

REVISTA


ABRV

Associação Brasileira de Pavimentação



PAVIMENTAÇÃO

Ano IV – Nº 13 – Abr/Mai/Jun de 2009 – [www.abpv.org.br](http://www.abpv.org.br) – ISSN 1809-1865



**Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas**

Manuel J. C. Minhoto  
Jorge Pais



# ABPv2009

## IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço

Comemoração dos 50 Anos da ABPv

— FORTALEZA - CE / BRASIL —

De 7 a 9 de outubro de 2009

TEMAS

- Avaliação de Pavimentos
- Equipamentos e Métodos
- Métodos de Projeto de Reforço
- Retroanálise de Bacias de Deflexão
- Sistema de Gestão de Pavimentos
- Reciclagem de Pavimentos
- Técnicas de Reforço de Pavimentos
- Uso de Geossintéticos em Reforço de Pavimentos
- Técnicas de Anti-reflexão de Trincas
- Equipamentos de Construção e sua Utilização
- Novas Metodologias

Envio de Resumo:  
31 de março de 2009  
Resultado da avaliação dos resumos:  
20 de abril de 2009  
Envio do artigo completo:  
18 de maio de 2009  
Aceite final:  
30 de maio de 2009

THEMES

- Pavements Evaluation
- Equipments and Methods
- Methods on Pavement Evaluation and Overlay Design
- Retro-Analysis of Pavement Deflection Basin
- Pavement Management
- Pavement Recycling Technologies
- Techniques of Reinforcement of Pavements
- Geosynthetic Pavement Reinforcement
- Anti-Reflection Crack's Techniques
- Construction Equipments
- New methodologies

Accepting abstracts:  
March 31, 2009  
Publishing the results (abstract):  
April 20, 2009  
Receiving full paper in DOC format:  
May 18, 2009  
Publishing the final results:  
May 30, 2009

TEMAS

- Evaluación de Pavimentos
- Equipamientos y Métodos
- Metodologías de Refuerzo de Pavimentos
- Retroanálise de Deformadas
- Gerenciamento de Pavimentos
- Reciclaje de Pavimentos
- Técnicas para el refuerzo de pavimentos
- Uso de Geossintéticos en Pavimentos
- Soluciones Técnicas para Trincas de Reflexión
- Equipo de construcción y su uso
- Nuevas metodologías

Envío de resúmenes:  
31 de marzo de 2009  
Resultado de la evaluación de los resúmenes:  
20 de abril de 2009  
Envío del artículo completo em formato DOC:  
18 de maio de 2009  
Resultado final:  
30 de maio de 2009

Local: Hotel Gran Marquise

Av. Beira Mar - Nº 3980 - Fortaleza, CE

ABPv

Há 49 anos promovendo a técnica da pavimentação



Maiores informações  
[www.abpv.org.br](http://www.abpv.org.br)

FORTALEZA



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

Arq<sup>ta</sup> Georgina Libório Azevedo  
georgina@abpv.org.br

JORNALISTA RESPONSÁVEL

Jean Pierre M. Santiago  
MTb 27170-RJ

redacao@revistapavimentacao.org.br

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO**

Presidente: Eng<sup>o</sup> EDUARDO ALBERTO RICCI  
Vice-Presidente: Cel Eng<sup>o</sup> PAULO ROBERTO DIAS MORALES  
Diretor Administrativo: Eng<sup>o</sup> JOÃO MENESCAL FABRÍCIO  
Diretor Técnico: Eng<sup>a</sup> LAURA M<sup>a</sup> GORETTI DA MOTTA  
Diretor Financeiro: Eng<sup>o</sup> ATAHUALPA SCHMITZ DA SILVA PREGO  
Diretor de Divulgação: Arq<sup>ta</sup> GEORGINA LIBÓRIO AZEVEDO

**COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO**

Eng<sup>o</sup> Alexandre Zupolini Neto; Eng<sup>o</sup> Alfredo Monteiro de Castro Neto; Eng<sup>o</sup> Alvaír Pinto Barbosa; Eng<sup>o</sup> Antônio Fortunato Marcon; Eng<sup>o</sup> Armando Martins Pereira; 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> Chequer Jabour Chequer; 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> Ernesto Simões Preussler; Eng<sup>o</sup> Fernando Augusto Jr.; Eng<sup>o</sup> Francisco Samuel Pithon Barreto; 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 Menescal Fabrício; Eng<sup>o</sup> João Virgílio Merighi; Eng<sup>o</sup> Jorge Augusto Pereira Ceratti; Eng<sup>o</sup> Jorge Henrique Ribeiro; Eng<sup>o</sup> Jorge Paulo Moro; Eng<sup>o</sup> José Franklin Moreira; Eng<sup>o</sup> José Leomar Fernandes Junior; Eng<sup>o</sup> José Pedro dos Santos Vieira Costa; Eng<sup>o</sup> José Tadeu Balbo; Eng<sup>o</sup> Laiz de Souza; Eng<sup>a</sup> Laura M<sup>a</sup> Goretti 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>a</sup> Luciana Nogueira Dantas; Eng<sup>o</sup> Luiz Miguel de Miranda; Eng<sup>o</sup> Marcello Roberto Rangel Pestana; Eng<sup>o</sup> Maria da Conceição M. Azevedo; Eng<sup>o</sup> Márcio Muniz de Farias; Eng<sup>o</sup> Marçílio Augusto Neves; Eng<sup>o</sup> Mario Henrique Furtado Andrade; Eng<sup>o</sup> Nilton de Souza Campelo; Eng<sup>o</sup> Otacílio Alves de França Junior; Eng<sup>o</sup> Paulo Roberto Belisário S. de Souza; Eng<sup>o</sup> Paulo Romeu Assunção Gontijo; Eng<sup>o</sup> Prepedigna D. E. Almeida da Silva; Eng<sup>a</sup> Rita Moura Fortes; Eng<sup>o</sup> Salomão Pinto; Eng<sup>o</sup> Silvio Rodrigues Filho; Eng<sup>o</sup> Saul Birman; Eng<sup>o</sup> Walter Canales Sant'ana; Eng<sup>a</sup> Wanda Trigo Loureiro; Eng<sup>o</sup> Washington Pérez Nuñez.

Editoração Eletrônica: MURO Produções Gráficas

Revisão: Ellis Pinheiro

Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda

Tiragem: 5.000 exemplares – Periodicidade: Trimestral



**Nossa capa:**

Pavimento da rodovia  
BR-265 trecho entre  
Barbacena e  
São João Del Rey, MG

Foto: Georgina Libório Azevedo

# Sumário

- 2 Editorial
- 3 Seção de notas

**ARTIGOS TÉCNICOS**

- 6 **Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas**  
*Manuel J. C. Minhoto e Jorge Pais*
- 14 **Avaliação do impacto ambiental sonoro em um trecho urbano de rodovia**  
*Elaine Carvalho da Paz  
e Paulo Henrique Trombetta Zannin*
- 23 **Novo critério de dimensionamento de pavimentos de concreto simples para as cargas ambientais e do tráfego**  
*Marcos P. Rodolfo e José T. Balbo*
- 34 **Utilização de cascalhos de perfuração oriundos da exploração de petróleo em misturas asfálticas**  
*Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena,  
John Kennedy Guedes Rodrigues, Leda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena e Heber Carlos Ferreira*
- 45 **Módulo de resiliência a 40°C de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha e óleo extensor**  
*Fernanda Pilati, Adalberto L. Faxina,  
Glauco T. P. Fabbri, Manoel H. A. Sória,  
Antonio C. Gigante e Leni F. M. Leite*

**FATOS HISTÓRICOS**

- 56 **Artigo do Eng<sup>o</sup> Thenn de Barros no Boletim Informativo da ABPv**

# Editorial

---

Nesta edição de abril/maio/junho, o engenheiro Atahualpa Schmitz da Silva Prego, em sua coluna Fatos Históricos, traz a menção a um artigo sucinto de autoria do engenheiro Sérgio Thenn de Barros, veiculado num Boletim Informativo da ABPv da década de 1980. O engenheiro Thenn comentava a respeito de soluções criativas ocorridas nas obras de duplicação da Via Dutra, em 1966/1967. Uma agradável lembrança que mostra o talento de um grande profissional.

Os artigos técnicos, objeto de excelência da Revista PAVIMENTAÇÃO, trazem as temáticas que estão em voga no meio acadêmico e profissional. São ao todo cinco artigos aprovados pelo Comitê Técnico Científico da ABPv: “Módulo de resiliência a 40°C de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha e óleo extensor”; “Novo critério de dimensionamento de pavimentos de concreto simples para as cargas ambientais e do tráfego”; “Utilização de cascalhos de perfuração oriundos da exploração de petróleo em misturas asfálticas”; “Avaliação do impacto ambiental sonoro em um trecho urbano de rodovia”; e “Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas”.

O leitor terá, portanto, um vasto material de estudo e apoio nas suas respectivas áreas com os artigos desta edição. Tendo em vista a publicação de cinco trabalhos, reservamos, exclusivamente nesta edição, as notas técnicas.

Na próxima edição do trimestre julho/agosto/setembro traremos a cobertura completa da 16ª RPU, que aconteceu em Belo Horizonte no final do mês de abril. O evento, além de ser o principal encontro de profissionais da pavimentação urbana no País, trouxe este ano uma conotação especial que está sendo a comemoração do cinquentenário da ABPv.

Por fim, a Revista presta homenagem *in memoriam* a três grandes nomes da pavimentação brasileira: José Francisco Azevedo, Haroldo Stewart Dantas e José Afonso Gonçalves de Macêdo, com um breve relato sobre suas vidas e seus feitos que marcaram toda uma época.

Conselho Editorial

# Seção de notas da Revista PAVIMENTAÇÃO

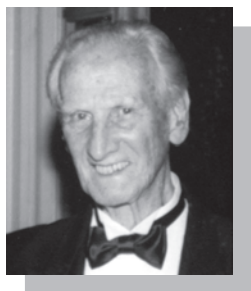
## HOMENAGEM

A ABPv rende homenagens a três grandes nomes de seu quadro de associados que faleceram, deixando saudosa lembrança nos corações de seus entes queridos e ingressando na história da pavimentação brasileira.

### **José Francisco Azevedo**

**\*28/05/1920 – † 08/03/2009**

Todos que conviveram com o engenheiro José Francisco Azevedo dirão que ele foi um grande homem em toda sua trajetória: filho generoso, profissional competente, irmão solidário, marido amoroso, pai dedicado, avô espetacular e amigo sem igual.



A todos contagiava com sua alegria, generosidade, educação e fantásticas histórias.

Nascido no Rio de Janeiro, Azevedo começou sua vida acadêmica em Salvador, onde diplomou-se em 1950 como Engenheiro Civil pela antiga Escola Politécnica, atual Universidade Federal da Bahia.

Lecionou na Escola Técnica do Rio de Janeiro e, em 1955, iniciou suas atividades no DNER, como residente em Porto Esperidião, distrito de Cáceres, no Mato Grosso. Era o início de uma carreira gloriosa que lhe permitiu galgar todos os degraus da escala profissional, exercendo vários cargos de chefia e direção.

Foi desbravador de terras virgens, trilhou sonhos e esperanças, levou progresso e modernidade aos quatro cantos do país. Com a ajuda de suas mãos, rodovias passaram a fazer parte do mapa deste país continental. Superou a dificuldade de mobilização de equipamentos e mão de obra, muitas vezes contando inclusive com o apoio dos indígenas. Em 1987, foi nomeado Diretor de Planejamen-

to do DNER, cargo que ocupou até sua aposentadoria. Seu último trabalho foi à frente da ACRJ compartilhando toda a sua experiência e sabedoria como conselheiro de Transporte, até seu falecimento.

Ávido leitor, tinha uma visão global que unia a técnica à política. Nas suas obras acadêmicas podemos destacar: *Preservação da Receita e Destinação do Fundo Rodoviário Nacional*, *Estradas Vicinais ou da Produção e Alternativas Rodoviárias Atlântico-Pacífico*.

Brasil afora, diversos foram os títulos e condecorações recebidos. Cidadão de várias cidades e estados, colecionou entre outros a Medalha do Mérito Aeronáutico Santos Dumont e a homenagem recebida da ABPv por ocasião da 12ª Reunião de Pavimentação Urbana, em 2003.

O engenheiro Azevedo foi um grande patriota, daqueles que podemos nos orgulhar, seus 88 anos foram pouco para quem ainda tinha muito a contribuir. Mas os homens passam e as obras ficam. Sejam elas morais ou profissionais, Dr. José Azevedo deixou em muitas delas gravada a sua assinatura.

.....

### **Haroldo Stewart Dantas**

**\*26/04/1935 – † 07/03/2009**

Outro importante profissional a quem rendemos homenagem é o Eng. Haroldo Stewart Dantas. Diplomou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica em 1960, no Rio de Janeiro.

Especializou-se em Pavimentação pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias/ CNPq. Foi Engenheiro concursado do DER-GB (atual fundação DER-RJ) de 1964 a 1970. Atuou ainda como diretor técnico da ABPv no biênio 1998/1999.

Participou de diversos eventos e congressos internacionais, o que lhe propiciou destacar-se como consultor,



prestando assessoria técnica em diversas obras e trabalhos importantes, tais como:

- A Revisão e complementação das Especificações Gerais de Obras Rodoviárias do DNER;
- Elaboração de diversos manuais do DNER, entre os quais o Manual de Drenagem, Manual de Hidrologia e o Manual de Ordenamento e Uso do Solo nas Faixas de Domínio e Lindeiras das Rodovias Federais, integrante do Corpo Normativo Ambiental.

Na vida acadêmica, foi professor da cadeira de Geotecnia do curso de engenharia da UFRJ, entre 1968 e 1970, e ministrou diversos cursos no IPR, ABPv, ABCP e IME. Em todas as instituições por que passou deixou a marca de um profissionalismo competente e atualizado.

Faleceu em plena atividade laboral à frente da empresa Concremat, na qual atuava como engenheiro consultor. Ao querido amigo, diretor e profissional, nossas saudosas honras.

.....

## **José Afonso Gonçalves de Macêdo**

**\*31/08/1957 – †04/12/2008**

Prestamos ainda homenagem *in memoriam* a um dos grandes profissionais de Engenharia do Estado da Paraíba e sócio da ABPv: Dr. José Afonso Gonçalves. Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (1978), era também mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (1989) e doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1996). Era Professor Adjunto da Universidade Federal de Campina Grande. Possuía vasta experiência na área de Engenharia de Pavimentos, com ênfase em comportamento mecânico de pavimentos, misturas asfálticas, materiais para desempenho e avaliação de pavimentos.

Foi professor (graduação e pós) pesquisador e coordenador regional de projetos junto ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Financiadora de Estudos e Projetos FINEP. Participou ativamente na Rede Asfalto N/NE e Rede Temática (asfalto),



além de projetos cooperativos em parceria com diversas empresas públicas e privadas. Foi orientador de teses de doutorado e dissertações de mestrado.

Em, 1995 recebeu o Prêmio Melhor Artigo da ABPv pela publicação do trabalho "Avaliação estrutural de trechos experimentais na Rodovia Carvalho Pinto – Análise preliminar".

Deixou como obra de referência o livro *Pequenas Barragens de Terra*, editado em 2007. Vários de seus artigos foram publicados em grandes revistas e periódicos científicos. Na Revista PAVIMENTAÇÃO teve publicado o artigo "Avaliação estrutural de trecho rodoviário no Estado da Paraíba através de ensaios destrutivos e não destrutivos", na edição de nº 6, em 2007.

Em nossa memória, para além do exímio profissional, restará a lembrança de um companheiro sempre disposto e alegre, que transmitia carisma e sinceridade a todos.

.....

## **SICRO 3**

Foi realizado entre os dias 5 e 7 de maio o segundo Curso SICRO 3, no Centran, no Rio de Janeiro. O evento repetiu o sucesso do primeiro que ocorreu nos dias 24 a 26 de abril de 2009.



.....

## **Palestra em Vila Velha-ES**

O Eng. Ronaldo Lacourt, com grande histórico de estradas vicinais no Estado do Espírito Santo, fez uma palestra no dia 18/03 no Auditório da Secretaria Municipal de Planejamento, Orçamento e Gestão de Vila Velha-ES. O engenheiro abordou o aproveitamento da Escória de Aciaria como sub-base e base de pavimentação rodoviária.

ria de vias urbanas e rurais. O assunto é muito interessante em se tratando de uma alternativa sustentável, com custos reduzidos, para pavimentação – urbana ou rural – com qualidade. O sucesso desse trabalho foi apresentado no Congresso Internacional de Pavimentação Rodoviária que aconteceu em outubro de 2008 em Vitória.

.....

## **ABPv 50 ANOS: segundo seminário**

Foi realizado em 1º de abril o 2º Seminário técnico, dentro da programação de comemoração dos 50 anos da ABPv, com o tema *Construção e Manutenção de Rodovias com Tecnologia de Geossintéticos*, na sede da ABPv Rio de Janeiro.

O seminário contou com 56 participantes da área de projetos, acadêmica, construção, manutenção e operação/



concessão de rodovias e de geotecnia. Foi organizado em conjunto ABPv-Geomaks (Eng<sup>os</sup> Gerson Cunha e Maria Francisca), contou com a apresentação da tecnologia de geossintéticos das seguintes empresas: Kanaflex (Eng<sup>o</sup> Osvaldo Barbosa, Huesker (Eng<sup>o</sup> Renato Pandolpho), Bidim Mexichem (Eng<sup>o</sup> Demetrius Gomes).

Na foto estão presentes, além dos organizadores/palestrantes, a Diretora Técnica da ABPv Eng<sup>a</sup> Laura Gorretti, o Diretor Financeiro Eng<sup>o</sup> Atahualpa Schmitz e a Diretora de Divulgação Arq<sup>ta</sup> Georgina Libório.

.....

## **Prêmio João Bento Jacomo Lopes**

Ano passado, o 19º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro do Petróleo concedeu aos engenheiros Fernando

Augusto Júnior e Heitor Roberto Giampaglia o Prêmio João Bento Jacomo Lopes pelo trabalho sobre *Comparação do Desempenho em Laboratório, do CAP 30-45 versus CAP 50-70, Empregados em Misturas do Tipo Concreto Asfáltico*.

No trabalho são destacadas as vantagens, desvantagens e cuidados na utilização do CAP 30-45 em revestimentos asfálticos.

A Revista PAVIMENTAÇÃO rende aos autores os parabéns por tal mérito.

.....

## **Novo laboratório de asfalto no IME**

O Instituto Militar de Engenharia (IME) inaugurou em fevereiro último o novo Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas e a remodelação do Laboratório de Agregados, destinados ao ensino e à pesquisa na área da pavimentação rodoviária.

O novo laboratório, com mais de 200m<sup>2</sup> de área construída, foi concebido e construído com o objetivo de proporcionar aos alunos de graduação e de pós-graduação os mais modernos equipamentos de análise dos materiais empregados na pavimentação asfáltica.

As novas instalações permitirão a realização de todos os ensaios de caracterização dos diversos tipos de ligantes asfálticos convencionais (cimento asfáltico de petróleo, emulsão asfáltica e asfalto diluído), além de poderem desenvolver estudos e projetos relativos à dosagem de misturas asfálticas quentes e frias, bem como analisar o seu comportamento mecânico. Está apto, também, à realização de estudos e pesquisas relativas à manutenção e gerência de pavimentos asfálticos.

Entre os principais equipamentos, destacam-se viscosímetros, ductilômetros, fornos, extratores de betume, destiladores, penetrômetros, estufas rotativas, simulador de tráfego LWT, equipamento para abrasão por via úmida WTAT, compactadores, prensas, extratores de amostra, banhos-maria.

A viabilização financeira das obras e da aquisição dos equipamentos foi obtida por meio do Convênio Cooperação Técnica com a Petrobras, com a qual o IME integra a Rede Temática de Tecnologia em Asfalto.

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.

# Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas

**Manuel J. C. Minhoto**

Professor Adjunto – Instituto Politécnico de Bragança, Portugal  
[minhoto@ipb.pt](mailto:minhoto@ipb.pt)

**Jorge Pais**

Professor Auxiliar – Universidade do Minho, Portugal  
[jpais@civil.uminho.pt](mailto:jpais@civil.uminho.pt)

## RESUMO

Os pavimentos rodoviários estão sujeitos à ação combinada do tráfego e das variações de temperatura que os conduzem a diversos tipos de degradações, destacando-se o fendilhamento como uma das principais, constituindo uma preocupação dos organismos rodoviários atrasar ou, quando possível, evitar a ocorrência de fendilhamento nos pavimentos flexíveis. O reforço de pavimentos constitui uma técnica de conservação estrutural e funcional integrante das estratégias de conservação mais utilizadas na reabilitação de pavimentos, quando a reposição da capacidade estrutural dos pavimentos é o principal objetivo. No entanto, tem-se constatado que o desempenho dos pavimentos constituídos por uma camada de reforço aplicada sobre um pavimento fendilhado mobiliza um mecanismo de resistência conducente a um tipo particular de ruína, caracterizado pela propagação das fendas do pavimento existente para as camadas de reforço, designado por reflexão de fendas. Esse mecanismo constituiu a principal motivação para a realização de um estudo, que aqui sucintamen-

te se apresenta, objetivando a avaliação do efeito das variações de temperatura, isoladas e combinadas com o tráfego, na ocorrência da reflexão de fendas. As conclusões obtidas neste estudo resultam da análise e tratamento do resultado da simulação numérica do comportamento à reflexão de fendas de um reforço de pavimento, para diversas situações de carregamento e tendo como base o método dos elementos finitos. Deduz-se que a ocorrência de variações de temperatura num reforço de pavimento contribui para o agravamento da propagação de fendas, conduzindo à ruína prematura do pavimento reforçado. No sentido de melhorar o desempenho destas soluções, conclui-se pela necessidade de, na concepção de um reforço de pavimento, se considerar a inclusão do efeito das variações de temperatura na avaliação do seu comportamento à reflexão de fendas.

## PALAVRAS-CHAVE

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

## 1. INTRODUÇÃO

Na maioria das redes rodoviárias, a estratégia de conservação considerada mais adequada para situações de reabilitação estrutural de pavimentos baseia-se na aplicação de camadas de reforço estrutural sobre os pavimentos degradados. No entanto, constata-se que, na maioria dos casos, o desempenho desses reforços não corresponde ao esperado, verificando-se ocorrer a transmissão do fendilhamento, existente nas camadas degradadas, para as camadas de reforço, conduzindo ao fendilhamento prematuro na sua base e a consequente propagação para a superfície. Este fenômeno, designado por reflexão de fendas, ocorre principalmente como resultado da combinação do carregamento cíclico do tráfego com o efeito mecânico das variações de temperatura (HALIM, 1989).

A ocorrência de variações de temperatura nos pavimentos, resultantes das variações diárias da temperatura do ar, induz movimentos horizontais de abertura e fecho das fendas existentes no pavimento como resultado de um fenômeno de retração térmica, contribuindo para um agravamento do estado de tensão no reforço (DE BONDT, 2000), em zonas próximas da frente das fendas, constituindo uma causa importante para a propagação do fendilhamento nessa camada (MINHOTO, 2005). A sobreposição de um estado de tensão de origem térmica com o estado de tensão resultante do efeito da passagem de um rodado de um veículo agrava o estado de tensão global no reforço e conduz à ocorrência da reflexão de fendas (MINHOTO *et al*, 2005).

Neste artigo apresenta-se resumidamente um estudo sobre a influência das variações de temperatura no comportamento à reflexão de fendas de um reforço de pavimento, objetivando um caso concreto de um pavimento, sujeito ao carregamento térmico e do tráfego, observados durante um ano (MINHOTO, 2005). Pretende contribuir-se para um melhor entendimento sobre o comportamento dos reforços de pavimentos à reflexão de fendas, quando sujeitos à ação conjunta das variações de temperatura e do tráfego, e estudar as diferenças de comportamento entre duas misturas betuminosas, uma mistura convencional e uma mistura com betume modificado com borracha (BMB).

## 2. ÂMBITO DO ESTUDO

O estudo que se apresenta envolveu a simulação numérica do comportamento à reflexão de fendas de um pavimento reforçado, pertencente à rede rodoviária fundamental portuguesa e situado no nordeste de Portugal. Essa simulação baseou-se no uso da metodologia dos elementos finitos para modelação do comportamento do pavimento reforçado e considerou como solicitações a ação do tráfego e a ação das variações de temperatura. As solicitações adotadas foram as observadas durante o período de um ano e compreendem a distribuição de temperaturas horárias a várias profundidades do pavimento (gradientes térmicos) e os valores do tráfego (volumes e agressividade) observado.

A simulação do comportamento do pavimento consistiu na avaliação dos estados de tensão e de extensão resultantes da aplicação mecânica das solicitações consideradas, o que permitiu avaliar a resistência do reforço do pavimento à reflexão de fendas para as seguintes situações de carregamento: a) tráfego; b) variações de temperatura; c) tráfego conjugado com as variações de temperatura.

A simulação horária do comportamento do pavimento foi realizada com base no uso de modelos numéricos, desenvolvidos para avaliação do estado mecânico do pavimento, tendo por base o pavimento observado (características geométricas, condições de ligação entre camadas e de discretização do domínio geométrico, mecânico e térmico) e atendendo ao efeito de cada ação, estruturados para funcionarem como: 1) modelo térmico para definição horária do estado térmico do pavimento, resultante das condições climáticas do local; 2) modelo mecânico de avaliação do efeito da ação do tráfego; 3) modelo mecânico de avaliação do efeito das variações de temperatura.

A avaliação da resistência do reforço de pavimento baseou-se na avaliação, horária, da vida previsível do reforço de pavimento. A vida previsível do reforço, numa determinada hora, foi avaliada em função dos níveis médios de extensão de Von Mises acima da fenda, relacionando-os com a resistência à fadiga das misturas envolvidas no reforço. A estimativa de vida previsível

do reforço permitiu determinar a evolução horária do dano sofrido pelo reforço do pavimento ao longo do ano.

### 3. MODELOS NUMÉRICOS DE COMPORTAMENTO

A definição numérica da geometria das camadas do pavimento é representativa das espessuras das camadas *in situ*, obtidas por análise de carotagens do pavimento no qual foram observadas as temperaturas. As espessuras das camadas do modelo são: reforço de pavimento, 0.125m, camada betuminosa fendilhada, 0.215m, camada granular, 0.30m, e camada representativa da fundação, 1.6m. O modelo numérico inclui uma fenda, localizada na camada fendilhada do pavimento antigo à qual é atribuída uma largura de 10mm.

A discretização mecânica do modelo baseou-se na adoção de um elemento finito do tipo sólido de oito nós, de interpolação linear, que conduziu à malhagem, que se apresenta na Figura 1. Esse elemento apresenta três graus de liberdade em cada nó, traduzidos em translações nodais nas direcções *x*, *y* e *z*.

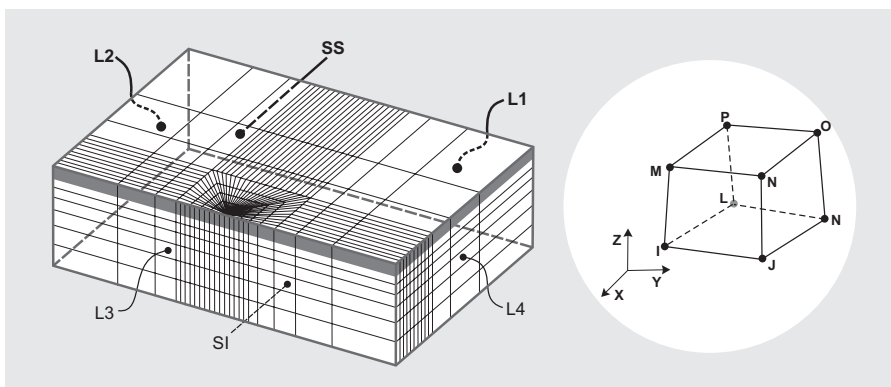


Figura 1 – Discretização do modelo mecânico com um elemento finito de oito nós

#### 3.1 Solicitações

Ao modelo descrito aplicam-se duas ações: tráfego e variações de temperatura. A simulação do carregamento do tráfego envolve a aplicação de uma carga, de um rodado duplo com eixo de 130kN, com a configuração apresentada na Figura 2, considerada distribuída na superfície do pavimento. Para efeitos de avaliação de dano, a caracterização do tráfego baseou-se nos registros de contagens de tráfego realizadas num

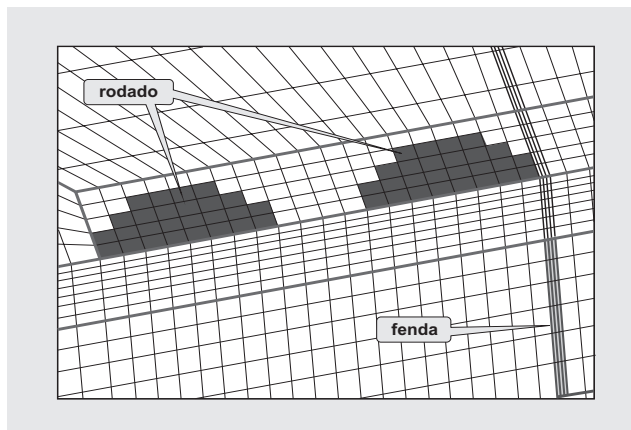


Figura 2 – Esquema da carga distribuída representativa de um rodado duplo

posto fixo de medição de tráfego, próximo do local de observação das temperaturas.

