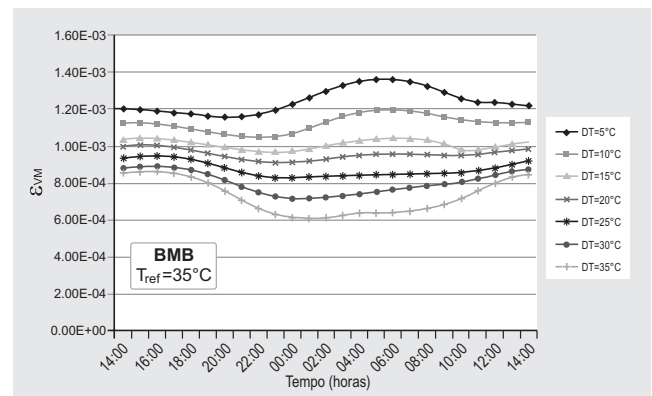


Figura 7. Extensões médias de Von Mises ao longo de 24 horas, para uma temperatura de referência de 35 °C num reforço com mistura com betume modificado com borracha

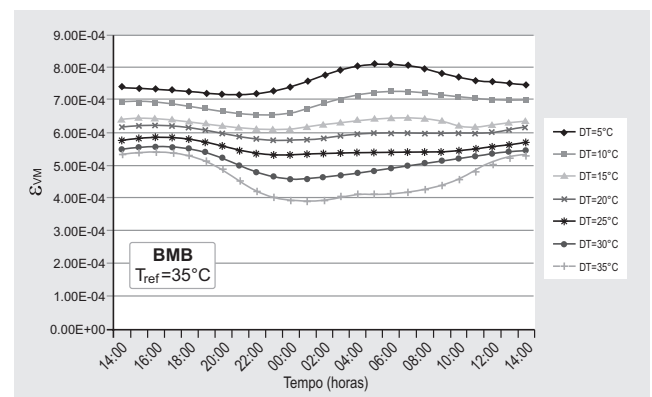


Figura 8. Extensões médias de Von Mises ao longo de 24 horas, para uma temperatura de referência de 35 °C num reforço com mistura convencional

## 5. Avaliação do dano horário

Para avaliação do dano associado a cada situação de carregamento considerou-se, para cada hora do ano, o estado de extensão de Von Mises instalado no reforço, assumindo a repetição cíclica diária dos valores diários associados a cada situação padrão. O estado

de extensão média de Von Mises, conjugado com as leis de fadiga para a mistura betuminosa convencional e para a mistura betuminosa com BMB, conduz à obtenção do tráfego admissível para os níveis de extensão de Von Mises instalados, para cada tipo de eixo e para cada hora do período diário em análise. Deste modo, para cada situação de carregamento, é avaliado o tráfego horário admissível seguindo o procedimento expresso pelo fluxograma que se apresenta na Figura 9.

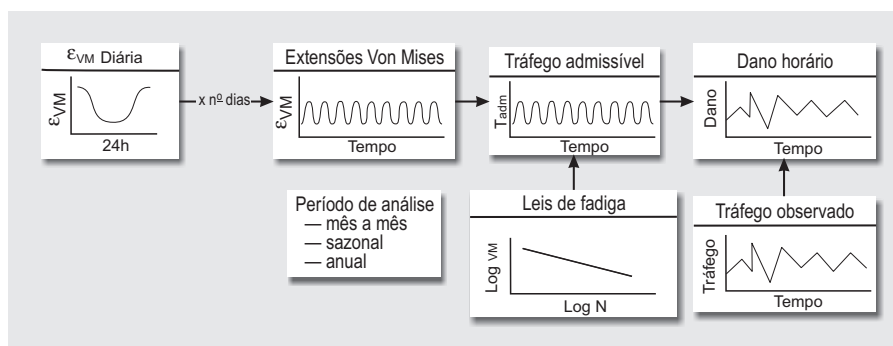


Figura 9. Procedimento para avaliação do dano horário

O tráfego horário admissível, obtido para cada período diário e para cada situação de carregamento, é considerado igual para todos os dias do período (ano ou mês) em estudo, conforme o caso. Como exemplo são apresentados na Figura 10 os valores horários do tráfego admissível,

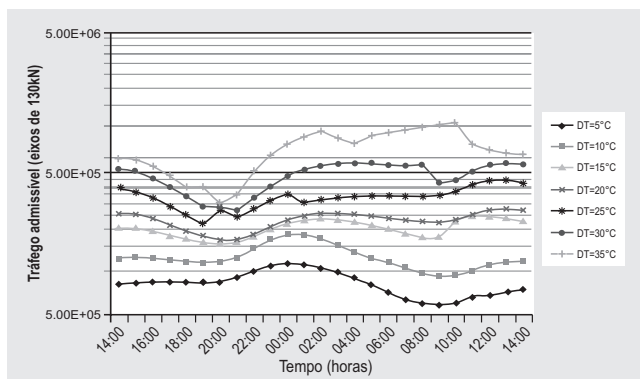


Figura 10. Tráfego horário admissível num reforço em mistura com BMB para as situações padrão com temperatura de referência de 35 °C e para um dia do ano

resultantes da simulação, para as situações padrão cuja temperatura de referência é de 35 °C e para a mistura betuminosa com BMB.

O tráfego admissível assim definido, para cada situação de carregamento, conjugado com o tráfego observado, cor-

respondente à distribuição horária do tráfego horário dos vários tipos de eixos, efetivamente observada, permite avaliar o dano horário associado a cada situação em estudo, o qual, acumulado, permite obter o dano total no período de tempo considerado.

Para a determinação do dano associado a um determinado período de tempo (anual ou mensal) procedeu-se à avaliação do quociente entre o tráfego efetivamente observado a todas as horas de todos os dias do período

considerado e o tráfego horário admissível. No caso da avaliação do dano anual de cada situação padrão, aplica-se o tráfego admissível, associado a essa situação, a todos os dias do ano.

## 6. Obtenção do dano relativo a um período de análise

A obtenção do dano relativo a um dado período de análise resulta da soma algébrica dos danos horários em todas as horas dos períodos em análise e para cada situação de carregamento térmico, seguindo o procedimento que se apresenta na Figura 11.

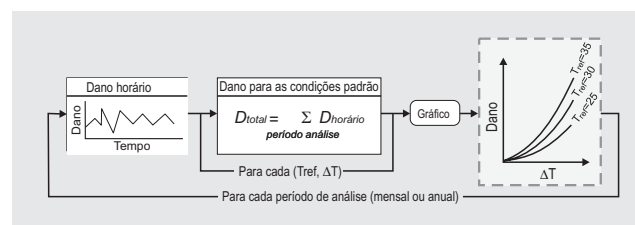


Figura 11. Procedimento para avaliação do dano

Esta análise permitiu deduzir curvas de dano, resultantes da ação conjunta das variações de temperatura e

do tráfego, em que cada curva de dano representa a variação do dano, anual ou mensal, com a variação de temperatura,  $\Delta T$ , para uma dada temperatura de referência,  $T_{ref}$ . Na Figura 12 representam-se as diversas curvas de dano anual obtidas para um reforço em mistura betuminosa com BMB, podendo constatar-se que as curvas de dano anual apresentam um comportamento idêntico e com tendência decrescente do dano à medida que se verifica um decréscimo de temperatura no pavimento. Desta análise pode concluir-se que a diminuição da temperatura do ar conduz a situações mais favoráveis do dano.

A comparação do desempenho dos dois tipos de materiais de reforço considerados foi realizada com base nas suas curvas de dano anual, definidas para a temperatura de referência de  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ , conforme se pode constatar na Figura 13.

Da análise da Figura 13 constata-se a evidência de que as misturas betuminosas com BMB conduzem a danos anuais inferiores às misturas betuminosas convencionais, sendo isto válido para qualquer temperatura de referência.

Neste estudo verificou-se a existência de uma tendência de variação do dano com os parâmetros que caracterizam cada situação de carregamento, ou seja, com a temperatura de referência,  $T_{ref}$  e com a variação de temperatura,  $\Delta T$ .

A variação do dano mensal, para cada mês analisado, com a temperatura de referência,  $T_{ref}$  e com as variações de temperatura,  $\Delta T$ , exhibe uma tendência do tipo exponencial, tendo-se obtido a seguinte expressão como melhor ajuste:

$$dano = a \times T_{ref}^b \times e^{c \times \Delta T} \quad (1)$$

onde:  $T_{ref}$  = temperatura de referência;

$\Delta T$  = variação de temperatura;

$a$ ,  $b$  e  $c$  = constantes de ajuste à evolução mensal do dano, definidos para cada mês.

Com base no modelo obtido para evolução do dano função da temperatura do ar e das variações, associados ao carregamento de um eixo de 130 kN,

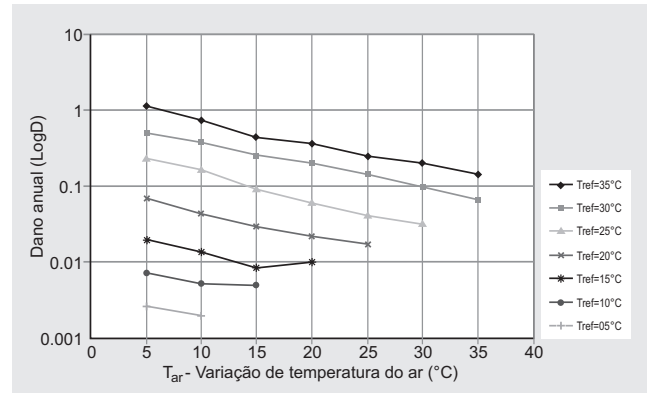


Figura 12. Variação do dano anual com a temperatura de referência e com as variações de temperatura

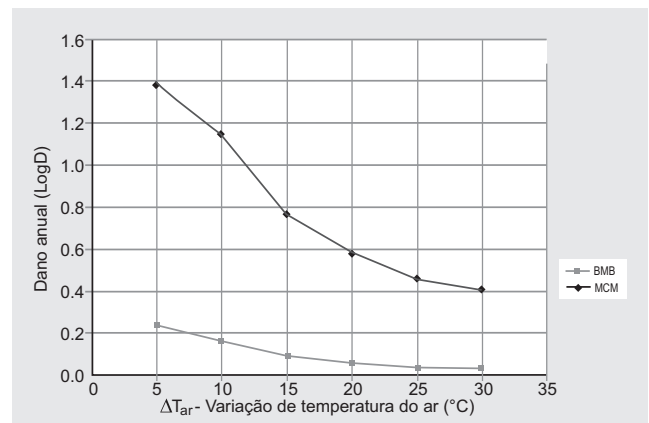


Figura 13. Variação do dano anual com a variação de temperatura, para a temperatura de referência de  $25^\circ\text{C}$  e para os dois tipos de mistura

realizou-se uma análise estatística de ajuste da evolução do dano para os vários meses do ano, através da obtenção das constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$ , baseado no ajuste da Equação 1. Deste estudo obtiveram-se as constantes que se apresentam na Tabela 2, expressas para cada mês, para o período anual e para cada tipo de material. Com base na expressão anterior, e usando as constantes da Tabela 2, é possível determinar o dano teórico para qualquer uma das condições de carregamento consideradas e para cada período de análise.

O dano calculado recorrendo à Equação 1 corresponde ao dano considerando uma temperatura média e a correspondente variação de temperatura para cada mês. No entanto, ao longo de cada mês a temperatura varia de dia para dia e de hora para hora pelo que o dano obtido, ao qual se atribui o nome de dano teórico,

pode diferir do que na realidade o reforço vai estar sujeito, ou seja o dano real.

A diferença entre estes dois danos é expressa pela Equação 2, a qual fornece o *fator de relação de dano* o qual é definido por:

$$r = \frac{D_{mensal}^{real}}{D_{mensal}^{teórico}} \quad (2)$$

onde:  $r$  = *fator de relação de dano* entre o dano teórico e o dano real;

$D_{mensal}^{real}$  = dano total mensal resultante da ação do tráfego e das variações de temperatura reais;

$D_{mensal}^{teórico}$  = dano total mensal resultante da ação do tráfego e das variações de temperatura para as situações padrão teóricas.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores do *fator de relação de dano* para cada período em análise e para cada tipo de material considerado, o que permite, utilizando a Equação 1, determinar o dano teórico e posterior-

mente com o fator de relação de dano obter o dano real a que o reforço está sujeito.

## 7. Conclusões

Do estudo realizado permitiu concluir que a variação horária do estado térmico do pavimento apresenta uma influência significativa na variação do seu estado de tensão e de extensão, qualquer que seja o carregamento considerado. Com a redução da temperatura média no reforço (arrefecimento), o estado de tensão/deformação horário agrava-se como resultado da retração térmica, qualquer que seja o material constituinte da camada de reforço. Das conclusões recomenda-se que, para efeito de concepção de reforços de pavimentos, o efeito conjunto do tráfego e das variações de temperatura deva ser considerado como a situação de carregamento mais desfavorável.

Do estudo do comportamento do reforço do pavimento composto pelos dois tipos de materiais adotados no presente trabalho, pode ainda concluir-se que os reforços

Tabela 2. Constantes da Equação 1 para obtenção do dano

		BMB				MCD			
		a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>
Dano Janeiro	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	1.640E-08	4.454E+00	-7.375E-02	0.922	1.467E-05	2.803E+00	-4.071E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.517E-06	2.215E+00	-7.015E-02	0.983	1.028E-03	1.126E+00	-2.460E-02	0.978
Dano Fevereiro	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	1.641E-08	4.433E+00	-7.371E-02	0.909	1.423E-05	2.792E+00	-4.074E-02	0.994
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.132E-06	2.215E+00	-6.992E-02	0.983	9.554E-04	1.127E+00	-2.411E-02	0.977
Dano Março	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	7.786E-09	4.680E+00	-7.386E-02	0.996	1.214E-05	2.874E+00	-4.067E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.651E-06	2.227E+00	-7.076E-02	0.983	1.098E-03	1.127E+00	-2.521E-02	0.978
Dano Abril	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	6.998E-09	4.674E+00	-7.154E-02	0.996	1.133E-05	2.868E+00	-4.008E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	4.989E-06	2.223E+00	-6.550E-02	0.983	1.003E-03	1.124E+00	-2.295E-02	0.978
Dano Maio	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	7.679E-09	4.679E+00	-7.430E-02	0.996	1.197E-05	2.870E+00	-4.078E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.745E-06	2.209E+00	-6.954E-02	0.983	1.059E-03	1.127E+00	-2.433E-02	0.978
Dano Junho	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	7.864E-09	4.681E+00	-7.464E-02	0.996	1.223E-05	2.873E+00	-4.107E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.800E-06	2.218E+00	-6.993E-02	0.984	1.098E-03	1.126E+00	-2.533E-02	0.978
Dano Julho	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	8.129E-09	4.681E+00	-7.417E-02	0.996	1.297E-05	2.870E+00	-4.085E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	6.293E-06	2.203E+00	-7.075E-02	0.982	1.156E-03	1.126E+00	-2.483E-02	0.978
Dano Agosto	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	9.878E-09	4.682E+00	-7.464E-02	0.996	1.609E-05	2.869E+00	-4.120E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	7.590E-06	2.207E+00	-7.106E-02	0.982	1.423E-03	1.127E+00	-2.480E-02	0.977
Dano Setembro	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	8.655E-09	4.678E+00	-7.363E-02	0.996	1.341E-05	2.875E+00	-4.059E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	6.375E-06	2.215E+00	-6.877E-02	0.984	1.220E-03	1.125E+00	-2.488E-02	0.978
Dano Outubro	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	7.878E-09	4.675E+00	-7.347E-02	0.996	1.215E-05	2.873E+00	-4.051E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.548E-06	2.229E+00	-6.887E-02	0.983	1.092E-03	1.125E+00	-2.455E-02	0.978
Dano Novembro	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	7.399E-09	4.680E+00	-7.315E-02	0.996	1.154E-05	2.876E+00	-4.043E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.657E-06	2.208E+00	-7.014E-02	0.982	1.047E-03	1.125E+00	-2.397E-02	0.978
Dano Dezembro	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	6.803E-09	4.678E+00	-7.262E-02	0.996	1.077E-05	2.874E+00	-4.018E-02	0.995
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	5.005E-06	2.222E+00	-6.961E-02	0.982	9.668E-04	1.125E+00	-2.301E-02	0.977
Dano Anual	35°C < T <sub>ref</sub> < 15°C	9.321E-08	4.680E+00	-7.368E-02	0.996	1.479E-04	2.871E+00	-4.089E-02	0.998
	15°C < T <sub>ref</sub> < 5°C	7.086E-05	2.207E+00	-6.962E-02	0.983	1.317E-02	1.124E+00	-2.416E-02	0.978

Tabela 3. Dano real, dano teórico e fator de relação de dano

Período	Temperaturas do ar				Dano-Carregamento real		Dano-Carregamento teórico		fator (Dr/Dt)	
	T <sub>ref</sub>	ΔT	T <sub>min</sub>	T <sub>média</sub>	BMB	MCD	BMB	MCD	BMB	MCD
Janeiro 04	10.14	8.06	2.08	5.96	2.123E-03	8.340E-03	5.304E-04	1.145E-02	4.002E+00	7.283E-01
Fevereiro 04	11.02	10.67	0.36	5.06	4.565E-03	1.738E-02	4.956E-04	1.104E-02	9.211E+00	1.574E+00
Março 04	11.69	9.95	1.73	6.65	1.125E-02	3.615E-02	6.677E-04	1.363E-02	1.686E+01	2.653E+00
Abril 04	15.69	13.13	2.56	9.41	1.462E-02	4.146E-02	1.061E-03	1.800E-02	1.378E+01	2.303E+00
Mai 04	19.68	12.29	7.39	13.68	9.999E-03	1.720E-02	3.492E-03	3.754E-02	2.864E+00	4.582E-01
Junho 04	28.13	15.22	12.91	20.99	1.590E-02	1.299E-02	1.536E-02	9.528E-02	1.035E+00	1.364E-01
Julho 04	27.68	15.17	12.51	20.58	1.807E-02	1.391E-02	1.485E-02	9.614E-02	1.216E+00	1.447E-01
Agosto 04	25.78	11.49	14.29	20.30	1.570E-02	1.169E-02	1.696E-02	1.123E-01	9.257E-01	1.041E-01
Setembro 04	25.16	16.46	8.70	16.62	1.199E-02	1.066E-02	9.203E-03	7.317E-02	1.302E+00	1.457E-01
Outubro 04	16.75	9.12	7.63	11.98	4.263E-03	6.598E-03	2.130E-03	2.757E-02	2.002E+00	2.393E-01
Novembro 04	10.09	9.13	0.97	4.95	1.759E-03	8.147E-03	4.914E-04	1.133E-02	3.580E+00	7.188E-01
Dezembro 04	9.08	9.45	-0.37	3.81	1.884E-03	1.016E-02	3.487E-04	9.312E-03	5.402E+00	1.090E+00
Anual	20.80	13.15	7.65	14.27	1.121E-01	1.947E-01	5.206E-02	5.246E-01	2.154E+00	3.711E-01

constituídos por uma mistura betuminosa com BMB apresentam melhor comportamento que os reforços com misturas betuminosas convencionais, sob o ponto de vista da reflexão de fendas considerando o efeito das variações de temperatura, constatando-se que o reforço constituído por uma mistura betuminosa com BMB apresenta estados de extensão mais favoráveis que os resultantes para um reforço com mistura betuminosa convencional.

