

REVISTA **ABR**

Associação Brasileira de Pavimentação



PAVIMENTAÇÃO

ANO VIII – Nº 27 – Janeiro a Março de 2013 – www.abpv.org.br – ISSN 1809-1865

Avaliação de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas através do Ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda

**Gerson Alves Bastos,
Michèle Dal Toé Casagrande,
Laura Maria Goretti da Motta**

REVISTA PAVIMENTAÇÃO

Ano VIII – Nº 27 – Jan–Mar de 2013

ISSN 1809-1865



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

Arqtª Georgina Libório Azevedo

georgina@abpv.org.br

MTb 31365-RJ

JORNALISTA RESPONSÁVEL

Jean Pierre M. Santiago

jpierrems@abpv.org.br

MTb 27170-RJ

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

Presidente: Engº José Pedro dos Santos Vieira Costa

Vice-Presidente: Engº Eduardo Alberto Ricci

Diretor Financeiro: Arqtª Georgina Libório Azevedo

Diretor Administrativo: Engº Fernando Augusto Júnior

Diretor Técnico: Engª Michéle Dal Toé Casagrande

Diretor de Divulgação: Engº Cristiano da Costa Moreira

COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO

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

Tradução: Mariana Ricci

Capa: Alvaro Magalhães

Editoração: Algo+ Soluções – Maristela Carneiro

Revisão: Mariflor Rocha e Eveline Vieira Machado

Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda.

Tiragem: 10.000 exemplares – **Periodicidade:** Trimestral



Nossa capa

Obra durante a construção "Ponte do Saber", Fundão - Rio de Janeiro.

Foto: João Luiz dos Anjos

Sumário

2 EDITORIAL

3 SEÇÃO DE NOTAS

13 ESPAÇO JURÍDICO

O Superior Tribunal de Justiça e Algumas Importantes Decisões sobre a Responsabilidade Ambiental em Função do Tempo

Victor Athayde

ARTIGOS TÉCNICOS

15 Avaliação de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas através do Ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda

Gerson Alves Bastos, Michéle Dal Toé Casagrande, Laura Maria Goretti da Motta

23 Avaliação Comparativa do Desempenho de Pavimentos Restaurados por Reciclagem Profunda dos Materiais de Pavimentação e Outras Técnicas

Firmino Sávio Vasconcellos de Souza

34 Dimensionamento de um Pavimento Utilizando Conceitos Mecanísticos na Reabilitação de Pavimentos Rígidos – A Técnica da Fragmentação

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, Márcio Muniz de Farias, Euclides Bandeira Neto, Ariosvaldo Roriz, José Maria Morheb

44 Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Escória de Aciaria e Resíduos Industriais de Minério de Ferro

Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva, Gilberto Fernandes

EDITORIAL

Os projetos de infraestrutura que se lançam no cronograma de modernização do Brasil desafiam a engenharia nacional. Tal desafio significa a oportunidade de fazer ingressar nos canteiros de obras as tecnologias de ponta que estão saindo das universidades, dos grandes centros de pesquisas e que foram debatidas nos vários eventos que o País comporta durante o ano.

A Associação Brasileira de Pavimentação bate constantemente nesta tecla: o aperfeiçoamento constante da técnica e sua aplicabilidade. E o ano de 2013 se apresenta como um excepcional momento para a engenharia nacional avançar rumo à vanguarda das obras inovadoras no campo da infraestrutura. São novos portos, aeroportos, rodovias, pontes, viadutos, estádios esportivos, hotéis etc. Sem falar no monotrilho da cidade de São Paulo, obra inovadora no Brasil, e nas perspectivas de construção do trem-bala, ligando a capital paulista ao Rio de Janeiro.

A Revista PAVIMENTAÇÃO, atenta a estes movimentos, publicou nas edições de 2012 relevantes artigos dos mais variados temas que comportavam as perspectivas para a inovação. E nesta primeira edição de 2013, traz mais quatro artigos inéditos que foram submetidos à criteriosa avaliação do nosso Comitê Técnico-Científico.

O primeiro trata da Avaliação de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas através do Ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda, dos autores Gerson Alves Bastos, Michéle Dal Toé Casagrande e Laura Maria Goretti da Motta.

O segundo trabalho também perfaz uma avaliação, esta, Comparativa do Desempenho de Pavimentos Restaurados por Reciclagem Profunda dos Materiais de Pavimentação e Outras Técnicas, um estudo de Firmino Sávio Vasconcellos de Souza.

O terceiro artigo versa sobre o Dimensionamento de um Pavimento Utilizando Conceitos Mecanísticos na

Reabilitação de Pavimentos Rígidos – A Técnica da Fragmentação, um trabalho produzido por Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, Márcio Muniz de Farias, Euclides Bandeira Neto, Ariosvaldo Roriz e José Maria Morheb.

O quarto e último artigo é um Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Escória de Aciaria e Resíduos Industriais de Minério de Ferro, de autoria de Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva e Gilberto Fernandes.