#### 3.2. Modelos desenvolvidos

A ação do tráfego foi considerada como uma carga de curta duração mobilizando o comportamento elástico-linear dos materiais betuminosos. Neste caso, a análise numérica é do tipo estacionário e realizada para cada hora de vida em serviço, à qual corresponde um estado térmico observado.

A temperatura observada nos pavimentos apresenta variações horárias, consideradas de longa duração quando comparadas com a duração da aplicação da carga de um eixo. Como tal, o modelo para simulação das variações de temperatura foi considerado transiente, de longa duração, realizando a integração do estado de tensão e de extensão para intervalos horários ao longo do período de

tempo de 24 horas. Este processamento mobiliza essencialmente fenômenos da retração térmica com resposta viscoelástica (relaxação) dos materiais betuminosos.

#### 3.3. Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais integrantes da camada de reforço foram obtidas por ensaios laboratoriais de fadiga à flexão em quatro pontos. As propriedades dos materiais das camadas existentes do pavimento a refor-

çar resultaram de uma caracterização do pavimento existente. Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades elásticas das misturas betuminosas (módulo dinâmico e coeficiente de Poisson), para uma gama de temperaturas, entre -5°C e +25°C, e para uma frequência de 10Hz. As propriedades elásticas adotadas para o material da camada fendilhada são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 1 – Propriedades das misturas betuminosas**

T (°C)	Mistura com BMB		Mistura convencional	
	E (MPa)	Coef. Poisson	E (MPa)	Coef. Poisson
-5	4440	0.35	16160	0.35
5	3220	0.35	13560	0.35
15	1950	0.35	9300	0.35
25	1110	0.35	4780	0.35

**Tabela 2 – Propriedades da mistura betuminosa da camada fendilhada**

T (°C)	E (MPa)	Coef. Poisson
-5	12000	0.35
0	9000	0.35
5	6500	0.35
10	4000	0.35
15	2500	0.35
25	680	0.35

Na Tabela 3, apresentam-se as propriedades dos materiais da camada de base granular e da camada de fundação, obtidas a partir de um estudo de reabilitação do pavimento em estudo.

**Tabela 3 – Propriedades da camada granular e do solo de fundação**

Designação	E (MPa)	Coef. Poisson
Camada de base granular	100	0.3
Solo de fundação	50	0.35

Na avaliação do estado de tensão/extensão devido ao efeito das variações de temperatura, considerou-se a termoviscoelasticidade das misturas betuminosas, incluindo, assim, o efeito de relaxação, ou fluência, das misturas perante a retração térmica. As propriedades viscoelásticas das misturas, determinadas experimentalmente, foram

expressas por funções de relaxação  $G(t)$  (corte) e  $K(t)$  (volumétrico), representadas por séries de Prony, de acordo com as seguintes expressões (ANSYS, 1999):

$$G = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_g} G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \quad (1)$$

$$K = K_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_k} K_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^K}\right) \quad (2)$$

O número de elementos da série de Prony adotados,  $n_g$  e  $n_k$ , foi de três, resultando 14 parâmetros das expressões de Prony, (7 de corte (G); 7 – volumétricos (K)). Atendendo ao caráter térmico da simulação, considerou-se a aplicação do princípio da simplicidade termorreológica aos materiais adotados, por intermédio da aplicação do fator de escala  $A(T(t))$  de William-Landel-Ferry (WLF) de acordo com a expressão (3) (ANSYS, 1999).

$$\log_{10}(A(T(\tau))) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (3)$$

As propriedades viscoelásticas, obtidas a partir de ensaios laboratoriais, conduziram ao estabelecimento dos parâmetros constantes na Tabela 4.

A realização de ensaios de retração térmica livre conduziu à obtenção dos valores do coeficiente de retração térmica para cada tipo de mistura usada na simulação, os quais se apresentam na Tabela 5.

#### 4. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

A simulação numérica visou avaliar o comportamento mecânico do pavimento perante à ação combinada das variações de temperatura e do tráfego e envolve quatro fases: a) avaliação do estado de tensão/extensão devido ao tráfego; b) avaliação do estado de tensão/extensão devido às variações de temperatura; c) avaliação do estado de tensão/extensão da combinação das duas ações; d) determinação da vida previsível do reforço e do dano associado às ações.

As três primeiras fases permitem a obtenção de estados de tensão/extensão nos nós da zona ativa e crítica do reforço, situados acima da frente de uma fenda. O ciclo elementar de simulação é horário, mesmo em soluções

Tabela 4 – Propriedades viscoelásticas das misturas betuminosas – Parâmetros de Prony

	Parâmetros	Mistura com BMB	Mistura convencional		Parâmetros	Mistura com BMB	Mistura convencional
Parâmetros volumétricos	$K_{\infty}$	1.379E+01	2.807E+01	Parâmetros de corte	$G_{\infty}$	5.108E+00	1.039E+01
	$K_1$	5.623E+02	7.845E+02		$G_1$	2.091E+02	2.894E+02
	$K_2$	1.116E+02	2.598E+02		$G_2$	4.134E+01	9.445E+01
	$K_3$	2.390E+01	3.071E+01		$G_3$	8.852E+01	1.135E+01
	$\tau_1^K$	6.054E-02	5.853E-01		$\tau_1^G$	6.032E-02	5.991 E-01
	$\tau_2^K$	1.474E+01	9.165E 00		$\tau_2^G$	1.473E+01	9.489E+00
	$\tau_3^K$	9.863E+03	9.922E+03		$\tau_3^G$	9.862E+03	9.999E+03
WLF	$T_r$	1.384E+01	13.114544				
	$C_1$	2.228E+07	2.557E+07				
	$C_2$	1.438E+08	1.395E+08				

Tabela 5 – Coeficientes de retração térmica das misturas betuminosas

Parâmetro	Mistura com BMB	Mistura convencional
$\alpha$	$4.268 \times 10^{-05}$	$3.542 \times 10^{-05}$

numéricas transientes, considerando ciclos diários, como é o caso das variações de temperatura.

As duas primeiras fases requerem o funcionamento prévio do modelo térmico com o objetivo de determinar as temperaturas horárias em todos os nós do modelo, para um período de 24 horas a partir das temperaturas observadas. A avaliação do estado de tensão no reforço devido ao tráfego é realizada após a consideração das temperaturas no domínio mecânico no sentido de estabelecer as propriedades termomecânicas dos materiais. As temperaturas horárias nos nós do modelo constituem a principal solicitação térmica a que o pavimento está sujeito, permitindo a avaliação do estado de tensão/extensão no pavimento (por meio do modelo transiente), em virtude da ação exclusiva das variações de temperatura.

As componentes do estado de tensão/extensão obtidas para os dois casos de carregamento permitem, na fase seguinte, determinar o estado de tensão/extensão correspondente à combinação dos efeitos dos dois tipos de carregamento. As componentes do estado de tensão/extensão obtidas permitem a avaliação da vida previsível

do reforço, realizada com base em leis de fadiga conseguidas em laboratório com ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos. A vida previsível à reflexão de fendas é relacionada com o tráfego observado, permitindo estimar o dano acumulado ao longo do período em análise.

#### 4.1. Avaliação do dano

A avaliação do dano horário associado à reflexão de fendas é realizada com base na adoção da metodologia de concepção de reforços de pavimento proposta por Sousa *et al.* (2002). Para cada tipo de mistura betuminosa, para cada hora de análise e para cada situação de carregamento, a avaliação do dano envolve: 1) determinação das extensões de Von Mises; 2) determinação da extensão de Von Mises média,  $\varepsilon_{VM}$ , na zona do reforço, acima da frente da fenda; 3) determinação da vida previsível do reforço; 4) determinação do dano. Assim, em cada nó, localizado acima da fenda (Figura 3), foi calculada, para cada caso de carregamento, a extensão de Von Mises por intermédio da expressão (SOUSA *et al.*, 2002):

$$\varepsilon_{VM} = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\frac{1}{2}((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2)} \quad (4)$$

onde:  $\varepsilon_{VM}$  = extensão de Von Mises;

$\nu$  = coeficiente de Poisson;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  = extensões principais.

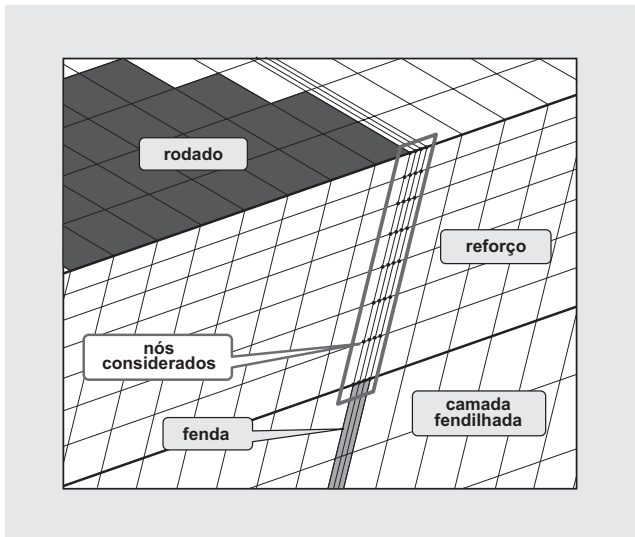


Figura 3 – Nós considerados para a avaliação da extensão média de Von Mises

Com base nos valores de  $\epsilon_{VM}$  em cada nó, foi calculada a extensão de Von Mises média nos nós localizados na zona acima da fenda (Figura 3). A  $\epsilon_{VM\text{ média}}$  foi, em seguida, usada numa expressão adotada para a avaliação do número de eixos admissível, definida em função da temperatura e da extensão de Von Mises. Para relacionamento da resistência à reflexão de fendas com a extensão de Von Mises, foi utilizada a seguinte relação (MINHOTO, 2007):

$$\epsilon_{VM} = \left[ \left( (a \times n) + b \right) \times E^c \times N^d \right] \quad (5)$$

onde:  $n$  = porosidade da mistura (%);

$E$  = rigidez da mistura, função da temperatura,  $T$ , expressa em (Pa);

$N$  = número de repetições de carga admissível;

$a, b, c, d$  = parâmetros experimentais de fadiga das misturas (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros adimensionais para a expressão da fadiga

Tipo de material	a	b	c	d
Mistura convencional de desgaste	1.009	0.928	-0.337	-0.252
Mistura com betume modificado com borracha	1.957	0.926	-0.434	-0.144

A partir do número de eixos admissíveis conseguidos no procedimento anterior e usando o número de eixos

observados *in situ*, foi obtido o rácio da resistência gasta em cada hora, designado por dano, cuja expressão adotada apresenta a seguinte forma (MINHOTO, 2007):

$$D_{h,e} = \frac{N_{h,e}}{N_{adm,h,e}} \quad (6)$$

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 na hora  $h$ .

Para cada hora de análise, é obtido um número de parcelas de “dano” correspondente ao número de tipos de eixos considerados. O dano total horário é obtido a partir da soma de todas as parcelas de dano obtidas para a hora “ $h$ ”.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Da simulação realizada obtiveram-se resultados que permitem analisar o comportamento do reforço, sob o ponto de vista de relações entre o estado de extensão

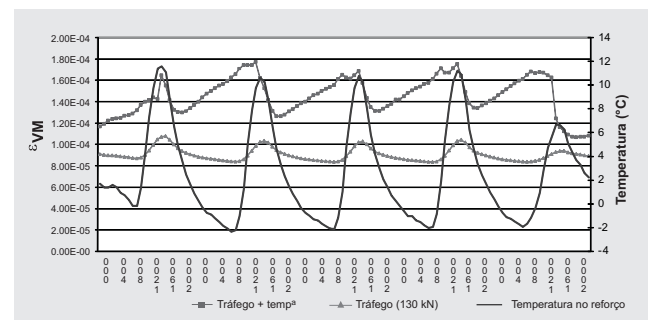


Figura 4 – Variação da extensão de Von Mises com a temperatura, para dias frios, no reforço em mistura com BMB

(expresso pela  $\epsilon_{VM\text{ média}}$ ) e o seu estado térmico, representado pela temperatura média, e sob o ponto de vista

da análise do dano associado a cada carregamento. A Figura 4 apresenta a evolução de  $\epsilon_{VM\text{ média}}$  com a variação de temperaturas, em dias tipicamente frios. Verifica-se, para  $\epsilon_{VM}$ , uma tendência contrária à evolução da temperatura, ou seja, o arrefecimento conduz ao aumento da extensão de Von Mises, em qualquer material. Nestes casos, as  $\epsilon_{VM}$  por causa das variações de temperatura,

apresentam valores da ordem de grandeza das resultantes do tráfego, o que constitui um motivo para a sua consideração num processo de concepção de um reforço.

Na Figura 5, apresenta-se a evolução da extensão de Von Mises com as variações de temperatura, em dias tipicamente quentes. Neste caso, verifica-se uma influência da temperatura na evolução do estado de extensão de Von Mises no caso da ação ao tráfego, devido à influência da temperatura nas variações do módulo de rigidez das misturas betuminosas. O efeito das variações de temperatura no estado de extensão total no reforço constituído por

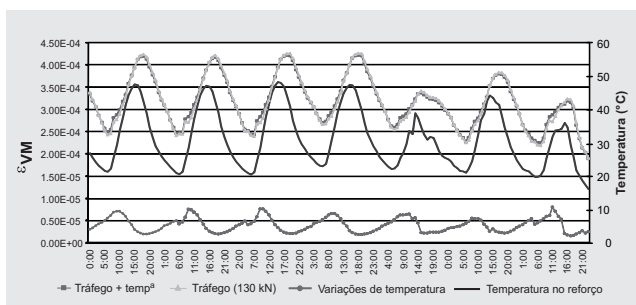


Figura 5 – Variação da extensão de Von Mises com a temperatura, para dias quentes, no reforço em mistura com BMB

uma mistura com BMB é desprezável, verificando-se uma proximidade entre as extensões em virtude do tráfego e das extensões por causa do carregamento total.

Considerando a evolução anual das extensões de Von Mises (Figuras 6 e 7), verifica-se que no período frio do ano (de novembro a fevereiro, no Hemisfério Norte) a situação de carregamento total (tráfego + variações de temperatura) condiciona o comportamento do pavimento, exibindo extensões de Von Mises superiores às da situação do tráfego. No período quente (de março a outubro, no Hemisfério Norte), constata-se que o carregamento devido ao tráfego conduz ao estado de extensão mais gravoso, apresentando o carregamento total, extensões de Von Mises, de valor considerável. Conclui-se, assim, que o efeito das variações de temperatura deve ser considerado em todo o período de análise, principalmente nos períodos frios do ano, nos quais a diferença entre o efeito do tráfego e o efeito do conjunto do tráfego e da temperatura é mais acentuada.

Nas Figuras 6 e 7, constata-se ainda que a diferença entre o carregamento total e o do tráfego é menor para o

caso do reforço com BMB do que para o caso do reforço com mistura convencional, devendo-se ao fato de a mistura com BMB apresentar maior capacidade de dissipação de tensões de origem térmica que a mistura convencional.

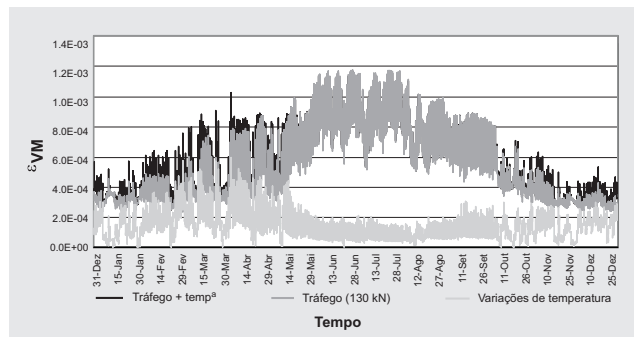


Figura 6 – Extensões de Von Mises anuais no reforço com mistura com BMB

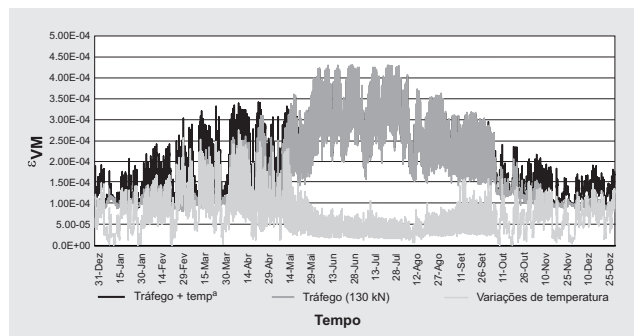


Figura 7 – Extensões de Von Mises anuais no reforço com mistura convencional

A Figura 8 apresenta o dano horário ao longo do ano, devido ao efeito do tráfego, no reforço constituído por mistura betuminosa com BMB, verificando-se que, durante os meses quentes do ano, esse dano horário é relevante, sendo até superior ao observado nos meses frios. A Figura 9 apresenta o aspecto do gráfico da evolução do dano por causa das ações do tráfego e total, constatando-se que o dano em virtude do carregamento total é sempre superior ao causado apenas pelo tráfego. As conclusões obtidas são igualmente aplicáveis no caso de um reforço ser constituído por uma mistura convencional.

## 6. CONCLUSÕES

No presente trabalho considerou-se o fenômeno da reflexão de fendas como uma das principais causas do fendilhamento prematuro dos reforços de pavimentos. Esse

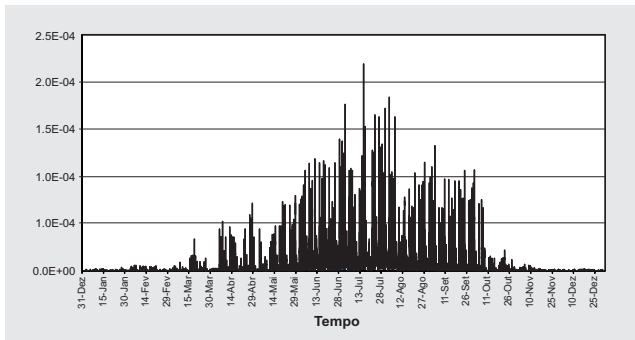


Figura 8 – Dano horário por causa do carregamento do tráfego no reforço com BMB

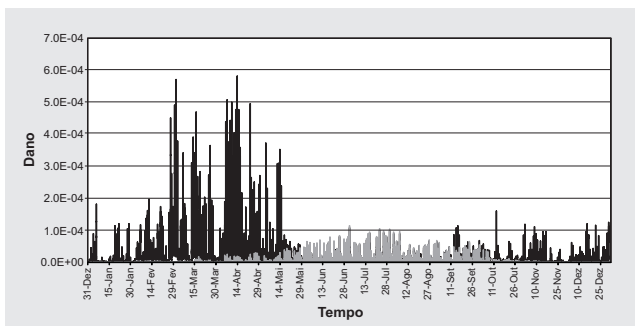


Figura 9 – Dano horário, devido ao carregamento total e ao do tráfego, num reforço com mistura com BMB

fenômeno deve-se, sobretudo, à elevada concentração de tensões na zona acima das fendas das camadas existentes, provocadas pelos movimentos dos seus bordos, resultantes da ação do tráfego e das variações de temperatura. Concluiu-se que o efeito conjugado do tráfego e das variações de temperatura, em termos de reflexão de fendas, constitui a ação mais desfavorável.

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 e

de extensão horários agrava-se, como resultado da retração térmica, qualquer que seja o material constituinte da camada de reforço.

No período mais frio do ano, a situação de carregamento conjugado do tráfego e das variações de temperatura condiciona o comportamento do reforço do pavimento, exibindo extensões de Von Mises muito maiores do que as do tráfego, considerado isoladamente, verificando-se que as extensões devido às variações de temperatura apresentam valores mais altos do que as do tráfego, considerado isoladamente.

No período mais quente do ano, o carregamento total condiciona igualmente o fenômeno de reflexão de fendas. No entanto, é neste período do ano que o estado de extensão por causa do efeito do tráfego assume valores mais elevados, ao contrário do carregamento térmico, apresentando valores muito superiores aos do dano observado nos meses frios, sendo, no entanto, inferiores aos valores do dano associados ao carregamento total.

Neste estudo conclui-se ainda que o período de tempo em que ocorrem valores consideráveis do dano em virtude da ação do carregamento total é superior ao período de tempo no qual ocorrem valores consideráveis do dano associados à situação de carregamento apenas do tráfego, indicando que, na concepção de reforços de pavimentos, o efeito conjunto do tráfego e das variações de temperatura deve ser considerado como a situação de carregamento mais desfavorável.

Em termos de desempenho dos materiais, verifica-se que um reforço constituído por uma mistura betuminosa com BMB apresenta estados de extensão mais favoráveis que os resultantes para um reforço com mistura betuminosa convencional.

## REFERÊNCIAS

1. ABD EL HALIM, A.O. A New Approach Toward Understanding the Problem of Reflective Cracking. Proceedings of the First International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, 1989.
2. ANSYS – computer program. 1999. ANSYS, Inc, Theory Reference – Realise 8.0. Edited by Peter Kohnke. ANSYS Inc. Canonsburg.
3. DE BOND T ARIAN. *Effect of Reinforcements Properties*. Proceedings PRO11. 4<sup>th</sup> International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Edited by A. O. Abd El Halim, D. A. Taylor and El H. H. Mohamed. RILEM. Ottawa, Ontario, Canada. March 2000.
4. MINHOTO, Manuel J. C. “Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis”. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Portugal, 2005.
5. MINHOTO, Manuel J. C., Pais, Jorge C., Pereira, Paulo A.A. & Picado-Santos, Luís G.. “Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Model”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board n° 1919 – Rigid and Flexible Pavement Design 2005. pp 96-110. TRB. Washington DC. 2005.
6. SOUSA, Jorge B., PAIS, Jorge C., Saim, Rachid, Way, George & Stubstad, Richard N. Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking, Journal of the Transportation Research Board, 2002.

# Avaliação do impacto ambiental sonoro em um trecho urbano de rodovia

**Elaine Carvalho da Paz**

Engenheira Civil / M.Sc.  
pazelaine@hotmail.com

**Paulo Henrique Trombetta Zannin**

Doutor Engenheiro

## RESUMO

*Este trabalho apresenta um estudo de impacto ambiental sonoro do trecho urbano da Rodovia BR-476, na cidade de Curitiba-PR, em função do processo de readequação que o referido trecho sofrerá. Para tanto, foram realizadas medições in situ e simulações computacionais para obtenção dos níveis sonoros das situações atual, de implantação de obras e de operacionalização. A análise preliminar foi feita a partir da classificação da poluição sonora formulada para uma área mista de aproximadamente 20km<sup>2</sup>, em função da Lei Municipal Nº 10.625/2002 e da Norma Brasileira de Conforto Acústico NBR-10151/2000, em termos de percentagem aceitável. Para determinação do impacto ambiental, foi realizada uma avaliação em função de atributos de impacto, ou seja, classificação das características qualitativas da atividade desenvolvida, a partir da observação dos mapas acústicos simulados e das informações obtidas da classificação da poluição sonora local, com elaboração de uma Matriz de Impacto Ambiental. Após análise, os resultados mostraram que o processo de readequação será um agente causador de impacto sonoro negativo, caso não sejam adotadas medidas mitigadoras ainda em sua fase de projeto. A funcionalidade estrutural e operacional deste projeto de readequação viária somente será alcançada se este projeto englobar também a sua funcionalidade ambiental. Em adição, são propostas medidas de controle que devem auxiliar na mitigação do impacto.*

## ABSTRACT

*This paper presents a sound environmental impact assessment of the urban stretch of highway BR-476, in the city of Curitiba-PR, according to the constructive process that the related stretch will suffer. To accomplish it, were made measurements and computer simulations to obtain the sound levels of current situations, engineering works and operationalization. The preliminary analysis was made from the classification of the noise pollution for a urban area of approximately 20 km<sup>2</sup>, according to the Municipal Law Nº 10.625/2002 and the Standard Brazilian de Comfort Acoustic NBR-10151/2000 in terms of percentage acceptable. To determine the environmental impact evaluation has been conducted on the basis of attributes of impact, i.e., classification of quality characteristics of the activity developed from the observation of simulated noise maps and information obtained from the classification of noise locally clustered an Environmental Impact Matrix. The constructive process will be causative agent of sound negative impact, if no mitigating measures are adopted even in their stage of design. The structural and operational function of this project will only be achieved if this project also includes their environmental function. In addition, are given proposals of the control which should assist in mitigate of the impact.*

## PALAVRAS-CHAVE

*Ruído de tráfego, impacto ambiental, poluição sonora.*

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição sonora é atualmente uma das principais formas de poluição ambiental, sendo responsável por impactos negativos com prejuízos ao meio ambiente e à qualidade de vida da população (BERGLUND *et al.*, 1999; RAMALINGESWARA RAO & SESHAGIRI RAO, 1992; ROBINSON, 1971).

O agente caracterizador da poluição sonora urbana é denominado de ruído urbano ou ruído ambiental (WHO, 2003).

O ruído proveniente do tráfego de veículos é a parcela que mais contribui com o aumento do ruído ambiental (ZANNIN *et al.*, 2002), por exemplo, uma rodovia com tráfego intenso pode chegar a gerar níveis sonoros de cerca de 80dB(A) à margem da mesma (GOLEBIEWSKI *et al.*, 2003). Para se ter uma ideia da magnitude deste valor, pelos critérios da Organização Mundial de Saúde (OMS), uma pessoa exposta à situação supracitada estaria no nível de desgaste do organismo (WHO, 2003).

A execução de uma obra em uma via agrega ao ruído de tráfego um novo componente, o ruído gerado pelo tráfego de equipamentos de construção. Esse tipo de ruído pode provocar uma redução no fluxo de tráfego normal de até 60%, conseqüentemente reduzindo as emissões sonoras da função de passagem a mais da metade de seu valor total (FHWA, 2004; DANTAS, 1996), contudo, esses equipamentos apresentam um nível de emissão sonora bastante elevado, cerca de  $\geq 90$ dB(A) (PAZ, 2004; ZANNIN *et al.*, 2003).

Neste sentido, uma intervenção em uma rodovia, que cause uma variação em algum parâmetro ou variável determinante nos processos de emissão e imissão sonora, deve ser avaliada objetiva e subjetivamente, em função dos efeitos que sua ação pode provocar no meio onde está inserida (WTEZEL *et al.*, 1999).

### 1.1. Impacto Ambiental Sonoro

Impacto Ambiental, conforme Resolução Nº 001/86 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, é considerado como: “... qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resul-

tante das atividades humanas que direta ou indiretamente afetam: I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II – as atividades sociais e econômicas; III – a biota; IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e V – a qualidade dos recursos ambientais ...” (CONAMA, 1986).

O ruído proveniente do tráfego de veículos pode ser considerado como um agente causador de impacto negativo, responsável não somente por impactos que afetam diretamente a saúde (WHO, 2003), como também impactos de ordem socioeconômica, como a desvalorização imobiliária (LAKE *et al.*, 1998; TAYLOR *et al.*, 1982), logo, o ruído de tráfego deve ser considerado no desenvolvimento de Estudos de Impacto Ambiental e Saúde (EIAS) (SORDIA & DÍAZ, 1999).

Assim, o Estudo de Impacto Ambiental Sonoro é um instrumento técnico-científico de caráter multidisciplinar, capaz de definir, mensurar, monitorar, mitigar e corrigir as possíveis causas e efeitos de determinada atividade que produz níveis sonoros excessivos sobre determinado ambiente (CARVALHO, 1999).

### 1.2. Parâmetros para mensuração do ruído de tráfego

O nível equivalente de pressão sonora ( $L_{eq}$ ) é um nível constante médio que equivale, em termos de energia acústica, aos níveis variáveis do ruído durante o período de medição, seja em medidas de emissão ou de imissão sonora, expresso em decibel na curva de ponderação “A” (dB(A)) (HARRIS, 1998; SCHULTZ, 1972).

Nos estudos de ruído de tráfego para a cidade de Curitiba-PR, podem ser adotados dois parâmetros comparativos para o  $L_{eq}$ , em nível nacional, a norma brasileira NBR-10151/2000, em nível municipal, a Lei Municipal de Curitiba Nº 19625/2002 (PMC/SMMA, 2002; ABNT, 2000).