Neste trabalho foram desenvolvidas relações entre as condições de carregamento ( $T_{ref}$ ;  $\Delta T$ ) e o dano

teórico mensal associado, o que permite estabelecer relações entre os danos real e teórico, através do estabelecimento de um fator de relação de danos. Esta conclusão poderá ser confirmada com a realização de estudos com outras estruturas de pavimento e outros materiais.

Neste contexto conclui-se ainda que havendo uma relação entre os danos real e teórico, esta poderá vir a ser expressa por modelos de previsão para condições de carregamento mais generalizadas.

### Referências bibliográficas

- Chang, H. S., Lytton, R. L., et al., 1976. Prediction of Thermal Reflective Cracking in West Texas. Research Report 18-3, study 2-8-73-18. Texas Transportation Institute.
- Colombier, G., 1997. Cracking in pavements: nature and origin of cracks. Vanelstraete, A., Francken, L. (eds.). RILEM report 18, Prevention of reflective cracking in pavements. E & FN Spon. London, UK. pp 1-15.
- de Bondt, A., 2000. Effect of Reinforcement Properties. Proceedings PRO11. 4th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Edited by Abd El Halim, A. O., Taylor, D. A. and El Mohamed, H. H.. RILEM. Ottawa, Ontario, Canada. pp 13-22.
- de Bondt, A., Steenvoorden, M. P., 1995. Reinforced test sections A50 (A6) Friesland. Report 7-95-209-21: Road and Railroad Research Laboratory. Delft University of Technology. Delft, The Netherlands.
- Joseph, P., 1987. *Low temperature reflection cracking through asphalt overlays*. Ph.D. Dissertation, University of Waterloo.
- Martin-Pérez, B., El Mohamed, H. H., 2000. Determining the potential for reflection of cracks. Proceedings PRO11. 4th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Abd El Halim & Taylor & Mohamed (eds.). RILEM. Ottawa, Ontário, Canada. pp 115-124.
- Minhoto, Manuel J.C. 2007. Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.
- Minhoto, M.J.C., Pais, J.C., "Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas". Revista Pavimentação, Ano IV, nº 13, Associação Brasileira de Pavimentação, p. 6-13, 2009.
- Molenaar, A. A. A., Potter, J., 1997. Assessment and Evaluation of Reflection Crack Potential. Vanelstraete, A., Francken, L. (eds.). RILEM report 18, Prevention of reflective cracking in pavements. E & FN SPON. London, UK.
- Pais, J.C., 1999. Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Braga, Portugal.
- Paris, P. C., Erdogan, F., 1963. *A critical analysis of crack propagation laws*. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering, Series D, 85. Nº3
- Sousa, J. B., Pais, J. C., Saim, R., Way, G., Stubstad, R. N., 2002. *Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking*. Journal of the Transportation Research Board. Washington D.C., USA.
- Tschegg, E. K., Catharin, A., Stanzl-Tschegg, E., 2000. *Healing behaviour of reflective cracks*. Proceedings PRO11. 4th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Abd El Halim & Taylor & Mohamed (eds.). RILEM. Ottawa, Ontário, Canada. pp 47-56.

# Avaliação da resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas por meio de métodos adotados no Brasil e na Espanha

**Edeildo de Almeida Ribeiro**

edeildo@det.ufc.br

**Wellington Lorrán Gaia Ferreira**

wlorran@hotmail.com

**Verônica T. F. Castelo Branco**

veronica@det.ufc.br

**Sandra Aguiar Soares**

sas@ufc.br

**Jorge Barbosa Soares**

jsoares@det.ufc.br

**Angel Mateos**

angel.mateos@cedex.es

## RESUMO

Acredita-se que a presença de água em misturas asfálticas possa causar a perda da adesividade entre agregado e ligante asfáltico. O dano por umidade é um defeito cada vez mais frequente nos revestimentos e é considerado um dos principais responsáveis pelo desgaste prematuro de pavimentos no mundo. O presente trabalho tem como principal objetivo estabelecer um comparativo entre as metodologias de avaliação da resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas projetadas no Brasil e na Espanha. No Brasil, esta avaliação foi feita a partir da norma AASHTO T283/99 que vem sendo comumente usada no país (ensaio Lottman modificado) e, na Espanha, utilizou-se a norma europeia UNE-EN 12697-12/06. A mistura asfáltica brasileira foi dosada pelos métodos Marshall e Superpave, com ligante asfáltico CAP 50/70 e agregados naturais. A mistura brasileira foi avaliada para dois Volumes de vazios (Vv): 4% e 7%. A mistura espanhola foi dosada pelo método Marshall de acordo com a norma europeia UNE-EN 12697-12/06 utilizan-

do-se também ligante asfáltico CAP 50/70, agregados naturais e Vv em torno de 7%. Com relação à caracterização dos agregados, foram realizados ensaios de fluorescência de Raio-X para a determinação dos elementos químicos presentes nos mesmos. Os resultados do trabalho indicaram que as propriedades mineralógicas dos agregados com maior teor de sílica podem ter contribuído para o pior desempenho com relação ao efeito deletério da água. As misturas asfálticas moldadas utilizando a metodologia Marshall apresentaram maior suscetibilidade ao dano por umidade. As amostras com Vv de 7% apresentaram valores da Relação de Resistência à Tração (RRT) inferiores, se comparadas às amostras moldadas com Vv de 4%. Esta variação foi de, aproximadamente, 6% e 13% para as amostras moldadas utilizando as metodologias Marshall e Superpave, respectivamente.

## PALAVRAS-CHAVE

Dano por Umidade, Misturas Asfálticas, Ensaio Lottman Modificado, Volume de vazios, Metodologia de Dosagem.

## ABSTRACT

*It is believed that the presence of water in asphalt mixtures can cause loss of adhesion between aggregates and asphalt binder. Moisture damage is a common distress in pavements and it is considered one of the primary causes for premature pavement deterioration. This study aims to establish a comparison between different tests for measuring moisture damage resistance in asphalt mixtures designed in Brazil and Spain. In Brazil, this assessment was made according to the standard AASHTO T283/99 (modified Lottman test). In Spain, it was used the European standard UNE-EN 12697-12/06. The Brazilian asphalt mixture was designed using Marshall and Superpave methods, with an asphalt binder 50/70 and natural aggregates. This asphalt mixture was tested with two different air void contents: 4% and 7%. The Spanish asphalt mixture was designed with*

*the Marshall methodology using an asphalt binder 50/70, natural aggregates, and 7% air voids content. X-Ray fluorescence tests were performed to determine the chemical composition of aggregates. The results indicate that mixtures with aggregates with higher silica content had a worse performance regarding the deleterious effect of water. The asphalt mixtures designed with the Marshall method showed great moisture damage susceptibility. The mixtures designed with 7% air voids showed lower Tensile Strength Ratio (TSR) values. A variation of 6% and 13% was found for samples designed using Marshall and Superpave methodologies, respectively.*

## KEY WORDS

*Moisture Damage, Asphalt Mixes, Modified Lottman Test, Air Voids, Design Methodologies*

## CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desempenho de misturas asfálticas perante o efeito deletério da água é um assunto complexo e vem sendo debatido em âmbito nacional e internacional durante as últimas seis décadas. Segundo dados apresentados no último relatório gerencial da CNT (Confederação Nacional do Transporte) em 2009, 89.552km da malha rodoviária do país foram avaliados com relação às seguintes características: (i) pavimento, (ii) sinalização e (iii) geometria da via. Constatou-se, de acordo com o levantamento realizado, que 33,1% dos pavimentos apresentam sinais de desgaste e em 23,5% predominam defeitos, principalmente trinca em malha e/ou remendos (17,8%) e afundamentos, ondulações e buracos (4,6%). Rodovias deterioradas ou de baixa qualidade elevam os custos operacionais dos veículos, o número de acidentes, a poluição ambiental entre outros fatores. Além disso, uma infraestrutura rodoviária nessas condições dificulta a integração produtiva, econômica e social do país (CNT, 2009).

De acordo com Solaimanian *et al.* (2003), os defeitos relacionados ao dano por umidade são ocasionados por diversos fatores, e a presença da água acelera a

formação e a variedade dos mesmos. Caro *et al.* (2008a) afirmaram que a deterioração da estrutura do pavimento devido à ação da água dificilmente acontece de maneira isolada. Defeitos clássicos como deformação permanente e trincamento por fadiga são frequentemente agravados pela presença da água na infraestrutura do pavimento. Gorkem e Sengoz (2009) afirmaram também que os maiores danos ocorrem particularmente quando há inverno combinado com alto volume de tráfego. Arambula (2007) dividiu os principais defeitos relacionados ao dano por umidade em dois tipos: (i) internos e (ii) externos. Os respectivos fatores e variáveis destes dois tipos de defeitos são mostrados na Tabela 1.

Liberatori e Constantino (2006) afirmaram que é de conhecimento técnico o fenômeno da perda de adesividade entre ligante asfáltico e agregado e da perda de coesividade dentro do filme de ligante asfáltico desde a década de 20. Os autores afirmam ainda que, a partir da década de 60, iniciaram-se pesquisas com o intuito de prever o efeito deletério ocasionado pela água com destaque para o protocolo de ensaio desenvolvido por Lottman em 1978.

O ensaio Lottman modificado é um ensaio amplamente utilizado para: (i) avaliar o potencial de deslocamento

da película asfáltica de uma mistura asfáltica a quente e (ii) predizer, em um prazo de 4 a 12 anos, conforme a AASHTO T 283/99, a susceptibilidade da mistura asfáltica ao dano por umidade. Neste ensaio, as amostras são divididas em dois grupos de três Corpos de Prova (CPs). Um grupo conhecido como condicionado, que é submetido a um ciclo de congelamento e aquecimento, tendo seus valores de Resistência à Tração (RT) comparados com os valores de RT do outro grupo (não condicionado) através de uma Relação entre as Resistências à Tração (RRT). O critério de aceitação é de  $RRT \geq 80\%$  de acordo com AASHTO T 283/99 e de  $RRT \geq 70\%$  conforme a ASTM D 4867.

O presente trabalho tem como objetivo principal estabelecer um comparativo entre os resultados do ensaio Lottman modificado executado seguindo dife-

rentes procedimentos de ensaios (AASHTO T 283/99 e UNE-EN 12697-12/06). Duas misturas asfálticas dosadas no Brasil e na Espanha foram avaliadas. A mistura brasileira foi avaliada para duas metodologias de compactação (Marshall e Superpave) e dois valores de Vv (4 e 7%), enquanto a mistura espanhola apenas para o método Marshall e com Vv de 7%.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Dano por umidade

Dano por umidade pode ser definido, segundo Kiggundu e Roberts (1988), como sendo a deterioração progressiva funcional de um pavimento pela perda de adesão entre ligante asfáltico e agregado e/ou

Tabela 1 – Fatores que influenciam o dano por umidade em misturas asfálticas (adaptado de Arambula, 2007)

Tipo de Fator			
Interno		Externo	
Fator	Variável	Fator	Variável
Agregado	Forma Textura Angularidade Porosidade Área superficial Limpeza Teor de umidade Composição mineralógica Energia de superfície	Produção	Segregação física Agregados secos Escorrimento do ligante asfáltico Segregação térmica
Ligante asfáltico	Espessura do filme Viscosidade Composição química Idade Energia de superfície	Construção	Equipamentos Projeto de mistura
Volume de vazios	Percentual Tamanho Conectividade Permeabilidade	Ambiental	Temperatura Ciclos de gelo-degelo Nível do lençol freático (saturação) pH da água
		Tráfego	Magnitude do carregamento Número de repetições do eixo padrão

a perda da resistência coesiva dentro do próprio filme de ligante asfáltico principalmente pela presença da água. Segundo Hanz *et al.* (2007), dano por umidade é um fenômeno complexo e não pode ser atribuído a uma única propriedade do material ou mecanismo físico, e tanto as características do ligante asfáltico quanto dos agregados contribuem para aumentar o efeito deletério ocasionado pela água. Interações dentro do sistema ligante/agregado/água apresentam diferentes mecanismos que acarretam o deslocamento da película de ligante do agregado em misturas asfálticas.

Conforme mencionado por Solaimanian *et al.* (2003), há no mínimo cinco diferentes mecanismos que levam ao descolamento da película asfáltica: (i) descolamento, (ii) deslocamento, (iii) emulsificação espontânea, (iv) pressão nos poros e (v) lavagem hidráulica (Tabela 2). Kiggundu e Roberts (1988) ressaltaram a complexidade relacionada a este fenômeno. Estes autores mencionaram que alguns mecanismos podem ser relacionados à falta de compatibilidade do par ligante/agregado: (i) intemperismo, (ii) magnitude do carregamento e (iii) possibilidade de combinação de variáveis. Solaimanian *et al.* (2003) destacaram ainda mecanismos adi-

cionais, como a instabilidade do pH da água, como responsável pela instabilidade do par ligante/agregado.

A falta de resistência de misturas asfálticas com relação ao efeito deletério da água vem ocasionando uma série de defeitos levando muitas vezes a ruína do pavimento devido à incompatibilidade entre o par ligante/agregado. Com o objetivo de aumentar a compatibilidade entre esses materiais e de melhorar seu grau de cobertura (molhabilidade), são utilizados polímeros além de aditivos tradicionais líquidos (MOURA, 2001; FURLAN *et al.*, 2004; LIBERATORI e CONSTANTINO, 2006; GORKEN e SENGOZ, 2009; KOV e YILMAZ, 2009).

### **Influência das propriedades dos agregados, Volume de vazios (Vv) e da metodologia de dosagem relacionados ao dano por umidade em misturas asfálticas**

O fenômeno relacionado à adesão do ligante asfáltico à superfície do agregado está relacionado com a formação de interações eletrostáticas cuja intensidade dependerá do par ligante/agregado (LIBERATORI e CONSTANTINO, 2006). A formação dessas interações na adesão está relacionada à natureza química dos materiais, pois o

**Tabela 2. Fatores que promovem o deslocamento do filme de ligante (Solaimanian *et al.*, 2003)**

<b>Fatores</b>	<b>Definição</b>	<b>Possíveis Causas</b>
Descolamento	Separação do ligante asfáltico e do agregado sem aparente dano ao filme de ligante asfáltico	Sujeira no agregado Agregado úmido Fina camada de ligante asfáltico
Descolamento	Remoção da película de ligante asfáltico da superfície do agregado pela ação da água	Cobertura parcial do ligante na superfície do agregado Perfuração do filme de ligante devido a cantos agudos Utilização de partículas de forma plana ou alongada (lamelar) em misturas asfálticas
Emulsificação Espontânea	Emulsão de fase invertida (água suspensa dentro do asfalto) se forma dentro da mistura asfáltica havendo rompimento da ligação coesiva	Baixa energia de ligação coesiva Composição química hidrofílica do ligante asfáltico Elevado pH da água Presença de agentes emulsificadores
Pressão Neutra	Presença de água nos vazios interconectados devido à densificação pela ação do tráfego	A ação do tráfego sobre a mistura asfáltica faz com que a pressão nos poros aumente e então diminua outra vez após cada passagem. Esta ação contínua de aumento-diminuição da pressão pode romper o filme de ligante e conduzir ao deslocamento ou à lavagem hidráulica
Lavagem Hidráulica	Acontece na superfície do pavimento quando a água é empurrada para dentro do pavimento devido à ação dos pneus	A água é comprimida dentro do pavimento em frente ao pneu, resultando em uma tensão compressiva dentro de uma estrutura vazia interconectada. Quando o pneu passa, há formação de vácuo, puxando a água de volta para fora dos vazios interligados

ligante asfáltico é formado por compostos apolares (hidrocarbonetos), enquanto que a superfície dos agregados é de natureza polar podendo possuir cargas positivas ou negativas. É importante a polaridade do agregado tendo em vista que, na ligação entre o par ligante/agregado, há um balanceamento das cargas elétricas superficiais. Um complicador desse fenômeno é a composição mineral de alguns agregados que apresentam os dois tipos de cargas elétricas superficiais (FURLAN *et al.*, 2004).

Pavimentos asfálticos são projetados para terem Vv inicial de 7%, com valor médio de 4% devido a densificação ocasionada pelo tráfego posteriormente, podendo chegar a ter 2% ao final da sua vida útil. A má adesividade entre ligante asfáltico e agregado, quando o Vv ou a umidade são excessivos, compromete o desempenho de misturas asfálticas a curto, médio e longo prazos (MOURA, 2001; FURLAN *et al.*, 2004). Moura (2001) afirma que esse fenômeno não acontece no pavimento inteiro, mas em áreas localizadas com vazios de ar saturados com água ou vapor de água.

Além do Vv, Arambula (2007) destaca outros fatores facilitadores da permeabilidade da água, tais como: (i) tamanho e granulometria dos agregados, (ii) espessura do filme de ligante, (iii) espessura da camada de revestimento e (iv) esforço de compactação. De acordo com Caro *et al.* (2008a), o tamanho e a distribuição dos vazios em misturas asfálticas dependem principalmente das propriedades dos agregados, do projeto de misturas e do processo de compactação.

De acordo com a AASHTO T 283/99, os CPs podem ser moldados em laboratório seguindo as metodologias Marshall, Superpave ou Hveem. No Brasil, o método Marshall é preponderante, embora a metodologia Superpave venha sendo usada para fins de pesquisa já há mais de uma década no país. Swami *et al.* (2004) verificaram que misturas dosadas pelo método Superpave foram menos afetadas pela água mesmo com baixo teor de ligante em relação às misturas dosadas pelo método Marshall.

### **Caracterização do dano por umidade em misturas asfálticas**

O dano por umidade em misturas asfálticas está relacionado a fenômenos físicos, químicos e mecânicos.

A redução da adesão entre o par ligante/agregado e a perda de coesão dentro do próprio filme de ligante asfáltico na presença da água motivaram numerosas pesquisas relacionadas a esse fenômeno durante as últimas seis décadas. Mais recentemente, teorias relacionadas à termodinâmica, energia de superfície, entre outros métodos analíticos, vêm sendo utilizadas para analisar o fenômeno do dano por umidade em misturas asfálticas (CARO *et al.*, 2008a).

O teste para verificação da susceptibilidade a umidade mais utilizado no Brasil, e de uso disseminado internacionalmente, foi desenvolvido por R.P. Lottman no final da década de 1970. No procedimento original descrito por Lottman (1982), os CPs são condicionados com saturação a vácuo por 30 minutos, seguidos por mais 30 minutos em pressão atmosférica. Após, os CPs são congelados a uma temperatura de -18°C durante 15 horas e transferidos posteriormente para um banho-maria a 60°C. Solaimanian *et al.* (2003) afirmaram que Lottman havia estabelecido um condicionamento alternativo no qual cada ciclo completo tinha a duração de oito horas, totalizando 18 ciclos de condicionamento. Lottman chegou à conclusão de que tal procedimento era bastante severo. Os CPs dos grupos condicionado e não condicionado devem ser rompidos a tração indireta com uma velocidade de carregamento de 0,16cm/min à temperatura de 12°C e a 0,38cm/min à temperatura de 23°C.

A AASHTO T 283/99 é uma alteração referente ao ensaio Lottman original. Este ensaio é muito similar ao anterior com poucas exceções. A principal alteração está na aplicação do vácuo até que se atinja um grau de saturação entre 55 e 80% (AASHTO T 283/99), ou entre 70 e 80% (AASHTO T 283/03), em vez da aplicação durante 30 minutos como era feito no ensaio Lottman original. Solaimanian *et al.* (2003) mencionaram que outra mudança entre os dois testes está na temperatura e na taxa de carregamento de 0,16in/min à 12,8°C para 5,1in/min à 25°C. Os autores afirmam também que estes valores de taxa de carregamento e temperatura foram elevados de modo a permitir que a prensa Marshall, disponível na maioria dos laboratórios, pudesse ser utilizada. Os valores eleva-

dos para a temperatura de acordo com os mesmos autores também eliminariam a necessidade de resfriamento do sistema.

Na Espanha, o ensaio utilizado para a verificação do comportamento de misturas asfálticas com relação ao dano por umidade é descrito pela norma UNE-EM 12697-12/06 que consiste na determinação da sensibilidade à água para CPs de misturas asfálticas betuminosas. Este ensaio apresenta muita semelhança com aquele descrito pela AASHTO T 283/99 devido à utilização de seis CPs divididos em dois grupos com o mesmo número de amostras. Um dos grupos (condicionado) será submetido a ciclos de congelamento e aquecimento. Os CPs são submetidos a um aquecimento em banho-maria a  $40 \pm 1^\circ\text{C}$  durante um período de 68 a 72h. Determina-se a RT para os CPs de ambos os grupos e depois a razão (RRT) entre os valores de RT do grupo condicionado e os valores de RT do grupo não condicionado.

Outro ensaio bastante utilizado para a verificação do desempenho de misturas asfálticas com relação ao dano por umidade é o ensaio descrito pela ASTM D4867/96. Moura (2001) afirma que este ensaio apresenta como vantagem a verificação de problemas de adesividade entre ligante/agregados em curto prazo: zero a quatro anos. Furlan *et al.* (2008) compararam os ensaios descritos pelas normas ASTM D4867/96 e AASHTO T 283/99 e constataram que o grau de severidade do ensaio normatizado pela ASTM é menor do que ensaio descrito pela AASHTO.

Ao realizar o ensaio de dano por umidade induzida conforme o procedimento descrito pela AASHTO T 283/99, Rhode (2007) verificou que o desempenho de misturas asfálticas de módulo elevado (EME) é superior em relação a misturas asfálticas convencionais. Moizinho (2007), ao utilizar agregados lateríticos, provenientes do Distrito Federal e do Estado de Roraima, verificou que a coesão entre agregados e ligante foi melhor para as misturas com agregados de constituição arenosa. O autor verificou que agregados lateríticos que possuem constituição argilosa apresentaram maior suscetibilidade à umidade. Moreira (2009), ao realizar um estudo de caso numa rodovia no Estado do

Pará, obteve um RRT de 91,5% nos resultados do ensaio AASHTO T 283/99. A autora não utilizou melhorador de adesividade devido a compatibilidade química satisfatória obtida entre os materiais utilizados para a confecção da mistura asfáltica analisada.

Zollinger (2005), com auxílio das Placas de Wilhelmy e de um dispositivo de sorção universal (*Universal Sorption Device – USD*), determinou a energia de superfície para agregados e ligantes asfálticos identificando possíveis combinações entre estes materiais que promovem maior resistência ao dano por umidade induzida. Caro *et al.* (2008b) desenvolveram um novo método de avaliação de dano por umidade para misturas asfálticas baseado na aplicação de modelos probabilísticos e princípios da mecânica da fratura. Caro (2009) estudou a influência do  $V_v$  no desempenho mecânico de misturas asfálticas expostas ao processo de difusão da umidade. A autora apresentou uma nova classificação para a avaliação do dano por umidade em misturas asfálticas baseada na natureza genérica de cada ensaio. Essa nova proposta oferece uma indicação sobre vantagens e desvantagens entre os principais métodos de avaliação do dano por umidade utilizados no mundo. Vasconcelos (2010), utilizando a espectroscopia de infravermelho a partir da análise espectroscópica na região do infravermelho a partir dos espectros obtidos por transformada de análise *Fourier* (FTIR) com reflectância total atenuada (ATR), verificou uma forte absorção na região do infravermelho. Através dessa técnica, a autora observou como a umidade alcança a interface do par ligante/agregado por sua permeação ou difusão no ligante asfáltico ou mástique.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Ligantes Asfálticos

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) brasileiro utilizado é caracterizado por penetração como CAP 50/70. É processado na Petrobras/Lubnor, a partir da destilação a vácuo de petróleo brasileiro oriundo do campo Fazenda Alegre, no Espírito Santo. O CAP brasileiro apresentou densidade igual a 1,027. O CAP espanhol

também é caracterizado por penetração como CAP 50/70. Os valores referentes à viscosidade absoluta dos CAP's analisados são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3. Viscosidade absoluta dos CAP's brasileiro e espanhol**

Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa.s)	
	CAP 50/70 (Brasil)	CAP 50/70 (Espanha)
135	475	497
150	228	218
175	90	90

### Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa são provenientes do Brasil e da Espanha. Os agregados brasileiros são de natureza granítica e provenientes da Pedreira de Itaitinga, localizada a aproximadamente 30km da cidade de Fortaleza - CE. A porcentagem de utilização dos agregados foi escolhida de modo a enquadrar as misturas de agregados na Faixa C do DNIT. Foram utilizadas as britas 3/4" e 3/8" como agregado graúdo, como agregado miúdo um pó de pedra e como material de enchimento foi utilizado um filer natural proveniente da mesma pedreira. Os agregados foram submetidos aos ensaios de caracterização segundo as normas do DNER: granulometria (DNER-ME 83/98), abrasão Los Angeles (DNER-ME 35/98), densidade do agregado miúdo e graúdo (DNER-ME 81/98 e DNER-ME 84/95), adesividade (DNER-ME 79/94) e índice de forma (DNER-ME 86/94). Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados brasilei-

ros constam na Tabela 4. Os agregados espanhóis utilizados nesta pesquisa são provenientes da região de Madri. Os agregados graúdos são de natureza silicosa-calcária e os agregados miúdos são de natureza calcária.

### Curvas Granulométricas

As misturas asfálticas brasileiras utilizadas neste trabalho são do tipo Concreto Asfáltico (CA) com graduação densa e enquadradas na faixa C do DNIT (DNIT-ES 031/2004). A Figura 1 mostra a distribuição granulométrica das misturas brasileiras e espanhola, além dos limites da Faixa C do DNIT e da faixa espanhola para misturas do tipo AC22G. Estão também incluídos na Figura 1 os conceitos referentes à metodologia Superpave, pontos de controle e Zona de Restrição (ZR) para o Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19mm.

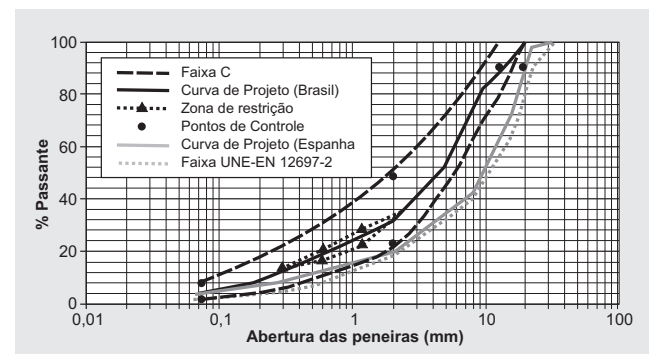


Figura 1. Curvas granulométricas das misturas brasileira e espanhola

### Caracterização Química

Através da técnica de fluorescência de Raio X, realizou-se uma análise química semi-qualitativa (identificação

**Tabela 4. Caracterização dos agregados brasileiros (CORREIA et al., 2010)**

Característica	Agregados		
	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra
Abrasão Los Angeles (%)		42,18	—
Absorção – graúdo (%)	0,62	1,20	—
Densidade real	2,67	2,64	2,65
Densidade aparente	2,62	2,58	—
Adesividade		Satisfatória	—
Índice de forma		0,66	—

dos elementos químicos) e semiquantitativa (teor de cada elemento químico) para os agregados do Brasil e da Espanha. Essa técnica consiste em identificar elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio, através da utilização de uma fonte de radiação gama ou radiação X de elevada energia, e assim excitar os elétrons dos átomos fazendo com que os mesmos saltem para uma camada eletrônica posterior. Quando os elétrons retornam à camada eletrônica de origem, eles emitem energia na forma de um fóton, sendo que essa transição é única para cada elemento, possibilitando a sua identificação (ANTUNES *et al.*, 2010). Para a realização desse ensaio, foi utilizado 1g da amostra passante na peneira Nº 200. Vale ressaltar que a quantidade utilizada para os agregados brasileiros e espanhóis refere-se à mistura entre as frações graúdas e miúdas.

### Determinações dos Teores de Ligantes

Para a mistura brasileira foram utilizadas as metodologias de dosagem Marshall e Superpave para determinação do teor de projeto de ligante. Na metodologia Superpave, adotou-se os valores para o número de giros de 100 e 30 para que as misturas asfálticas obtivessem Vv de aproximadamente 4% e 7%, respectivamente. Para a metodologia de dosagem Marshall, os números de golpes utilizados na compactação foram de 75 e 30 golpes por face para a obtenção de Vv de aproximadamente 4% e 7%, respectivamente. Para a determinação do Vv para a mistura espanhola, foi seguida a metodologia de dosagem Marshall com aplicação de 30 golpes por face. A Tabela 5 mostra os resultados dos parâmetros de dosagem das misturas.

Observa-se que a mistura espanhola possui um percentual muito baixo de ligante quando comparada às

misturas brasileiras (dosagens Marshall e Superpave). Isso se deve ao fato da mistura brasileira, que nesse caso é uma mistura densa do tipo CA, servir como camada de revestimento asfáltico, que deve possuir um percentual de vazios de aproximadamente 4%. Já a mistura espanhola estudada possui uma função diferente. Essa é uma mistura com graduação mais aberta, cuja função é melhorar as condições de atrito e drenagem em camadas de pavimentos já revestidas (COUTINHO *et al.*, 2010).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Caracterização Química

Foram realizados ensaios de caracterização química no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC. A Tabela 6 mostra os elementos químicos presentes nos agregados brasileiros e espanhóis e seus respectivos teores. Os resultados para os agregados brasileiros são esperados, já que os mesmos apresentam em sua constituição um teor elevado de silício (Si) caracterizando assim sua natureza granítica. Para os agregados espanhóis, comprovou-se através dos resultados que os mesmos apresentam em sua constituição um elevado teor de cálcio (Ca) e um baixo teor de Si. Conforme mencionado anteriormente, isso se deve à natureza silicosa-calcária referente aos agregados graúdos e à natureza calcária dos agregados miúdos.

Os agregados brasileiros apresentam um maior teor de Si em relação aos agregados espanhóis. Um teor elevado de Si faz com que os agregados sejam mais ácido, necessitando assim de compostos de natureza básica para que haja uma melhor adesão. Daí, agregados silicosos tenderem a apresentar baixa compatibilidade

Tabela 5. Parâmetros de dosagem das misturas brasileira e espanhola (CORREIA *et al.*, 2010)

Parâmetros/mistura	Brasileira (Superpave)	Brasileira (Marshall)	Espanhola (Marshall)
Ligante (%)	6,0	6,5	3,5
Vv (%)	4,0 e 7,0	4,0 e 7,0	7,0
$G_{mm}^*$	2,414	—	2,513
DMT**	—	2,408	—

\* Densidade Máxima Medida, \*\* Densidade Máxima Teórica

química com o ligante asfáltico. Portanto, espera-se um melhor desempenho com relação aos ensaios de resistência ao dano por umidade induzida para os agregados espanhóis em relação aos agregados brasileiros devido ao menor teor de Si.

**Tabela 6. Caracterização química, fluorescência de Raios X**

Elemento Químico	Agregados Brasileiros (%)	Agregados Espanhóis (%)
Silício (Si)	61,904	0,482
Potássio (K)	17,998	0,081
Alumínio (Al)	12,138	0,262
Cálcio (Ca)	5,317	98,835
Ferro (Fe)	2,595	0,261
Fósforo (P)	–	–
Cobre (Cu)	–	–
Zinco (Zn)	–	–
Rubídio (Rb)	0,048	–
Estrôncio (Sr)	–	0,049
Cloro (Cl)	–	–
Enxofre (S)	–	0,030

### **Influência das Propriedades dos Agregados Utilizados na Confeção das Misturas Asfálticas Brasileira e Espanhola**

Verificou-se a influência das propriedades dos materiais nos valores de RRT para as seguintes misturas: (i) Marshall brasileira e (ii) espanhola. As misturas analisadas foram moldadas com Vv em torno de 7%, e os ensaios para ambas foram realizados no Brasil seguindo os procedimentos descritos pela AASHTO T 283/99.

A mistura brasileira apresentou RRT = 73%, enquanto a mistura espanhola apresentou RRT = 83%, este último acima do limite de aceitação da AASHTO T 283/99, ou seja, 80%. A diferença de comportamento nessas misturas asfálticas deve-se aos materiais utilizados na confecção das misturas asfálticas de ambos os países. Conforme se observou na Tabela 6, o fato de os agregados espanhóis de natureza calcária apresentarem em sua constituição um alto teor de Ca justificaria o melhor desempenho em relação

aos agregados brasileiros de natureza silicosa com baixo teor de Ca e alto teor de Si. Furlan (2006) também verificou que a composição mineralógica fora fator preponderante à suscetibilidade à umidade em misturas asfálticas.

### **Influência do Método de Ensaio na RRT com Diferentes Processos de Condicionamento**

Verificou-se a influência do método de ensaio nos valores de RRT para a mistura brasileira com ensaios realizados no Brasil e na Espanha conforme procedimentos descritos pela AASHTO T 283/99 e UNE-EM 12697-12/06, respectivamente. Essa mistura foi dosada pelo método Superpave, com Vv em torno de 7%. A norma UNE-EM 12697-12/06 não estabelece um critério de aceitação para valores de RRT, portanto adotou-se o valor mínimo aceitável de RRT igual a 80%, de acordo com o estabelecido pela AASHTO T 283/99.

A mistura brasileira ensaiada na Espanha conforme a UNE-EM 12697-12/06 apresentou RRT igual a 86%, enquanto a mesma mistura ensaiada no Brasil conforme a AASHTO T 283/99 apresentou valor de RRT = 88%. Os resultados indicam a pouca influência do processo de condicionamento utilizado por ambas as normas. Observa-se que há um ciclo de aquecimento utilizado no método da UNE-EM 12697-12/06, ou seja, as amostras são submetidas a um banho-maria com temperatura de 40°C por um período de 68 a 72h, enquanto pelo método da AASHTO T 283/99 o ciclo de aquecimento é apenas 24h a 60°C.