Para uma área mista, a NBR-10151/2000 recomenda o seguinte valor limite para o nível de imissão sonora nas fachadas das edificações de 65dB(A) para o período diurno. Para áreas com edificações especiais, como educacional, a norma recomenda para o período diurno o valor limite de imissão sonora de 55dB(A) (ABNT, 2000).

Para a área de transição da BR-476 (SE-BR-476, trecho urbano), a Lei Municipal de Curitiba Nº 19625/

2002 fixa o valor limite para o nível de emissão sonora nas fachadas das edificações de 65dB(A) para o período diurno. Quando da ocorrência de estabelecimento educacional (ZE-E), a Lei Municipal fixa para o período diurno o valor limite de emissão sonora de 60dB(A) (PMC/SMMA, 2002).

### 1.3. O trecho urbano da BR-476 como objeto de estudo

O trecho urbano da Rodovia Federal BR-476, na cidade brasileira de Curitiba-PR, se insere no contexto exposto nos itens anteriores. Esse trecho é denominado de “rodovia-grande avenida” (CALIXTO *et al.*, 2003), por ser uma via de acesso à chegada, partida e passagem pela cidade e de acesso ao trabalho e moradias, uma vez que as áreas às margens do trecho supracitado transformaram-se em bairros com densas concentrações demográficas.

Em virtude do aumento na demanda do fluxo viário desse trecho, uma via de contorno à cidade foi construída e operacionalizada em setembro de 2002 (CALIXTO, 2002). O fluxo de veículos pesados em relação ao fluxo total de veículos no trecho decresceu significativamente em 13,53%, segundo dados levantados pelo Laboratório de Acústica Ambiental, Industrial e Conforto Acústico – LAAICA, da Universidade Federal do Paraná – UFPR (ZANNIN *et al.*, 2003). A Tabela 1, a seguir, mostra a situação do trecho em relação ao tráfego e às emissões

sonoras na região, respectivamente, antes e após a abertura do contorno supramencionado, dados estes obtidos entre os anos de 2001 e 2002.

Da observação da Tabela 1, pode-se verificar que o trecho no momento é um local poluído acusticamente, de acordo com a Lei Municipal vigente Nº 10625/2002 (PMC/SMMA, 2002), que rege as emissões sonoras na cidade, que fixa para o período diurno um valor limite de 65dB(A) para o nível equivalente de pressão sonora.

Com o objetivo de integrar a malha viária das zonas adjacentes ao trecho urbano da Rodovia Federal BR-476, o mesmo será transformado em um corredor viário, passando ao domínio público da esfera municipal. Neste projeto estão previstas as construções de estações coletoras e um sistema de metrô de superfície.

A presente pesquisa objetiva apresentar o prognóstico do impacto ambiental de implantação desta obra, em relação aos níveis sonoros equivalentes, por meio de simulações computacionais, bem como propor medidas mitigadoras para impactos negativos identificados.

## 2. MÉTODOS E MATERIAIS

Na primeira fase, procedeu-se a escolha da área objeto de estudo, trecho urbano norte da BR-476, com coleta em campo de suas características construtivas principais, necessárias à elaboração do mapa acústico da

região. A área selecionada para o estudo apresentou as seguintes características consideradas na simulação computacional: trecho plano em sua grande maioria no sentido longitudinal da via, isto é, sem bruscas variações de greide; rampa inferior a 5%; rodovia Classe I-A; região em sua grande maioria plana, às margens da via; pistas com três faixas, com 3,60m de largura; existência de via marginal de mão única em quase toda a extensão oeste; acostamento com largura de 1,50m; canteiro central com larguras de 0,50m

Tabela 1 – Fluxo de Veículos na BR-476 (antiga BR-116)

Ano (*)	Variáveis de Tráfego	Estabelecido (**)	Situação do Local
2001	Percentagem de veículos pesados em relação ao fluxo de veículos total [%] = 31,38 Nível equivalente médio de emissão sonora $Leq [dB(A)] = 73,10$ dB(A)	65,00dB(A)	Poluído acusticamente
2002	Percentagem de veículos pesados em relação ao fluxo de veículos total [%] = 17,85 Nível equivalente médio de emissão sonora $Leq [dB(A)] = 66,80$ dB(A)	65,00dB(A)	Poluído acusticamente

Fonte: dados coletados em 2001 e 2002 pelo LAAICA; PMC/SMMA, 2002.

\* Ano de correspondência dos dados. \*\* Nível equivalente de pressão sonora fixado para região em estudo, no período diurno, pela Lei Municipal Nº 10.625/2002, que rege as emissões sonoras na cidade de Curitiba-PR.

entre pistas principais, e 20m em relação à marginal; existência de sistema de drenagem eficiente em todo o trecho; pavimento considerado aceitável para o tráfego, com existência de mínimos defeitos estruturais; revestimento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ); existência de sinalização vertical e horizontal funcional e em boas condições; tráfego misto; zona de localização considerada mista, com predominância de estabelecimentos comerciais e com existência de edificações de uso especial, como, por exemplo, educacional e residências de médio a alto padrão; velocidade média fixada para o tráfego de 60km/h; velocidade média real verificada de 80km/h para veículos leves e 70km/h para veículos pesados; tráfego de veículos de transporte coletivo de regiões metropolitanas.

Dentro desta área, foi selecionado um local com presença de edificação para fins especiais, no caso uma edificação educacional, com a finalidade de se analisar uma situação de impacto imediato.

Após a escolha do local, na segunda fase foram elaborados os mapas acústicos da situações atual e de implantação e operacionalização da obra de readequação da rodovia, com consideração de todas as características da área, anteriormente citadas, utilizando um software de análise gráfica em SIG, que consiste na simulação da propagação sonora do ruído gerado pelo tráfego.

O processo de geração dos mapas acústicos se deu por intermédio da interpolação dos níveis sonoros, em função de sua propagação desde a fonte geradora até uma distância predeterminada, representados em escala de cores relacionada aos níveis de ruído.

Na entrada de dados da simulação de predição acústica, foi agregado um grande número de variáveis, como, por exemplo: 1) cálculo de fenômenos de propagação (difração etc.); 2) adoção de fatores de correção (efeitos do solo e áreas de atenuação); 3) tipo de fonte; e 4) características estruturais e de tráfego da via.

Para elaboração do mapa acústico da situação atual, foram medidos em campo os níveis equivalentes de pressão sonora e realizada a contagem de veículos. Os dados físicos da área foram adquiridos a partir de fotogrametria e avaliação local. Para elaboração do mapa acústico simulado da situação de implantação da obra,

foram medidos em campo os níveis sonoros equivalentes gerados pela movimentação e trabalho de dois tipos de equipamentos de terraplenagem mais comuns, a saber, uma motoniveladora modelo 12H *Standard Caterpillar* e uma retroescavadeira 580H *CASE*, ambas sobre rodas pneumáticas, com um nível equivalente de pressão sonora ( $L_{eq}$ ) em funcionamento de 91dB(A) e 92dB(A), respectivamente.

Na simulação da implantação das obras, considerou-se, também, a existência de “apito de sinalização”, o qual está acoplado aos equipamentos de terraplenagem e que gerou um  $L_{eq}$  de 90,20, dB(A) (Figura 1), avaliando o equipamento somente em operação de marcha a ré.

Considerou-se um fluxo de 780 veículos/hora, com uma percentagem de veículos pesados em relação ao total da frota de 8,5%, para ambas as situações de implantação e operacionalização da obra. A velocidade considerada tanto para veículos pesados quanto para veículos leves, durante a fase de implantação da obra, foi de 40km/h.

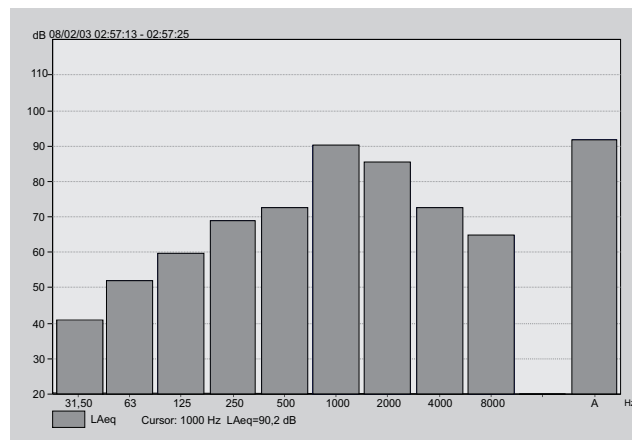


Figura 1 – Espectro de frequências do ruído gerado por uma motoniveladora com apito de sinalização. Nível equivalente de pressão sonora de 90,20dB(A) em 1.000Hz

Para elaboração do mapa acústico simulado da situação de operacionalização da obra, foi considerado o projeto básico para o Eixo Metropolitano da Rede Integrada de Transportes, que prevê: a priorização do transporte coletivo, com implantação de uma canaleta exclusiva para linhas expressas; vias laterais destinadas à circulação de veículos em geral, do tráfego entre diversos bairros de Curitiba e de municípios metropolitanos; vias locais para o acesso às atividades lindeiras; e implanta-

ção e remodelação de ciclovias e áreas verdes. Foram ainda considerados veículos de transporte coletivo com dupla e tripla articulações, com intervalos entre itinerários de três minutos.

Para determinação do impacto ambiental, foi realizada uma avaliação em função de atributos de impacto, ou seja, classificação das características qualitativas da atividade desenvolvida, a partir da observação dos mapas acústicos simulados.

A Tabela 1, a seguir, apresenta os atributos considerados.

**Tabela 1 – Atributos de Impacto Ambiental devido às emissões e imissões sonoras**

Atributo	Qualificação
Fase de ocorrência	Implantação (fase de obras) Operacionalização
Área de abrangência	Local Regional
Natureza	Positiva Negativa
Ordem	Primeira ordem (origem direta) Segunda ordem (origem indireta)
Probabilidade de ocorrência	Incerta Certa
Início	A curto e médio prazos A longo prazo Imediato
Duração	Temporária Permanente
Importância	Pequena Média Grande
Possibilidade de reversão	Reversível Irreversível
Sinergia com outros impactos*	Existente Inexistente

\* Especificar quando "existente"

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os mapas acústicos gerados por meio da simulação computacional para as situações atual, de implantação e operacionalização. Os mapas são apresentados em forma sequencial, precedidos

de informações sobre características principais identificadas, sendo a classificação acerca da poluição sonora formulada para uma área mista de aproximadamente 20km<sup>2</sup>, em função da Lei Municipal Nº 10.625/2002 e da Norma Brasileira de Conforto Acústico NBR-10151/2000, da seguinte forma em termos de percentagem aceitável:

- de 0% a 20% – claramente poluído;
- de 21% a 50% – parcialmente poluído;
- de 51% a 70% – meramente poluído;
- de 71% a 100% – ideal.

Ao final é apresentada a matriz de impacto ambiental da área em estudo.

#### 3.1. Situação atual

Níveis sonoros nas imediações das pistas de 74-76 dB(A). Existência de zonas concentradas ao longo da via na faixa de 76-78 dB(A), devido à redução do canteiro central entre vias principais. Existência de uma zona potencializada entre as faixas principais da via de 72-74 dB(A), em virtude da existência de talude sem recobrimento dividindo estas faixas. Níveis nas fachadas das edificações à margem da via na faixa de 66-68 dB(A), imissões em fachadas de edificações mais distantes na faixa de 62-64 dB(A). Existência de um estabelecimento educacional com imissão em sua fachada principal na faixa de 66-68 dB(A) (Figura 2, a seguir).

O trecho não atende em sua grande maioria às prerrogativas normativas e legislativas para o período diurno

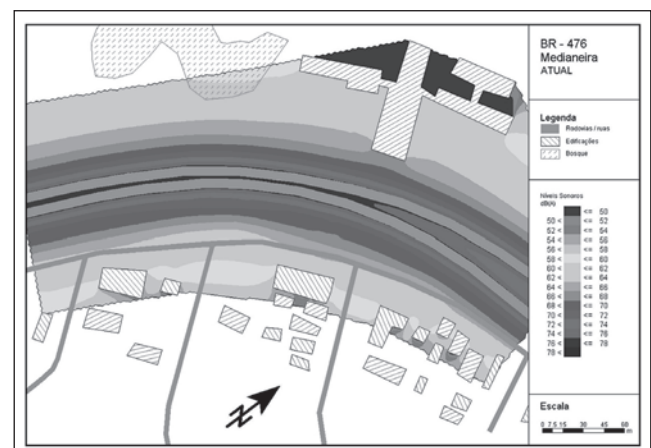


Figura 2 – Mapa acústico da BR-476 para a situação atual, circunvizinhanças do estabelecimento educacional

(Tabela 2, a seguir). Os níveis sonoros da situação atual já se encontram acima do  $L_{eq}$  máximo permitido de 65dB(A), valor este citado por Maschke (1999) como o limiar de conforto acústico para a medicina preventiva.

### 3.2. Fase de implantação (obras)

Níveis sonoros nas imediações dos pontos que representam os equipamentos de terraplenagem (motoniveladoras e retroescavadeiras) da ordem de 90,5dB(A) a 94dB(A), sendo uma zona concentrada. No canteiro de obras, os níveis sonoros irão variar de 76,5dB(A) a 94dB(A). Níveis nas fachadas das edificações à margem da via na faixa de 73-76,5dB(A), imissões em fachadas de edificações mais distantes na faixa de 66-73dB(A). Existência de um estabelecimento educacional com imissão em sua fachada frontal na faixa de 73-76,5dB(A) (Figura 3).

O trecho não atende em sua grande maioria às prerrogativas normativas e legislativas para o período diurno (Tabela 3).

A estes níveis, problemas de ordem psicológica e fisiológica podem ser desencadeados pela exposição contínua a níveis elevados de ruído segundo Maschke (1999) e Belojevic *et al.* (1997).

### 3.3. Fase de operacionalização

Para esta fase serão considerados somente os valores limites para áreas com edificação de uso especial, pois, após a implantação do projeto, a área deixará de ser um

trecho urbano de rodovia e passará a ser uma via municipal, enquadrando-se apenas como ZE-E na área em estudo, conforme a legislação municipal de Curitiba vigente.

Níveis sonoros contínuos nas imediações da via na faixa de 72-74dB(A). Níveis nas fachadas das edificações à margem da via na faixa de 68-70dB(A), imissões em fachadas de edificações mais distantes na faixa de 62-64dB(A). Existência de um estabelecimento educacional com imissão em sua fachada frontal na faixa de 68-70dB(A) (Figura 4).

O trecho não atende às prerrogativas normativas e legislativas para o período diurno (Tabela 4, a seguir).

A operacionalização do projeto de readequação irá potencializar o quadro de poluição sonora existente.

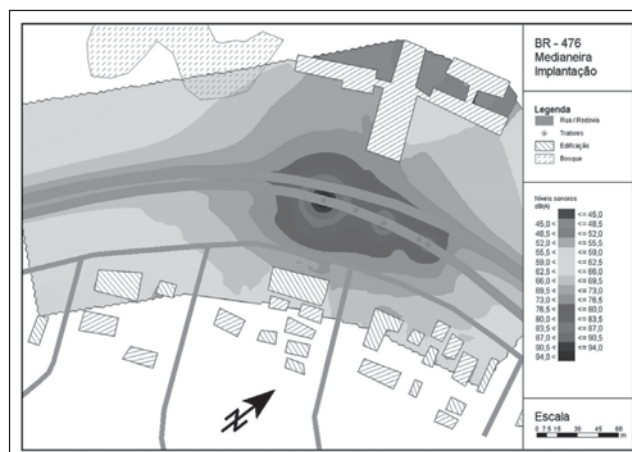


Figura 3 – Simulação da fase de implantação das obras do projeto de readequação, serviços de terraplenagem, circunvizinhanças do estabelecimento educacional

Tabela 2 – Comparação com valores limites, situação atual, diurno

Prerrogativa	Período	Valor Limite [dB(A)]	% atendida	Situação Acústica
Lei Nº 10625 (SE-BR-476)	Diurno	65	16	Claramente poluído
Lei Nº 10625 (ZE-E)	Diurno	60	0	Claramente poluído
NBR-10151 (zona mista)	Diurno	65	16	Claramente poluído
NBR-10151 (com edificação especial)	Diurno	55	0	Claramente poluído

Tabela 3 – Comparação com valores limites, fase de implantação, diurno

Prerrogativa	Período	Valor Limite [dB(A)]	% atendida	Situação Acústica
Lei Nº 10625 (SE-BR-476)	Diurno	65	13	Claramente poluído
Lei Nº 10625 (ZE-E)	Diurno	60	0	Claramente poluído
NBR-10151 (zona mista)	Diurno	65	13	Claramente poluído
NBR-10151 (com edificação especial)	Diurno	55	0	Claramente poluído

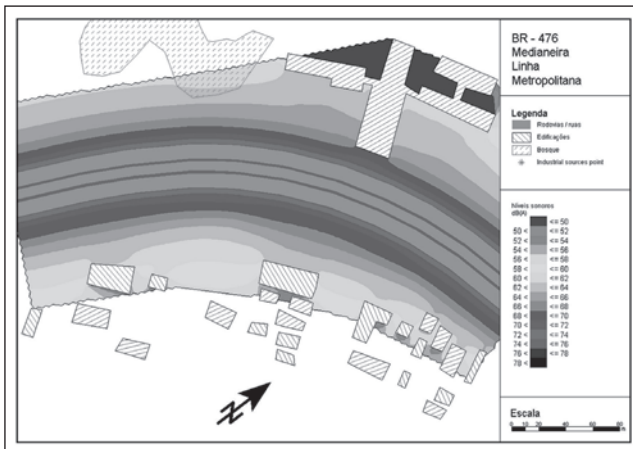


Figura 4 – Simulação da fase de operacionalização do projeto de readequação, circunvizinhanças do estabelecimento educacional

Tabela 4 – Comparação com valores limites, fase de implantação, diurno

Prerrogativa	Período	Valor Limite [dB(A)]	% atendida	Situação Acústica
Lei Nº 10625 (ZE-E)	Diurno	60	0	Claramente poluído
NBR-10151 (com edificação especial)	Diurno	55	0	Claramente poluído

### 3.4. Matriz de Impacto Ambiental

As Tabelas 5 e 6, a seguir, apresentam a Matriz de Impacto Ambiental, correspondente às situações de implantação e operacionalização do projeto de readequação, em função dos níveis sonoros equivalentes encontrados.

## 4. CONCLUSÕES

A implantação do projeto de readequação, bem como a sua operacionalização, irá potencializar o qua-

dro de poluição sonora existente, implicando impacto ambiental sonoro negativo de caráter local com sinergia com impactos de outras ordens.

A ordem desse impacto em termos de aumento de nível sonoro é em média de 48%, o que representa quase dobrar o número de fontes sonoras no local, de acordo com as leis da acústica. Portanto, a população que vive ou trabalha ao longo desta via estará submetida a uma condição insalubre.

Logo, para uma região que já apresenta níveis sonoros superiores aos limites normativos e legislados estabelecidos, este aumento é considerado de atenção, implicando adoção de medidas mitigadoras imediatas, que

deverão ser definidas ainda na fase de projeto.

Em adição, se concluiu que: a funcionalidade estrutural e operacional de um projeto de readequação viária

somente será alcançada se este projeto englobar também a sua funcionalidade ambiental; intervenções indiretas, como a construção de vias alternativas que absorvam parte da demanda viária da via que está saturada, mesmo causando redução nos níveis de poluição sonora desta, são apenas medidas compensatórias, pois transpõem parte do problema para outro projeto.

Existem várias medidas de caráter preventivo, corretivo e preditivo que podem ser utilizadas no controle da

Tabela 5 – Matriz de Impacto para a situação de Implantação

Atributo	Qualificação
Fase de ocorrência	Implantação
Área de abrangência	Local
Natureza	Negativa
Ordem	Primeira ordem
Probabilidade de ocorrência	Certa
Início	Imediato
Duração	Temporária
Importância	Grande
Possibilidade de reversão	Reversível
Sinergia com outros impactos	Aumento da poluição do ar local devido ao aumento da emissão de poeira não metálica, poeira contendo metais e gases

Tabela 6 – Matriz de Impacto para a situação de Operacionalização

Atributo	Qualificação
Fase de ocorrência	Operacionalização
Área de abrangência	Local
Natureza	Negativa
Ordem	Primeira ordem
Probabilidade de ocorrência	Certa
Início	Em curto prazo
Duração	Permanente
Importância	Grande
Possibilidade de reversão	Reversível
Sinergia com outros impactos	<p>Aumento da poluição do ar local devido ao aumento da emissão de poeira não metálica, poeira contendo metais e gases pelo tráfego constante de veículos.</p> <p>Aumento da poluição térmica por causa do aumento da sensação térmica, provocada pela poluição do ar e redução de área permeável.</p> <p>Impacto econômico, com possível desvalorização imobiliária de residências de médio e alto padrão.</p>

emissão de ruídos, sendo a sua escolha função da eficiência, do fator econômico e da aceitação da população.

Essas medidas de controle de ruídos de tráfego poderão ocorrer de duas formas:

1) redução da fonte de ruído, por intermédio do controle da emissão sonora veicular, uso de pavimentos com baixa rugosidade e absorventes, controle da velocidade do tráfego, manutenção do pavimento ex-

cutado, controle da qualidade da frota de veículos particulares e públicos;

2) limitação da transmissão sonora por meios naturais, utilizando as condições topográficas e vegetação existente, ou por meios artificiais, como, por exemplo, o uso de barreiras acústicas com materiais absorventes, uma vez que a propagação sonora na via operacionalizada terá característica progressiva contínua.

## 5. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR-10.151: Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o Conforto da Comunidade. Rio de Janeiro: 2000.
- BELOJEVIC, G.; JACOVLEVIC, B; ALESKSC, O. Subjective Reaction for Traffic Noise with Regard to some Personality Traits. *Environmental International*, Yugoslavia, v. 23, n. 2, p. 221-226, 1997.
- BERGLUND, B.; LINDVALL, T.; SCHWELA, D. H. *Guidelines for Community Noise*. World Health Organization – WHO. Geneva, p. 1-21, 1999.
- CALIXTO, A. *O Ruído gerado pelo Tráfego de Veículos em “Rodovias-Grandes Avenidas”, situadas dentro do perímetro urbano de Curitiba, analisados sobre parâmetros acústicos objetivos e seu impacto ambiental*, Curitiba: 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, 125 p.
- CALIXTO, A.; DINIZ, F. B.; ZANNIN, P. H. T. Modelamento matemático da emissão sonora em rodovias federais que adentram áreas urbanas. *Revista de Acustica*, Brazil, v. 34, n. 1 e 2, p. 22-30, 2003.
- CARVALHO, C. G. *Introdução ao Direito Ambiental*. 2 ed., São Paulo: Editora Letras e Letras, 320 p., 1999.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. *Resolução No. 001 de 17 de fevereiro de 1986: Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA*. Brasília: 1986.
- DANTAS, G. H. G. *Manual de Pavimentação*. 2 ed. Rio de Janeiro: DNER, 320 p., 1996.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION/USA – FHWA. *Measurement of Highway – Related Noise (1996), Highway Traffic Noise Prediction Vehicle emission Levels (1999)*. Disponível em: <[http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/mem\\_nois.htm/](http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/mem_nois.htm/)> Acesso em: 14 abr 2004.
- GOLEBIEWSKI, R.; MAKAREWICK, R.; NOWAK, M.; PREIS, A. Traffic Noise Reduction due the porous Road Surface. *Applied Acoustics*, Poland, v. 64, p. 481-494, 2003.
- HARRIS, C. M. *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1646 p., 1998.

- LAKE, I. R.; LOVETT, A. A.; BATEMAN, I. J.; LANGFORD, I. H. Modelling Environmental influences on property prices in an urban environment. *Comput. Environ. And Urban System*, UK, v. 22, p. 121-136, 1998.
- MASCHKE, C. Preventive Medical Limits for Chronic Traffic Noise Exposure. *Acustica*, Germany, v. 85, p. 448-461, 1999.
- PAZ, E. C. *Estudo de um Modelo de Avaliação e Predição para o Ruído de Tráfego*, Curitiba: 2004. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, 417 p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA – PMC, SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE – SMMA. *Lei Nº 10625, de 19 de Fevereiro de 2002: Dispõe sobre ruídos urbanos, proteção do bem-estar e do sossego público e dá outras providências*. Curitiba: 2002.
- RAMALINGESWARA RAO, P.; SESHAGIRI RAO, M. G. Community Reaction to Road Traffic Noise. *Applied Acoustics*, Indian, v. 37, p. 51-54, 1992.
- ROBINSON, D. W. Towards a unified system of noise assessment. *Journal of Sound and Vibration*, UK, v. 14, n. 3, p. 279-298, 1971.
- SCHULTZ, T. J. *Community Noise Rating*. 2 ed. New York: Elsevier Applied Science, 415 p., 1972.
- SORDIA, D. S. R.; DÍAZ, V. I. P. Criterios de Salud en la Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos de Desarrollo. In: Higiene y Epidemiología. *Revista Cubana*, Cuba, v. 37, p. 15-18, 1999.
- TAYLOR, S. M.; BRESTON, B. E.; HALL, F. L. The effect of road traffic noise on house prices. *Journal of Sound and Vibration*, Canadian, v. 80, n. 4, p. 523-541, 1982.
- ZANNIN, P. H. T. et al. Environmental Noise Pollution in the city of Curitiba, Brazil. *Applied Acoustics*, Brazil, v. 63, p. 351-358, 2002.
- ZANNIN, P. H. T.; DINIZ, F. B.; FERREIRA, J. A. C. *Avaliação acústica da reurbanização da BR 116 - Eixo Metropolitano da Cidade de Curitiba*. Relatório Técnico, LAAICA/ UFPR, Brasil, p. 1-33, 2003.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO (UK). *Résumé d’Orientation des Directives de l’OMS Relatives au Bruit dans l’Environmental*. Disponível em: <<http://www.who.int/home.page/>> Acesso em: 05 abr 2003.
- WTEZEL, E.; NICOLAS, J.; ANDRE, P.; BOREAUX, J. J. Modelling the Propagation Pathway of Street Traffic Noise: practical comparasion of German Guideelines and Real World Measurements. *Applied Acoustics*, Germany, v. 57, p. 97-107, 1999.

.....

## 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)



Sobre a matéria da Linha Verde em Belo Horizonte, a Revista poderia ter abordado também a questão do impacto ambiental. Não resta dúvida da importância de uma obra deste vulto para uma metrópole brasileira em tempos que se torna cada vez mais difícil trafegar nas vias, no entanto, é preciso pensar nos estragos ambientais ou se foram feitas devidamente as ações que amortecem os impactos no meio ambiente.

*Diogo Minauta Gomes – Montes Claros, MG*

Muito oportuna a matéria do corredor viário de Belo Horizonte. A Linha Verde é um sinal de progresso. Mas ainda não é o bastante. A capital dos mineiros precisa se preparar para sediar os jogos da Copa do Mundo de 2014, e certamente terá de fazer outro corredor viário de grande porte ligando o centro da cidade à Pampulha. Mais um desafio.

*Evânio José Marques Jr – Belo Horizonte, MG*

O Rio de Janeiro também tem uma obra rodoviária importante sendo projetada, como a Linha Verde de BH, é o Anel Rodoviário. Gostaria de saber mais sobre este projeto. Fica, portanto, a sugestão de matéria.

*Daniel Alves dos Santos, Rio de Janeiro, RJ*

**Nota da Redação:** O Anel Rodoviário do Rio de Janeiro já está em pauta na Revista.

# Novo critério de dimensionamento de pavimentos de concreto simples para as cargas ambientais e do tráfego

**Marcos P. Rodolfo**

Engenheiro Civil, ME  
eng.mprodolfo@gmail.com

**José T. Balbo**

Engenheiro Civil, DE, Professor Livre Docente  
jotbalbo@usp.br

## RESUMO

Desde os primeiros estudos realizados por Westergaard, na década de 1920, sabe-se que as tensões causadas por gradientes térmicos em placas de concreto aplicadas em pavimentação podem, em muito, superar os esforços resultantes apenas das cargas de roda. Pesquisas recentes desenvolvidas em São Paulo mensuraram, por anos, a magnitude dos gradientes térmicos em meio ambiente tropical. Os gradientes térmicos observados nesse estudo se mostraram bastante superiores e, por consequência, mais danosos do que aqueles encontrados em climas temperados. Tem-se, ainda, o hábito de os engenheiros brasileiros aplicarem, indiscriminadamente, métodos desenvolvidos para situações ambientais distintas daquelas encontradas no Brasil, como é o caso do método empírico (observacional-estatístico) da AASHTO. Motivados por essas razões, os autores desenvolveram modelos para o cálculo de tensões em pavimentos de concreto simples (placas) geradas por cargas de roda e decorrentes dos gradientes térmicos. Tais equações foram desenvolvidas a partir de simulações realizadas no modelo de elementos finitos ILSL2 da

Universidade de Illinois e utilizando-se valores reais de gradientes térmicos medidos na pista experimental localizada na cidade de São Paulo e sob responsabilidade do LMP/USP. Os modelos desenvolvidos neste trabalho foram comparados com outros modelos: as equações do método de projeto oficial da Prefeitura do Município de São Paulo (IP-07) e a rede neural inserida no novo método de dimensionamento empírico-mecanicista do NHRCP, dos EUA. Desta maneira, os autores propõem modelos que consideram adequadamente os efeitos dos gradientes térmicos tropicais observados em pavimentos de concreto simples. A acurácia e a simplicidade dos modelos, apresentados na forma de equações únicas para cada um dos tipos de estruturas estudadas, permitirão, no futuro, a inclusão de variáveis econômicas no dimensionamento de pavimentos em concreto simples e a rápida busca na melhor alternativa de projeto em termos de custo-benefício.