### **Influência do Vv e do Método de Dosagem na Resistência ao Dano por Umidade Induzida**

A Figura 2 apresenta os resultados de RTT para as misturas brasileiras dosadas conforme os métodos Marshall e Superpave para diferentes Vv: 4% e 7%. A linha negra estabelece o limite mínimo de RTT = 80% conforme as recomendações da AASHTO T 283/99.

Como já se esperava, os valores de RTT das misturas dosadas com Vv = 4% apresentaram valores maiores

em relação as misturas com  $V_v = 7\%$ . Isso se deve à presença de água entre os vazios interconectados da mistura asfáltica. Por esse motivo, o ensaio descrito pela AASHTO T 283/99 recomenda que as amostras ensaiadas estejam com  $V_v$  entre 6 e 8% para que se

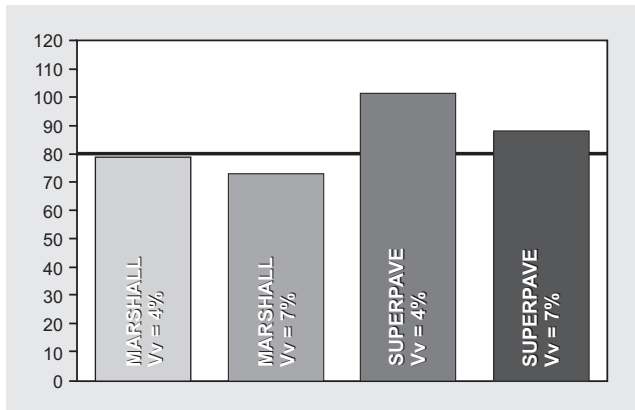


Figura 2. Relação de Resistência à Tração (RRT) das misturas asfálticas brasileiras analisadas conforme metodologias de dosagem e  $V_v$  diferentes

possa verificar a influência do efeito deletério da água numa situação desfavorável. Dessa forma, as misturas asfálticas com  $V_v$  em torno de 4% apresentam menor quantidade de vazios, diminuindo a presença de água entre os vazios da mistura. Furlan (2006) também observou que o aumento do  $V_v$  de 4 para 7% acarretou em uma maior sensibilidade ao dano por umidade. Arambula (2007) afirmou que misturas com maior  $V_v$  apresentam um maior grau de conexão e, conseqüentemente, uma maior suscetibilidade ao dano por umidade. Masad *et al.* (2009) utilizaram misturas asfálticas com  $V_v = 7\%$  dosadas pelo método Superpave, com agregados de natureza calcária provenientes da Flórida e granítica provenientes da Geórgia. Estes autores observaram que o tamanho médio de vazios conectados era maior do que o tamanho médio total de vazios não conectados.

De maneira geral, percebe-se que para os dois métodos de dosagem analisados, as misturas dosadas utilizando a metodologia Superpave, mesmo apresentando menor teor de ligante, apresentaram melhor desempenho em relação ao método Marshall. Swami *et al.* (2004) também verificaram que misturas dosadas pelo método Superpave foram menos suscetíveis a

ação da água em relação ao método Marshall. Nascimento *et al.* (2006) e Masad *et al.* (2009) verificaram, através de análise tomográfica em CPs moldados pelos métodos Marshall e Superpave, maior densificação na parte central das amostras compactadas pelo método Superpave.

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nessa pesquisa, conclui-se que os agregados brasileiros apresentaram maior teor de Si em relação aos agregados espanhóis. Essa diferença nas propriedades mineralógicas produziu misturas asfálticas com maior suscetibilidade ao dano por umidade. Verificou-se também que não houve diferenças significativas para as misturas asfálticas condicionadas conforme os procedimentos descritos pela AASHTO T 283/99 e UNE-EM 12697-12/06. A análise dos resultados para as misturas com  $V_v$  de 7% mostrou que estas amostras apresentaram valores de RRT inferiores se comparados àqueles encontrados para as amostras com  $V_v$  igual a 4%. Esta variação foi aproximadamente igual a 6% e 13% para as amostras confeccionadas utilizando as metodologias Marshall e Superpave, respectivamente. As misturas asfálticas moldadas pelo método de dosagem Marshall apresentaram maior suscetibilidade à umidade em relação às misturas moldadas pelo método Superpave, um indicativo da influência da compactação na estrutura interna destas misturas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos à Petrobras/Lubnor pelo fornecimento do ligante asfáltico, ao laboratório de Raios X da UFC pelas análises de fluorescência realizadas, ao Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) pela realização dos ensaios na Espanha, ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP/DET/UFC) por todo apoio operacional, a CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro aos autores. Os autores também agradecem ao estudante de Engenharia Civil Ryan Lucas pela ajuda durante a realização dos ensaios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T-283 (1999) Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.
- AASHTO T 283 (2003) Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.
- Antunes, F. F. L.; Castelo Branco, V. T. F.; Soares, J. B. (2010) Avaliação dos Impactos Causados pela Utilização de Rejeitos em Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 20º Encontro de Asfalto.
- Arambula, E. M. (2007) Influence of Fundamental Material Properties and Air voids Structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes, Tese de Doutorado. Texas A&M University, College Station, Texas.
- ASTM D 4867 (1996) – American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. Philadelphia.
- Caro, S.; Masad, E.; Bhasin, A.; Little, D. N. (2008a) Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures, part 1: Mechanisms, International Journal of Pavement Engineering, 9:2, 81-98.
- Caro, S.; Masad, E.; Airey, G.; Bhasin, A.; Little, D. (2008b) Probabilistic Analysis of Fracture in Asphalt Mixtures Caused by Moisture Damage. 87<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC.
- Caro, S. (2009) A Coupled Micromechanical Model of Moisture-Induced Damage in Asphalt Mixtures: Formulation and Applications, Tese de Doutorado. Texas A&M University, College Station, Texas.
- CNT (2009) Relatório Gerencial – Brasília: CNT : SEST : SENAT, 152p.
- Correia, B.M.; Onofre, F.C.; Castelo Branco, V.T.F.; Soares, J.B.; Mateos, A. (2010) Estudo Sobre Ensaio de Deformação Permanente em Misturas Asfálticas por Métodos Adotados no Brasil e na Espanha. Submetido para publicação na Revista Pavimentação, ABPv. Rio de Janeiro, RJ.
- Coutinho, R.P.; Pamplona, T.F.; Castelo Branco, V.T.F.; Soares, J.B.; Mateos, A. (2010) Multiscale Approach for Characterization of Asphaltic Materials Designed in Brazil and Spain. 11<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements. Nagoya, Japão.
- DNIT-ES 031 (2004) Pavimentação: Concreto Asfáltico. Rio de Janeiro/RJ.
- Furlan, A. P. (2006) Considerações Acerca da Adesão e da Suscetibilidade à Umidade de Misturas Asfálticas Densas À Luz de Algumas Propriedades Mecânicas. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo-SP.
- Furlan, A. P.; Gouveia, L. T.; Fabbri, G. T. P.; Fernandes Jr., J. L. (2004) Influência de Características dos Agregados na Suscetibilidade a Dano por Umidade de Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 17º Encontro de Asfalto.
- Furlan, A. P.; Fabbri, G. T. P.; Gigante, A. C.; Bernucci, L. L. B. (2008) Considerações sobre a Suscetibilidade à Umidade de Misturas Asfálticas Densas. 39ª Reunião Anual de Pavimentação, Recife/PE.
- Gouveia, L. T.; Furlan, A. P.; Parreira, A. B.; Fernandes Jr., J. L.; Fabbri, G. T. P. (2004) Considerações Acerca da Absorção de Asfalto pelos Agregados e sua Influência na Suscetibilidade à Umidade. // XVIII ANPET-Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 1. 138-149, Florianópolis-SC.
- Gorkem, C.; Sengoz, B. (2009) Predicting Stripping and Moisture Damage of Asphalt Concrete Prepared with Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime. Construction and Building Materials, v.23, 2227-2236.
- Hanz, A.; Bahia, H. U.; Kanitpong; Wen, H. (2007) Test Method to Determine Aggregate/Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage. Wisconsin Highway Research Program, Performing Organization Code, University of Wisconsin – Madison.
- Kiggundu, B. M., Roberts, F. L. (1988) Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods. Auburn University: National Center for Asphalt Technology.
- Kov, B. V.; Yilmaz, M. (2009) The Effects of Using Lime and Styrene-Butadiene-Styrene on Moisture Sensitivity Resistance of Hot Mix Asphalt. Construction and Building Materials, v.23, 1999-2006.
- Liberatori, L. A.; Constantino, R. S. (2006) Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas – Estado da Arte. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 18º Encontro de Asfalto.
- Lottman, R. P. (1978) NCHRP Report 192: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Masad, E.; Kassem, E.; Chowdhury, A. (2009) Application of Imaging Technology to Improve Laboratory and Field Compaction of HMA. Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration.
- Moizinho, J. C. (2007) Caracterização e Uso de Agregados Lateríticos do Distrito Federal e do Estado de Roraima em CBUQ. Tese de Doutorado, publicação G.DM-043º/07, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Moura, E. (2001) Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Moreira, L. S. (2009) Avaliação de Mistura Asfáltica Utilizada na Malha Rodoviária Paraense: Estudo de Caso. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade da Amazônia, UNAMA.
- Nascimento, L.; Leite, L.; Campos, E. F. (2006) Uso da Tomografia Computadorizada e de Imagens Digitais para o Estudo de Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 18º Encontro de Asfalto.
- Rohde, L. (2007) Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre-RS.
- Swami, B. L.; Mehta, Y. A.; Bose, S. (2004) A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India, International Journal of Pavement Engineering, vol. 5, 163-173.
- Solaimanian, M.; Harvey, J.; Tahmoressi, M.; Tandon, V. (2003) Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: a National Seminar. San Diego, California Washington DC: National Academies Press.
- UNE-EN 12697-12 (2006) Determinación de la Sensibilidad al Agua de las Probetas de Mezcla Bituminosa. Mezclas Bituminosas – Métodos de Ensayo para Mezcla Bituminosa em Caliente; Vasconcelos, K.L. (2004) Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE.
- Zollinger, C. J. (2005) Application of Surface Energy Measurement to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University, College Station, Texas.

# Utilização de resíduos oleosos em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários

**Cláudio Batista dos Santos**

claudiobatista\_esp@hotmail.com

**Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena**

lucenafb@uol.com.br

**André Wesley Barbosa Rodrigues**

andrewesley@bol.com.br

**John Kennedy Guedes Rodrigues**

profkennedy@hotmail.com

## RESUMO

As atividades de Exploração e Produção (E & P) de petróleo geram um resíduo oleoso que é obtido de diversos setores da cadeia produtiva de petróleo como: limpeza de filtros, derrames de óleo, fundo de tanques, limpezas em geral, transportes etc. A disposição final desse resíduo sobre o ambiente vem causando grande preocupação apesar de a indústria petrolífera ter procurado adotar diretrizes que melhorem o desempenho das suas atividades. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo apresentar uma alternativa de reaproveitamento dos rejeitos da indústria petrolífera, através da estabilização/solidificação de solos juntamente com o resíduo oleoso para aplicação em estradas, utilizando como agente estabilizante a cal e o cimento. O procedimento experimental foi dividido em duas partes: caracterização física e química dos materiais utilizados na pesquisa e caracterização mecânica das misturas SOLO-RESÍDUO-CAL e SOLO-RESÍDUO-CIMENTO. Após experimento piloto, adotou-se um percentual de incorporação de 17,5% de resíduo oleoso nas misturas, e a cal e o cimento foram adicionados nos teores de 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10%.

A adição de cal e cimento nas misturas ocasionou um aumento significativo nos valores de CBR se comparados aos valores encontrados para o solo em seu estado natural. Os valores obtidos no ensaio de expansão ficaram dentro dos limites preestabelecidos pelo DNIT para as misturas com adição de cal e fora do limite para as misturas com adição de cimento. Todos os valores de CBR encontrados para os dois tipos de misturas estudadas estavam dentro dos padrões do DNIT para uso em sub-base de pavimentos rodoviários.

## PALAVRAS-CHAVE

Resíduo Oleoso, Estabilização/solidificação, Pavimentos rodoviários.

## ABSTRACT

The Exploration and Production (E & P) of petroleum generate an oily residue that is obtained from various sectors of the production chain of oil such as cleaning of filters, oil spills, tank bottom, cleaning in general and transport. The final disposal of this residue on the environment has caused great concern despite the oil

industry have sought to adopt policies that improve the performance of their activities. This study shows an alternative for the reuse of the residue from the oil industry through stabilization/solidification of soils along with the oily residue for use in roads, using as a stabilizing agent lime and cement. The experimental procedure was divided into two parts: physical and chemical characterization of materials used in research and mechanical characterization of the SOIL-RESIDUE-LIME and SOIL-RESIDUE-CEMENT mixture. After an initial experiment, we adopted a percentage of incorporation of 17.5% of oily residue in the mixture and lime and cement were added in concentrations

of 4.0%, 5.5%, 7.0%, 8.5% and 10%. The addition of lime and cement in the mixture caused a significant increase in CBR values when compared to the values found for the soil in its natural state. The values obtained in the test were to expand within the preset limits for DNIT for mixtures with the addition of lime and out of range for the mixtures with addition of cement. All CBR values found for the two types of mixtures were studied within the standards of DNIT for use in sub-base of road pavements.

## KEYWORDS

*Oily Residue, Stabilization / solidification, Road pavements.*

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma grande preocupação mundial com o meio ambiente e os impactos causados pelas atividades do homem, principalmente as que se referem a processos industriais que geram uma grande quantidade de resíduos que em sua maioria não possuem um destino final ambientalmente adequado. Dessa forma, tem-se buscado avanços em técnicas de reaproveitamento e/ou reciclagem desses resíduos como forma de minimizar os impactos ambientais gerados pela mesma. O estudo e aperfeiçoamento destas técnicas podem resultar no desenvolvimento de novos produtos.

No Brasil a disposição de resíduos sólidos industriais no solo foi praticada de forma descontrolada e sem nenhuma restrição durante muitos anos, devido à falta de uma política ambiental efetiva (OLIVEIRA, 2003). As atividades de Exploração e Produção (E & P) de petróleo geram um resíduo oleoso que é obtido de diversos setores da cadeia produtiva de petróleo, como: limpeza de filtros, derrames de óleo, fundo de tanques, limpezas em geral, transportes etc. A disposição final desse resíduo sobre o ambiente vem causando grande preocupação apesar de a indústria petrolífera ter procurado adotar diretrizes que melhorem o desempenho das suas atividades, no entanto ainda não encontrou soluções viáveis referentes à disposição dos resíduos oleosos.

Segundo Cordeiro (2007), a pavimentação pela sua extensão e grandes volumes de solo mobilizado, cons-

titui-se uma alternativa ao reaproveitamento de resíduos, principalmente aqueles com certo potencial de estabilização. Os resíduos industriais ou subprodutos, quando disponíveis próximos às áreas em que são produzidos, resultam, geralmente, em soluções de baixo custo. A estabilização de solos em conjunto com o reaproveitamento de resíduos industriais tem permitido aplicações proveitosas na execução de bases e sub-bases de estradas.

Portanto, tem-se apresentado como alternativa para a utilização dos resíduos gerados pela indústria do petróleo a mistura do resíduo oleoso com material argiloso para a estabilização em pavimentos rodoviários.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram disponibilizados pela Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior – ATECEL. Em seguida estão descritos os materiais, a sua natureza e a origem de cada um deles, na ordem: Cimento, Cal hidratada, Solo Argiloso e Resíduo oleoso de petróleo.

O Cimento utilizado na pesquisa foi o CP II – Z – 32 da marca Nassau. Escolhido para ser utilizado como estabilizante químico.

A cal utilizada na pesquisa foi a hidratada da marca Megaó com massa específica de 2,30 g/cm<sup>3</sup>. Optou-se

pela utilização da cal também como estabilizante químico devido aos excelentes resultados obtidos por diversos autores na estabilização de solos argilosos.

Foi utilizado um solo do tipo argiloso proveniente da cidade de Campina Grande, Estado da Paraíba, Brasil, distando 121km da capital João Pessoa. As amostras de solo foram coletadas à profundidade de 1,0 m, como forma de evitar a camada superficial, geralmente com presença de matéria orgânica e alteração da quantidade de partículas finas por lixiviação. Procurou-se trabalhar com um tipo de solo que atendesse às condições para uma boa estabilização química com o uso da cal e do cimento e que fosse predominantemente argiloso.

O resíduo oleoso utilizado na pesquisa trata-se de um cascalho de perfuração oriundo das atividades de Exploração & Produção de Petróleo do Município de São Sebastião do Passé, unidade de Taquipe da Petrobras no Estado da Bahia, Nordeste do Brasil.



Figura 1 – Resíduo oleoso

## 2.2 Métodos

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT).

### 2.2.1 Experimento Piloto

Com o intuito de verificar a influência do resíduo oleoso (RO) sobre o comportamento mecânico do solo, inicialmente, foram feitas adições de resíduo ao solo

nas proporções de 2,5%, 7,5%, 12,5%, 17,5% e 22,5% (em relação ao peso total da amostra) e também foi feita amostra testemunha sem adição de resíduo oleoso, para comparação dos resultados. Para estes teores foram realizados o ensaio de compactação e, em seguida, o ensaio de CBR. A partir dos resultados obtidos foi fixado o teor de resíduo oleoso de 17,5% a ser utilizado no decorrer da pesquisa para as misturas de SOLO+RO+CAL e SOLO+RO+CIMENTO.

Os aglomerantes escolhidos foram a cal e o cimento devido à eficácia de ambos na estabilização de solos argilosos. Com a adoção do percentual de 17,5% para a incorporação do resíduo oleoso na mistura, baseado em resultados obtidos no Experimento Piloto, optou-se em adicionar estes aglomerantes às misturas, nos teores de 4%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10%. O critério adotado para esta incorporação foi baseado em sugestões de estudos realizados por Cordeiro (2007) e Oliveira (2003).

### 2.2.2 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados, segundo Método de Ensaio (ME 162/94) normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), na Energia Proctor Intermediário.

Primeiramente o ensaio de compactação foi realizado apenas para amostras de solo. Em seguida, foram realizados ensaios de compactação para as misturas de SOLO+RO+CAL e SOLO+RO+CIMENTO.

### 2.2.3 Ensaio de CBR e Expansão

O ensaio de CBR foi realizado segundo Método de Ensaio (ME 049/94) normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) com uma réplica para cada teor de variação dos aglomerantes. Primeiramente o ensaio de CBR foi realizado apenas para amostras de solo. Em seguida, o ensaio foi realizado para as misturas de SOLO+RO (Ensaio Piloto), SOLO+RO+CAL e SOLO+RO+CIMENTO.

Os corpos de prova foram confeccionados e colocados em imersão, sendo acompanhados durante quatro dias para análise do comportamento do nível de expansão de todas as amostras ensaiadas.

## 2.2.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de Resistência à Compressão Simples foram realizados, segundo Método de Ensaio NBR 12025 (ABNT, 1990). Na primeira etapa o ensaio foi realizado apenas para as amostras de solo. Na segunda etapa foi realizado o ensaio de compressão simples para as misturas de SOLO+RO+CAL e SOLO+RO+ CIMENTO. Os corpos de prova foram moldados de acordo com os procedimentos sugeridos pela NBR 12024 da ABNT (1992).

A cura dos corpos de prova foi realizada ao ar em câmara úmida durante sete dias para posterior determinação da Resistência à Compressão Simples dos corpos de prova.

## 2.2.5 Caracterização Ambiental

Para que um resíduo seja disposto adequadamente é necessário que sua composição química seja determinada segundo os procedimentos sugeridos na NBR 10004 (ABNT, 2004). Esta norma estabelece os critérios adotados para a classificação dos resíduos quanto aos seus riscos potenciais para o meio ambiente e à saúde pública. Portanto, com o objetivo de classificar ambientalmente os resíduos oleosos foram utilizados os seguintes procedimentos: determinação do teor de óleo e graxas, preparação dos extratos lixiviados e solubilizados e realização da espectroscopia por absorção atômica.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Experimento Piloto

Os resultados obtidos com os ensaios de CBR para o solo puro com 0% de adição de resíduo oleoso (testemunha) e para o solo com adições de resíduo oleoso nas proporções de 2,5%, 7,5%, 12,5%, 17,5%, e 22,5% em massa, em relação à massa total da amostra (6.000g), são apresentados na Figura 2. Foram utilizadas para realização deste ensaio duas amostras (corpos de prova) para cada teor de adição, ou seja, em cada série de corpo de prova existe uma amostra para cada teor adicionado.

Analisando os resultados apresentados na Figura 2, observa-se que não houve variações significativas nos

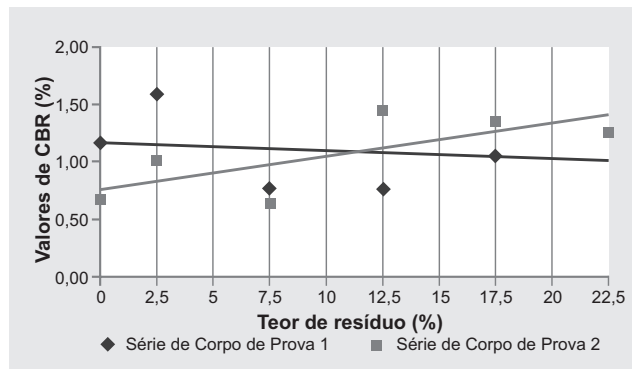


Figura 2 – Efeito da adição do resíduo oleoso nos valores de CBR para o solo.

valores obtidos para o CBR quando foram adicionados vários percentuais de resíduo oleoso em relação ao peso da amostra de solo. No intuito de incorporar à maior quantidade possível de resíduo oleoso as misturas que darão seguimento a este estudo, optou-se por fixar a quantidade de resíduo oleoso na mistura em 17,5% em relação à massa de solo seco. O teor de 22,5% foi descartado por ter apresentado no ensaio de expansão resultado um pouco maior que os demais teores estudados, sendo dessa forma não indicado para ser utilizado no seguimento da pesquisa, pois, caso fosse utilizado, poderia apresentar valores acima dos estabelecidos pelos critérios do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

### 3.2. Ensaio de compactação

O cimento e cal foram escolhidos como estabilizantes químicos devido à eficácia apresentada diante de solos argilosos. Assim, após a fixação do resíduo oleoso em 17,5%, a cal e o cimento foram incorporados à mistura nos teores de 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10%.

No ensaio de compactação para o solo puro obteve-se os resultados mostrados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Resultados obtidos no ensaio de compactação para o solo.

Solo	Massa específica aparente	Umidade	Expansão
	seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	ótima (%)	(%)
	1,750	15,50	0,92

**Tabela 2 – Resultados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo-resíduo-cal.**

Mistura	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	Umidade Ótima (%)
solo – resíduo – 4,0% cal	1,750	15,40
solo – resíduo – 5,5% cal	1,740	14,95
solo – resíduo – 7,0% cal	1,750	16,00
solo – resíduo – 8,5% cal	1,740	14,40
solo – resíduo – 10% cal	1,730	15,60

**Tabela 3 – Resultados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo-resíduo-cimento.**

Mistura	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	Umidade Ótima (%)
solo – resíduo – 4,0% cimento	1,740	15,20
solo – resíduo – 5,5% cimento	1,720	15,40
solo – resíduo – 7,0% cimento	1,720	15,60
solo – resíduo – 8,5% cimento	1,760	15,20
solo – resíduo – 10% cimento	1,670	16,60

Na Tabela 2 e 3 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação para as diferentes misturas de solo-resíduo-cal e solo-resíduo-cimento.

Ao analisar os resultados da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima para as amostras com adição de cal e cimento apresentados nas Tabelas 2 e 3, percebe-se que os valores obtidos são semelhantes aos encontrados para o solo puro (Tabela 1).

### 3.3 Ensaio de CBR e Expansão

Na Tabela 4 foram inseridos os valores de referência para os valores de CBR e de Expansão (ambos na energia Proctor Intermediário) para solos estabilizados ou melhorados com cimento, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Ressalta-se que estes valores de referência fazem parte das especificações de serviços para uso em estradas de tráfego pesado.

Nas Tabelas 5 e 6 estão os resultados detalhados dos ensaios de CBR (%), bem como os valores obtidos para umidade (%), massa específica aparente seca (g/cm³) e expansão (%) obtidos para as misturas de solo-resíduo-cal e solo-resíduo-cimento. Foram utilizados dois corpos de prova para cada adição de cal ao solo puro.

Os valores de CBR obtidos na pesquisa para as misturas contendo 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10% de cal são superiores aos recomendados para uso em sub-bases. Quanto à expansão todos os valores obti-

**Tabela 4 – Valores de referência para solos melhorados com cimento Portland.**

	CBR	Expansão
Sub-base	≥ 30%	Máxima de 1%
Base	≥ 80%	Máxima de 0,5%

Fonte: DNIT ES-302/97 e ES-304/97.

**Tabela 5 – Resultados dos ensaios de CBR variando o teor de cal.**

Teores de cal (%)	Umidade (%)	Massa específica aparente seca corpo de prova (g/cm³)	CBR(%)	Expansão(%)
4,0	26,14	1,570	38,28	0,35
	12,62	1,770	36,98	0,25
5,5	36,11	1,440	43,50	0,26
	21,22	1,660	42,05	0,19
7,0	17,69	1,600	39,59	0,38
	12,74	1,720	42,05	0,33
8,5	16,65	1,630	40,31	0,22
	13,32	1,680	47,13	0,33
10	15,94	1,610	35,53	0,18
	16,13	1,610	29,00	0,42

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de CBR variando o teor de cimento.

Teores de cimento (%)	Umidade (%)	Massa específica aparente seca corpo de prova (g/cm <sup>3</sup> )	CBR(%)	Expansão(%)
4,0	12,55	1,770	25,67	1,29
	14,94	1,740	23,20	1,54
5,5	13,19	1,940	38,43	1,32
	15,73	1,920	33,35	1,62
7,0	13,62	1,760	51,48	1,37
	15,26	1,720	45,68	1,67
8,5	14,24	1,740	54,38	1,79
	14,81	1,690	49,30	2,06
10	15,12	1,750	79,75	1,49
	15,41	1,680	75,40	1,22

dos estão em conformidade com as especificações de serviços citadas na Tabela 4. Foram utilizados dois corpos de prova para cada adição de cimento ao solo puro.

Analisando os valores de CBR obtidos na pesquisa para as misturas contendo cimento, observa-se que, para os teores de 5,5%, 7%, 8,5% e 10%, os resultados obtidos são superiores aos recomendados para uso em sub-bases de pavimentos rodoviários. Para o teor de 4% de cimento, o resultado encontrado ficou abaixo do limite estabelecido. Quanto à expansão, todos os valores obtidos estão acima do estabelecido nas especificações de serviços citadas na Tabela 4, recomendada pelo DNIT.

Portanto, entre todas as misturas analisadas, a mistura composta por solo, 17,5% de resíduo oleoso e 8,5% de cal apresentou o maior incremento dentre os valores de CBR encontrados e o valor da expansão

dentro do limite estabelecido nos critérios do DNIT para utilização em sub-bases de estradas.

### 3.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados de resistência à compressão simples obtida para as misturas de solo-resíduo-cal e solo-resíduo-cimento. O teor de resíduo oleoso presente nessas misturas é 17,5%. Foram utilizadas para realização deste ensaio duas amostras (corpos de prova) para cada teor de adição, ou seja, em cada série de corpo de prova existe uma amostra para cada teor adicionado.

De acordo com as Figuras 3 e 4, observa-se uma tendência de incremento nos valores de resistência à compressão simples ao se comparar com os valores encontrados para o solo puro. Os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples tanto para o solo puro como

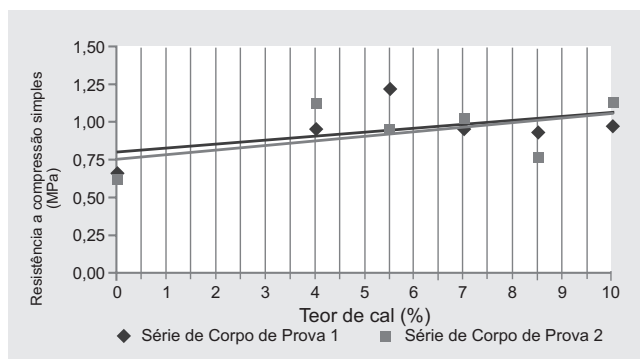


Figura 3 – Efeito do teor de cal nos valores da resistência à compressão simples

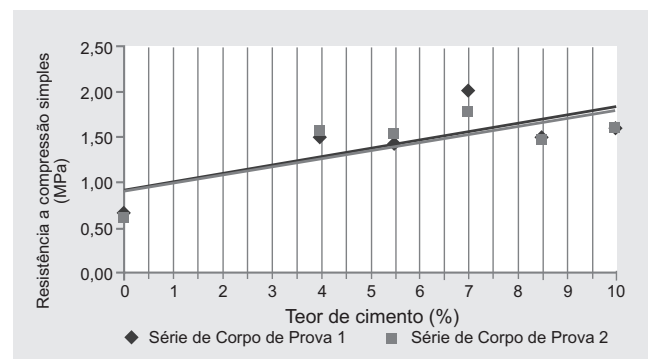


Figura 4 – Efeito do teor de cimento nos valores da resistência à compressão simples

para as misturas contendo 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10% de cal foram superiores aos valores recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas, que recomenda uma resistência à compressão simples de no mínimo 0,7 MPa para base e de 0,35 MPa para sub-base, segundo Baptista (1976).

Os valores obtidos nos ensaios de compressão simples para as misturas contendo 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10% de cimento foram superiores aos valores recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas e também são superiores aos obtidos para as misturas com adição de cal.

### 3.5 Caracterização Ambiental

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas as concentrações dos constituintes químicos da mistura composta por solo, 17,5% de resíduo e 8,5% de cal, obtidas a partir dos extratos solubilizado e lixiviado, respectivamente. A escolha desta mistura com este teor de substituição se deu pelo fato da mesma ter apresentado melhores resultados em conformidade com as especificações do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, como visto nos valores apresentados no item anterior (caracterização mecânica).

Os resultados obtidos evidenciam que, para a mistura solo-resíduo-8,5%cal, os constituintes químicos, com exceção do chumbo, apresentaram concentrações inferiores aos limites do anexo G, estabelecidos pela NBR 10004/2004 para análise de extratos solubilizados (Tabela 7). Para as concentrações dos constituintes químicos obtidos com o extrato lixiviado (Tabela 8), observou-se que todos apresentam concentrações inferiores aos limites do anexo F, estabelecido pela NBR 10004/2004. Assim, pode-se concluir que a mistura solo-resíduo-8,5%cal pode ser classificada como “resíduo” não tóxico para os metais analisados. De acordo com os padrões da referida norma, a mistura solo-17,5%resíduo-8,5%cal classifica-se como não perigosa e não inerte, ou seja, “Resíduo Classe II A”.

## 4. CONCLUSÕES

Em relação às misturas de solo+resíduo (experimento piloto), percebeu-se que não houve incrementos signifi-

**Tabela 7 – Resultados do teste de solubilização para a mistura solo-17,5% resíduo-8,5% cal.**

Parâmetros	LMP (mg/l)		Caracterização
	Anexo G NBR 10004/2004	Mistura (mg/l)	
Cádmio	0,005	0,00	I
Chumbo	0,01	0,18	NI
Cobre	2,00	0,137	I
Manganês	0,10	0,00	I
Ferro	0,30	0,02	I
Cobalto	Sem padrão	0,047	I

LMP – Limite Máximo Permitido; NI - Não Inerte e I – Inerte

**Tabela 8 – Resultados do teste de lixiviação para a mistura solo-17,5% resíduo-8,5% cal.**

Parâmetros	LMP (mg/l)		Caracterização
	Anexo F NBR 10004/2004	Mistura(mg/l)	
Cádmio	0,50	0,058	NT
Chumbo	1,00	0,51	NT
Manganês	Sem padrão	0,038	NT
Cobre	Sem padrão	0,092	NT
Cobalto	Sem padrão	0,129	NT

LMP – Limite Máximo Permitido; NT – Não Tóxico

cativos no valor do CBR para os teores de resíduo oleoso adicionados (2,5%, 5,0%, 7,5%, 12,5%, 17,5% e 22,5%) a esta mistura quando comparados aos valores obtidos para o solo puro. Nos valores de umidade ótima (%), massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>) e expansão (%) observaram-se pequenas variações.

Nos resultados obtidos nos ensaios de CBR para as misturas com adição de cal (4,0%, 5,5%, 7,0% 8,5% e 10%), observou-se um aumento significativo nos valores encontrados e todos estes valores são superiores ao estabelecido (>30% para uso em sub-base) pela especificação de serviço DNIT – ES 302/97. Em relação à expansão, os valores encontrados para esta mistura nos teores acima mencionados apresentam-se dentro dos limites preestabelecido pelo DNIT (máxima de 1% para uso em sub-base, DNIT – ES 302/97 e máxima de 0,5% para uso em base de pavimentos, DNIT – ES 304/97). Nas misturas com adição de cimento (5,5%, 7,0% 8,5%

e 10%), os valores obtidos do ensaio de CBR também foram superiores aos estabelecidos pelo DNIT para uso em sub-bases de pavimentos rodoviários, porém, os valores de expansão apresentaram-se superiores aos limites preestabelecidos nas especificações de serviço.

Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão simples para as misturas com adição de cal ou cimento nos teores de 4,0%, 5,5%, 7,0% 8,5% e 10% foram acima dos recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas (DOT-Texas, EUA), que recomenda uma resistência à compressão simples de no mínimo 0,7 MPa para materiais utilizados em camadas de base e de 0,35 MPa para materiais utilizados em camadas de sub-base.

Ao se analisar de maneira conjunta os resultados das misturas solo-resíduo-cal e solo-resíduo-cimento, a mistura que melhor atendeu aos requisitos

das Normas do DNIT para os ensaios de CBR, expansão e resistência à compressão simples foi a mistura composta por solo, 17,5% de resíduo oleoso e 8,5% de cal.

Em relação à classificação quanto à toxicidade e inerticidade segundo a ABNT NBR-10004, a mistura ideal solo-resíduo-cal (74% de solo, 17,5% de resíduo oleoso e 8,5% de cal) foi classificada como "Resíduo Classe II A" para os parâmetros analisados.