## PALAVRAS-CHAVE

Pavimentos de concreto, método dos elementos finitos, diferenciais térmicos, meio ambiente tropical, dimensionamento

## 1. OS GRADIENTES TÉRMICOS EM CONDIÇÕES TROPICAIS

Hall (2000) alertava que, tradicionalmente, efeitos climáticos como empenamentos térmicos ou gradientes

higrométricos não são considerados de modo explícito no dimensionamento da espessura dos pavimentos em concreto e recomendava que, no futuro, tais questões fossem consideradas. Estas necessidades foram contempladas pelo Guia de Projetos Empírico-Mecanicista da ASSHTO (2002),

após décadas de coleta de dados em centenas de seções experimentais em rodovias federais e estaduais inseridas no *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP). O novo modelo de projeto, por meio do *Enhanced Integrated Climate Model* (EICM), é capaz de prever os diferenciais térmicos não lineares em placas de concreto para qualquer horário do dia e estação climática, com base de quarto de hora.

De acordo com Westergaard (1927), em pavimentos de concreto simples (placas não armadas), os efeitos da temperatura são usualmente relacionados a mudanças no volume do concreto de cimento Portland (CCP). Posto que a temperatura observada no interior da placa não é homogênea ao longo de sua espessura, este gradiente faz com que o material se expanda ou se contraia de modo heterogêneo. Huang (1993) esclarece que, durante o dia, quando a temperatura do topo ( $T_t$ ) da placa é superior à temperatura de seu fundo ( $T_f$ ), o material presente no topo tende a expandir-se, enquanto o material de fundo tende a se contrair, se referido à linha neutra. A placa, então, assumiria uma curvatura convexa (Figura 1). Esse movimento vertical, ou deslocamento, resultante de expansões e contrações do concreto, é restringido pelo peso próprio da placa e pelo atrito

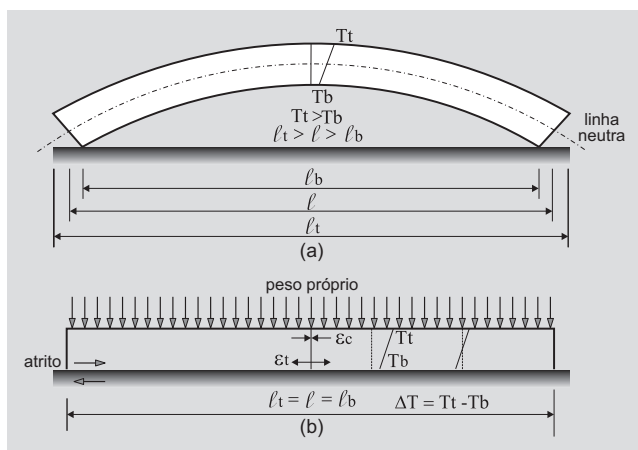


Figura 1 – Efeitos do gradiente térmico positivo (extraído de: RODOLFO e BALBO, 2002).

entre a placa e a base do pavimento. Tais restrições, resistentes ao empenamento natural da placa de concreto sob condições de gradiente térmico não nulo, impõem esforços de tração em seu fundo e tensões de compressão em seu topo. Em condições quando no topo a temperatura é menor que no fundo, causariam o oposto. Contudo, em zona tro-

pical, empenamentos positivos são encontrados com frequência em períodos noturnos (BALBO e SEVERI, 2002).

Balbo e Severi (2002) publicaram seus estudos sobre variações sazonais de temperatura em pavimentos de concreto simples em meio ambiente tropical, com base em dados coletados na pista de testes do Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Universidade de São Paulo (LMP-USP), localizada na cidade de São Paulo (latitude  $23^{\circ}33'S$  – SAD 69). Os pesquisadores concluíram que gradientes térmicos noturnos não são significantes em valores absolutos e que os gradientes positivos diurnos apresentaram valores expressivamente maiores que aqueles observados em nove estudos sistemáticos realizados entre 1922 e 1994 em climas temperados (EUA, França e Chile). A frequência de observação dos gradientes diurnos também foi outro ponto de atenção: 89% no verão (gradiente térmico médio de  $0,064^{\circ}C/mm$ ), 62% no outono (gradiente térmico médio de  $0,043^{\circ}C/mm$ ), 65% no inverno (gradiente térmico médio de  $0,045^{\circ}C/mm$ ) e 76% na primavera (gradiente térmico médio de  $0,080^{\circ}C/mm$ ). O gradiente térmico máximo medido foi de  $0,1^{\circ}C/mm$ , ao menos 30% superior ao valor recomendado por Huang (1993) para projetos de pavimentos de concreto simples. Pesquisas desenvolvidas por Armaghani *et al.* (1987) em seções de testes do *Florida Department of Transportation* em Gainesville (latitude  $29^{\circ}39'N$ ) concluíram que o gradiente térmico positivo máximo observado foi de  $0,057^{\circ}C/mm$ , 43% menor que os resultados obtidos na pista de testes do LMP-USP. Comparações apresentadas por Balbo e Severi (2002) com o modelo de previsão de gradientes térmicos positivos (diurnos) da AASTHO (1998) mostraram claramente valores subdimensionados quando se aplica tais modelos para as condições climáticas prevalecente em zonas intertropicais, consequência de se tratarem de modelos puramente empírico-estatísticos, oferecendo, portanto, modelos adequados apenas à realidade e ao contexto local onde foram desenvolvidos; os modelos de Balbo e Severi (2002) foram inseridos, de modo simplificado, no método de projeto de pavimentos de concreto simples da Prefeitura do Município de São Paulo (2004).

## 2. A MODELAGEM DE TENSÕES EM PLACAS POR ELEMENTOS FINITOS

Rodolfo e Balbo (2002) propuseram modelos de cálculo de tensões críticas em placas de concreto baseados

no método dos elementos finitos, obtidos por simulações do programa ILSL2 (KHAZANOVICH e IONNIDES, 1993). A comparação de tais modelos, aplicados a casos típicos de dimensionamento, mostrou claramente que, quando não se considera a temperatura atuante em placas (o que lamentavelmente é corriqueiro em muitos projetos no Brasil, embora não por meio de norma oficial de agência de governo), as tensões calculadas são muito próximas, quando não idênticas, ao método recomendado pela indústria de cimento dos EUA, conhecido como método da PCA-1984. O motivo de tal semelhança é facilmente compreendido por engenheiros experimentados em análises por elementos finitos, pois programas de análises diferentes, quando aplicados a estudos com os mesmos parâmetros, mesmos carregamentos e mesmas malhas de elementos finitos, de fato resultam respostas bastante semelhantes. Contudo, os autores evidenciaram que, quando o carregamento ambiental (gradiente térmico) é imposto ao problema, as tensões aumentam drasticamente. A exigência da consideração de tais efeitos climáticos em pavimentos de concreto simples e armados é detalhadamente descrita em termos de modelo físico por Balbo (2007); Ioannides *et al.* (1985) expõem os possíveis caminhos (analíticos, experimentais, redes neurais) para a determinação de tensões em placas de concreto relacionadas aos gradientes térmicos. No presente artigo, os autores formulam modelos alternativos e mais refinados, tanto numérica quanto estatisticamente, comparando-os com outros dois modelos oficiais de projeto, no que tange ao cálculo de tensões: o modelo da PMSP (2004), que é norma oficial no Brasil, e o modelo do NCHRP (2003), que é norma oficial nos EUA.

## 2.1 O programa de elementos finitos ILSL2

Neste trabalho, os autores utilizaram o programa ILSL2, um software baseado no modelo ILLI-SLAB. ILLI-SLAB é um modelo de elementos finitos desenvolvido na Universidade de Illinois no final da década de 1970, que ao longo dos anos foi recebendo incorporações e melhorias nos modelos constitutivos de placas, barras de transferência de cargas, modelos para subleitos etc. Esse software permite a análise de placas aderidas e não aderidas e o uso de barras de transferência ou intertravamento dos agregados como elementos de transferência de cargas.

A versão original do ILLI-SLAB, publicada em 1978, não permitia a consideração de gradientes térmicos. Diversos pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento contínuo do modelo, entre eles Khazanovich (1994) que incorporou a análise de gradientes térmicos não lineares e perda de suporte, entre outras, sendo esta versão chamada de ILSL2 (KHAZANOVICH e IOANNIDES, 1993). Há versão comercial para tal software, com interface gráfica, denominada ISLAB2005.

Cervo *et al.* (2005) publicaram um estudo que compara tensões previstas pelo ILSL2 com aquelas medidas em dois experimentos de campo conduzidos entre 1999 e 2004 no LMP-EPUSP. A pista I encontra-se no campus da Universidade de São Paulo, na cidade de São Paulo, sendo composta por placas de 3,50 x 5,50m com 150 e 250mm de espessura, apoiadas em base granular com 100mm ou sobre bases de concreto compactado com rolo de espessuras de 100 e 200mm, sobre subleito argiloso (BALBO e SEVERI, 2002). A pista II, localizada na Rodovia SP-79 no acesso da Fábrica de Cimento Santa Helena da Votorantim, cerca de 100km da capital paulista, foi construída com placas de 23mm de espessura, dimensões planas de 3,60 x 5,0m, sobre base de concreto compactado com rolo de 10mm de espessura plenamente aderida à placa (pavimento composto). Ambas as pistas foram instrumentadas com *strain-gages* e termorresistores. Provas de carga dinâmicas foram executadas e seus resultados foram comparados com aqueles previstos pelo ILSL2. Os pesquisadores, então, concluíram que um fator de 85% deveria ser aplicado sobre as tensões calculadas pelo método dos elementos finitos, de modo a corrigir as tensões calculadas numericamente (BALBO *et al.*, 2004; CERVO *et al.*, 2005). Valores de tensões superiores àqueles extraídos de deformações medidas em pista são corriqueiros na literatura, sejam calculados por meio de modelos analíticos (TELLER e SUTERLAND, 1943) ou por modelos numéricos (BURNHAM, 2005).

## 2.2. Modelagem numérica de tensões causadas por cargas rodoviárias e gradientes térmicos

Dois tipos de pavimentos de concreto foram modelados. O primeiro grupo de estruturas era constituído de placas de concreto simples com barras de transferência

de carga em juntas transversais e barras de ligação em juntas longitudinais, conforme padrões construtivos comuns, apoiados sobre bases cimentadas não aderidas (Figura 2); o segundo grupo se diferenciava apenas por se apoiarem sobre bases granulares.

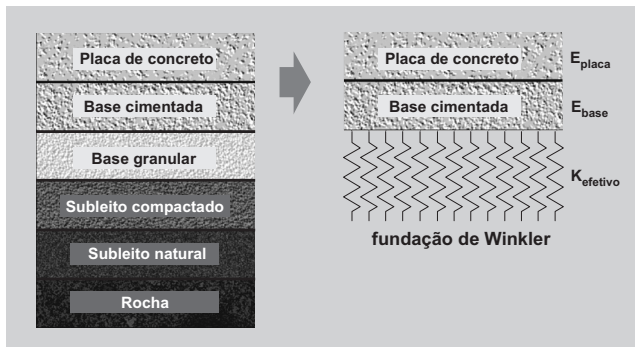


Figura 2 – Representação simplificada de um pavimento em modelos de elementos finitos (adaptado de NCHRP, 2003)

Para os casos com camadas granulares, estas foram consideradas como parte de uma fundação de Winkler, representada pelo módulo de reação do subleito (efetivo). A carga de um eixo simples de rodas duplas de 80kN foi aplicada na borda longitudinal da placa de concreto (Figura 3), a posição crítica de carga como demonstrada por Huang e Wang (1973) quando as barras de transferência de cargas estão presentes em juntas transversais,

e também adotada pelo método de projeto oficial nos EUA (NCHRP, 2003). Outros parâmetros utilizados nas simulações por MEF são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Os modelos simulados no ILSL2 foram compostos por três placas (Figura 3). Foram aplicados conceitos de simetria, e, desta maneira, apenas metade da estrutura foi modelada, utilizando-se metade da carga. A placa carregada foi dividida em 11 elementos ao longo de seu comprimento e 25 elementos ao longo de sua largura, totalizando uma malha com 275 elementos na placa central. Tensões principais típicas no fundo da placa são representadas na Figura 4. Para este caso, as características do pavimento eram as seguintes: espessura da placa de 0,25m; espessura da base em CCR de 0,15m e módulo da base de 15 GPa; módulo de reação do subleito de 30MPa/m; diferencial térmico linear de 10 °C.

De modo a avaliar os erros inerentes à malha, a tensão principal máxima obtida por esta malha de 275 elementos (2,8978MPa) foi comparada com a tensão obtida em outra malha, de 27 x 58 elementos (1.566 elementos), cuja resposta do ILSL2 foi de 2,8668MPa. Assumindo-se que esta malha de 1.566 elementos é a mais próxima à solução real, o erro interno do modelo de elementos finitos foi de apenas 1,1%. Esse erro de pequena magnitude trouxe a certeza de que os erros inerentes à malha estavam sob controle na modelagem oferecida. Combinando-se,

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na modelagem de pavimentos de concreto com bases não aderidas

Variável	Valores adotados
Espessura da placa	de 0,15m a 0,35m
Módulo de elasticidade do concreto	30GPa
Espessura da base cimentada	de 0,10m a 0,30m
Módulo de elasticidade da base em CCR	de 10GPa a 30 GPa
Módulo de reação do subleito	de 30MPa/m a 130MPa/m
Diferencial térmico entre topo e fundo da placa (linear)	de 0°C a 25°C

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na modelagem de pavimentos de concreto com bases granulares

Variável	Valores adotados
Espessura da placa	de 0,15m a 0,35m
Módulo de elasticidade do concreto	30 GPa
Módulo de reação do subleito	de 20MPa/m a 140MPa/m
Diferencial térmico entre topo e fundo da placa (linear)	de 0°C a 25°C

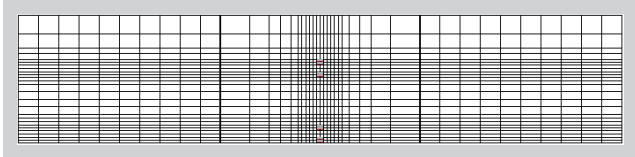


Figura 3 – Malha de elementos finitos e configuração da carga de roda

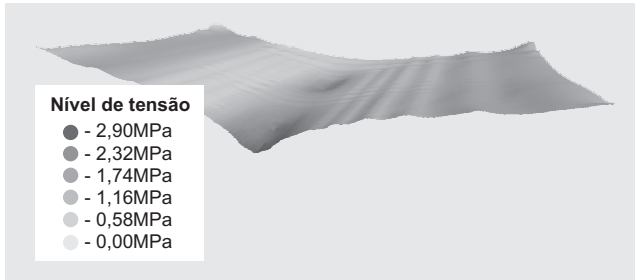


Figura 4 – Distribuição típica das tensões no fundo da placa de concreto carregada

logo, as variáveis anteriormente apresentadas, foram modeladas 4.950 estruturas de pavimentos com bases cimentadas e 330 estruturas com bases granulares. As tensões principais variaram entre 0,48MPa (para diferencial térmico nulo e sistema de suporte mais rígido) a 7,47MPa (placas esbeltas, sistemas de suporte mais elásticos e elevados diferenciais térmicos) para pavimentos com bases cimentadas não aderidas. Valores similares foram encontrados em pavimentos com bases granulares: de 0,83MPa (placas espessas, sistema de suporte rígido e ausência de diferenciais térmicos) a 7,91MPa (placas esbeltas, elevados diferenciais térmicos e sistema de suporte flexível).

### 3. A MODELAGEM ESTATÍSTICA

A análise estatística dos resultados obtidos a partir do ILSL2 focou a busca de equações para cálculo das tensões principais que pudessem representar o modelo de elementos finitos de maneira fidedigna. Os autores a iniciaram com a proposição de que as tensões poderiam ser calculadas como função da tensão encontrada na ausência de gradiente térmico multiplicada por um fator que fosse dependente do gradiente térmico, conforme o modelo funcional a seguir:

$$\sigma = \sigma(h_1, h_2, E_2, k, \Delta T=0) \times \text{Fator}(h_1, h_2, E_2, k, \Delta T) \quad [1]$$

onde  $\sigma$  é a tensão principal (em MPa) de tração na flexão no fundo da placa de concreto (ou da base cimentada),

$h_1$  é a espessura da placa de concreto (em metros),  $h_2$  é a espessura da base em CCR (em metros),  $E_2$  é o módulo de elasticidade do material da base (em GPa),  $k$  é o módulo de reação do subleito (em MPa/m) incluídas possíveis camadas granulares e  $\Delta T$  é o diferencial térmico (em °C). Dessa maneira, as tensões causadas exclusivamente pelas cargas de roda e pelo peso próprio da estrutura foram modeladas, tanto por regressões múltiplas (estruturas com base em CCR) quanto por regressões simples (estruturas com bases granulares). Então, regressões múltiplas foram realizadas de modo a determinar o melhor modelo para o fator dependente do gradiente térmico. Por fim, os modelos foram analisados para que as estatísticas de regressão pudessem ser determinadas.

#### 3.1. Modelo para pavimentos de concreto simples com bases em CCR não aderidas

Ao longo da análise desse grupo de estruturas, a espessura da placa ( $h_1$ ) foi separada das demais variáveis. Ao comparar as respostas do ILSL2 para estruturas cujas espessuras das placas eram constantes, observou-se que as tensões comportavam-se como funções quadráticas (parábolas). A variável que rege esse comportamento é uma nova variável, que engloba as características da base em CCR e do subleito – o raio de rigidez da base em CCR ( $\ell$ ) – dado pela Equação 2 abaixo:

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{E_2 \cdot h_2^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} \quad [2]$$

Com essa transformação, a Equação 3 para o cálculo de tensões foi desenvolvida na seguinte forma quadrática e dependente do diferencial térmico:

$$\sigma = \left[ \begin{array}{l} (C_1 \cdot \ell^4 + C_2 \cdot \ell^2 + C_3) \cdot h_1^2 + \\ (C_4 \cdot \ell^4 + C_5 \cdot \ell^2 + C_6) \cdot h_1 + \\ (C_7 \cdot \ell^4 + C_8 \cdot \ell^2 + C_9) \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{l} (C_{10} \cdot \ell^4 + C_{11} \cdot \ell^2 + C_{12}) \cdot \Delta T \cdot h_1^2 + \\ (C_{13} \cdot \ell^4 + C_{14} \cdot \ell^2 + C_{15}) \cdot \Delta T \cdot h_1 + \\ (C_{16} \cdot \ell^4 + C_{17} \cdot \ell^2 + C_{18}) \cdot \Delta T + 1 \end{array} \right] \quad [3]$$

Os coeficientes de regressão  $C_i$  da Equação 3 acima ( $C_1$  a  $C_{18}$ ) são funções do módulo de reação do subleito ( $k$ ) e são calculadas a partir da Equação 4 a seguir descrita. Os coeficientes  $C_{i,1}$ ,  $C_{i,2}$  e  $C_{i,3}$  são apresentados na Tabela 3.

$$C_i = C_{i,1} \cdot k^2 + C_{i,2} \cdot k + C_{i,3} \quad [4]$$

Tabela 3 – Coeficientes de regressão  $C_i$  (Equação 3) e  $C_{i,1}$ ,  $C_{i,2}$  e  $C_{i,3}$  (Equação 4)

Coeficiente	$C_{i,1}$	$C_{i,2}$	$C_{i,3}$	Coeficiente	$C_{i,1}$	$C_{i,2}$	$C_{i,3}$
$C_1$	-0,00250	2,2170	13,585	$C_{10}$	4,4E-05	0,03350	-0,16200
$C_2$	0,00542	-1,9210	-121,440	$C_{11}$	-7,0E-05	0,02850	0,60900
$C_3$	0,00111	-0,3560	89,900	$C_{12}$	3,8E-05	-0,00610	-1,28700
$C_4$	0,00151	-1,3210	-7,929	$C_{13}$	-3,0E-05	-0,02810	0,18730
$C_5$	-0,00340	1,2023	75,210	$C_{14}$	3,3E-05	-0,01570	-0,40560
$C_6$	-0,00080	0,2470	-61,860	$C_{15}$	-3,0E-05	0,00845	0,67520
$C_7$	-0,00020	0,1916	1,123	$C_{16}$	6,8E-06	0,00675	-0,04650
$C_8$	0,00053	-0,1886	-11,730	$C_{17}$	-3,0E-06	0,00222	0,06294
$C_9$	0,00016	-0,0492	12,010	$C_{18}$	2,8E-06	-0,00080	-0,04510

### 3.2. Modelo para pavimentos de concreto simples com bases granulares

Na modelagem de placas de concreto para pavimentos com bases granulares, mais uma vez os autores assumiram que a tensão principal total poderia ser calculada como uma função de uma tensão inicial multiplicada por um fator de correção (conforme Equação 1). A tensão inicial é calculada a partir da espessura da placa ( $h_1$ ) e do módulo de reação equivalente do sistema de apoio ( $k_{eq}$ ). O fator de correção é calculado a partir das características do pavimento ( $h_1$ ,  $k_{eq}$ ) e do diferencial térmico (DT). O modelo proposto é representado pela Equação 5 abaixo, e seus coeficientes de regressão encontram-se indicados na Tabela 4.

$$\sigma = 10^{C_1} \cdot h_1^{C_2} \cdot k_{eq}^{C_3} \times \left[ \begin{aligned} & (C_4 \cdot k_{eq}^2 + C_5 \cdot k_{eq} + C_6) \cdot \Delta T \cdot h_1^2 + \\ & (C_7 \cdot k_{eq}^2 + C_8 \cdot k_{eq} + C_9) \cdot \Delta T \cdot h_1 + \\ & (C_{10} \cdot k_{eq}^2 + C_{11} \cdot k_{eq} + C_{12}) \cdot \Delta T + 1 \end{aligned} \right] \quad [5]$$

Uma vez que o módulo de reação equivalente do sistema de apoio ( $k_{eq}$ ) ou  $k$ -efetivo é estimado a partir de

Tabela 4 – Coeficientes de regressão para pavimentos de concreto com base granular (Equação 5)

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
$C_1$	-0.384	$C_7$	-0.0000362
$C_2$	-1.482	$C_8$	0.00894
$C_3$	-0.174	$C_9$	0.472
$C_4$	0.000039	$C_{10}$	0.00000358
$C_5$	-0.007	$C_{11}$	-0.000875
$C_6$	-0.960	$C_{12}$	-0.0166

medidas de campo, nem sempre disponíveis, os autores modelaram as tradicionais correlações de  $k$  com o Índice de Suporte Californiano (CBR – *California Bearing Ratio*) do subleito e da espessura da base granular ( $H_b$ ) sugeridas no método de dimensionamento da *Portland Cement Association* (PCA, 1984; PACKARD e TAYABJI, 1985). Esse modelo, representado pela Equação 6, é útil em fases de anteprojeto para se estimar o valor de  $k_{eq}$  quando medições de campo não estão disponíveis. Recordar-se nesse instante que o valor do módulo de reação do subleito não é parâmetro preponderante no cálculo de tensões (por elementos finitos) em pavimentos de concreto simples (BALBO, 1989).

$$k_{eq} = (21,1 \cdot H_b^2 - 5,779 \cdot H_b + 1,422) [20,67 \cdot \ln(\text{CBR}) + 1,26] + (-4806 \cdot H_b^3 + 2451 \cdot H_b^2 - 310 \cdot H_b + 13,53) \quad [6]$$

### 3.3. Estatísticas das regressões

Todos os modelos apresentados neste trabalho foram analisados para a determinação de suas estatísticas de regressão. Hair *et al.* (1998) afirmam que a qualidade de uma regressão pode ser medida, basicamente, por dois fatores: por meio do erro padrão da estimativa e pelo coeficiente de determinação –  $R^2$ . Tais valores para os modelos numéricos-estatísticos desenvolvidos são apresentados na Tabela 5, na qual se verificam baixíssimos desvios-padrão para o cálculo de tensões em relação aos valores exatos fornecidos pelo programa ISLS2 (na ordem de centésimos de MPa) e erro médio de 1/50 na estimativa do módulo de reação do subleito, embora de pequena importância conforme argumento anterior. Os

modelos de cálculo de tensões apresentaram coeficientes de determinação altamente significativos para o nível de 95%. Assim, os modelos desenvolvidos representam muito bem as simulações numéricas originais com o programa ILSL2, usando-se o procedimento tradicional em modelagem de pavimentos que é a simulação extensiva e modelagem das tensões por regressão das variáveis independentes. Considerando o argumento de que, atualmente, a simulação de cada caso do fatorial desenvolvido consome um segundo, esta técnica ainda é bastante válida e atrativa em termos de custos computacionais, comparada ao desenvolvimento de redes neurais. As simulações não consumiram em sua totalidade mais de duas horas de CPU de microcomputador *dual-core*.

Tabela 5 – Estatística de regressão dos modelos apresentados

Modelo	Desvio-padrão	R <sup>2</sup>
Pavimento de concreto simples com base em CCR não aderida – eq. 3	0,0658MPa	0.9978
Pavimento de concreto simples com base granular – eq. 5	0,0678MPa	0.9981
Módulo de reação do sistema de apoio – eq. 6	1,061MPa/m	0,9965

### 3.4. Definindo analiticamente as tensões na base de CCR ou cimentada

O desenvolvimento de equações para o cômputo de tensões em bases cimentadas a partir de simulações numéricas pode ser executado, alternativamente, a partir de formulações analíticas diretamente da Teoria Clássica de Placas Isotrópicas, tão facilmente quanto apresentado por Ioannides *et al.* (1992). Os momentos fletores e de cisalhamento em placas de concreto ( $M_x$ ,  $M_y$  and  $M_{xy}$ ) podem ser dados pela Equação 7 na sequência, na qual  $\{M\}$  é o momento fletor,  $D$  é a rigidez da placa,  $[w(x,y)]$  é a matriz de deslocamentos e  $\Gamma(\mu)$  é um operador dependente do coeficiente de Poisson.

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = -D \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} & 0 \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ \mu \\ (1-\mu) \end{Bmatrix} = -D \cdot [w(x,y)] \cdot \{\Gamma(\mu)\} \quad [7]$$

Se for considerado um sistema real de uma placa sobre uma base rígida apoiada sobre o subleito, ele pode ser transformado em um sistema equivalente de uma única placa apoiada sobre o mesmo subleito; a equivalência estrutural será ditada pela suposição de que as deflexões no topo dos dois sistemas é a mesma quando eles são submetidos ao mesmo carregamento externo, o que garante a mesma curvatura nas superfícies de ambos os sistemas. O sistema real (Figura 5) é representado por duas placas com módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson e espessuras, respectivamente,  $E_1$  e  $E_2$ ,  $\mu_1$  e  $\mu_2$ ,  $h_1$  e  $h_2$ .