## 5. AGRADECIMENTOS

– Ao CNPq, pelo apoio financeiro na realização deste projeto de pesquisa;

– À ATECEL (Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior), pela disponibilização do laboratório para a realização dos ensaios.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-10004. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-12024. Solo cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-12025. Solo cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.
- BAPTISTA, C. N. Pavimentação: Compactação dos Solos no Campo, Camadas de Base e Estabilização dos solos, 4ª edição, ed. Globo, Rio de Janeiro, 1976.
- CORDEIRO, J. F. S. Estabilização química e Solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários, 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ME- 049/94. Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia, 1994.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ME- 162/94. Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, 1994.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ES- 302/97. Pavimentação – Sub-base de solo melhorada com cimento, 1997.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ES- 304/97. Pavimentação – Base de solo melhorada com cimento, 1997.
- OLIVEIRA, D. M. Aplicação da técnica de solidificação/estabilização para resíduos oleosos da indústria petrolífera, utilizando solo argiloso e bentonita, 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

# Contribuição ao uso de análise paramétrica para dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizando valores estimados de módulo de resiliência

**Clauber J. B. da Costa**

clauber.costa@pacsengenharia.com.br

**Adson Viana Alecrim**

adson.alecrim@em.ufop.br

## RESUMO

A evolução mais recente para os projetos de pavimentos e avaliação estrutural está calcada nos conceitos da Mecânica de Pavimentos, cujo objetivo é de projetar um pavimento considerando o estado de tensões e deformações atuantes, compatibilizando-os com os valores admissíveis ou resistentes, para um período de projeto e condição de serventia. A verificação das tensões e deformações atuantes na estrutura do pavimento só podem ser feitas com acuidade através de modelos elásticos representativos dos materiais envolvidos, fundamentalmente do revestimento asfáltico que é submetido ao envelhecimento de curto e longo prazo. No Brasil, o módulo de resiliência tornou-se um dos parâmetros-chave para o dimensionamento empírico-mecânico de pavimentos rodoviários. Este trabalho avaliou, através de uma análise paramétrica, as variações do comportamento estrutural a partir de valores estimados de módulos

para diferentes espessuras da camada de revestimento. A verificação estrutural foi realizada por meio do programa ELSYM5 (Elastic Layered Symmetrical), que se baseia no método das diferenças finitas (EL) e permite determinar as deflexões, tensões e deformações, em qualquer ponto da estrutura. Para as camadas granulares e subleito foram considerados módulos representativos dos materiais correntes na bibliografia rodoviária, levando em conta que por ocasião do projeto executivo esses materiais são ensaiados em laboratório. No caso das misturas asfálticas, a estimativa de módulos são mais complexas, uma vez que esses materiais dependem de diversos fatores, dentre eles: os fatores da mistura, os fatores de carga bem como os fatores ambientais.

## PALAVRAS-CHAVE

Dimensionamento de pavimentos, análise paramétrica, módulo de resiliência.

## INTRODUÇÃO

Convencionou-se chamar em Mecânica dos Pavimentos, de deformação resiliente a deformação elástica ou recuperável de solos e de estruturas de pavimentos sob ação de cargas repetidas. Medina *et al.* (1976)

foram os pioneiros no Brasil na abordagem da Mecânica dos Pavimentos de modo efetivo, no que tange a avaliação estrutural de pavimentos e projeto de reforço.

A resiliência excessiva faz-se notar mesmo em pavimentos bem dimensionados por critérios de resistência à ruptura plástica, sempre que as deflexões são

grandes ou quando o trincamento da superfície é prematuro. É o fenômeno da fadiga dos materiais, que se manifesta especialmente em materiais betuminosos ou tratados com cimento.

O método do CBR para dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis, desenvolvido pelo USACE (*U.S. Army Corps of Engineers*), tem como base o trabalho *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*, onde não são consideradas as propriedades e características físicas dos materiais. Pode-se, quando muito, estabelecer relações específicas a determinados materiais ou estruturas, sendo isso sempre de modo empírico. A verificação das tensões e deformações atuantes na estrutura do pavimento só podem ser feitas com acuidade através de modelos elásticos da mecânica dos pavimentos.

A análise de tensões e deformações de pavimentos, como sistemas de múltiplas camadas, e a aplicação da Teoria da Elasticidade deram ensejo à consideração racional da resiliência do pavimento. Assim, cresceu a importância do conhecimento das características elásticas dos solos e materiais utilizados na estrutura de um pavimento.

Desta forma, os métodos de projeto correntes, ao estabelecerem empiricamente a espessura necessária de cada material sobre os solos de fundação, com diferentes capacidades de suporte, não consideram, de modo explícito, a compatibilidade das deformações das camadas que constituem o pavimento. Portanto, pode ocorrer que um pavimento, embora bem dimensionado para um subleito de CBR conhecido, apresente deformações resilientes que solicitem demasiadamente à flexão o revestimento ou uma camada cimentada.

Entende-se que um processo racional de dimensionamento deve considerar não somente o CBR do subleito e das camadas granulares, mas também as características elásticas de todas as suas camadas.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo avaliar através de análise paramétrica as variações do comportamento estrutural (ALECRIM *et al.*, 2009) a partir de valores estimados de módulo de resiliência para diferentes espessuras de revestimento asfáltico bem como as camadas granulares. As análises tensão e defor-

mação serão realizadas por meio do Software ELSYM5 (*Elastic Layered Symetrical*).

## DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

### DNER-ME- 135/10 – Norma Brasileira

Esta norma teve sua primeira publicação em 1986, desenvolvida por Pinto e Preussler tendo sido revista em 2010, que cancela e substitui a Norma DNER-ME 133/94. No Brasil, permanece até hoje como norma de referência aos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para misturas asfálticas.

A norma preconiza o uso de um sistema pneumático de carregamento com dispositivo mecânico de controle de aplicação de carga. O tipo de sensor de deslocamento a ser utilizado é do tipo LVDT, preso ao corpo de prova por meio de um suporte como aquele descrito pela norma ASTM D-4123. O cálculo do módulo segue a Equação 1, para corpos de prova de dimensões estabelecidas.

$$MR = \frac{F}{\Delta.H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

F – Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em Kgf;

MR – Módulo de Resiliência, em Kgf/cm<sup>2</sup>;

H – altura do corpo de prova, em cm;

$\mu$  – Coeficiente de Poisson.

$\Delta$  – Deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador, para aplicações da carga F, em cm.

## FADIGA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O principal mecanismo de ruptura de pavimentos flexíveis no Brasil é a fadiga do revestimento asfáltico sob a ação de cargas repetidas de tráfego. Já as deformações permanentes repetidas que levam a afundamentos de trilha de roda são de menor importância devido às características lateríticas que comumente apresentam os subleitos e as camadas terrosas do próprio pavimento. Acresce o fato de que a umidade de

equilíbrio do subleito fica próxima e, geralmente, aquém do teor ótimo do ensaio de compactação normal, nos pavimentos de rodovias federais. Além disso, não ocorre a condição de saturação que é típica do degelo da primavera nos países de clima frio.

O fenômeno de fadiga tem sido definido como um processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincas ou em fratura completa, após certo número de repetições do carregamento, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

Para a estimativa da vida de fadiga e das propriedades elásticas das misturas betuminosas, dispõem-se de ensaios de laboratório dinâmicos que são os que melhor reproduzem as condições de carregamento induzidas pelo tráfego. Os ensaios dinâmicos usados para se determinar a vida de fadiga distinguem-se quanto ao processo empregado para desenvolver tensões e deformações repetidas, ou seja, por flexão, tração direta e tração indireta e quanto à geometria das amostras ensaiadas.

O ensaio de carga repetida a flexão alternada consiste em submeter uma vigota de concreto asfáltico simplesmente apoiada a duas cargas simétricas em relação ao seu centro, cargas estas que produzem um estado de tração uniforme na parte central do corpo de prova. A trinca que surge na vigota é geralmente única, formando-se na região onde o momento fletor é constante e máximo. Ao longo das últimas três décadas, es-

forços consideráveis têm sido impetrados no sentido de se estabelecer métodos de projeto de pavimentos que possibilitem minimizar a ocorrência de trincamento prematuro por fadiga em pavimentos asfálticos. Para se determinar as propriedades de fadiga, os seguintes procedimentos são usualmente adotados:

- Realização de ensaios de laboratório para estabelecimento de leis de fadiga para as misturas asfálticas;
- Estimativas das propriedades de fadiga com base em estudos realizados em materiais similares ou a partir de avaliação do desempenho de pavimentos em serviço através da análise comparativa do trincamento observado.

## FATORES QUE INFLUEM NA VIDA DE FADIGA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A presença de trincas em pavimentos tem sido categorizada em dois grandes grupos: trincas devido às cargas do tráfego e trincas que decorrem de outras causas, como as solicitações térmicas, deficiências construtivas e intemperismo. Apresentam-se na Tabela 1 os principais fatores que afetam a vida de fadiga de misturas asfálticas.

## MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

Prever o desempenho futuro de uma seção específica de pavimento é uma tarefa muito difícil. Muitas variáveis influem no comportamento dos pavimentos e muito poucas delas permanecem constantes durante a

Tabela 1 – Principais fatores que influem na vida de fadiga de misturas asfálticas

Fatores de Mistura	Fatores de Mistura	Fatores de Mistura
Tipo de Cimento Asfáltico	Magnitude do Carregamento	Temperatura Umidade
Teor de Ligante	Tipo de Carregamento	
Temperatura da Mistura	Frequência	
Temperatura de Compactação	História de Tensões	
Método de Compactação	Carregamento simples ou composto	
Adesividade asfalto/agregado	Forma de carregamento: triangular, quadrado etc,	
Tipo, forma, granulometria e textura do agregado		
Índice de vazios		

Fonte: SHRP

vida de serviço. As variações normais encontradas na construção podem tornar o uso de valores médios ou de projeto para as variáveis de análise totalmente inadequada. Além disso, um tipo de deterioração pode depender de outro, como é o caso do trincamento e dos afundamentos em trilha de roda.

Ao longo dos anos, com a evolução da tecnologia aplicada à engenharia de pavimentos, tem se buscado estabelecer modelos de previsão de desempenho de maneira que se possa prever a ocorrência e a evolução dos principais mecanismos de deterioração que concorrem para a queda da serventia dos pavimentos ao longo do tempo (ex.: trincamento por fadiga, afundamento em trilha de roda e trincamento térmico).

Modelos de previsão de desempenho são *funções que relacionam as características do pavimento e suas condições atuais (estruturais, funcionais e de degradação superficial) à evolução com o tempo dos defeitos de superfície ou do nível de serventia, sob dadas condições climáticas e de tráfego a que o pavimento está submetido*. Tais modelos são instrumentos tecnológicos essenciais para a análise econômica de rodovias.

## MODELOS EMPÍRICOS

Resultam da observação do desempenho de rodovias em serviço e são funções de alguns poucos parâmetros ou índices que procuram caracterizar a estrutura do pavimento, como, por exemplo, o tráfego e o clima. Uma abordagem puramente empírica para previsão do desempenho de pavimentos é baseada em observações de desempenho sem considerar (satisfazer), teoricamente, as contribuições dos vários fatores. Por outro lado, uma abordagem puramente mecanística define matematicamente os fatores individuais específicos concluindo acerca do momento preciso e o modo principal de deterioração.

Abordagens empíricas estão restritas às condições para as quais foram desenvolvidas e qualquer extrapolação desses limites podem resultar em interpretações grosseiras. Modelos analíticos e numéricos são usualmente confinados a problemas específicos, como as respostas das cargas ou temperatura, e combinações desses modelos para explicar completamente o comporta-

mento de um pavimento tornam-se impossibilitadas. Uma forma para resolver essas diferenças é a realização de experimentos em escala real, onde seções de pavimentos são devidamente instrumentadas com o propósito de se obter parâmetros e respostas em pontos críticos da estrutura. Portanto, a finalidade principal da instrumentação de seções de pavimentos *in situ* é a de se buscar condições que possibilitem explicar racionalmente o desempenho dos mesmos.

Embora os modelos empíricos sejam de utilização bem mais simples que os mecanístico-empíricos, estes últimos tendem a ser mais confiáveis, especialmente quando se trata de aplicá-los a condições de clima, tráfego e materiais de construção diferentes ou fora das faixas referentes aos trechos experimentais em que foram calibrados. Além disso, os modelos empíricos nada informam sobre a evolução dos defeitos no pavimento ao longo do tempo e, na maioria dos casos, não indicam qual será a condição do pavimento ao final do período de projeto. Estas deficiências não existem, de modo geral, nos modelos mecanístico-empíricos.

## MODELOS MECANÍSTICO-EMPÍRICOS

São constituídos por um modelo teórico que procura explicar ou prever a deterioração da estrutura sob a repetição das cargas do tráfego. Modelo este baseado no comportamento mecânico dos materiais das camadas e da própria estrutura sob a ação das cargas dinâmicas dos veículos em movimento, e por Funções de Transferência, que calibram o modelo teórico de modo a que este reproduza o desempenho real de pavimentos em serviço. A calibração é responsável por incluir no modelo final fatores que não puderam ser considerados pelo modelo mecanístico. É comum, no entanto, na grande maioria dos modelos mecanístico-empíricos existentes, que a teoria de degradação adotada seja precária ou muito inconsistente, o que tem levado a dificuldade na calibração experimental, quando se obtém fatores de calibração exageradamente variados.

Os modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico consistem, essencialmente, da associação de três componentes fundamentais:

1. Um modelo mecânico para o cálculo das respostas da estrutura do pavimento à passagem das cargas do tráfego, respostas estas na forma de tensões, deformações e deflexões em toda estrutura;
2. Uma teoria que associe as respostas calculadas à geração e progressão de defeitos, tais como trincas de fadiga nas camadas asfálticas e cimentadas;
3. Uma calibração experimental, para incluir os efeitos de fatores que não puderam ser tratados de forma adequada ou explícita pelo modelo teórico, onde se incluem principalmente as variáveis ambientais (clima, drenagem) e características específicas do tráfego, especialmente aquelas que afetam as solicitações dinâmicas efetivamente aplicadas ao pavimento.

A grande maioria dos modelos de previsão de desempenho mecanístico-empíricos desenvolvidos até a atualidade requerem, para a caracterização de cada componente da estrutura do pavimento, incluindo a sua fundação, de constantes da elasticidade linear, ou seja, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (FINN *et al.*, 1978). Dessa forma, foram desenvolvidos procedimentos para a caracterização dos materiais e para a medida experimental desses parâmetros, tendo se consolidado o AASHTO *Test Method T724* para solos e o ASTM *Method D3497* para concretos asfálticos, onde se mede o módulo de deformação resiliente a partir da realização de ensaios triaxiais de laboratório. Em reconhecimento de que os materiais de pavimentação não são necessariamente lineares, estes métodos incluem a consideração da sensibilidade ao estado de tensões dos solos coesivos e não coesivos e a dependência da temperatura e do tempo de carregamento do concreto asfáltico.

Outra dificuldade para a implementação de modelos mecanístico-empíricos é a necessidade de se reproduzir as propriedades dos materiais *in situ* e em longo prazo. Um grande cuidado é requerido na preparação e no ensaio das amostras e se recomenda o uso de um número suficiente de corpos de prova de modo a se obter a melhor representação possível da condição *in situ* dos materiais e ao longo do tempo. Assim, é necessário se estimar as condições iniciais e as variações anu-

ais esperadas, a fim de se simular adequadamente as propriedades dos materiais. Estudos de campo acerca de variações com o tempo do teor de umidade e da densidade são requeridos para os solos.

Para o concreto asfáltico, os efeitos do envelhecimento e do intemperismo nas relações módulo-temperatura e nas propriedades de fadiga deveriam ser investigados.

Em se tratando de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico, sua deterioração se dá de forma gradual ao longo do tempo devido a dois mecanismos diretamente associados à passagem repetida das cargas do tráfego, ou seja:

- O trincamento por fadiga das camadas asfálticas; e
- Os afundamentos em trilha de roda decorrentes do acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas da estrutura.

As condições ambientais a que o pavimento está sujeito, onde se incluem as condições de temperatura do ar, a insolação, a pluviometria e as condições de drenagem subsuperficial e profunda, afetam as velocidades com que a degradação estrutural se processa, por influírem nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais das camadas do pavimento e por gerarem tensões quando a estrutura tende a restringir movimentações volumétricas de natureza térmica ou de variação de umidade.

## METODOLOGIA ADOTADA

### Verificação Mecanística

A análise mecanística utiliza a teoria da elasticidade e considera a estrutura do pavimento como um sistema de multicamadas, consideradas como de comportamento elástico para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos decorrentes da ação das cargas. Para a análise mecanística utilizou-se o programa ELSYM5 – *Elastic Layered System*, baseado na teoria da elasticidade linear (EL), desenvolvido pela universidade da Califórnia (Berkeley) em 1972.

Os dados de entrada são: as características do carregamento (carga, pressão de enchimento dos pneus

e posicionamento), características das camadas (espessuras, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson) e as coordenadas dos pontos onde se deseja analisar os parâmetros estruturais.

### Condição de Carregamento Simulada

Admitiu-se carregamento de eixo-padrão de 8,2 tf. O eixo simples com rodas duplas solicita o pavimento com cargas de 2.050 kgf por roda, espaçadas por 32 cm e pressão de enchimento dos pneus de 5,63 kgf/cm<sup>2</sup>.

A análise tensão deformação foi realizada em dois pontos: no ponto central entre pneus ( $x=16; y=0$ ) e sob a roda ( $x=0; y=0$ ). Em relação à profundidade da análise, foram avaliadas as tensões e deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico.

Foram analisados os seguintes critérios de ruptura:

- Deslocamento vertical na superfície do pavimento – deflexão;
- Diferença de tensões na fibra inferior da camada asfáltica.

Sob o ponto de vista mecânico, o pavimento é representado segundo a Figura 1.

### CARACTERÍSTICAS RESILIENTES DAS CAMADAS

A verificação do dimensionamento do pavimento por análise mecânica baseou-se na avaliação das tensões e deformações que atuam no seio da estrutura do

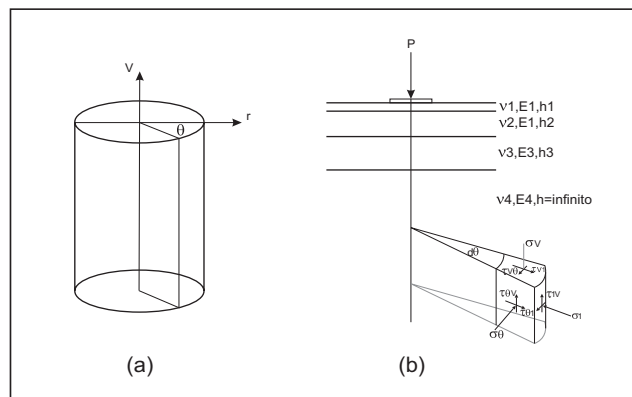


Figura 1 – Representação do modelo usualmente adotado em análises mecânicas; (a) condição axissimétrica; (b) elemento axissimétrico infinitesimal

pavimento. Para tal fez-se necessário estimar os módulos de resiliência do subleito, das camadas de sub-base e base, e da camada de revestimento betuminoso.