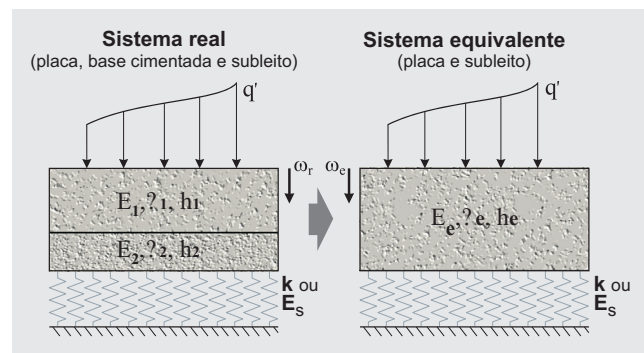


Figura 5 – Sistemas de placas real e equivalente

Seguindo a prática construtiva usual de se empregar um elemento separador, ou mesmo película betuminosa separadora, entre a placa e a base em CCR, não deverá existir aderência na interface, o que supõe teoricamente a possibilidade de deslocamento horizontal relativo na interface (*slip*), ou seja, tensão de cisalhamento nula, apesar de não haver perda de contato na interface em função da resposta monolítica total. As hipóteses que circundam a teoria da equivalência e que tornam possível uma solução analítica são: (i) a soma dos momentos no sistema real e no sistema equivalente ( $M_e$ ) é a mesma; (ii) o módulo de elasticidade é o mesmo para a placa de concreto do sistema real e para o sistema equivalente; (iii) os valores do coeficiente de Poisson para quaisquer placas são idênticos (o que não é uma hipótese grosseira). Além disso, deve-se levar em consideração de que a carga externa e o módulo de reação do subleito em ambos os sistemas devem ser os mesmos. Seguindo essas considerações, pode ser facilmente demonstrado que:

$$\{M_e\} = \left(1 + \frac{D_2}{D_1}\right) \cdot \{M_i\} \quad [8]$$

$$\{\sigma_e\} = \left(\frac{D_1}{D_2} + 1\right) \cdot \{M_2\} \quad [9]$$

Se for levada em consideração a relação entre tensão de tração na flexão e momentos ( $\sigma = 6M/h^2$ ), o desenvolvimento de expressões analíticas relacionando as tensões no sistema real ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ) e no sistema equivalente ( $\sigma_e$ ) resulta nas seguintes equações:

$$\{\sigma_e\} = \left(\frac{h_e}{h_1}\right) \cdot \{\sigma_1\} \quad [10]$$

$$\{\sigma_2\} = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \cdot \left(\frac{h_2}{h_e}\right) \cdot \{\sigma_e\} \quad [11]$$

$$\{\sigma_2\} = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right) \cdot \{\sigma_1\} \quad [12]$$

A partir da equação apresentada anteriormente para o cálculo da tensão crítica em placas de concreto (Equação 3), é possível o cálculo da tensão de tração na flexão na base rígida, seja essa produzida com qualquer material estabilizado com cimento, como brita graduada tratada com cimento (BGTC), concreto compactado com rolo (CCR) ou até mesmo um concreto antigo em caso de *overlays*. Para cada um desses casos, o módulo de elasticidade do material de base é diferente. A Figura 6 explora cada relação de tensão em termos de parâmetros adimensionais para auxiliar a definição das tensões de flexão na base cimentada após o cálculo da tensão na placa no

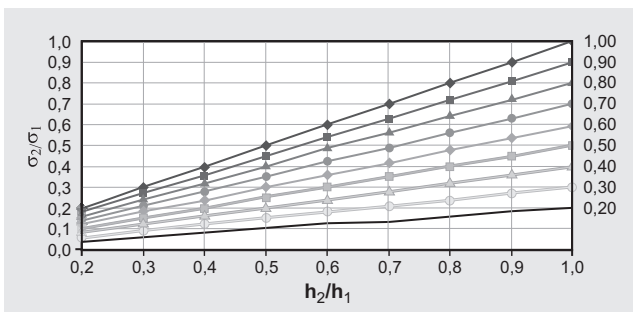


Figura 6 – Relação de tensões em termos de parâmetros adimensionais

topo do sistema real. A representação adimensional torna fácil o entendimento de que quanto menor o módulo de elasticidade da base, menor será a tensão encontrada nela. Quando placa e base possuem o mesmo módulo de elasticidade, a tensão é dada pela proporção  $h_2/h_1$ .

## 4. COMPARAÇÕES COM MODELOS RECENTEMENTE PROPOSTOS E EM APLICAÇÃO OFICIAL

### 4.1 Secretaria de Infraestrutura Urbana do Município de São Paulo

Em 2004, a Secretaria de Infraestrutura Urbana do Município de São Paulo publicou seu novo método de dimensionamento de pavimentos. A Instrução de Projeto (IP-07) refere-se a pavimentos de concreto simples com barras de transferência (PMSP, 2004). Os modelos aplicados nesse método foram desenvolvidos a partir de simulações no ILSL2 e consideram o fator de correção modelo numérico-pista definido por Cervo *et al.* (2005), que é:

$$\sigma_{\text{pista}} = 0,85 \times \sigma_{\text{teórico}} \quad [13]$$

Os coeficientes de regressão foram determinados para três faixas de espessura das placas (0,15m a 0,19m; 0,19m a 0,25m e 0,25m a 0,35m) e para os módulos de reação do subleito de 30MPa/m, 80MPa/m e 130MPa/m, tendo sido detalhadamente apresentados por Rodolfo e Balbo (2002). As tensões calculadas para valores de módulos de reação de subleitos não modelados devem ser interpoladas entre os acima descritos. Esses modelos são estatisticamente aderentes ao modelo de elementos finitos que os gerou (ILSL2) e apresentam coeficientes de regressão superiores a 0,98.

Uma comparação entre os modelos da IP-07 e a Equação 3 pode ser observada na Figura 7. Essa comparação mostra que, apesar de ambos os modelos responderem de maneira adequada frente às tensões calculadas pelo ILSL2, os modelos da IP-07 concentra seus desvios nas tensões menores que 3MPa (tensões usuais de projeto), enquanto a Equação 3 apresenta uma distribuição de erros substancialmente menor e mais homogênea para todas as faixas de tensão. Trata-se, portanto, de uma melhoria a ser futuramente incorporada na referida norma, ou ainda a ser considerada em novas normas a serem estabelecidas por agências rodoviárias brasileiras.

### 4.2. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) – AASHTO

Em 2002, o NCHRP publicou seu guia para projetos de pavimentos baseado em conceitos mecanicistas e empíricos,

como produto parcial do projeto NCHRP 1-37A (NCHRP, 2003). Esse procedimento de projeto incorpora os impactos do clima e do envelhecimento dos materiais ao longo da vida de projeto de um pavimento. As tensões de projeto para modelagem por redes neurais foram calculadas a partir do ISLAB2000, um programa de elementos finitos derivado do ILSL2. Tais modelos foram também calibrados frente a resultados de instrumentação de pista em grande quantidade de seções experimentais nos EUA. Esses modelos complexos baseados em redes neurais são fechados e foram introduzidos no software de dimensionamento do programa.

O Projeto 1-37A é muito bem documentado, e seu Apêndice QQ – *Structural Response Models for Rigid Pavements* (NCHRP, 2003) – detalha o desenvolvimento da rede neural. A comparação desenvolvida para testar a rede contra as tensões calculadas pelo ISLAB2000 pode ser observada na Figura 7. O teste da rede-neural foi realizado com 2.100 simulações independentes do modelo de elementos finitos e obteve como resposta um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9982. Comparando-se as estatís-

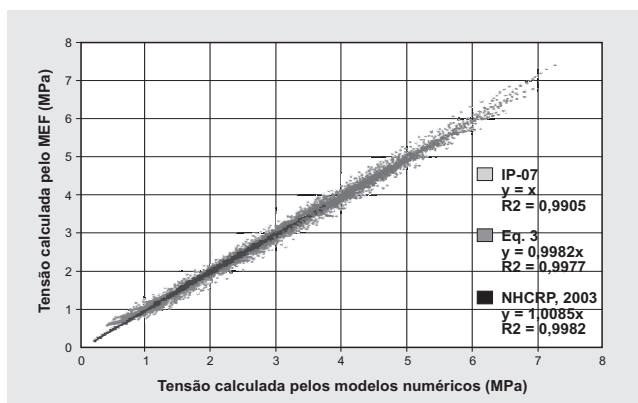


Figura 7 – Comparação entre a Equação 3 do presente estudo e os modelos do IP-07 (PMSP, 2004) e MEPDG (NCHRP, 2003).

ticas da Equação 3 do presente estudo com aquelas da rede neural do MEPDG, pode ser concluído que ambos os modelos possuem correlação muito semelhante (os programas ILSL2 e ISLAB2000 têm a mesma estrutura analítica de análise por elementos finitos).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Foram desenvolvidos modelos mais acurados para o cálculo de tensões críticas de tração na flexão em placas

de pavimentos de concreto simples apoiadas sobre bases rígidas e granulares, considerando-se o caso de eixos simples de rodas duplas rodoviários. Esses modelos, do ponto de vista de sua formulação estatística, são bem mais simples que modelos recentemente elaborados. Os novos modelos derivam de simulações baseadas no método dos elementos finitos e realizadas com o programa ILSL2, equivalente em sua estrutura analítica ao programa ISLAB2000, que foi empregado no desenvolvimento do MEPDG pelo NCHRP nos EUA. O projeto fatorial aplicado nessas simulações numéricas cobriu uma vasta gama de estruturas no que diz respeito a espessuras e propriedades dos materiais, bem como diferenciais térmicos realistas, observados durante as pesquisas realizadas na pista de teste do LMP-USP. O módulo de elasticidade do concreto da placa superior, contudo, foi preservado em padrões de concretos convencionais para pavimentos de concreto simples.

Os resultados de tais simulações foram analisados sob a ótica da estatística multivariada e as equações, desenvolvidas a partir de regressões múltiplas. Os modelos propostos apresentam uma alternativa nova e de simples aplicação para o cálculo de tensões na flexão em pavimentos de concreto, com sutis melhorias em relação aos modelos anteriormente desenvolvidos por Rodolfo e Balbo (2002). Comparando os modelos propostos com os outros modelos apresentados recentemente, destacam-se as seguintes características: (a) existe apenas um único conjunto de coeficientes de regressão para cada equação, ao contrário do IP-07 (PMSP, 2004) que possui nove conjuntos de coeficientes no modelo para bases não aderidas; (b) é apresentado um modelo para cálculo de tensões em pavimentos com bases granulares que leva em consideração a influência dos gradientes térmicos, ausente no IP-07, que adota o modelo da PCA-84, sem levar em conta, portanto, os inevitáveis diferenciais térmicos nas placas de concreto, o que gera erros grosseiros na avaliação ou previsão de tensões reais em pista; (c) simulações em modelos de elementos finitos, como ILSL2, podem ser substituídas, com precisão adequada, pela aplicação dos modelos propostos, observando-se as limitações de seu domínio, economizando-se o tempo em fases de projetos básicos. Consideradas as semelhanças de resultados entre o modelo de rede neurais do NCHRP e aquele apresentado neste estudo, infere-se a

grande atratividade ainda existente na elaboração de modelos por meio de experimentos fatoriais de análise numérica, o que é corroborado pela atual e futura velocidade de processamento dos microcomputadores no mercado.

Ainda que as simulações realizadas no ILSL2 consideraram eixos simples de rodas duplas (ESRD) de 80kN, os autores sugerem a utilização de linearidade entre cargas e tensões para a determinação de tensões devidas a diferentes cargas e a diferentes configurações de eixos. A linearidade inerente aos modelos desenvolvidos permite o cálculo das tensões ( $\sigma_q$ ) causadas por qualquer carga ( $Q_q$ ) de qualquer configuração de eixo como função da tensão causada por um ESRD de 80kN,  $\sigma_{80\text{-kN,ESRD}}$ , e a carga de equivalência para a configuração desejada,  $Q_{ref}$  (Equação 13). Simulações realizadas pelos autores mostraram que um eixo tandem duplo (ETD) de 135kN e um eixo tandem triplo (ETT) de 215kN gerariam tensão semelhante àquela causada por um ESRD de 80kN.

$$\sigma_q = \sigma_{80\text{-kN,ESRD}} \times \frac{Q_q}{Q_{ref}} \quad [13]$$

Deve ser lembrado que diversas configurações entre espessuras de placa e base podem ser empregadas na solução de dimensionamento, sendo que, todavia, estas não são as únicas variáveis que devem ser consideradas. O projeto também é afetado pelo modelo de fadiga do concreto de cimento Portland, bem como pela resistência dos materiais selecionados, dentre outros fatores. No futuro, os modelos apresentados neste trabalho poderão ser incorporados em um novo método de projeto nacional, que leve em consideração as reais condições de carregamento (tráfego e ambientais) existentes em rodovias brasileiras. Modelos mais completos ainda, considerando diversas configurações de eixos, podem ser desenvolvidos para essa finalidade, o que também se justificaria para o projeto de pavimentos industriais, portuários e aeroportuários.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMAGHANI, J. M.; LARSEN; T. J. SMITH, L. Temperature response of concrete pavement. *Transportation Research Record*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1121, p. 23–33, 1987.
- BALBO, J. T. *Aplicação do Método dos Elementos Finitos na Avaliação Estrutural de Pavimentos Rígidos Rodoviários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- BALBO, J. T. Consequências da temperatura em placas de concreto. *Concreto & Construções*. São Paulo: IBRACON, n. 45, p. 66–76, jan./fev./mar 2007.
- BALBO, J. T.; SEVERI, A. A. Thermal gradients in concrete pavements in tropical (hot-wet) environment: an experimental appraisal. *Transportation Research Record*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1809, p. 12–22, 2002.
- BALBO, J. T.; SEVERI, A. A.; PEREIRA, D. S.; RODOLFO, M. P. Calibração de tensões em pavimentos de concreto simples com base em medidas físicas em pistas experimentais. In: Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, XVIII, 2004, Florianópolis. *Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2004*, Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004, v. 1, p. 307–318.
- BURNHAM, T. Concrete Pavement Performance and Research at the Minnesota ROAD Research Project – The First Ten Years. In: International Conference on Concrete Pavements, 8, 2005, Colorado Springs. *Proceedings*. Colorado Springs: International Society for Concrete Pavements, 2005. CD-ROM.
- CERVO, T. C.; SEVERI, A. A.; RODOLFO, M. P.; PEREIRA, D. S.; BALBO, J. T. Innovative Aspects of the Concrete Pavement Design Standard for Sao Paulo Highways. In: International Conference on Concrete Pavements, 8, Colorado Springs, 2005. *Proceedings*. Colorado Springs: International Society for Concrete Pavements, 2005. CD-ROM.
- HAIR, J. F.; TATHAM, R. L.; ANDERSON, R. E.; BLACK, W. *Multivariate Data Analysis*. 5<sup>th</sup> Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 768 p.
- HALL, K. T. State of the art and practice in rigid pavement design. *Transportation in the New Millennium: State of the Art and Future Directions*, Perspectives from Transportation Research Board Standing Committees. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 7 p., 2000. Disponível em <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/millennium/00105.pdf>>. Acesso em: 04 fevereiro 2008.

- HUANG, Y. H. *Pavement Analysis and Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1993. 805 p.
- HUANG, Y. H.; WANG, S. T. Finite-Element Analysis of Concrete Slabs and its Implications for Rigid Pavement Design. *Highway Research Record*. Washington, D.C.: Highway Research Board, 466, p. 55–69, 1973.
- IOANNIDES, A. M.; DAVIS, C. M.; WEBER, C. M. Curling Analysis: Change and Continuity. In: International Workshop on the design theories and their verification of concrete slabs for pavements and railroads, 4, 1998, Buçaco. *Proceedings*. Buçaco: CROW, 1998.
- IOANNIDES, A. M.; KHAZANOVICH, L.; BECQUE, J. L. Structural evaluation of base layers in concrete pavement systems. *Transportation Research Record*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1370, p. 20–28, 1992.
- KHAZANOVICH, L. *Structural analysis of multi-layered concrete pavement systems*. Ph.D. Thesis – University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 1994.
- KHAZANOVICH L.; IOANNIDES, A. M. Finite Element Analysis of Slabs-On-Grade Using Improved Subgrade Soil Models. In: ASCE Specialty Conference Airport Pavement Innovations – Theory to Practice, 1993, Vicksburg. *Proceedings*. Vicksburg: Waterways Experiment Station, 1993, p. 16–30.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report for Project 1-37A. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2003.
- PACKARD, R. G.; TAYABJI, S. New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements. In: International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 3, 1985, West Lafayette. *Proceedings*. West Lafayette: Purdue University, 1985, 225–236.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. *Thickness Design of for Concrete Highways and Streets Pavements*. EB209.01P. Ottawa: PCA, 1984.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Secretaria de Infraestrutura Urbana. Instruções de Projeto. IP 07 – Dimensionamento de Pavimentos de Concreto. *Revisão e atualização das normas de pavimentação*. São Paulo: PMSP, 2004.
- RODOLFO, M. P.; BALBO, J. T. Modelagem de tensões em pavimentos de concreto submetidos a gradientes térmicos e cargas rodoviárias. In: Confederação Nacional dos Transportes; Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes. (Org.). *Transporte em Transformação*. São Paulo: MAKRON Books, 2002, v. 5, p. 101-116.
- TELLER, L. W.; SUTHERLAND, E. C. The structural design of concrete pavements part 5: an experimental study of the Westergaard analysis of stresses condition in concrete pavement slabs of uniform thickness. *Public Roads*, v. 23, n. 8, p. 168–212, 1943.
- WESTERGAARD, H. M. Analysis of Stresses in Concrete Pavements due to Variations of Temperature. *Proceedings*. Washington, D.C: Highway Research Board, v. 6, p. 201–215, 1927.

# Utilização de cascalhos de perfuração oriundos da exploração de petróleo em misturas asfálticas

**Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena**

Pós-Doutorando em Engenharia Civil | lucenafb@uol.com.br

**John Kennedy Guedes Rodrigues**

Professor | jkennedy@dec.ufcg.edu.br

**Leda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena**

Engenheira Civil | ledach@uol.com.br

**Heber Carlos Ferreira**

Professor | heber@dema.ufcg.edu.br

## RESUMO

Um dos resíduos produzidos pelas indústrias de petróleo é o “cascalho de perfuração”, produzido em grande escala durante a perfuração de poços de petróleo. Uma alternativa de disposição final do resíduo cascalho de perfuração é sua utilização em misturas asfálticas, pois a sua adoção minimizaria o efeito da migração de alguns componentes tóxicos de sua constituição para o lençol freático e os solos que circunvizinham as estradas, tornando-se, assim, uma prática ambientalmente mais adequada que a técnica de roadspreading. Com esse objetivo foram selecionados resíduos oleosos (cascalhos de perfuração) provenientes da perfuração de poços de petróleo: o resíduo oleoso 1 (poço: 4-SES-149A) e o resíduo oleoso 2 (poço: 1-POTI-4-RN). Inicialmente foram realizadas caracterizações físicas e ambientais dos materiais (análise granulométrica e espectroscopia por absorção atômica) com o objetivo principal de conhecer suas propriedades essenciais para o desenvolvimento da pesquisa. Em seguida, a partir da análise teórica (revisão da literatura) e dos resultados das caracterizações físicas e

ambientais, foram estabelecidos os procedimentos normatizados para a mistura dos materiais e os critérios de aceitação dos resultados obtidos, realizando-se na sequência a caracterização mecânica (ensaio Marshall, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Lottman). Por fim, foi construído um trecho experimental com o objetivo de verificar a migração ou não de constituintes tóxicos para o entorno do trecho. Os resultados obtidos indicaram que a utilização do resíduo oleoso 1 (filler) e o resíduo oleoso 2 (agregado miúdo), em revestimentos asfálticos, obedecendo a limites percentuais, é uma alternativa que deve ser considerada, pois o encapsulamento desses resíduos, em revestimentos asfálticos, não possibilita a lixiviação e contaminação dos solos vicinais pelos constituintes nocivos ao meio ambiente presentes nos resíduos. Representando, assim, uma alternativa para a redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequada dos resíduos oleosos.

## PALAVRAS-CHAVE

resíduo oleoso, petróleo, revestimentos asfálticos

## ABSTRACT

The drilling cuttings are one of the residues produced by the oils industries in large amounts during the drilling of oil wells. The alternative utilization of oily residues (perforation gravel) in asphaltic pavements must be considered, once its adoption would minimize the migration effect of the toxic composites to the groundwater and soils that edges the road making this alternative a more suitable one from the environmental point of view, than the roadspreading one. Aiming this objective, it was selected oily residues from oil drilling wells: the oily residue 1 (well:4-SES-149A) and the oily residue 2 (well: 1-POTI-4-RN). At first, it was realized physical and environmental characterization (granulometric analysis and Atomic Absorption Spectroscopy) to discover their mainly properties to the development of this research. Beginning from the bibliographic review and of the results of the referred characterizations, it was possible to establish the normalized proceedings to mix the materials and the acceptance

criteria of the achieved results. After these definitions, it was conducted the mechanical characterization essays (Marshall, indirect tensile strength and Lottman). Finally, it was build an experimental pavement aiming to verify the migration of toxic composites to the edges of the pavement. The obtained results indicated that the utilization of the oily residue 1 (filler) and the oily residue 2 (fine aggregate) in asphaltic pavements, obeying to ratio limits is an alternative to be considered, once the encapsulation of these residues doesn't permit the lixiviation and contamination of the vicinal soils by the harmful composites to the environment. It can be concluded that the utilization of the residues can be considered a viable alternative to the minimization of the great environmental impact caused by the inadequate disposal of the oily residues.

## KEYWORDS

Oily residue, petroleum, asphaltic pavements.

## 1. INTRODUÇÃO

A reciclagem e o aproveitamento de resíduos como materiais de construção são de fundamental importância para controle e minimização dos problemas ambientais causados pela geração de resíduos de atividades industriais e urbanas. Alguns resíduos apresentam propriedades que permitem a sua utilização em substituição parcial ou total da matéria-prima, utilizada como insumo convencional. O aproveitamento desses resíduos requer uma avaliação dos aspectos econômicos e tecnológicos, bem como do risco de contaminação ambiental que o uso de matérias com resíduos incorporados poderá ocasionar durante o ciclo de vida do material e após a sua destinação final.

Tem sido estudada a aplicação de resíduos produzidos em diversos tipos de indústrias para uso como material na construção civil e, em especial, na pavimentação. Além da preocupação com a execução de pavimentos de baixo custo com desempenho satisfatório, procura-se amenizar danos ambientais que ocorrem com a estocagem desses materiais.

Em todas as pesquisas, evidencia-se que a utilização de resíduos como material alternativo minimizará

os impactos ambientais causados por sua deposição no meio ambiente, além de poder vir indicar o uso e agregar valor a um material, atualmente visto como sem valor econômico.

Em suas operações, as indústrias de petróleo produzem resíduos líquidos, sólidos e gasosos que podem ser prejudiciais ao meio ambiente. Um dos resíduos produzidos pelas indústrias de petróleo é o "cascalho de perfuração", produzido em grande escala durante a perfuração de poços de petróleo. Neste processo, os fragmentos das rochas cortados pela broca (cascalhos) são carregados pelo fluido de perfuração até as peneiras vibratórias na superfície, nas quais são separados do fluido e descartados em um dique ou tanque. Por não haver uma remoção total do fluido impregnado nos cascalhos, estes podem conter contaminantes, tais como: metais pesados, alta salinidade, óleos e graxas, elementos que causam demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e alcalinidade.

Fonseca (2003) apresenta uma caracterização e classificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, utilizado em estradas de terra. Segundo a NBR 10004/2004, sob o aspecto toxicidade,

foi caracterizado como tóxico, uma vez que 89% das concentrações observadas para o parâmetro óleos e graxas ultrapassaram o limite de 5% em massa, estabelecido por essa norma. De acordo com as características apresentadas, o RO foi classificado como resíduo Classe I ou perigoso. Quanto aos aspectos de inerticidade em amostras de RO analisadas, detectou-se característica de não inerte para os parâmetros bário, cádmio, chumbo, cromo, alumínio, ferro, manganês, sódio, cloretos, nitratos e fenóis.

Dados de caracterização e classificação de resíduos oleosos foram obtidos por Faé *et al.* (2002), por meio de análises realizadas no Laboratório de Saneamento da Universidade Federal do Espírito Santo, em nove amostras do resíduo oleoso bruto (*in natura*) gerado naquela região. Os resultados das análises efetuadas no resíduo oleoso bruto, em seu extrato lixiviado e solubilizado, indicaram que oito amostras foram classificadas como perigosas (Classe I), para o parâmetro óleo e graxas, com teor médio de 11,5% (o limite máximo permitido pela NBR 10004/2004 é de 5%), e uma como não inerte (Classe II), para os parâmetros bário, cádmio, chumbo, bromo, alumínio, ferro, manganês, sódio, cloretos, nitratos e fenóis. As análises efetuadas em amostras do resíduo já aplicado na via não pavimentada indicaram que o mesmo foi classificado como não inerte (Classe II), para os parâmetros bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, alumínio, ferro, manganês e sódio, e não perigoso quanto ao teor óleo e graxas cuja média foi de 0,77% em peso.

Cordeiro (2007) avaliou o processo de estabilização química e solidificação, com o uso do resíduo oleoso gerado nas atividades de exploração e produção de petróleo, em solo para uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários. Em relação à classificação dos materiais quanto à toxicidade e inerticidade segundo a ABNT NBR 10004/2004, o solo, o resíduo oleoso e a mistura classificam-se como "Resíduo Classe II". Os resultados obtidos para os constituintes químicos da mistura solo-resíduo-cal (Resíduo oleoso = 25%; teor de cal = 9,0%) foram inferiores aos obtidos individualmente para o solo e para o resíduo oleoso. Esta redução deve-se ao processo de estabiliza-

ção química e solidificação que resultou em um melhor encapsulamento dos referidos constituintes.

Portanto, é importante notar que em geral resíduos oriundos das indústrias de E & P de petróleo, independentemente de fonte geradora, representam em sua maioria riscos para a saúde pública e meio ambiente. Ressaltando-se, assim, a importância de que os resíduos tenham uma destinação final ambientalmente adequada.

Uma alternativa de disposição final do resíduo cascalho de perfuração é sua utilização em misturas asfálticas. Considerando essa alternativa, foi realizada análise granulométrica, caracterização ambiental, ensaios na mistura asfáltica (ensaio Marshall e ensaio de Resistência Tração por Compressão Diametral) e construção de um modelo reduzido experimental, com o resíduo originário da perfuração de poços de petróleo *offshore* (poço 4-SES-149A, SE – Brasil) e *onshore* (poço: 1-POTI-4-RN, localizado em Governador DIX-Sept Rosado – RN – Brasil).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram: agregados (gráudo e miúdo), fillers convencionais (cal, cimento Portland e pó calcário), resíduos oleosos e o cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Foram utilizados dois agregados gráudos, tipo granítico, designado como comercial, (DNIT – ME 081/1995), apresentando um diâmetro máximo de 19,1mm, e 12mm, disponibilizados pelo 3º Batalhão de Engenharia e Construção (BEC). O agregado miúdo utilizado foi a areia do rio Paraíba, do tipo quartzosa (DNIT – ME 084/1995).

A cal hidratada utilizada é da marca Megão e possui massa específica de 2,450g/cm<sup>3</sup>. O cimento utilizado nesta pesquisa é do tipo Portland (CP II-Z 32 – Zebu), com massa específica de 3,080g/cm<sup>3</sup>. O pó calcário utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pelo 3º Batalhão de Engenharia e Construção (BEC) e possui massa específica de 2,830g/cm<sup>3</sup>.

O resíduo oleoso 1 (Figura 1) foi fornecido pela Petrobras, proveniente da perfuração de um poço de

petróleo offshore no Estado de Sergipe (poço: 4-SES-149A – profundidade de 3.068m). Na perfuração do poço foi utilizado fluido de perfuração à base de parafina.

O resíduo oleoso 2 foi fornecido pela empresa de perfuração Aurizônia, proveniente da perfuração de um poço de petróleo onshore no Estado do Rio Grande do Norte (poço: 1-POTI-4-RN – profundidade de 800m).

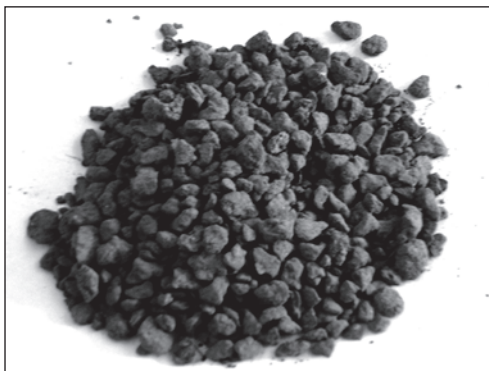


Figura 1 – Resíduo oleoso 1 (poço: 4-SES-149A)

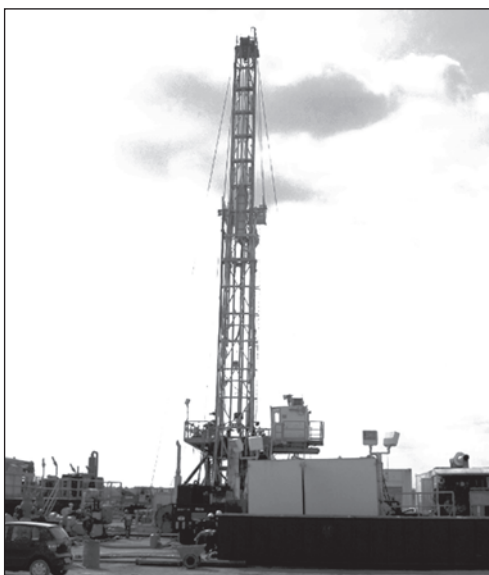


Figura 2 – Sonda de perfuração do poço 1-POTI-4-RN

Na perfuração do poço (Figura 2), foi utilizado fluido de perfuração à base água.

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) usado na pesquisa foi do tipo 50/70 (penetração 100g, 5s a 25°C), cujas especificações estão de acordo com o DNP (Departamento Nacional de Petróleo) e a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis), os quais definem parâmetros de aceitação e classificação.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Análise granulométrica

A distribuição dos tamanhos de grãos dos agregados, dos fillers convencionais e dos resíduos oleosos foi determinada a partir da realização do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação NBR 7181 (ABNT, 1984).