As camadas que compõem a estrutura do pavimento foram caracterizadas de acordo com o plano fatorial de simulação apresentado na Tabela 2 tendo sido adotados parâmetros típico-conhecidos para as diversas camadas do pavimento proposto com o uso de informações disponíveis em bibliografia especializada, como, por exemplo, o Coeficiente de Poisson e o Módulo de Resiliência. No entanto, para fins práticos se faz necessário a realização dos ensaios mecânicos para caracterização dos materiais de pavimentação.

No caso das misturas asfálticas, os diversos ensaios discutidos são categorizados conforme indicação: ensaios convencionais: estabilidade Marshall; ensaios de módulo: módulo de resiliência; módulo complexo (módulo dinâmico);

Tabela 2. Estrutura simulada – Plano Fatorial

Camadas	Poisson	Material	MR Revestimento (kgf/cm <sup>2</sup> )	Espessuras Rev. (cm)				
				H1	H2	H3	H4	H5
1	0,30	CBUQ	15000	5	7	10	12	15
			25000					
			35000					
			45000					
			55000					
			65000					
2	0,35	BGS	2500	15				
3	0,35	SG	1500	20				
4	0,40	SL	1000	Semi-infinito				

ensaios de ruptura: resistência à tração indireta; vida de fadiga (compressão diametral, flexão); ensaio de deformação permanente: simulador de tráfego de laboratório; compressão ou tração axial estática (creep); compressão ou tração axial de carga repetida e ensaios complementares: Cântabro; dano por umidade induzida.

As estruturas modeladas têm a finalidade de suportar o número "N" =  $5 \times 10^7$  repetições de carga do eixo padrão. Neste trabalho, os valores de módulo de resiliência de 15.000 kgf/cm<sup>2</sup> a 65.000 kgf/cm<sup>2</sup> adotados para as misturas asfálticas são perfeitamente compreensíveis de modo a permitir uma melhor extrapolação das curvas conforme apresentado nas Figuras 4 e 5.

### Modelagem da Estrutura

A seguir são apresentados alguns exemplos de modelos de laboratório resultado dos ensaios de carga repetida conhecidos na bibliografia e de domínio público.

#### Brita Graduada Simples (BGS)

A Tabela 3 mostra resultados típicos de britas graduadas utilizadas em pavimentos como base ou sub-base (RAMOS, 2003).

#### Valores adotados

Para a estrutura simulada, adotou-se o módulo de resiliência de 2.500 kgf/cm<sup>2</sup>, com coeficiente de Poisson de 0,35, condizentes com a prática corrente para este tipo de material.

### Sub-Base

No banco de dados de ensaios de módulo resiliente da COPPE/UFRJ foi possível encontrar resultado de ensaio para um saibro (pedregulhoso), residual de granito, oriundo de uma jazida comercial localizada ao longo da Via Dutra e que vem sendo amplamente utilizado em obras de pavimentação na região. A equação encontrada foi expressa através do modelo combinado, ou seja, em função simultaneamente da tensão desviatória e confinante, sendo descrita pela expressão abaixo:

$$MR = 427,5 \cdot (\sigma_d)^{0,47} (\sigma_3)^{-0,12} \quad (\sigma_d \text{ e } \sigma_3 \text{ em MPa})$$

Considerando-se o menor par de tensões utilizado no ensaio, ou seja,  $\sigma_d = \sigma_3 = 0,021$  MPa, obtém-se um módulo resiliente de 110,6 MPa.

As areias argilosas lateríticas, amarelas ou vermelhas foram utilizadas como camada final de terraplenagem da pista experimental circular do IPR/DNIT (Instituto de Pesquisas Rodoviárias), tendo sido estudado por Silva (2001), sendo o resultado apresentado abaixo:

$$MR = 68,6 \cdot (\sigma_d)^{-0,257} \quad h = 22,0 \% (\sigma_d \text{ em MPa})$$

Para um valor de tensão desvio de 0,021 MPa, o módulo resiliente obtido pela equação é de 185 MPa, porém para  $\sigma_d = 0,14$  MPa o valor de MR diminui para 113,7 MPa.

#### Valores adotados

Para a estrutura simulada, adotou-se o módulo de resiliência de 1.500 kgf/cm<sup>2</sup>, com coeficiente de Poisson

Tabela 3 – Módulo de resiliência para britas de granito e gnaisse do RJ (RAMOS, 2003)

Amostra	Energia	MEAS	Wot	W <sub>Ensaio</sub>	MR = $k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_1^{k_3}$	R <sup>2</sup>
S-374/02	Intermediária	2033	7,5	7,28	$592 \sigma_3^{0,47} \sigma_d^{-0,26}$	0,96
	Modificada	2140	6,2	5,77	$815 \sigma_3^{0,44} \sigma_d^{-0,08}$	0,96
S-375/02	Intermediária	2040	7,7	6,68	$604 \sigma_3^{0,29} \sigma_d^{-0,11}$	0,96
	Modificada	2088	4,7	4,91	$1051 \sigma_3^{0,44} \sigma_d^{-0,06}$	0,96
S-377/02	Intermediária	2030	4,8	4,47	$307 \sigma_3^{0,26} \sigma_d^{-0,47}$	0,94
	Modificada	2096	4,0	3,65	$678 \sigma_3^{0,33} \sigma_d^{-0,01}$	0,97
S-380/02	Intermediária	1990	7,0	6,50	$690 \sigma_3^{0,35} \sigma_d^{-0,02}$	0,97
	Modificada	2044	5,0	4,77	$603 \sigma_3^{0,29} \sigma_d^{-0,20}$	0,94

de 0,35, condizentes com a prática corrente para este tipo de material.

### Subleito

Para o subleito os modelos utilizados serão os propostos por Preussler e Pinto (1984) para previsão de módulo de resiliência de solos finos de predominância argilosa e/ou siltosa.

Solo Tipo I

$$M_{SL} = 4874\sigma_d^{-1,129} \quad \text{baixo grau de resiliência}$$

Solo Tipo II

$$M_{SL} = 1286\sigma_d^{-0,5478} \quad \text{grau de resiliência intermediário}$$

Solo Tipo III

$$M_{SL} = 530 \text{ kgf/cm}^2$$

### Valores adotados

Para a estrutura simulada, adotou-se o módulo de resiliência de 1.000 kgf/cm<sup>2</sup>, com coeficiente de Poisson de 0,40, condizentes com a prática corrente para este tipo de material.

## MODELOS DE VERIFICAÇÃO DOS VALORES ADMISSÍVEIS

### Critério de deflexão máxima na superfície do pavimento

Para estimar a vida de fadiga do revestimento asfáltico a partir do deslocamento vertical na superfície do pavimento (deflexão) foi adotado o modelo preconizado no procedimento DNER-PRO 269/94 – Método da Resiliência (TECNAPAV), conforme mostra a Equação 2 e a Figura 2 a seguir.

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \log N \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

D – deflexão na superfície (10<sup>-2</sup> mm), para camada cimentada, adotar metade da deflexão;

N – número de solicitações do eixo padrão de 80 kN para o período de projeto (USACE).

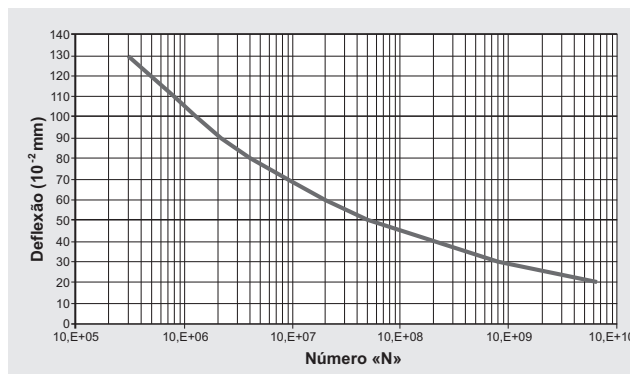


Figura 2 – Equação de Fadiga – PRO 269

### Critério de trincamento por fadiga da camada betuminosa

Franco (2007) obteve através de regressão não linear múltipla uma expressão da vida de fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais, considerando todo o banco de dados de misturas ensaiadas na COPPE/UFRJ. O modelo matemático proposto pelo pesquisador é apresentado pela equação 3.

$$N = 1,904 \times 10^{-6} \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{2,821} \cdot \left( \frac{1}{MR} \right)^{0,74} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$\epsilon_t$ : deformação específica de tração no revestimento

MR: módulo resiliente do revestimento (MPa)

N: Número de solicitações obtido em laboratório

Pinto (1991) propôs a seguinte expressão para o cálculo da vida de fadiga:

$$N_{lab} = 9,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{2,65} \cdot \left( \frac{1}{MR} \right)^{-0,033} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$N_{lab}$ : número de repetições de carga necessárias à ruptura completa da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral à tensão controlada – Vida de Fadiga;

$\epsilon_t$ : deformação específica de tração no revestimento;

MR: módulo resiliente do revestimento (MPa).

$$N_{lab} = 5,63 \times 10^5 \cdot \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,61} \quad (\text{Equação 5})$$

$$N_c = f_0 N_{lab} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$N_{lab}$ : número de repetições de carga necessárias à ruptura completa da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral à tensão controlada – Vida de Fadiga.

$\Delta\sigma$ : diferença algébrica entre as tensões horizontais (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra;

$f_0$ : fator campo-laboratório;

$N_c$ : número terminal de solicitações do eixo padrão rodoviário, para uma área afetada por trincas de fadiga da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento.

Utilizando esta equação para os dados obtidos na simulação numérica, para os diferentes segmentos, foi obtida a vida de fadiga calculada ( $N_{calculada}$ ), sendo este valor comparado com o número N obtido no estudo de tráfego.

Pinto (1991) realizou a calibração do seu modelo com base em observações e análises do comportamento no campo de trechos da rodovia BR-101. O autor citado definiu curvas para estimar os valores mínimos e máximos do fator campo-laboratório para o seu modelo, associados à deformação específica inicial e às diferenças de tensões no revestimento dos trechos da rodovia analisados. Atualmente, diversos órgãos e institutos de pesquisa vêm utilizando o coefi-

ciente igual a  $10^4$  como fator campo-laboratório (*Shift Factor*) para esse modelo, que corresponde a cerca de 20% da área trincada do pavimento em termos de  $\Delta\sigma$ , segundo Pinto (1991).

## RESULTADOS OBTIDOS

O objetivo da análise paramétrica foi de avaliar a variabilidade visando hierarquizar o comportamento estrutural de 30 estruturas de pavimento, efetuando-se uma análise tensão e deformação atuante no seio da estrutura, conforme apresentado na Figura 3. Complementarmente, foram empregadas combinações si-

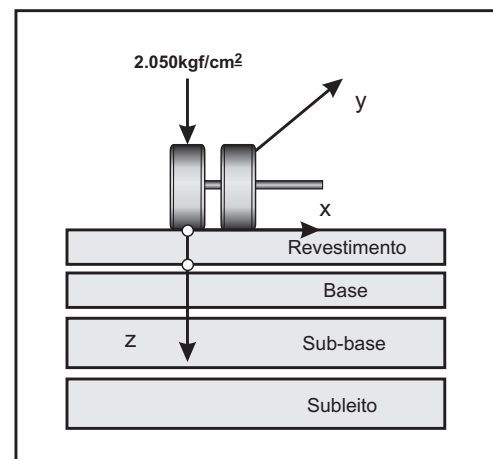


Figura 3 – Pontos de análise tomados na simulação com o ELSYM5 – Perfil Esquemático

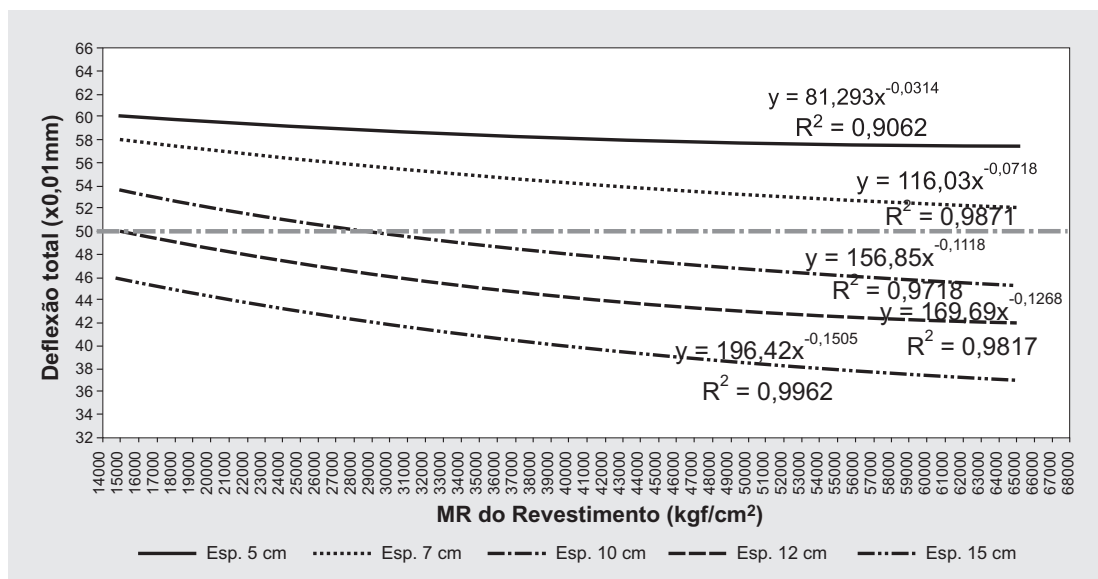


Figura 4 – Deflexão Total na Superfície do Revestimento x Módulo de Resiliência do Revestimento

milhares de materiais e espessuras de camada, variando-se apenas o módulo de resiliência e a espessura do revestimento asfáltico e adotando-se módulos estimados baseados na bibliografia rodoviária, dentro de padrões construtivos comumente empregados e tolerados. Nas Tabelas 4 e 6 são descritas as condições analisadas.

### Variação da Deflexão Total em função do MR do Revestimento

Observa-se, de acordo com a Figura 4 e a Tabela 4, que a Deflexão Total diminui com o aumento do módulo de resiliência do revestimento asfáltico, para os casos (Esp. 5cm); (Esp. 7cm); (Esp. 10cm); (Esp. 12cm) e (Esp. 15cm), sendo também influenciada pelo aumento da espessura do revestimento (linhas não coincidentes).

Para um exemplo prático, dado um período de projeto de 10 anos considerando um tráfego hipotético de  $N = 5,0 \times 10^7$ , tem-se que, para uma  $D_{adm} = 50 \times 10^{-2}$  mm e uma espessura de revestimento de  $e = 12$  cm, o valor de MR mínimo do revestimento será de 15.000 Kgf/cm<sup>2</sup> ao valor máximo de 65.000 Kgf/cm<sup>2</sup>. Por outro lado para a espessura de  $e = 10,0$  cm, o valor de MR mínimo do revestimento seria cerca de 35.000 Kgf/cm<sup>2</sup> caracterizando que a rigidez do revestimento está associada à

espessura e módulo. No presente trabalho, utilizou-se a análise da variância para a comparação entre os resultados obtidos para as diferentes estruturas de pavimento. Utilizou-se em todos os casos um coeficiente de confiança de 95% ( $\alpha=0,05$ ). O resultado de uma ANOVA lhe dá o valor estatístico de "F". Neste caso (Tabela 5) já que o valor observado de "F" ou a variância entre as cinco espessuras é 42.69 e maior do que o valor crítico para "F" (2.758), estamos seguros que os resultados são significativos (isto é, a probabilidade "P" é inferior a 0,05), ou seja, existe uma relação significativa sobre as deflexões atuantes obtidas com o ELSYM5.

### Variação da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) atuante em função do MR do Revestimento

Observa-se, de acordo com a Figura 5 e Tabela 6, que a diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) aumenta com o incremento do valor do módulo de resiliência do revestimento asfáltico, para os casos (Esp. 5cm); (Esp. 7cm); (Esp. 10cm); (Esp. 12cm) e (Esp. 15cm), sendo também influenciada pela diminuição da espessura do revestimento (linhas não coincidentes).