### 2.2.2 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.

### 2.2.3 Ensaio Marshall

O ensaio Marshall (DNIT – ME 043/95) foi realizado nas seguintes etapas: Primeira Etapa – Mistura CAP + agregados + pó calcário: variando o teor de pó de 2 a 5%; Segunda Etapa – Mistura CAP + agregados + cimento: variando o teor de cimento de 2 a 5%; Terceira Etapa – Mistura CAP + agregados + RO, variando o teor de RO de 2 a 5%. Para o resíduo 1, o ensaio Marshall foi realizado utilizando-se dois processos de compactação: compactação manual e compactação automática.

### 2.2.4 Ensaio de Compressão Diametral

O ensaio de Compressão Diametral (DNIT – ME 138/94) foi realizado nas seguintes etapas: Primeira Etapa – Mistura CAP + agregados + pó calcário: variando o teor de pó de 2 a 5%; Segunda Etapa – Mistura CAP + agregados + cimento: variando o teor de cimento de 2 a 5%; Terceira Etapa - Mistura CAP + agregados + RO, variando o teor de RO de 2 a 5%.

### 2.2.5 Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman

O ensaio de Lottman (ASTHO T 283-02) foi realizado nas seguintes etapas: Primeira Etapa – Mistura CAP +

agregados + pó calcário: variando o teor de pó de 2 a 5%; Segunda Etapa – Mistura CAP + agregados + cimento: variando o teor de cimento de 2 a 5%; Terceira Etapa - Mistura CAP + agregados + RO, variando o teor de RO de 2 a 5%.

### 2.2.6 Modelo Reduzido

Com a finalidade de monitorar o impacto ambiental causado pela utilização de resíduos oleosos em revestimentos asfálticos, foi construído um modelo reduzido (data da construção: 03/11/07), de revestimento asfáltico de 0,03m de espessura sobre uma camada de 0,2m de areia contidos em uma caixa de madeira (1m x 1m x 0,3m) (Figura 3). Foram realizados 12 orifícios ao redor da caixa na qual foram inseridos canos de PVC, para facilitar o procedimento de coleta do líquido resultante da aspersão de água destilada no revestimento asfáltico do trecho experimental.

Para o líquido coletado (data da coleta: 03/11/08), foram preparados extratos lixiviados e solubilizados de acordo com a NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT, 2004), visando à caracterização e à classificação do líquido segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) a partir do equipamento de Espectroscopia por Absorção Atômica.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Análise granulométrica

A Figura 4 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos agregados (granulometria por peneiramento NBR 7181, ABNT, 1984). Os resultados encontrados são fundamentais para a realização das dosagens experimentais da mistura asfáltica. O Quadro 1 apresenta os valores da distribuição granulométrica dos agregados e as porcentagens que foram definidas para mistura asfáltica, enquadrando a mistura na Faixa B do DNIT-ES 031/2006 (Tabela 1 – capítulo 2). Portanto, os ensaios asfálticos foram realizados partindo-se da seguinte composição inicial: 24% de brita 19mm, 34% de brita 12mm, 39% de areia e 3% de filler. Quando foi necessário variar o teor de filler (resíduo 1) ou agregado miúdo (resíduo 2) em 2%, 3%, 4% e 5%, a diferença foi compensada diminuindo-se ou aumentando-se a porcentagem de areia presente na mistura.

A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica, obtida a partir do ensaio de granulometria por peneiramento

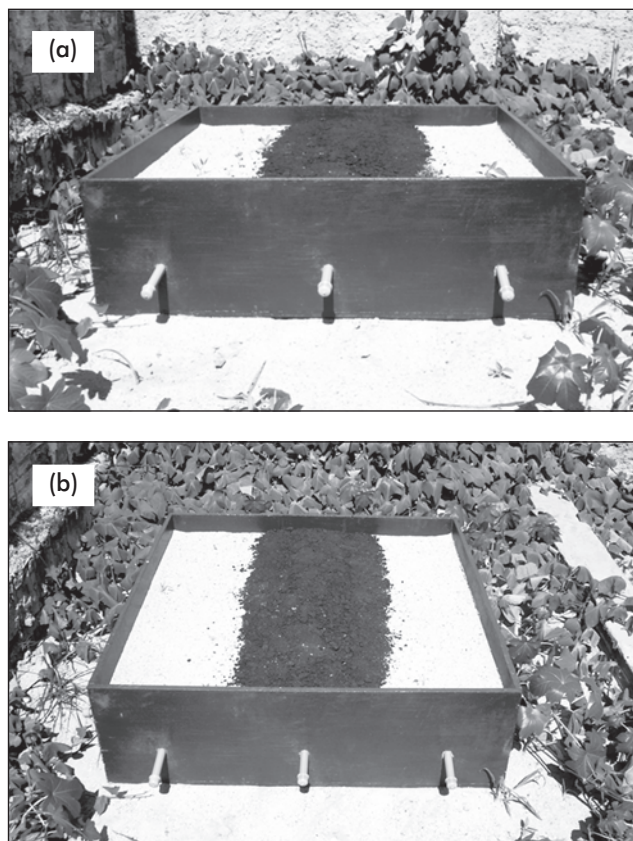


Figura 3 – Modelo Reduzido

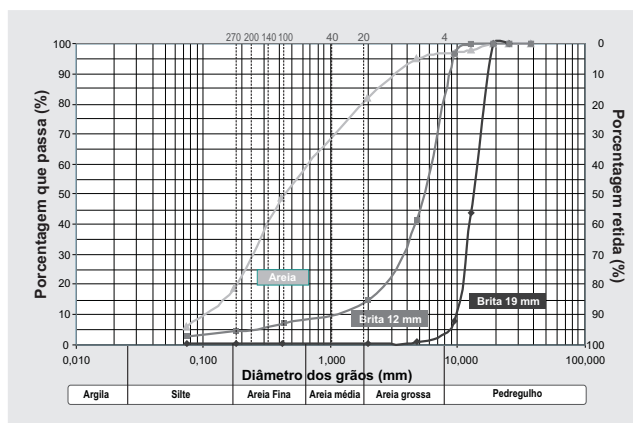


Figura 4 – Distribuição granulométrica – agregados

e sedimentação (NBR 7181, ABNT, 1984). A análise do resíduo 1 indica que o material possui granulometria aceitável para ser utilizado como filler (92% do material passa na peneira ABNT nº 200 – abertura de 0,075mm).

Na Figura 6, pode-se notar que o resíduo 2 apresenta um comportamento granulométrico semelhante ao de um agregado miúdo (areia). Em função da granulometria, o resíduo 2 não pode ser utilizado como filler, visto que não atende à exigência do DNIT de no mínimo

Quadro 1 – Composição granulométrica da mistura asfáltica

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO										
	BRITA 19		BRITA 12		AREIA		FILLER		COMBIN. RESULT.	ESPECIFICAÇÃO Faixa B	
	TOTAL	24%	TOTAL	34%	TOTAL	39,0%	TOTAL	3%		PT. MED.	LIMITES
1 1/2"	100,00	24,00	100,00	34,00	100,00	39,00	100,00	3,00	100,00	—	—
1"	100,00	24,00	100,00	34,00	100,00	39,00	100,00	3,00	100,00	—	—
3/4"	100,00	24,00	100,00	34,00	100,00	39,00	100,00	3,00	100,00	100	100
1/2"	43,54	10,45	100,00	34,00	98,00	38,22	100,00	3,00	85,67	92,5	85-100
3/8"	7,81	1,87	96,82	32,92	97,00	37,83	100,00	3,00	75,62	87,5	75-100
Nº 4	0,61	0,15	41,47	14,10	95,00	37,05	100,00	3,00	54,30	67,5	50-85
Nº 10	0,54	0,13	14,72	5,00	82,00	31,98	100,00	3,00	40,11	52,5	30-75
Nº 40	0,52	0,12	7,07	2,40	49,00	19,11	100,00	3,00	24,64	27,5	15-40
Nº 80	0,48	0,12	4,20	1,43	19,00	7,41	100,00	3,00	11,95	19	08-30
Nº 200	0,37	0,09	2,44	0,83	6,00	2,34	100,00	3,00	6,26	7,5	5-10

65% do material passar na peneira ABNT nº 200 (abertura de 0,075mm). Desta maneira, o resíduo 2 será utilizado na mistura asfáltica como agregado miúdo.

### 3.2 Caracterização ambiental

Os valores observados a partir da espectroscopia por absorção atômica e da determinação do teor de óleo e graxas foram confrontados com os limites máximos permitidos (LMP) estabelecidos pela norma NBR 10004 (2004).

O Quadro 2 apresenta as concentrações observadas para os parâmetros analisados. Para o resíduo 1, pode-se notar que, quanto ao aspecto de inerticidade, observou-se que o resíduo apresenta característica de não inerte para os parâmetros cádmio e chumbo, visto que,

para o extrato solubilizado, os valores obtidos estão acima do limite máximo permitido pela norma.

Quanto ao aspecto toxicidade, mesmo o resíduo 1 apresentando concentrações inferiores ao limite estabelecido pela norma para os metais cádmio, chumbo e cromo no extrato lixiviado, o mesmo é classificado como tóxico, uma vez que o teor de óleo e graxas ultrapassa o limite de 5% em massa, estabelecido pela norma. Portanto, de acordo com as características apresentadas, o resíduo oleoso 1 foi classificado como resíduo Classe I ou perigoso.

Para o resíduo 2, pode-se notar que, quanto ao aspecto de inerticidade, observou-se que o resíduo apresenta característica de não inerte para o parâmetro ferro,

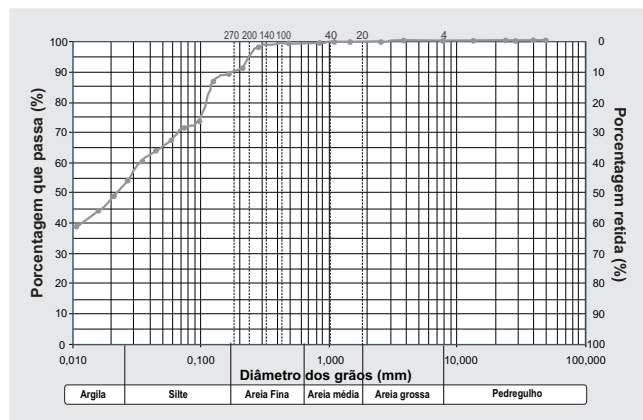


Figura 5 – Distribuição granulométrica – resíduo oleoso 1

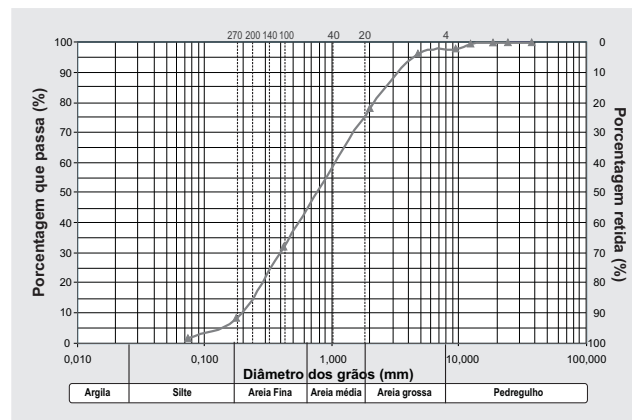


Figura 6 – Distribuição granulométrica – resíduo oleoso 2

Quadro 2 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas

	Parâmetro	Limites Máximos Permitidos	Resíduo 1	Resíduo 2
<b>Solubilização (mg/L)</b>	cádmio	0,005	0,300	0,0021
	chumbo	0,05	0,544	0,011
	chromo	0,05	<LD <sup>2</sup>	<LD <sup>2</sup>
	sulfetos	Sem padrão	Não detectado	Não detectado
	cobre	1	Não detectado	Não detectado
	ferro	0,3	Não detectado	0,39
	manganês	0,1	Não detectado	Não detectado
	sódio	200	Não detectado	Não detectado
	zinco	5	Não detectado	Não detectado
	cloretos	Sem padrão	Não detectado	Não detectado
<b>Lixiviação (mg/L)</b>	cádmio	0,5	0,118	0,045
	chumbo	5	0,154	0,018
	chromo	5	<LD <sup>2</sup>	<LD <sup>2</sup>
	sulfetos	Sem padrão	571,11	820,11
	cobre	Sem padrão	<LD <sup>1</sup>	<LD <sup>1</sup>
	ferro	Sem padrão	0,038	23
	manganês	Sem padrão	0,682	0,088
	sódio	Sem padrão	0	425
	zinco	Sem padrão	0,047	0,045
	cloretos	Sem padrão	84	1012
<b>Óleo e Graxas (%)</b>	óleo e graxas	5	5,7	—

<LD<sup>1</sup>: Abaixo do Limite de detecção do aparelho: 0,01mg L-1 — <LD<sup>2</sup>: Abaixo do Limite de detecção do aparelho: 0,02mg L-1

visto que, para o extrato solubilizado, o valor obtido está acima do limite máximo permitido pela norma. Quanto ao aspecto toxicidade, o resíduo 2 apresentou concentrações inferiores ao limite estabelecido pela norma para os metais cádmio, chumbo e cromo no extrato lixiviado, portanto, o mesmo é classificado como não tóxico. Logo, de acordo com as características apresentadas, o resíduo oleoso 2 classifica-se como não perigoso e não inerte, ou seja, Resíduo Classe II, ou seja, é um resíduo que não pode ser descartado sem um tratamento prévio, pois apresenta propriedades como biodegradabilidade ou solubilidade em água.

### 3.3 Ensaio Marshall

Com o objetivo de verificar o comportamento da mistura asfáltica com a variação do teor de filler, foram confeccionados 72 corpos-de-prova (36 para a compactação manual e 36 para a compactação automática), variando-

se o teor de filler em 2%, 3%, 4% e 5%. O principal parâmetro fornecido pelo ensaio Marshall é a estabilidade (kgf). A Figura 7 apresenta os resultados da estabilidade (kgf) obtida pelos corpos-de-prova moldados com o resíduo 1 atuando como filler na mistura asfáltica, assim como os corpos-de-prova moldados com fillers tradicionais: cimento e pó calcário.

Pode-se notar para o parâmetro estabilidade – compactação manual – que a utilização do resíduo oleoso como filler apresenta um comportamento semelhante ao do pó calcário, tendo ambos apresentado resultados bem superiores quando comparados à utilização do cimento Portland como filler. Entre todos os teores analisados (2%, 3%, 4% e 5%), o filler resíduo oleoso ultrapassou a estabilidade mínima exigida no teor de 4% e alcançou também a maior estabilidade da pesquisa (674,86kgf). Já na compactação automática, todos os teores dos três fillers analisados ficaram acima do limite mínimo exigido pelo DNIT.

Pode-se notar também que o parâmetro estabilidade é extremamente influenciável pelo processo de compactação, como exemplo temos que, para a compactação manual, o maior valor de estabilidade alcançado foi de 674,86kgf (teor de 4% filler resíduo oleoso), já para a compactação automática, o maior valor encontrado foi de 1.353,80kgf (teor de 5% filler resíduo oleoso), resultado

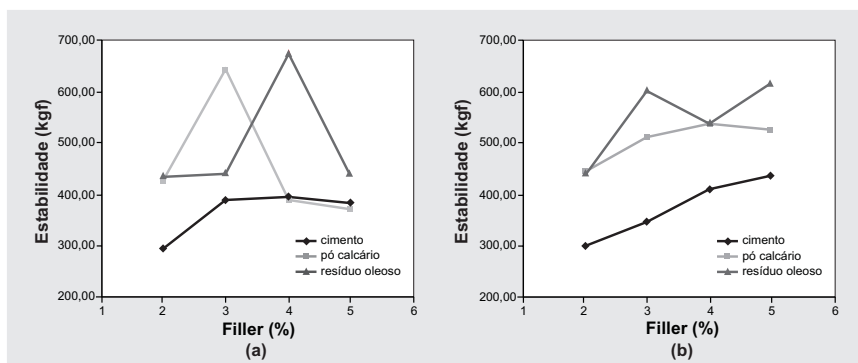


Figura 7 – Parâmetro Estabilidade – Resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 1 [(a) Compactação Manual (b) Compactação Automática]

cerca de duas vezes superior. Com o objetivo de verificar o comportamento da mistura asfáltica com a variação do teor do resíduo 2, foram confeccionados 12 corpos-de-prova (compactação automática), variando-se o teor de resíduo em 2%, 3%, 4% e 5%. Neste caso, em função de sua granulometria, o resíduo 2 fez parte da composição da mistura como agregado miúdo, e o filler utilizado foi o pó calcário.

Observam-se na Figura 8 os resultados dos ensaios Marshall para o parâmetro estabilidade (kgf). É importante destacar o aumento do valor da estabilidade máxi-

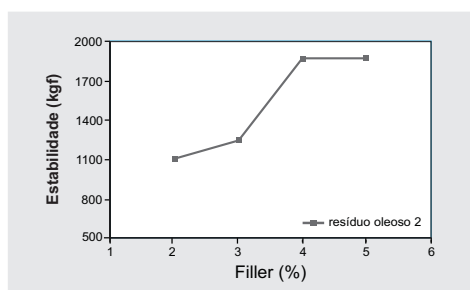


Figura 8 – Parâmetro Estabilidade – Resultados do ensaio Marshall – resíduo oleoso 2

ma alcançada com a introdução do resíduo oleoso 2 na composição da mistura de 1.189kgf para 1.881kgf. Esse aumento pode ser explicado pelo fato de o resíduo oleoso 2 possuir uma granulometria mais bem graduada que a

granulometria da areia quartzosa, contribuindo, assim, para a diminuição da porcentagem de vazios na mistura asfáltica.

### 3.4 Ensaio de compressão diametral

Na Figura 9, estão lançados em gráfico os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral com os corpos-de-prova moldados com os fillers cimento, pó calcário e resíduo 1. Neste ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando-se os teores de filler de 2%, 3%, 4% e 5%.

Pode-se notar que todos os teores e tipos de fillers utilizados forneceram valores de resistência à tração por compressão diametral superiores ao mínimo exigido pelo DNIT (0,65MPa). O filler pó calcário apre-

sentou os melhores resultados, já o filler cimento, novamente, forneceu os menores valores de resistência. Notam-se também tendências crescentes de resistência de

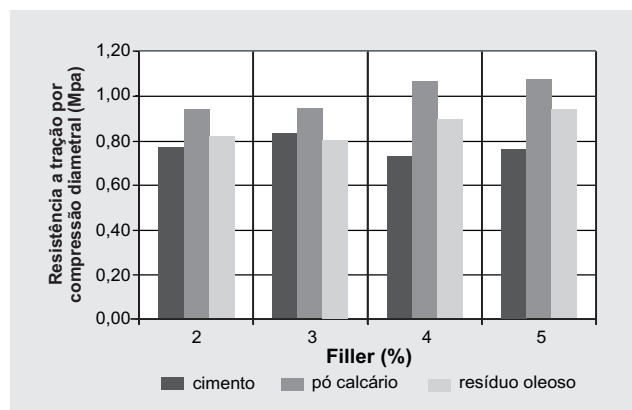


Figura 9 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral – resíduo 1

acordo com o aumento dos teores de fillers pó calcário e resíduo oleoso, entretanto, o filler cimento apresenta uma tendência decrescente a partir do teor de 3%. A similaridade de comportamento entre os resultados obtidos pelo resíduo 1 e o pó calcário, tanto no ensaio Marshall como no Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, pode ser explicada pelo fato de ambos fillers possuírem um teor de  $\text{SiO}_2$  considerável, em suas

composições químicas (pó calcário – 20,08% de SiO<sub>2</sub> e resíduo 1 – 52,72% de SiO<sub>2</sub>).

Na Figura 10, estão lançados em gráfico os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral com os corpos-de-prova moldados com o filler pó calcário e o resíduo 2 atuando como agregado miúdo. Nesse ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando-se os teores de resíduo de 2%, 3%, 4% e 5%.

Pode-se notar que, para todos os teores analisados, o valor da resistência à compressão diametral ficou acima do limite mínimo exigido pelo DNIT (0,65MPa). Entretanto, pode-se destacar que a presença do resíduo 2 na mistura asfáltica, diferentemente do que ocorreu no parâmetro estabilidade do ensaio Marshall, não propor-

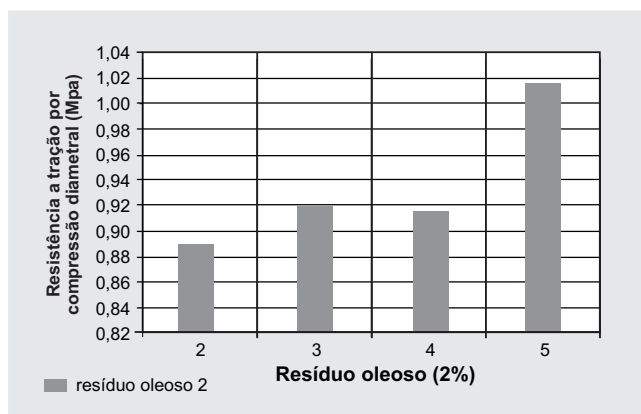


Figura 10 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral – resíduo 2

cionou mudanças significativas quando comparado ao mostrado na Figura 9 (filler pó calcário). Desta maneira, pode-se inferir que a porcentagem de vazios não influencia significativamente o valor da resistência à tração por compressão diametral.

### 3.5 Ensaio de tração diametral modificada de Lottman

Na Figura 11, estão lançados em gráfico os resultados obtidos no ensaio de tração diametral modificada de Lottman com os corpos-de-prova moldados com os fillers cimento, pó calcário e resíduo 1. Nesse ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, va-

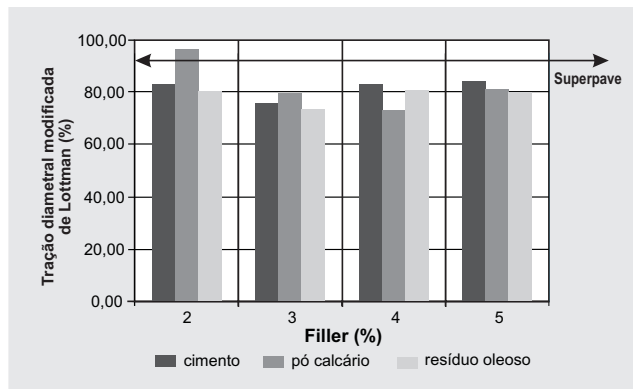


Figura 11 – Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman – resíduo oleoso 1

riando-se os teores de filler de 2%, 3%, 4% e 5%. Os resultados do ensaio de Lottman, para os teores de 2, 3 e 5% do filler pó calcário, 2, 4 e 5% do filler cimento e 2, 4 e 5% do filler resíduo 1, estão acima do limite mínimo preconizado pela metodologia SUPERPAVE (mínimo de 80%).

Na Figura 12, estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração diametral modificada de Lottman com os corpos-de-prova moldados com o filler pó calcário e o resíduo oleoso 2 atuando como agregado miúdo. Nesse ensaio foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando-se os teores de resíduo de 2%, 3%, 4% e 5%.

Os resultados do ensaio de Lottman, para os teores de 2 e 5% do resíduo oleoso 2, estão acima do limite mínimo preconizado pela metodologia SUPERPAVE (mínimo de 80%). Nota-se, também, uma tendência

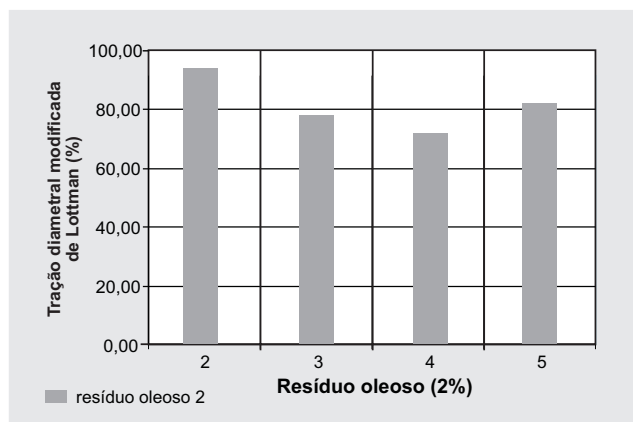


Figura 12 – Resultados do ensaio de tração diametral modificada de Lottman – resíduo oleoso 2

decrecente entre os teores de 2 a 4% e crescente entre 4 e 5%, fato semelhante ao observado na Figura 11 quando da utilização do filler pó calcário sem o resíduo oleoso 2 atuando como agregado miúdo. Desta maneira, pode-se inferir que a adição do resíduo oleoso 2 à mistura asfáltica não proporcionou modificações significativas nos resultados obtidos pelo ensaio de Lottman.

### 3.6 Modelo reduzido

O modelo reduzido de revestimento asfáltico possui a seguinte composição: 24% de brita de 19mm, 34% de brita de 12mm, 32% de areia, 5% de agregado miúdo resíduo oleoso 2 e 5% de filler resíduo oleoso 1.

No período de 03/11/07 a 03/07/08, o modelo reduzido ficou ao ar livre, em contato direto com as variações de temperatura e clima. Nesse período ocor-

reu uma precipitação pluviométrica total de 660,9mm. Na data de 03/07/08, o trecho experimental foi irrigado com água destilada, e, em seguida, executou-se a coleta do líquido que escoou pelos orifícios instalados na caixa de madeira.

Foi realizada a espectroscopia por absorção atômica com os extratos lixiviados e solubilizados do líquido coletado. O Quadro 3 apresenta as concentrações observadas para os parâmetros analisados. Pode-se notar que todas as concentrações estão abaixo do limite máximo permitido pela norma, dessa forma o líquido foi classificado como resíduo Classe III ou inerte, ou seja, não representa perigo para o meio ambiente. Este resultado comprova a assertiva de que a utilização de resíduos oleosos em revestimento asfálticos de estradas representa uma alternativa ambientalmente adequada, de destinação final do resíduo oleoso (cascalho de perfuração).

Quadro 3 – Espectroscopia por absorção atômica e teor de óleo e graxas – modelo reduzido

	Parâmetro	Limites Máximos Permitidos	Resultado
<b>Solubilização (mg/L)</b>	cádmio	0,005	Não detectado
	chumbo	0,05	Não detectado
	chromo	0,05	Não detectado
	sulfetos	Sem padrão	Não detectado
	cobre	1	Não detectado
	ferro	0,3	0,09
	manganês	0,1	Não detectado
	sódio	200	39,09
	zinco	5	Não detectado
	cloretos	Sem padrão	1,35
<b>Lixiviação (mg/L)</b>	cádmio	0,5	Não detectado
	chumbo	5	Não detectado
	chromo	5	Não detectado
	sulfetos	Sem padrão	Não detectado
	cobre	Sem padrão	Não detectado
	ferro	Sem padrão	0,88
	manganês	Sem padrão	Não detectado
	sódio	Sem padrão	16,00
	zinco	Sem padrão	Não detectado
	cloretos	Sem padrão	0,70
<b>Óleo e Graxas (%)</b>	óleo e graxas	5	Não detectado

## 4. CONCLUSÕES

Para o resíduo oleoso 1 (1 –SES-149A), pode-se afirmar que:

- a composição granulométrica do resíduo oleoso 1 indica, principalmente, que é um material com granulometria aceitável para ser usado como filler (92% do material passa na peneira ABNT nº 200);
- o resíduo oleoso 1 foi classificado como de Classe I ou perigoso (tóxico e não inerte); e
- a caracterização mecânica (ensaio Marshall, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Lottman) da mistura asfáltica estudada indica que os teores ideais de resíduo oleoso 1 que podem ser utilizados são de 4 ou 5%.

Para o resíduo oleoso 2 (1 –POTI-4-RN), pode-se afirmar que:

- a composição granulométrica do resíduo oleoso 2 indica, principalmente, que é um material com granulometria aceitável para ser usado como agregado miúdo;
- o resíduo oleoso 2 foi classificado como não perigoso e não inerte, ou seja, resíduo Classe II; e
- a caracterização mecânica (ensaio Marshall, Resistência à Tração por Compressão Diametral de Lottman) da mistura asfáltica estudada indica que o teor ideal de resíduo oleoso 2 que pode ser utilizado é de 5%.

Para o modelo reduzido, pode-se afirmar que:

- o monitoramento ambiental do modelo reduzido indica que o resíduo oleoso 1 e o resíduo oleoso 2 po-

dem ser incorporados em revestimentos asfálticos de estradas sem representar riscos ao meio ambiente.

Logo, as evidências da pesquisa, baseadas em ensaios de laboratório (que simulam o comportamento do material no campo) e no monitoramento do modelo reduzido, são de que os resíduos oleosos (cascalhos de perfuração) estudados, obedecendo a limites percentuais, podem ser utilizados em revestimentos asfálticos de estradas.