Para o exemplo prático anterior, verificou-se que, abordando a diferença de tensões como parâmetro

Tabela 4 – Deflexões Atuantes obtidas com o ELSYM5

MR Revestimento (kgf/cm <sup>2</sup> )	Espessuras Rev. (cm)				
	5	7	10	12	15
	Deflexão Total Atuante (x0,01 mm)				
15000	60,0	58,0	53,0	50,0	46,0
25000	59,0	56,0	51,0	47,0	43,0
35000	59,0	55,0	49,0	45,0	41,0
45000	58,0	54,0	48,0	44,0	39,0
55000	58,0	53,0	46,0	43,0	38,0
65000	57,0	52,0	45,0	41,0	37,0

Tabela 5 – ANOVA – fator único – Deflexões Atuantes obtidas com o ELSYM5

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1240	4	310	42,69972	7,99E-11	2,75871
Dentro dos grupos	181,5	25	7,26			
Total	1421,5	29				

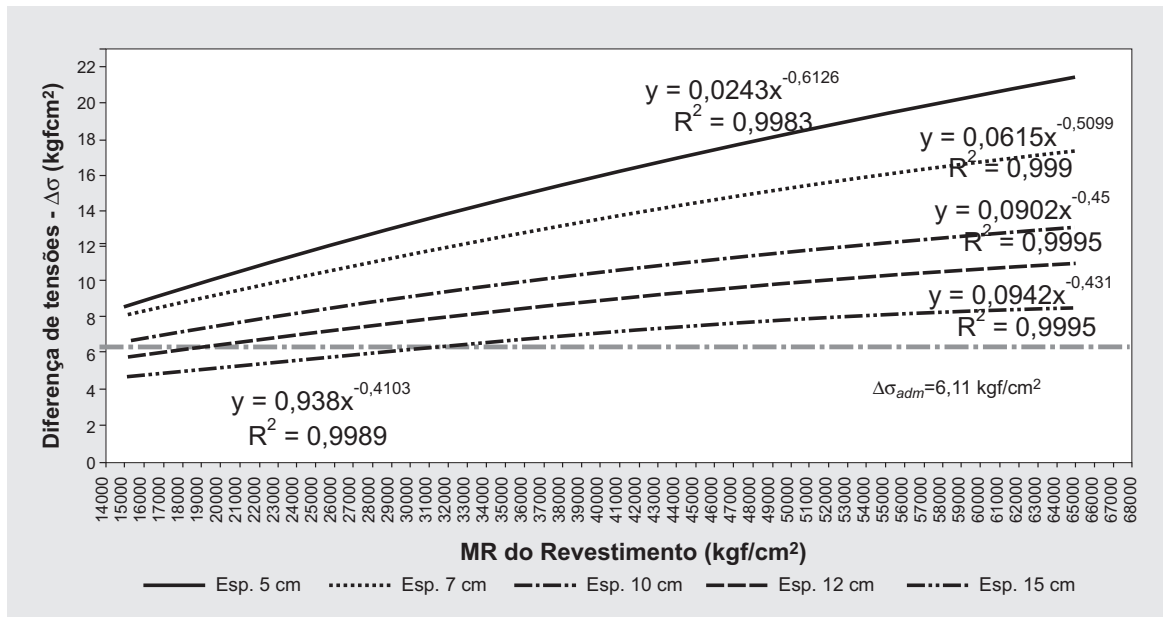


Figura 5 – Diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ ) atuante no Revestimento x Módulo de Resiliência do Revestimento

notável ( $\Delta\sigma_{adm} = 6,11 \text{ kgf/cm}^2$ ) a partir da Equação 5 e 6, somente as espessuras  $e = 12 \text{ cm}$  para  $MR = 15.000 \text{ kgf/cm}^2$  e para  $e = 15 \text{ cm}$  para os módulos  $MR = 15.000 \text{ kgf/cm}^2$  a  $25.000 \text{ kgf/cm}^2$  satisfazem as condições estruturais.

Neste caso (Tabela 7), já que o valor observado de "F" é de 7,9101 e maior do que o valor crítico para "F" (2,7587), estamos seguros que os resultados são

significativos, ou seja, existe uma relação expressiva sobre as diferenças de tensões atuantes obtidas com o ELSYM5.

## CONCLUSÃO

O estudo mostrou que a verificação dos valores de tensões e/ou deformações limites comparados aos valores atuantes (ELSYM5) será sempre condicionada

Tabela 6 – Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) atuante obtidas com o ELSYM5

MR Revestimento ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Espessuras Rev. (cm)				
	5	7	10	12	15
	Diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ ) Atuante ( $\text{kgf/cm}^2$ )				
15000	8,66	8,20	6,79	5,91	4,81
25000	12,18	10,83	8,64	7,45	6,02
35000	15,01	12,89	10,07	8,62	6,92
45000	17,39	14,58	11,24	9,58	7,65
55000	19,44	16,03	12,25	10,40	8,26
65000	21,26	17,32	13,13	11,12	8,77

Tabela 7 – ANOVA – fator único – Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) atuante obtidas com o ELSYM5

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	284,9314	4	71,23286	7,910164	0,00029	2,75871
Dentro dos grupos	225,1308	25	9,005231			
Total	510,0622	29				

não somente aos materiais constitutivos, caracterizado pelo Módulo de Resiliência (MR) e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) da estrutura de pavimento projetada, sobretudo das condições de carregamento impostas pelo tráfego.

No que se refere aos dados empregados no presente trabalho pôde-se constatar que quando utilizado o critério da deflexão máxima a espessura mínima para atender número N de  $5 \times 10^7$  solicitações do eixo padrão foi  $e=10\text{cm}$  de revestimento asfáltico, com módulo de resiliência mínimo de  $27.000 \text{ kgf/cm}^2$ . Quando comparado com o método de dimensionamento preconizado pelo DNIT, a espessura mínima para atender a mesma solicitação é de  $e=12,5\text{cm}$ , revelando que não há relação entre os critérios empregados. Já quando comparado com o outro critério da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ), os resultados também apontam divergências, tendo em vista que a espessura mínima para atender o mesmo número de solicitações foi de  $e=15\text{cm}$  e módulo de resiliência de  $26.000 \text{ kgf/cm}^2$ . Desta forma, o trabalho mostrou a importância e os cuidados a se-

rem considerados numa avaliação empírico-mecânico de sistemas de camadas, fundamentalmente na seleção dos modelos matemáticos de verificação dos valores admissíveis, que o projetista irá considerar no projeto de pavimentos, seja a deflexão prevista ou o estado de tensões calculado para a estrutura concebida, bem como as características dos materiais utilizados. Fica evidente que, abordando os parâmetros supracitados, os resultados são bastante distintos, e mostra a importância do uso da análise paramétrica como ferramenta para tornar o projeto mais versátil e conduza a resultados mais apurados, mesmo que sob a forma de intervalos (ranges).

Por ocasião do projeto executivo os módulos de resiliência dos materiais devem ser definidos através de ensaios em laboratório.

Finalmente, antes de se aplicar modelos de previsão de desempenho é fundamental reavaliar-se os fatores de calibração utilizando-se os dados de desempenho locais ou regionais disponíveis.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- ALECRIMA, V, 2009, Estudo do Resíduo de Quartzito Foliado para o Emprego em Estrutura de Pavimento. São Paulo, 2009, 168p. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,
- DNER (1994b) ME 133 – *Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência*, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- FINN, FN.; NAIR, K. & HILLIARD, J.M. - "*Minimizing Premature Cracking in Asphaltic Concrete Pavement*". NCHRP Report 195, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1978.
- FRANCO, F. A. C. P. M\*todo de dimensionamento mecânico empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. XXI, 294p., (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2007)
- MEDINA, J., *Mecânica dos Pavimentos*, Editora UFRJ (1997).
- MEDINA, J., MOTTA, L.M.G., *Mecânica dos Pavimentos*, 2ª Edição, ISBN 85-905987-3-3 (2005)
- MOTTA, L.M.G., O estudo da temperatura em revestimentos betuminosos, Tese (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, RJ, 146p. (1979).
- MOTTA, L.M.G., Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, 366p. (1991).
- PINTO, S., Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, RJ. (1991).
- PINTO, S., PREUSSLER, E.S., Módulos resilientes de concretos asfálticos, DNER, IPR (1980).
- PREUSSLER, E. S., Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso, Tese (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, RJ, 149p. (1978).
- PREUSSLER, E. S.; PINTO, S. (1984). "*Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários - Programa TECNAPAV*". 19o RAPV. Associação Brasileira de Pavimentação - ABPV. Rio de Janeiro.
- PREUSSLER, E.S., Estudo de deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, RJ, 266p. (1983).
- RAMOS, C.R., Estudo para o desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do município do RJ, Tese (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, RJ (2003).
- SILVA, P.D.E.A., Estudo do reforço de concreto de cimento portland (Whitotopping) na pista circular experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, RJ, 403 p. (2001).
- GONÇALVES, F. J. P. (1999). Desempenho de pavimentos flexíveis.

# Cartas dos leitores

A Seção de Cartas destina-se a colher opiniões dos leitores sobre as matérias veiculadas na Revista, bem como críticas, elogios e manifestações de assuntos inerentes ao objeto da publicação. A Coordenação da Revista reserva-se, no entanto, o direito de publicar o conteúdo das cartas no todo ou em parte, bem como fazer uma seleção das mesmas devido às limitações de espaço.

e-mail: [redacao@revistapavimentacao.org.br](mailto:redacao@revistapavimentacao.org.br)

*Minha pequena homenagem ao Salomão*

*Quando entrei no DNER eu queria muito trabalhar no IPR e lá fui eu falar com o Engº Salomão Pinto, desde então aqui estou eu no IPR, com a ajuda dele que nunca tinha me visto antes! Essa gratidão guardarei no coração para o resto de minha vida. Até sua aposentadoria foram 12 anos de convivência durante os quais sua personalidade diferenciada nos brindou com seu jeito menino e pérolas que sempre vou me lembrar:*

*“Que qui tu qué?” ao ver alguém entrar na sala dele.*

*“Tá tudo errado!” ao ver um errinho nos meus relatórios.*

*“Isaac, meu filho; Sandra, minha filha; André, meu filho que é juiz” ao se referir aos filhos*

*“Coitado!!” ao saber algo ruim de alguém.*

*“Tu tá doida!” quando eu falava algo que ele não concordava.*

*“Repete o que eu falei” ao dar uma ordem para conferir se eu tinha entendido.*

*“To esbaforido” ao se referir ao cansaço.*

*Enfim, deixo aqui meu último abraço ao profissional de carreira irretocável que muito contribuiu para a pavimentação nacional, criando procedimentos, publicando livros e apostilas, criando muitas polêmicas nos congressos e reuniões e ministrando aulas com uma didática perfeita.*

*Fique em Paz meu Amigo!*

*Engª Luciana Nogueira Dantas, Rio de Janeiro, RJ*

*Lamento, profundamente, tomar conhecimento desta triste ocorrência. Infelizmente, não sabia da perda deste nosso querido colega. Seria bom que estas notícias chegassem, de alguma forma, no momento oportuno.*

*Dr. Salomão Pinto não somente era um profissional exemplar como um ser humano caracterizado por sua humildade. Com muita tristeza, registro esta tão grande perda para a Engenharia e a Pavimentação.*

*Engº Samuel Hautequest Cardoso, Rio de Janeiro, RJ*

*Parabéns a nova Diretoria da ABPv, desejo um período auspicioso para a Associação, e que a Revista PAVIMENTAÇÃO continue sendo este veículo primaz na difusão do conhecimento científico da área de pavimentação.*

*Telmo Lizandro da Silva, Americana, SP*

# Normas Básicas para submissão de artigos e contribuições técnicas

1. A Revista PAVIMENTAÇÃO é uma publicação técnica e científica de divulgação da ABPv. As contribuições para a revista devem ser de caráter exclusivamente técnico e estão abertas aos sócios e aos profissionais da Engenharia Rodoviária, Ferroviária e Aeroportuária nacional e internacional.
2. A Revista pode também apresentar eventualmente matérias especiais redigidas pelo seu corpo técnico editorial e pela diretoria da ABPv como forma de divulgação de opiniões ou comentários considerados relevantes como “voz” da ABPv.
3. Os artigos e contribuições como nota técnica, inéditos, podem ser enviados em qualquer época do ano para serem publicados em uma das quatro edições anuais ou até no ano seguinte dependendo do número de matérias selecionadas.
4. Os trabalhos, sejam científicos, sejam técnicos ou de outra natureza encaminhados para eventual publicação, serão submetidos a avaliação de três profissionais que compõem o Comitê Técnico-Científico da Revista, escolhidos de acordo com o perfil do material a ser julgado. Aos avaliadores não será dado a conhecer os autores do artigo ou trabalho antes da avaliação e também é vedada a divulgação para os autores da identidade dos avaliadores.
5. Os avaliadores recebem da ABPv um questionário indicativo dos itens a serem avaliados em cada contribuição para Revista PAVIMENTAÇÃO, podendo sugerir três opções de encaminhamento:
  - (I) O trabalho é aceito para publicação;
  - (II) O trabalho não é aceito para publicação e será então devolvido aos autores;
  - (III) O trabalho poderá vir a ser aceito caso os autores concordem em fazer algumas modificações sugeridas por um ou mais avaliadores.
6. Cabe à Diretoria da ABPv julgar os casos omissos e autorizar a publicação de contribuições de caráter não técnico, eventualmente, em função dos assuntos abordados e da disponibilidade de espaço.
7. O resultado da avaliação de qualquer material encaminhado à Revista PAVIMENTAÇÃO será levado ao conhecimento dos autores dos mesmos informando o destino que será dado à sua contribuição, que pode ser: publicação imediata no próximo número a ser lançado, publicação em número subsequente devido ao excesso de contribuições ou não publicação.
8. O autor ou autores das contribuições aceitas para publicação devem concordar com a reprodução de seu material sem nenhum direito a qualquer custo de direitos autorais, já que a ABPv é uma entidade sem fins lucrativos e a Revista PAVIMENTAÇÃO destina-se preferencialmente aos sócios e não será utilizada para venda com fins lucrativos.
9. As contribuições para a Revista PAVIMENTAÇÃO devem ser encaminhadas de preferência por meio digital, podendo estar em formato PDF somente na fase de julgamento pelo Comitê. Os originais deverão ser produzidos em programa Microsoft Word. As figuras deverão ser fornecidas em separado, com resolução mínima de 300dpi. Caso a foto seja digital, a resolução deverá ser de no mínimo de 3.2 mega pixels. Não sendo as fotos do(s) autor(es), este(s) será(ão) responsável(eis) por declarar os créditos das mesmas e obter a autorização para publicação. Nos gráficos, evitar utilizar cores e dar preferência a símbolos que possam distinguir claramente as informações relevantes da figura.
10. As contribuições podem ser de no mínimo duas e de no máximo 15 páginas em formato A4, editoradas em fonte Times New Roman, tamanho 12, espaço simples. Número maior de páginas poderá ser aceito em casos excepcionais a critério da Editoria da Revista.
11. Os textos deverão ser escritos em português, em linguagem adequada e correta, sendo de responsabilidade do(s) autor(res) a revisão ortográfica. As referências bibliográficas devem seguir o padrão ABNT, tipo por citação de sobrenome e ano (ex. MATHEUS, 1994) e preferencialmente os artigos devem apresentar um resumo de 200 a 300 palavras e indicar de três a cinco palavras-chaves. Artigos em outros idiomas podem eventualmente ser aceitos a critério da Editoria da revista.
12. Estas especificações podem ser eventualmente revistas a critério da Editoria da Revista e da Diretoria da ABPv a qualquer tempo, cabendo aos artigos e contribuições já submetidos se adequarem seguindo as regras existentes à época da submissão do seu material.

## Basic guidelines for submission of technical articles and contributions

1. The magazine PAVIMENTAÇÃO is a technical-scientific publication by ABPv. All contributions to the Periodical must be exclusively technical and professionals from the Road, Railroad and Airport Engineering.
2. The magazine may also present special contents, written by its editorial staff and board of directors such as opinions and comments considered relevant to the technical-scientific community.
3. All articles and contributions such as unpublished technical notes may be sent all year long so that they can be published in one of the four annual editions or in the following year, depending on the number of selected contents.
4. All papers, whether scientific or technical, comments and letters forwarded for a future publication will be evaluated by three professionals who are members of the Technical-Scientific Committee of the magazine, and will be chosen according to the profile of their content. The evaluating committee will not have cognizance of the authors or papers before the evaluation, and authors will not be allowed to know the identity of those chosen to evaluate their papers.
5. The experts who evaluate papers receive from ABPv a questionnaire that indicate the items to be evaluated in each contribution/paper sent to magazine PAVIMENTAÇÃO, and they may suggest three options in order to forward them:
  - (I) The paper is accepted for publication;
  - (II) The paper is not accepted for publication and will be sent back to the author;
  - (III) The paper might be accepted, if the author agrees with making some changes which may be suggested by one or more experts.
6. It is up to the Board of Directors to judge all negligent cases and allow the publication of papers and contributions that are not all technical, eventually, due to approached subjects and space availability.
7. The authors will be aware of the evaluation result of any contents sent to magazine PAVIMENTAÇÃO as well as the destination of their documents that may be informed to the authors and they will also be informed of what will happen to their contribution, which could be: immediate publication in the following editions according to the number of papers; no acceptance for publication.
8. The authors who have their papers accepted must allow of contents with no copyrights, since ABPv is a non profit association and the magazine PAVIMENTAÇÃO is preferably addressed to its partners.
9. All contributions to magazine PAVIMENTAÇÃO must be preferably sent over the internet, and they may be written in PDF format. All the original papers must be produced in Microsoft Word. All pictures must be on separated sheets, and at least 300dpi resolution. If it is a digital pictures do not belong to the author, he or she will be responsible for both credits and references and authorization for their publication. For graphics, authors must use symbols instead of colors which can clearly distinguish all relevant information of the figure.
10. Contributions must be of at least 2 pages and 15, at most, in A4 format, Times New Roman, size 12, single spacing. An exceeding number of pages may be accepted in extraordinary cases, depending on the magazine's Editor.
11. Foreign papers should be sent in their native language, and it is up to the author to translate it into Portuguese. Authors are responsible for the proofreading and bibliographic references. Articles must also present an abstract of about 200-300 words and indicate up to 5 keywords.
12. These specifications may suffer some changes at any time, by the magazine's editor and by the Board of Directors of ABPv. All articles or technical contributions must be addressed according to the rules in force.



Máquina Universal de Ensaios



Soquete Elétrico (CBR)



Prensa Hidráulica Elétrica p/ Concreto Mod. CI



Prensa manual p/ Concreto com indicador digital



Argamassadeira



Recuperador Elástico



Extratora Rotativa à Gasolina



Perfuratriz Elétrica



Pêndulo Britânico



Flow Table Elétrica Digital



Prensa (CBR / Marshall) Elétrica



Extrator de Amostras Universal



Analisador de Corrosão



Prensa (CBR) Manual



Detector de Vergalhões



Esclerômetro



Viga Linear Digital



Máquina de Abrasão Losangeles



**Rodovia Presidente Dutra, km 2,  
entre as cidades de Queluz e Engenheiro Passos**