Portanto, a utilização de resíduos oleosos (especificamente o cascalho de perfuração) em revestimentos asfálticos representa uma alternativa para a redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequada no meio ambiente. Ainda existem obstáculos ao emprego dessa tecnologia, como, por exemplo, a grande variedade de resíduos oleosos existentes (tipos e composições). À medida que trabalhos de pesquisa apresentarem resultados sobre a viabilidade técnica e a indústria petrolífera se conscientizar do elevado custo ambiental da disposição inadequada de resíduos oleosos, certamente o uso desses resíduos em revestimentos asfálticos se disseminará.

## 5. AGRADECIMENTOS

- À Auriozônia Petróleo S/A;
- À Petrobras;
- À Atecel (Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior);
- AO PRH-25 / ANP (Agência Nacional de Petróleo).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. NBR 10004: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. NBR 10005: Lixiviação de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. NBR 10006: Solubilização de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- 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.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT – ES 31/2004: Pavimentação: Concreto Betuminoso. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_. DNIT – ME 043/95: Misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. DNIT – ME 081/95: Agregado graúdo: determinação de densidade real. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. DNIT – ME 084/95: Agregado miúdo – determinação de densidade real. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. DNIT – ME 138/94: Misturas asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.
- FAÉ, M. I., BRAGA, F. S., BICALHO, K. V., SILVA, M. G. Viabilidade técnica, ambiental e econômica da aplicação da areia oleosa em estradas vicinais e artefatos de concreto. Relatório de Projeto cooperativo do Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor de Petróleo e Gás Natural – CTPETRO, Vitória, 2002.
- FONSECA, M. H. G. P. Estudo do resíduo oleoso das atividades de exploração e produção de petróleo na manutenção de estradas de terra: enfoque ambiental, 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

# Módulo de resiliência a 40°C de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha e óleo extensor

**Fernanda Pilati**

fepilati@sc.usp.br

**Adalberto L. Faxina**

alfaxina@sc.usp.br

**Glauco T. P. Fabbri**

glauco@sc.usp.br

**Manoel H. A. Sória**

mane@sc.usp.br

**Antonio C. Gigante**

gigante@sc.usp.br

**Leni F. M. Leite**

leniml@petrobras.com.br

## RESUMO

Este trabalho visa avaliar os efeitos da borracha moída e do resíduo de óleo de xisto sobre o módulo de resiliência, a 40°C, de misturas asfálticas densas confeccionadas pelo método Marshall. Foram empregados oito ligantes asfálticos, compostos por proporções distintas de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto. O módulo de resiliência foi monitorado, e os dados obtidos foram submetidos à análise estatística, que incluiu o ajuste de modelos polinomiais, a análise de efeitos dos componentes e análise de superfície de resposta. A borracha aumenta o módulo de resiliência a uma taxa média de 20 a 100 MPa para cada 1% de borracha adicionada, o que é favorável ao aumento da resistência à deformação permanente. O óleo reduz o módulo de resiliência a taxas da ordem de 150 a 300 MPa/1%, o que pode ser interpretado como desfavorável à resistência à deformação permanente. As formulações com quaisquer concentrações de borracha, entre 0 e 18%, e concentrações altas de óleo, próximas

de 14%, proporcionam misturas com menores valores de módulo. Arbitrando-se o módulo mínimo de 3.000 MPa, podem ser empregadas formulações com qualquer proporção de borracha entre 0 e 18%, porém, à medida que aumenta o teor de ligante asfáltico, a proporção admissível de óleo diminui: para os teores de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%, admitem-se proporções máximas de óleo, respectivamente, de 12, 12, 7, 5 e 3%.

## PALAVRAS-CHAVE

Ligante asfalto-borracha, resíduo de óleo de xisto, misturas asfálticas densas, módulo de resiliência.

## ABSTRACT

The objective of the present research is to evaluate the effects of crumb rubber and shale-oil residue on resilient modulus, at 40°C, of dense-graded HMA mixes compacted by the Marshall procedure. Eight asphalt binders were used, compounded with different proportions of crumb rubber

and shale-oil residue. Resilient modulus was monitored and the obtained data was submitted to statistical analysis, including model fitting, the analysis of component effects and the response surface analysis. rubber increases resilient modulus at an average rate of 20 to 100 MPa for each 1% rubber added, what is advantageous to increase the rutting resistance. Oil reduces resilient modulus, at average rates of 150 to 300 MPa/1%, what can be seen as a detrimental effect in terms of rutting resistance. Those formulations with any rubber proportion, from 0 and 18%, and with high oil proportion, around 14%, lead to mixtures

with lower resilient modulus values. Choosing a minimum resilient modulus of 3.000 MPa, formulations with any rubber proportion, from 0 and 18%, can be used. However, as the optimum asphalt binder content increases, the acceptable oil proportion reduces: for binder contents of 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 and 6,5%, the maximum oil proportions, respectively, of 12, 12, 7, 5 and 3% are acceptable.

#### KEY-WORDS

Asphalt-rubber binder, shale-oil residue, dense-graded HMA, modulus of resilience.

## 1. INTRODUÇÃO

A durabilidade de uma camada asfáltica está associada, basicamente, à sua rigidez e à sua flexibilidade, que podem ser melhoradas por meio do emprego de ligantes asfálticos modificados, em particular pelo ligante asfalto-borracha. A borracha de pneu moída apresenta características térmicas e mecânicas que proporcionam ao ligante asfáltico modificado menor sensibilidade ao efeito da temperatura, além de incrementar sua rigidez e sua flexibilidade. Se por um lado proporções altas de borracha são favoráveis ao desempenho do pavimento, em termos de resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga, por outro prejudicam a trabalhabilidade da mistura asfáltica durante o processo construtivo.

A reação entre a borracha e o ligante asfáltico acontece mediante a absorção de óleos aromáticos do ligante asfáltico à cadeia polimérica da borracha natural ou sintética. Como consequência direta deste fenômeno, ocorre aumento da viscosidade. A fim de corrigir a composição química do ligante asfáltico de base, um dos elementos que podem ser empregados na produção do asfalto-borracha é o óleo extensor. O resíduo de óleo de xisto, empregado aqui como óleo extensor, é rico em óleos aromáticos, o que facilita a incorporação da borracha moída ao ligante asfáltico, proporcionando um produto de melhor qualidade (FAXINA, 2002). A composição de um ligante asfalto-borracha pode, assim, ser vista como

a tarefa de selecionar proporções adequadas de borracha moída e de óleo extensor, de forma a compor um produto adequado ao uso na pavimentação.

A técnica de experimentos com misturas (CORNELL, 2002) tem sido empregada com êxito na formulação de ligantes asfalto-borracha (FAXINA, 2006; PILATI, 2008), permitindo modelar os efeitos que a proporção de borracha e/ou de outros componentes têm sobre propriedades de interesse. Com os recursos de análise de efeitos de componentes e de superfície de resposta, é possível avaliar os efeitos isolados dos componentes e a interação entre eles, da mesma maneira que definir formulações com base em faixas de valores aceitáveis de propriedades-alvo. A modelagem dos efeitos das proporções dos modificadores sobre as propriedades de interesse na pavimentação permite a previsão de novos valores em condições não testadas, evitando trabalho extra para compor amostras em condições específicas, o que facilita o desenvolvimento de pesquisas e a avaliação de materiais.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da borracha moída de pneus reciclados e do resíduo de óleo de xisto, no papel de óleo extensor, sobre o módulo de resiliência, a 40°C, de misturas asfálticas densas projetadas segundo o método Marshall. Oito ligantes asfálticos foram selecionados, de acordo com o delineamento do experimento, compostos por proporções diversas de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto. Foram confeccionados corpos-de-prova para cada uma das oito misturas asfálticas, em cinco teores de ligante asfáltico.

Foi monitorado o módulo de resiliência das misturas na temperatura de 40°C. Modelos de regressão para o módulo de resiliência foram ajustados, empregando dois métodos de cálculo, o da norma AASHTO TP 31 e o do NCHRP Project 1-28, nos cinco teores de ligante asfáltico. Com base nestes modelos, foram gerados gráficos de efeitos dos componentes e superfícies de resposta, a fim de avaliar os efeitos isolados e de interação entre o ligante asfáltico, a borracha moída e o resíduo de óleo de xisto.

## 2. EFEITOS DA BORRACHA MOIDA E DO ÓLEO EXTENSOR SOBRE O MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os valores de módulos de resiliência das misturas com asfalto-borracha (EPPS, 1994), a 25°C, podem ser maiores ou menores que os obtidos para misturas convencionais, dependendo de vários fatores. Tipicamente, valores menores são obtidos em misturas contendo asfalto-borracha. Ayres e Witzak (1995) verificaram que misturas asfálticas usando ligante asfalto-borracha apresentam valores de módulo de resiliência, a 25°C, correspondentes a 80 a 90% dos valores obtidos para a mistura de referência (CAP 50/70). Estes autores também verificaram que os valores de módulo de resiliência diminuíram com o aumento da proporção de borracha.

Um estudo com misturas asfálticas produzidas com ligante asfalto-borracha e óleo extensor (FAXINA, 2002), avaliado à luz do módulo de resiliência a 25°C, constatou uma diminuição dos valores de módulo de 50% para a mistura asfáltica com 12% de borracha e 10% de resíduo de óleo de xisto e de 66% para a mistura com 20% de borracha e 15% de resíduo de óleo de xisto, em relação à mistura com CAP 30/45, indicando que a adição destes produtos torna as misturas mais flexíveis. Sória *et al.* (2007) e Pilati (2008) apontam que o efeito da borracha sobre o módulo total é parabólico, ou seja, aumenta o módulo total até concentrações próximas a 9% e o diminui quando se aumenta a proporção desse modificador. No entanto, o efeito do óleo de xisto, em linhas gerais, é linear, reduzindo o módulo total a uma taxa aproximada de 480MPa/1%. Leite *et al.* (2000) constataram a redução de aproximadamente 50% no valor do módulo de resiliência, a 25°C, de misturas empre-

gando ligante asfalto-borracha, em relação às misturas convencionais (CAP 50/70). Lemes (2004) verificou o aumento do módulo de resiliência de misturas asfálticas com ligante asfalto-borracha, quando submetidas a envelhecimento a curto prazo.

Morilha Jr. (2004) comparou o módulo de resiliência, a 40°C, de misturas asfálticas empregando ligantes não modificados de diferentes consistências e ligantes asfálticos modificados com diferentes concentrações de borracha moída de pneu e com os polímeros SBS e EVA. A mistura asfáltica utilizando asfalto-borracha, na concentração de 15%, apresentou maior módulo de resiliência, indicando que a borracha moída proporciona misturas asfálticas com menor suscetibilidade à temperatura. Este autor também verificou, ao comparar os valores de módulo de resiliência medidos a 25 e a 40°C, que as misturas asfálticas confeccionadas com ligante asfalto-borracha apresentaram maior retenção de módulo com o aumento da temperatura. A mistura empregando ligante asfalto-borracha na concentração de 15% reteve, a 40°C, 72% do valor do módulo obtido a 25%, e a mistura com ligante asfalto-borracha na concentração de 20% reteve 40% do módulo a 25°C, ao passo que as demais misturas retiveram entre 20 e 30% do módulo a 25°C.

Já Spetch (2004), ao avaliar o efeito da temperatura sobre o módulo de resiliência, nas temperaturas de 25 e 45°C, obteve valores de retenção de 53, 77 e 80%, para misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha nas proporções de 6, 12 e 18%, respectivamente, enquanto a mistura com CAP 50/70 preservou apenas 37% do valor do módulo. Estes resultados reafirmam que a borracha tem potencial de proporcionar misturas asfálticas com menor suscetibilidade térmica nas temperaturas de ocorrência de deformação permanente. Este autor também verificou aumento do módulo de resiliência com o aumento da concentração de borracha moída a 45°C.

## 3. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

Os ligantes asfálticos avaliados foram selecionados com base em um experimento delineado por meio da técnica estatística de “experimentos com misturas” (CORNELL,

2002), com restrições nas proporções dos componentes. Chamando  $x_1$  o teor de ligante asfáltico,  $x_2$  o teor de borracha moída e  $x_3$  o teor de resíduo de óleo de xisto, as restrições impostas, em porcentagem, foram:  $68 \leq x_1 \leq 100$ ,  $0 \leq x_2 \leq 18$  e  $0 \leq x_3 \leq 14$ . Outras duas restrições, provenientes da teoria de experimentos com misturas, foram impostas:  $x_i \geq 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, q$ , sendo  $q$  o número de componentes da mistura, e  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ . A Figura 1 ilustra o simplex e a sub-região delimitada para o experimento, no qual estão indicadas as misturas projetadas. Temperatura, tempo e velocidade de agitação são variáveis de processo intervenientes sobre as características do asfalto-borracha, mas não foram incluídas neste experimento. Os ligantes asfálticos obtidos do delineamento do experimento foram: 100-0-0, 93-0-7, 86-0-14, 91-9-0, 77-9-14, 82-18-0, 75-18-7 e 68-18-14, no qual o primeiro número corresponde ao teor de asfalto, o segundo ao teor de borracha e o terceiro ao teor de óleo. O experimento foi delineado de forma a ajustar um modelo polinomial de terceiro grau, específico para problemas com misturas, denominado modelo cúbico especial (CORNELL, 2002).

O agregado mineral não é considerado um quarto componente, o que tornaria o experimento mais complexo. Como a porcentagem de agregado no corpo-de-prova, para um mesmo teor de ligante asfáltico, não muda e cada modelo é definido para teores controlados de ligante asfáltico, assume-se que as porcentagens de agregado mineral e de ligante asfáltico são constantes nas oito misturas asfálticas, para cada teor de ligante asfáltico. Assim, é possível avaliar o efeito das variações das proporções de asfalto, de borracha e óleo sobre o módulo de resiliência das misturas asfálticas, admitindo que as interferências sobre os valores da propriedade sejam devidas exclusivamente às variações nas porcentagens desses componentes.

#### 4. MATERIAIS EMPREGADOS

A borracha, cuja composição granulométrica é mostrada na Tabela 1, foi produzida pela empresa Artgoma S.A., de São Paulo-SP, obtida da trituração de pneus de veí-

culos pesados. O ensaio de termogravimetria indicou a presença de 64,3% de polímeros e plastificantes, 31,4% de negro de fumo e 4,3% de material inorgânico na composição química da borracha. O cimento asfáltico de petróleo, CAP 30/45, com classificação PG 70-10 pela especificação SUPERPAVE, foi empregado como ligante asfáltico de base. O resíduo de óleo de xisto, tipo AR-5 conforme especificação ASTM D 4552, foi fornecido pela Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX-Petrobras), de São Mateus do Sul-PR. O agregado mineral foi fornecido pela Pedreira Said, de Ribeirão Preto-SP, e é oriundo da britagem de rocha basáltica. A composição granulométrica das misturas asfálticas, correspondente ao centro da faixa C do DER-SP, foi obtida por separação dos agregados nas frações correspondentes a cada uma das peneiras desta especificação e posterior misturação. O agregado apresenta Abrasão Los Angeles de 11% e a massa específica aparente da composição é de 28,73 kN/m<sup>3</sup>.

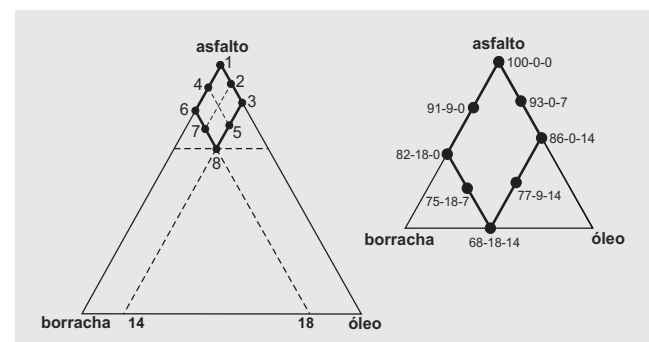


Figura 1 – Simplex do experimento, sub-região delimitada e ligantes asfálticos escolhidos

Tabela 1 – Composição granulométrica da borracha empregada

abertura da peneira, mm	1,19	0,59	0,42	0,297	0,175	0,150	0,074
% passada	100,00	99,24	59,74	44,99	15,84	11,31	2,46

#### 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A rotina de laboratório foi dividida em três etapas: preparação dos ligantes asfálticos, moldagem dos corpos-de-prova e obtenção das medidas de módulo de resiliência. Foram preparados oito ligantes asfálticos, em conformidade com o delineamento do experimento, e, em seguida, confeccionados corpos-de-prova Marshall em dois teores de ligante asfáltico: 5,5 e 6,5%. A densidade

efetiva do agregado mineral foi determinada segundo o método Rice (ASTM D 2041-00), e a densidade aparente da composição granulométrica foi obtida da ponderação das densidades aparentes dos materiais miúdo e graúdo nas porcentagens em que são empregados, obtidas pelos métodos ASTM C 128-93 e ASTM C 127-91. Foi considerado material graúdo o retido na peneira de malha #4,8 mm e material miúdo passado na peneira de malha #4,8 mm. O agregado mineral empregado apresenta valores baixos de absorção de ligante asfáltico, e, por isso, a absorção não foi considerada nos cálculos. Foi empregado um único valor de densidade efetiva para cada ligante asfáltico, corrigido para os teores utilizados.

### 5.1 Preparação dos ligantes asfálticos

As composições contendo apenas asfalto e borraça e aquelas contendo asfalto, borraça e óleo foram processadas a 170°C, durante 90 minutos, a uma velocidade de 4.000rpm, em misturador de alto cisalhamento, marca Silverson, modelo L4RT. As composições contendo apenas asfalto e óleo foram processadas a 135°C, durante 25 minutos, sob rotação de 400rpm em misturador de baixo cisalhamento, marca Fisatom, modelo 722D. Foram compostos sete ligantes asfálticos, aos quais se soma a mistura de referência (CAP 30/45), totalizando oito ligantes asfálticos.

### 5.2 Moldagem dos corpos-de-prova

O agregado mineral foi aquecido em uma misturadora de massa adaptada para este fim e, em seguida, adicionado o ligante asfáltico e realizada a homogeneização do material. Em seguida, foram separados 1.200g e armazenados em tigelas metálicas, que foram acondicionadas em estufa pelo período de 2h na temperatura de compactação. Foram empregados cinco teores de ligante asfáltico (4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%), sendo compactados sete corpos-de-prova para cada teor. Todas as misturas asfálticas foram compactadas nestes teores,

por se tratar de um requisito do delineamento do experimento. A Tabela 2 apresenta as temperaturas de usinagem e de compactação.

### 5.3 Obtenção dos dados de módulo de resiliência

Foram empregados na modelagem os módulos totais, obtidos a 40°C, e determinados por meio de dois métodos de cálculo, referenciados no texto como AASHTO (norma AASHTO TP 31) e NCHRP (NCHRP Project 1-28). Foram aplicados 100 ciclos de carregamento com 1s de duração cada, com carregamento de 0,1s e repouso de 0,9s. O módulo de resiliência total é obtido com base no deslocamento total recuperado durante o período de descarregamento e repouso. Segundo a norma da AASHTO, o deslocamento total é dado pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e o deslocamento registrado no final do ciclo. Já para o procedimento do NCHRP, o deslocamento total é obtido pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e a média dos deslocamentos registrados no intervalo de 85 a 95% da parcela de repouso do ciclo. Foram realizadas sete repetições por condição, totalizando 280 medidas.

## 6. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Para a realização da modelagem estatística, foi empregado o pacote estatístico Minitab, versão 14.1. A análise dos resíduos foi realizada por meio de inspeção visual, para a verificação de tendências, e do teste de Anderson-Darling, para verificar a ocorrência de distribuição normal dos resíduos. O efeito da multicolinearidade, normalmente presente em regiões experimentais altamente delimitadas, não foi considerado neste estudo, uma vez que a modelagem está direcionada exclusivamente para previsão. O modelo empregado na regressão é denominado modelo cúbico especial, com o formato geral indicado na equação 1. Tais modelos são de-

Tabela 2 – Temperaturas de usinagem e de compactação

ligante asfáltico	100-0-0	91-9-0	82-18-0	93-0-7	86-0-14	75-18-7	77-9-14	68-18-14
usinagem (°C)	158	165	180	150	143	175	155	165
compactação (°C)	148	155	170	140	132	165	145	155

nominados modelos canônicos e são específicos para modelagem de problemas de misturas.

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i^0 x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij}^0 x_i x_j + \beta_{ijk}^0 x_i x_j x_k \quad (1)$$

com  $i, j, k = 1, 2, \dots, q$ , sendo  $q$  o número de componentes da mistura,  $b_i$ ,  $b_{ij}$  e  $b_{ijk}$  as estimativas dos coeficientes dos termos  $x_i$ ,  $x_{ij}$  e  $x_{ijk}$ , respectivamente,  $x_i$ ,  $x_j$  e  $x_k$  correspondentes aos teores de CAP, de borracha e de óleo, respectivamente.

A análise estatística se baseia na avaliação dos gráficos de efeitos dos componentes e das superfícies de resposta. Um gráfico de efeitos dos componentes mostra o efeito que cada componente, isoladamente, tem sobre a resposta, com base no modelo adotado. Este tipo de gráfico indica o efeito da variação da proporção de um dado componente, mantendo constante a relação entre proporções dos demais. Isto quer dizer que ao avaliar o efeito da variação da proporção de borracha, por exemplo, as proporções de asfalto e de óleo na mistura também variam, mas a relação entre estes últimos dois componentes se mantém constante. Cada linha no gráfico indica o efeito de mudar o componente correspondente em uma linha imaginária (direção) conectando a mistura de referência (normalmente o centroide da região experimental) ao vértice da região experimental e a mistura de referência ao lado oposto ao vértice.

É preciso entender que a análise de efeitos de componentes exposta por este tipo de gráfico é apenas uma dentre muitas possibilidades de análise (várias direções). A direção escolhida, nesta análise, corresponde à reta ligando o vértice ao lado oposto da região experimental, passando pela mistura de referência, que, neste caso, é o centroide da região delimitada na Figura 1. Esse tipo de gráfico pode ser empregado para identificar o componente que influencia mais a resposta. A amplitude horizontal indica a faixa de variação da proporção dos componentes, nos limites indicados no delineamento do experimento, partindo da mistura de referência para +50% da faixa de variação e para -50% desta faixa. A amplitude vertical indica a intensidade do efeito da variação da proporção do componente na mistura sobre a propriedade. Uma maneira mais rápida de analisar os efeitos é ver a porcenta-

gem de cada componente aumentando da direita para a esquerda, dentro da sua respectiva faixa de variação.

Ao interpretar um gráfico de efeitos de componentes, é necessário observar que: (a) todos os componentes são interpretados em relação à mistura de referência; (b) os componentes que apresentam maior efeito na resposta apresentarão curvas com maior inclinação; (c) componentes que apresentam faixas mais amplas de ocorrência (limite superior – limite inferior) apresentarão curvas mais extensas, componentes com faixas mais restritas apresentarão curvas mais curtas; (d) o efeito total de um componente depende da sua faixa de ocorrência e da inclinação da curva correspondente; o efeito total de um componente é definido pela diferença na resposta entre o ponto na curva correspondente ao seu limite superior e o ponto na curva correspondente ao seu limite inferior; (e) componentes com curvas aproximadamente horizontais, em relação à mistura de referência, não apresentam virtualmente nenhum efeito sobre a resposta; (f) componentes com curvas semelhantes apresentarão efeitos semelhantes sobre a resposta; e (g) os componentes não têm efeitos totalmente isolados, uma vez que alterar a proporção de um implica alterar a de pelo menos um dos complementares.

Enquanto analisando os gráficos de efeitos de componentes, é importante ter em mente que estes resultados são obtidos ao se caminhar ao longo de uma dada direção dentro do simplex. Outras análises são possíveis em outras direções. Este tipo de gráfico representa um artifício estatístico para tentar entender como cada componente afeta a resposta individualmente, uma vez que não é possível variar a proporção de um componente mantendo constantes as proporções dos demais. Em termos práticos, os três componentes atuam em conjunto, e os efeitos deles sobre a resposta dependem dos efeitos de interação entre eles. Estes efeitos de interação dependem das proporções dos componentes e são ilustrados de uma forma mais efetiva e realística pelas superfícies de resposta.

As superfícies de resposta permitem mostrar como uma resposta se relaciona com os componentes da mistura, com base no modelo adotado. A superfície de resposta representa um plano bidimensional, no qual todos os pontos que apresentam a mesma resposta estão co-

nectados para produzir curvas de nível. As superfícies de resposta são úteis para estabelecer valores ideais de uma dada propriedade e as misturas ideais correspondentes. Representam uma ferramenta efetiva na determinação de regiões em que o resíduo de óleo de xisto pode ser empregado em conjunto com a borracha, atuando como óleo extensor.

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os modelos de regressão referentes aos módulos obtidos pelos procedimentos AASHTO e NCHRP, nos teores de ligante asfáltico de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%. As Figuras de 2 a 6 mostram os gráficos dos efeitos dos componentes, e as Figuras de 7 a 11 trazem as superfícies de resposta, nos cinco teores de ligante asfáltico, pelos procedimentos AASHTO (a) e NCHRP (b).

De acordo com a Figura 2a, o aumento da proporção de borracha aumenta o módulo total obtido pelo procedimento AASHTO a uma taxa de 19 MPa para cada 1% de borracha adicionada. Já o óleo reduz o módulo, à taxa de 207 MPa/1%. As mesmas tendências são vistas na Figura 2b, com os componentes apresentando intensidades similares às observadas para os valores de módulo obtidos pelo procedimento AASHTO.

O efeito da borracha, observado na Figura 3, é parabólico, com ponto de máximo em torno de 9%, ou seja, a borracha aumenta o valor do módulo de resiliência até a concentração de 9% e o reduz em proporções de 9 a 18%,

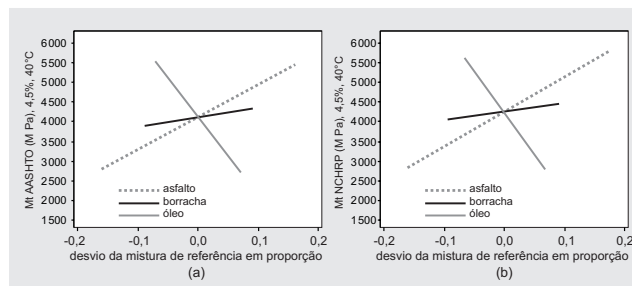


Figura 2 – Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 4,5%

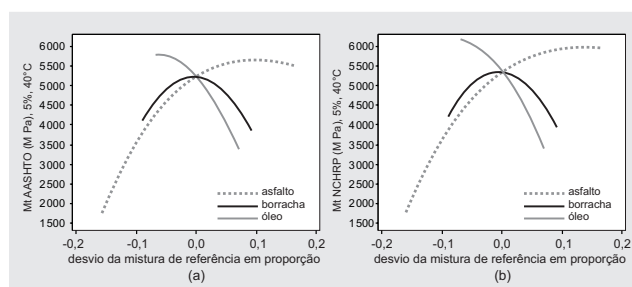


Figura 3 – Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,0%

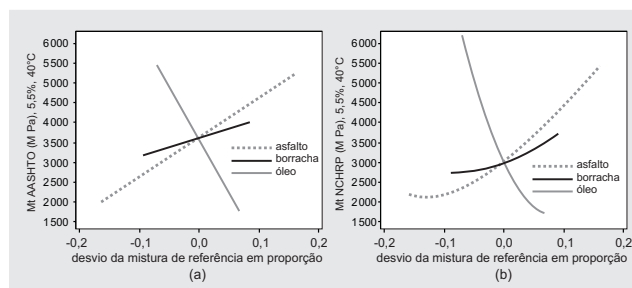


Figura 4 – Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,5%

Tabela 3 – Modelos de regressão referentes às propriedades monitoradas

propriedade	modelo de regressão	R <sup>2</sup> (%)	n
M <sub>i</sub> AASHTO 4,5%	$= 5.387x_1 + 6.295x_2 - 14.328x_3$	56,0	52
M <sub>i</sub> AASHTO 5,0%	$= 5.507x_1 - 103.479x_2 - 100.222x_3 + 123.859x_1x_2 + 94.833x_1x_3 + 378.875x_1x_2x_3$	87,5	55
M <sub>i</sub> AASHTO 5,5%	$= 5.206x_1 + 7.823x_2 - 20.937x_3$	85,0	52
M <sub>i</sub> AASHTO 6,0%	$= 4.122x_1 + 11.886x_2 - 16.595x_3$	86,0	54
M <sub>i</sub> AASHTO 6,5%	$= 3.945x_1 - 23.398x_2 + 85.960x_3 + 31494x_1x_2 - 117.441x_1x_3 - 88.538x_1x_2x_3$	89,9	55
M <sub>i</sub> NCHRP 4,5%	$= 5.661x_1 + 6.181x_2 - 15.322x_3$	56,7	52
M <sub>i</sub> NCHRP 5,0%	$= 5.981x_1 - 105.119x_2 - 84.900x_3 + 125.352x_1x_2 + 73.838x_1x_3 + 361.494x_1x_2x_3$	91,1	53
M <sub>i</sub> NCHRP 5,5%	$= 5.408x_1 + 13.719x_2 + 119.068x_3 - 160.551x_1x_3 - 311.069x_1x_3$	87,5	54
M <sub>i</sub> NCHRP 6,0%	$= 4.310x_1 + 12.010x_2 - 17.554x_3$	86,1	54
M <sub>i</sub> NCHRP 6,5%	$= 4.158x_1 + 2.484x_2 + 112.976x_3 - 150.046x_1x_3 - 122.105x_2x_3$	90,2	54

x<sub>1</sub>: proporção de CAP; x<sub>2</sub>: proporção de borracha; x<sub>3</sub>: proporção de óleo; n: amostra

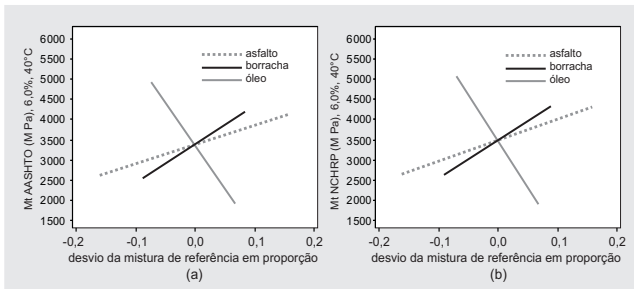


Figura 5 – Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,0%

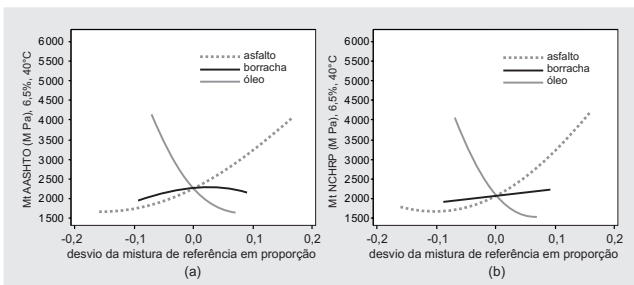


Figura 6 – Efeitos dos componentes sobre os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,5%

para ambos os procedimentos de obtenção do módulo. O efeito do óleo é aproximadamente linear, reduzindo o valor do módulo. O óleo reduz o módulo à taxa de 150MPa por 1% de óleo adicionado, quando se emprega o procedimento AASHTO (Figura 3a), e à taxa de 200MPa/1% no caso dos módulos obtidos pelo procedimento NCHRP (Figura 3b).

No teor de 5,5% (Figura 4a), a borracha aumenta o módulo total à taxa de 53MPa/1%. O óleo, por sua vez, reduz o módulo total à taxa de 257MPa/1%. Já no caso dos módulos obtidos pelo procedimento NCHRP, a borracha tem efeito aproximadamente linear, aumentando o módulo à taxa de 54MPa/1%. O óleo reduz o valor do módulo de resiliência à taxa de 300MPa/1%.

A Figura 5 indica que os efeitos da borracha e do óleo são lineares e mantêm a mesma tendência para ambos os métodos de determinação do módulo total. Pelo procedimento AASHTO, a borracha aumenta o módulo total à taxa de 97MPa/1%, e o óleo o reduz à taxa de 192 MPa/1%. Pelo procedimento NCHRP, a borracha aumenta o módulo total à taxa de 91MPa/1%, e o óleo o reduz à taxa de 226MPa/1%.

A Figura 6 apresenta os gráficos de efeito dos componentes dos módulos totais no teor de ligante asfáltico

de 6,5%. Nota-se que, para o procedimento da AASHTO, a borracha apresenta efeito parabólico, com ponto de máximo em torno de 10%, isto é, aumenta o valor do módulo para concentrações de 0 a 10%, e o diminui para concentrações acima disto. Já para o procedimento NCHRP, a borracha apresenta efeito linear e pouco expressivo sobre o módulo de resiliência: a borracha aumenta o módulo à taxa de 16MPa/1%. Para ambos os métodos o efeito do óleo é parabólico.

A Figura 7 apresenta as superfícies de resposta para os valores de módulo total no teor de ligante asfáltico de 4,5%. Observa-se que os valores mais baixos de módulos estão localizados na região em que figuram misturas com quaisquer concentrações de borracha e concentrações altas de óleo, enquanto os valores mais altos de módulos são observados nas regiões com quaisquer concentrações de borracha e concentrações baixas de óleo. Nota-se que a proporção de borracha possui efeito pouco expressivo sobre a propriedade neste teor.

No teor de 5,0%, conforme indicado na Figura 8, observa-se que os maiores valores do módulo de resiliência

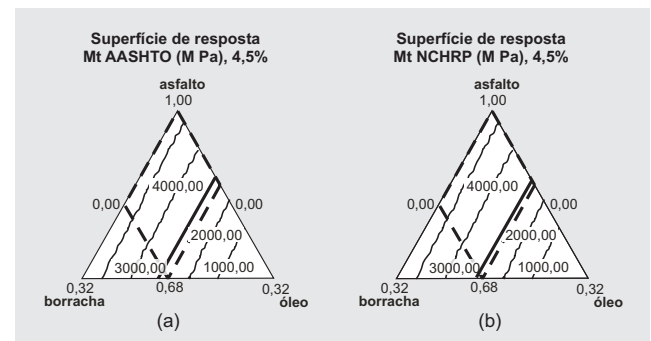


Figura 7 – Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 4,5%

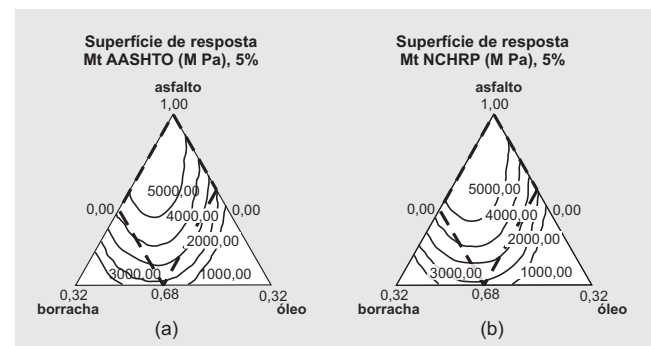


Figura 8 – Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,0%

estão localizados na região com concentrações baixas e intermediárias de borracha e concentrações baixas de óleo. Misturas asfálticas com módulo menor são obtidas ao se empregar formulações com proporções baixas de borracha e altas de óleo e com proporções altas de borracha e de óleo.

A Figura 9 apresenta a superfície de reposta para o módulo de resiliência total no teor de 5,5%. Nota-se que o efeito do óleo é mais expressivo que o da borracha. Os maiores valores de módulos de resiliência são encontrados na região com quaisquer concentrações de borracha e baixas concentrações de óleo, e os menores valores de módulos de resiliência estão localizados na região com quaisquer concentrações de borracha e altas concentrações de óleo.

A Figura 10 apresenta a superfície de reposta para o módulo total no teor de 6,0%. Os maiores valores de módulos de resiliência são encontrados na região com quaisquer concentrações de borracha e baixas concentrações de óleo, e os menores valores de módulos de resiliência estão localizados na região com quaisquer concentrações de borracha e altas concentrações de óleo. Observa-se que o efeito do óleo é mais expressivo que o da borracha.

No teor de 6,5%, apresentado na Figura 11, nota-se que os valores mais altos de módulos de resiliência estão localizados na região com quaisquer concentrações de borracha e baixas concentrações de óleo, porém, os valores baixos de módulos são encontrados em quaisquer concentrações de borracha e altas de óleo. Observa-se que para valores altos de módulos de resiliência a borracha possui efeito pouco expressivo.

É natural associar os diferentes comportamentos constatados, nos gráficos de efeitos dos componentes e nas superfícies de resposta, sobre as propriedades monitoradas, à influência do teor de ligante asfáltico presente na mistura. No entanto, é importante lembrar que estes gráficos são provenientes de modelos cujos coeficientes foram ajustados com base nas amostras disponíveis. A variabilidade inerente aos dados determina se um certo coeficiente será estatisticamente significativo ou não, no nível de confiança de 95%, gerando modelos em que nem todos os termos estão presentes. É im-

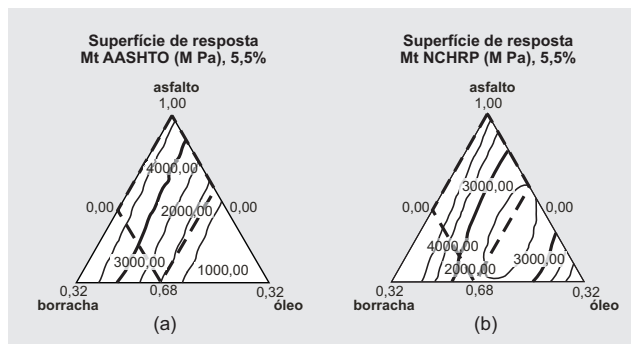


Figura 9 – Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 5,5%

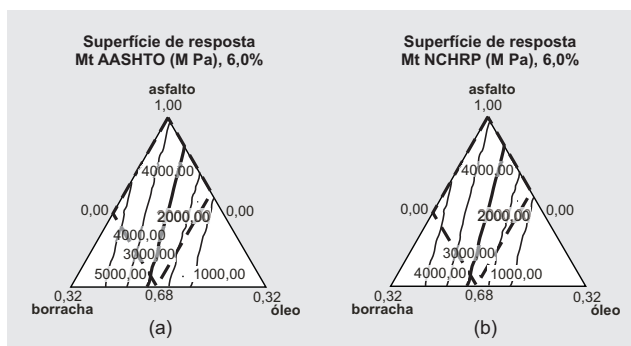


Figura 10 – Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,0%

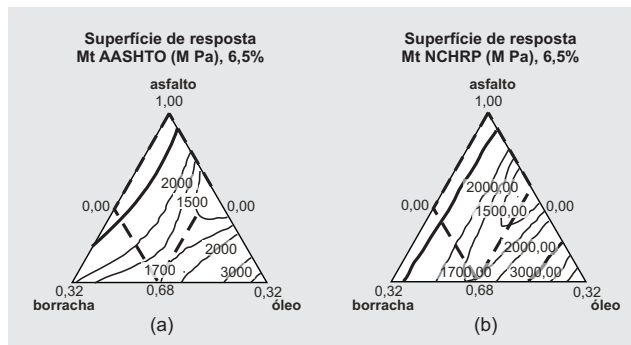


Figura 11 – Superfícies de resposta para os módulos totais (a) AASHTO e (b) NCHRP, no teor de ligante asfáltico de 6,5%

portante observar que a maioria dos modelos é linear, em que não figuram efeitos de segunda ordem. Os diferentes comportamentos observados nestes gráficos são, portanto, influenciados pelo teor de ligante asfáltico, mas também pelos termos presentes no modelo, o que não permite atribuir estas diferenças apenas ao teor de ligante asfáltico.

A título de exemplo, considere-se o limite arbitrado de 3.000MPa para o módulo total a 40°C. A Tabela 4 indica as proporções de borracha e de óleo na composi-

ção do ligante asfáltico, nos cinco teores estudados, de forma a garantir que as misturas asfálticas apresentem módulo total superior ao arbitrado. Observa-se que pode ser empregada qualquer proporção de borracha entre 0 e 18%, porém, há restrições à proporção de óleo, dependendo do teor de ligante asfáltico. Em linhas gerais, à medida que aumenta o teor de ligante asfáltico, a proporção admissível de óleo diminui. Para o teor de 4,5%, admite-se uma proporção máxima de óleo de 12%, e para o teor de 6,5%, a proporção máxima seria de 3%. Caso se considere que o emprego do ligante asfalto-borracha exige teores de ligante asfáltico mais altos, a melhoria da trabalhabilidade obtida seria pequena, uma vez que a concentração de óleo admissível não poderia ser superior a algo em torno dos 5%. Obviamente que esta observação está vinculada ao limite arbitrado para o módulo de resiliência, pois, no caso de um limite menor, a proporção admissível de óleo poderia ser maior.

**Tabela 4 – Proporções de borracha e óleo visando misturas asfálticas com módulo superior a 3.000MPa**

teor de ligante asfáltico	procedimento	proporções
4,5	AASHTO NCHRP	borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 12% borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 13%
5,0	AASHTO NCHRP	borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 12% borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 12%
5,5	AASHTO NCHRP	borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 8% borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 7%
6,0	AASHTO NCHRP	borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 5% borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 6%
6,5	AASHTO NCHRP	borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 3% borracha entre 0 e 18% e óleo entre 0 e 3%

## 8. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliados os efeitos da borracha moída e do resíduo de óleo de xisto sobre o módulo de resiliência de misturas asfálticas densas, empregando o método Marshall de compactação. Foi monitorado o módulo em oito misturas asfálticas, empregando ligantes asfálticos compostos com borracha moída e resíduo de óleo de xisto, nos teores de ligante asfáltico de 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5%. Os dados obtidos foram em-

pregados no ajuste de modelos polinomiais de terceiro grau, com base nos quais foram obtidos gráficos de efeitos de componentes e superfícies de resposta, que permitiram a análise dos efeitos isolados e de interação entre os componentes.

As seguintes constatações merecem destaque:

- a borracha contribui para o aumento do módulo de resiliência com taxas médias de 20 a 100MPa para cada 1% de borracha adicionada;
- o efeito do óleo é contrário ao da borracha, reduzindo o módulo de resiliência a taxas da ordem de 150 a 300MPa/1%, que são superiores às observadas para a borracha; no entanto, o efeito do óleo poderia ser interpretado como prejudicial, uma vez que reduz a rigidez da mistura asfáltica;
- as formulações com quaisquer concentrações de borracha, entre 0 e 18%, e concentrações altas de óleo, próximas de 14%, proporcionam misturas com menores valores de módulo de resiliência, e, por sua vez, composições com quaisquer concentrações de borracha, entre 0 e 18%, e concentrações baixas de óleo proporcionam misturas com módulos mais altos;
- arbitrando-se o módulo mínimo de 3.000MPa, podem ser empregadas formulações com qualquer proporção de borracha entre 0 e 18%, porém, à medida que aumenta o teor de ligante asfáltico, a proporção admissível de óleo diminui: para os teores de ligante asfáltico de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5%, admitem-se proporções máximas de óleo, respectivamente, de 12, 12, 7, 5 e 3%.

## 9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SIX-Petrobras pelo fornecimento do óleo de xisto, ao Cenpes-Petrobras pela disponibilização do laboratório para a preparação das amostras e realização de ensaios, à Artgoma S.A. pelo fornecimento da borracha moída, à Capes pela concessão de bolsa de mestrado à primeira autora, e à FAPESP pela concessão de bolsa de doutorado ao segundo autor e de Auxílio à Pesquisa (processo nº 2004/09761-5) ao quarto autor.

## REFERÊNCIAS

- AYRES, M. e WITCZAK, M.W. (1995). Resilient modulus properties of asphalt rubber mixes from field demonstration projects in Maryland. *Transportation Research Record*, n. 1492, p. 96-107.
- CORNELL, J. A. (2002). *Experiments with mixtures: design, models, and the analysis of mixture data*. 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York.
- EPPS, J. A. (1994). Uses of recycled rubber tires in highways. *NCHRP – Synthesis of Highway Practice*, n.198, Transportation Research Board, Washington, DC, 162p.
- FAXINA, A. L. (2002). *Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha*. 274p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- \_\_\_\_\_. (2006) *Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligante asfalto-borracha*. 308p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G.; BERNUCCI, L. L. B.; SOARES, J. B. (2000). Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: *Asphalt Rubber 2000 Conference*. Vilamoura, Portugal, p. 309-318.
- LEMES, P. C. L. (2004). *Estudo do envelhecimento a curto prazo de misturas asfálticas densas com cimentos asfálticos modificados*. 131p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- MORILHA J R., A. (2004). *Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas*. 165p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- PILATI, F. (2008). *Análise dos efeitos da borracha moída e do óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas*. 212p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SORIA, M. H. A.; FAXINA, A. L.; PILATI, F.; FABBRI, G. T. P.; GIGANTE, A. C.; LEITE, L.F.M. (2007). Modelagem do efeito da borracha moída e do resíduo de óleo de xisto sobre o módulo de resiliência. In: *21º Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2007, Rio de Janeiro. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2007*.
- SPECHT, L.P. (2004). *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneu*. 279p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

# Artigo do Eng<sup>o</sup> Thenn de Barros no Boletim Informativo da ABPv

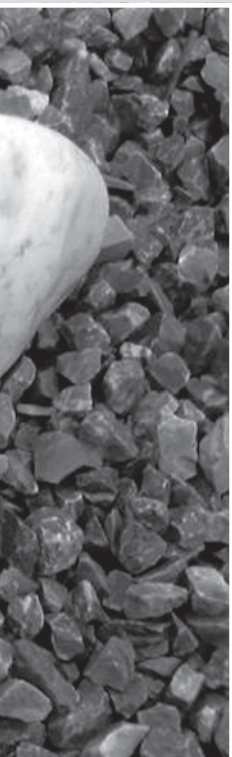
Atahualpa Schmitz da Silva Prego

**D**o Boletim Informativo nº 109, de fevereiro de 1988, retiramos parte de um relatório sucinto escrito pelo engenheiro Sérgio Thenn de Barros e resumimos outras partes do ocorrido nas obras de duplicação da Via Dutra, em 1966/1967.

A “Dutra” não estava ainda inteiramente duplicada e com o tráfego em ascensão passou a pressionar o DNER; foram construídos trechos novos duplicando a pista existente, corrigindo o sinuosidade do traçado, melhoramentos foram introduzidos no perfil possibilitando ampla visibilidade vertical e implantados trevos nos acessos às principais cidades. As construtoras no canteiro, todas de grande porte, foram supervisionadas por uma consultoria norte-americana, de acordo com as exigências do financiamento do Banco Mundial.

“Foi a primeira grande obra rodoviária no Brasil executada com o acompanhamento e controle tecnológico realizados por uma firma de consultoria estrangeira, porque praticamente não existiam ainda empresas nacionais de consultoria. Só a partir dessa época





generalizou-se no DNER a prática de contratação de serviços de supervisão de obras”.

Contratado por uma das construtoras, o engenheiro Sérgio Thenn de Barros tinha uma tarefa específica, qual seja, resolver problemas de execução das fases do pavimento.

“A primeira dificuldade a ser vencida era a falta de experiência da empresa contratada para executar um *controle tecnológico relativamente rigoroso*. A falta de experiência da empresa, como de todas as construtoras até então e também em parte da própria fiscalização do DNER, em trabalhar sob este novo sistema obrigava ao assessor contratado a estabelecer um novo canal de comunicação a nível técnico das três partes envolvidas na obra”.

O problema executivo residia na falta de ocorrências para o reforço de subleito e sub-base. As ocorrências foram mal estudadas e foram esgotadas logo do início da obra. A fiscalização não aceitava o que havia de sobra nas ocorrências.

A geologia e fotos aéreas foram usadas para localização de novas ocorrências numa região onde se mostravam escassas. O projeto de pavimentação da rodovia BR-04 Rio–Bahia (atual BR-116) exerceu forte influência nos projetistas da Rio–São Paulo, em razão das dificuldades para a localização de materiais para sub-base estabilizada granulometricamente.

A pavimentação paralizada deixava todos receosos.

Passando por uma ponte de uma estrada secundária a 10km de Lorena (SP), Thenn de Barros viu na caixa de um pequeno rio, meio seco, uma camada de seixos rolados de diâmetro média, assemelhando-se a uma bola de futebol. Tratava-se de um matiral ou muito graúdo ou muito fino, não havia a gradação intermediária. O mate-

rial não foi considerado no projeto “porque estava completamente fora de especificação de estabilização granulométrica (...)”. “Mas ali estava a solução”.

Admitido pelos titulares da empresa, procedeu-se a britagem, em bica corrida, das “bolas de futebol”, originando uma curva granulométrica no meio da faixa C de base estabilizada, com tamanho máximo de 1. Das serras vizinhas vinham mais seixos trazidos por fortes chuvas. A nova ocorrência próxima da rodovia, com curta distância de transporte, equilibrou o preço contratado.

No entato, era “um pouco mais caro do que a sub-base de cascalho natural, porém, mais barato do que a base de pedra britada”, dada a menor distância de transporte.

A usina de mistura de solos ficava próxima à ocorrência, e aí foi posta “uma pequena instalação de britagem em circuito fechado, com separação de material britado em apenas duas frações”.

A usina de solos remisturou essas frações e adicionou água para compactação. Na pista o espalhamento era mecânico, feito por um distribuidor de agregados. A compactação vinha de imediato. Os 100km foram feitos desta maneira.

Anos se passaram, o “engenheiro Murilo Lopes de Souza, o papa da pavimentação no Brasil, observou que aquela tinha sido a primeira base de brita granulada executada no Brasil. Não exatamente pedra britada, mas seixo britado de excelente qualidade”.

O professor Sérgio Thenn de Barros fez ainda observação lembrando o caso: “Não entendemos por que não se usa mais bases de material beneficiado no Brasil. Quando não se encontra cascalho natural, parte-se logo para as bases de pedra. Talvez falta imaginação criativa!” Ponderou.

# 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(is) 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 submitting articles and technical contributions

1. PAVIMENTAÇÃO Journal is a technical-scientific publication by ABPv. All contributions to the Periodical must be exclusively technical and must be open to partners and professionals of the Road, Railroad and Airport Engineering, both national and international.
2. The Journal may eventually also present special contents, written by your editorial technical staff and by the board of directors of ABPv, as a way of publishing opinions or comments that are considered relevant as the “voice” of ABPv.
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, technical or any other issue forwarded to eventual publication will be evaluated by three professionals who are members of the Technical-Scientific Committee of the Journal, and will be chosen according to the profile of the content to be evaluated. Those who evaluate the papers will not be able to know either authors or papers before the evaluation, and authors will not be allowed to know the identity of those who will be 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 PAVIMENTAÇÃO Journal, and they may suggest three options in order to forward them:
  - (I) The paper is accepted and sent to publication;
  - (II) The paper is not accepted to 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 evaluation result of any contents sent to PAVIMENTAÇÃO Journal will 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 next edition; publication in the following editions, due to excessive papers; no publication at all.
8. Author or authors of the accepted contributions must agree with publicizing their contents with no copyrights, since ABPv is a non-profitable entity and PAVIMENTAÇÃO Journal is preferably destined to its partners and it won't be used to make profits.
9. All contributions to PAVIMENTAÇÃO Journal must be preferably sent over the internet, and they may be written in PDF format, only while the Committee evaluates the papers. All the original papers must be produced in Microsoft Word. All figures must be on separated sheets, and at least 300dpi resolution. If it's a digital figure, then the resolution must be that of at least 3.2 mega pixels. If those figures do not belong to the author, they will be responsible for both credits and references and authorization for publicizing them. On graphics, authors must not use colors and must use symbols 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. A bigger number of pages might be accepted in extraordinary cases, depending on the Journal's Editor.
11. Foreign papers should be sent in their native language, and it is up to the author to translate it into Portuguese. Writing and language must be appropriated and correct, and authors are responsible for proofreading and bibliographic references. Articles must also present an abstract of about 200-300 words and indicate up to 5 keywords.
12. These specifications might eventually be reviewed, at any-time, by the Journal's Editor and by the Board of Directors of ABPv, being necessary for all sent articles to have followed the existing rules at the time they were submitted.

# Normas básicas para la admisión de artículos y contribuciones técnicas

1. La Revista PAVIMENTAÇÃO es una publicación técnica y científica de divulgación de la ABPv. Las contribuciones para la revista deben ser de carácter exclusivamente técnico y están abiertas a los socios y profesionales de Ingeniería de Carreteras, Ferroviaria y Aeroportuaria nacional e internacional.
2. La Revista también puede presentar eventualmente notas especiales redactadas por su cuerpo técnico editorial y por la dirección de ABPv como forma de divulgación de opiniones o comentarios considerados relevantes como “voz” de la ABPv.
3. Los artículos y contribuciones como nota técnica, inéditos, pueden ser enviados en cualquier época del año para que sean publicados en una de las cuatro ediciones anuales o incluso en el año siguiente dependiendo del número de notas seleccionadas.
4. Los trabajos, sean científicos, sean técnicos o de otra naturaleza enviados para una eventual publicación, serán sometidos a la evaluación de tres profesionales que componen el Comité Técnico Científico de la Revista, elegidos de acuerdo con el perfil del material a ser examinado. A los evaluadores no les será dado a conocer los autores del artículo o trabajo antes de la evaluación y también será vedada la divulgación de los evaluadores para los autores.
5. Los evaluadores reciben de la ABPv un cuestionario indicativo de los ítems a ser examinados en cada contribución para la Revista PAVIMENTAÇÃO, pudiendo sugerir tres opciones de encaminamiento:
  - (I) El trabajo es aceptado para publicación;
  - (II) El trabajo no es aceptado para publicación y entonces será devuelto a los autores;
  - (III) El trabajo podrá ser aceptado caso los autores concuerden en hacer algunas modificaciones sugeridas por uno o más evaluadores.
6. Cabe a la Dirección de la ABPv dictaminar los casos omisos y autorizar la publicación de contribuciones de carácter no técnico, eventualmente, en función de los asuntos abordados y de la disponibilidad de espacio.
7. El resultado de la evaluación de cualquier material encaminado a la Revista PAVIMENTAÇÃO será llevado al conocimiento de los autores de los mismos informando el destino que se le dará a su contribución que puede ser: publicación inmediata en el próximo número a ser lanzado, publicación en número subsiguiente debido al exceso de contribuciones o la no publicación.
8. El autor de las contribuciones aceptadas para publicación debe concordar con la reproducción de su material sin ningún derecho a cualquier costo de derechos de autor ya que la ABPv es una entidad sin fines de lucro y la Revista PAVIMENTAÇÃO se destina preferentemente a los socios y no será utilizada para la venta con fines de lucro.
9. Las contribuciones para la Revista PAVIMENTAÇÃO deben ser dirigidas preferentemente a través de medio digital, pudiendo estar en formato PDF solamente en la fase de examen del Comité. Los originales deberán ser producidos en programa Microsoft Word. Las figuras deberán entregarse por separado, con resolución mínima de 300dpi. Caso la foto sea digital, la resolución deberá ser como mínimo de 3.2 mega pixels. No siendo las fotos de el(los) autor(es), este(estos) será(n) responsable(s) por declarar los créditos de las mismas y obtener la autorización para la publicación. En los gráficos, evitar utilizar colores y dar preferencia a símbolos que puedan diferenciar claramente las informaciones relevantes de la figura.
10. Las contribuciones pueden ser como mínimo 2 y como máximo 15 páginas en formato A4, editadas en fuente Times New Roman, tamaño 12, espacio simple. Número mayor de páginas podrá ser aceptado en casos excepcionales según criterios de la Editora de la Revista.
11. Los artículos extranjeros deberán ser enviados en el idioma original, quedando facultativo al autor encaminar la debida traducción para el idioma portugués. El lenguaje debe ser adecuado y correcto, siendo responsabilidad de el(los) autor(res) la revisión ortográfica y las referencias bibliográficas. Los artículos también deberán presentar resumen de 200 a 300 palabras e indicar de 3 a 5 palabras claves.
12. Estas especificaciones pueden ser eventualmente revisadas según criterio de la Editorial de la Revista y la Dirección de la ABPv a cualquier tiempo, cabiendo a los artículos y contribuciones ya sometidos adecuarse siguiendo las reglas existentes a la época de la admisión de su material.



## PRODUTOS QUE FAZEM A DIFERENÇA



Mirafi® Série HP



Mirafi® Série HS/PET



Mirafi® Série X



Mirafi® Série FW



Mirafi® Série BXG



Mirafi® Série XT



Mirafi® Série MPV



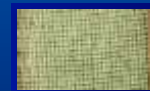
Mirafi® Série MTK



Mirafi® Série FG



Mirafi® Série G



Mirafi® Série MMESH



Mirafi® Série N

A Allonda é distribuidora dos produtos TenCate Mirafi, oferecendo com exclusividade no Brasil a mais completa linha de Geossintéticos, como Geogrelhas uni e bi-direcionais. São soluções completas para projetos, que geram ganhos de produtividade e desempenho incomparáveis.

[www.allonda.com](http://www.allonda.com)  
[sac@allonda.com](mailto:sac@allonda.com)

Rua Luigi Galvani, 200 - Cj. 51 - Cidade Monções  
04575-020 - São Paulo - SP - Brasil

Tel: (55 11) 5501-9201  
Fax: (55 11) 5501-9203





### Série há 50 anos ...

As dificuldades que enfrentavam os nossos engenheiros,  
no desbravamento do país.