Especial atenção pedimos para o calendário dos Cursos da ABPv, que são ministrados em sua sede, no Rio de Janeiro. A Associação cuidou de elaborar uma gama de cursos importantes dentre aqueles que o mercado mais exige aperfeiçoamento dos profissionais. O calendário está disponível no site www.abpv.org.br. Também está acessível na página da ABPv no Facebook.

No que tange aos eventos para este ano, estão programadas a 19ª Reunião de Pavimentação Urbana – RPU, de 03 a 05 de julho, em Cuiabá, MT; e a 42ª Reunião Anual de Pavimentação – RAPv, de 12 a 14 de novembro, em Gramado, RS. Profissionais, acadêmicos e expositores já podem procurar inteirar-se das atividades de ambos os eventos para assegurar inscrições e *stands* nas feiras conjuntas.

São as perspectivas e a visão de futuro que nos direcionam a todos na busca das inovações. É o trabalho, a pesquisa e a dedicação que pavimentam a estrada do conhecimento, que nunca será o bastante, mas sempre nos permitirá usufruir de um ambiente cada vez melhor em prol de uma sociedade mais justa e com qualidade de vida.

Conselho Editorial

Seção de notas da Revista PAVIMENTAÇÃO

mariana@abpv.org.br

BRAZIL ROAD EXPO 2013

A terceira edição da Brazil Road Expo, realizada de 19 a 21 de março no Transamérica Expo Center, em São Paulo, reuniu em um só lugar as principais empresas dos mercados nacional e internacional de infraestrutura, além de apresentar as últimas novidades para o setor. Durante os três dias de evento, que contou com a presença de 10.517 profissionais, entre visitantes e congressistas, as 250 marcas expositoras fecharam R\$ 500 milhões em negócios.

Paralelamente à feira de negócios, o evento contou com o Brazil Road Summit, um extenso programa de conferências que abordou diversos assuntos, tais como, a pavimentação em concreto e asfalto, geotécnica, sinalização, segurança rodoviária, obras de artes especiais (pontes, viadutos e túneis), contenção de encostas, drenagem de rodovias, entre outros. No total, foram mais de 60 palestras divididas em 16 programas.



Vice-Presidente da ABPV, Eduardo Alberto Ricci foi um dos moderadores no Brazil Road Summit.

Um dos grandes destaques do evento foi a área externa, que contou com a demonstração, in loco, do funcionamento de equipamentos de grande porte. A Sotreq/Caterpillar montou uma arena onde o público pôde ver a pavimentadora AP555E em operação. Também na área externa, a Lindsay fez a demonstração do sistema QMB, que possibilita o deslocamento de uma barreira de concreto de alto desempenho em até duas faixas.



Pavimentadora AP555E

Outra novidade foi o labirinto de sinalização, espaço que foi coordenado pelo ONSV (Observatório Nacional de Segurança Viária) e mostrou aos visitantes a importância da sinalização para a segurança dos usuários de vias e rodovias. No local, os participantes constataram a diferença, por exemplo, de como a sinalização é vista (ou não) por motoristas de veículos de passeio e caminhoneiros.

A ABPV esteve presente no Brazil Road Expo 2013 com seu stand, onde recebeu os visitantes para conversar e conhecer todas as atividades promovidas pela Associação. Foram distribuídos exemplares da Revista PAVIMENTAÇÃO e o Boletim Especial para o evento, que trouxe as perspectivas do setor para o ano de 2013.



No stand, estiveram presentes recebendo o público: o jornalista da Revista Jean Pierre, a diretora financeira da ABPv e coordenadora geral da Revista Arqt. Georgina Libório, o coordenador da 19ª RPU Eng. Luiz Miguel de Miranda e o diretor de divulgação da ABPv Eng. Cristiano Moreira.

FEICON BATIMAT



Entre os dias 12 e 16 de março, foi realizado em São Paulo a **Feicon Batimat**, um importante evento que ocorre regularmente no País, considerado o grande salão da construção da América Latina. Neste ano, completou 21 anos de existência, surpreendendo uma vez mais pela inovação, atraindo milhares de visitantes. Nesta edição, apresentou, em primeira mão, os principais lançamentos e tendências para todo o setor da construção civil.

A feira contou também com a conferência **Núcleo de Conteúdo Feicon Batimat**, que promoveu palestras e debates, apontando as tendências do mercado por renomados profissionais nacionais e internacionais.

PALESTRA NA ABPV

Foi apresentada no auditório da ABPv, no dia 18 de março, a palestra sobre **“TECNOLOGIA EM EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO DE CONCRETO, SOLOS E MISTURAS BETUMINOSAS”**, patrocinada pela SOLOCAP e proferida pelo Eng. Pierpaolo Viola, técnico especialista da italiana TECNOTEST S.p.A., convidado exclusivamente para essa finalidade.



Palestrante Engº Pierpaolo Viola, Massimo Fila presidente da TECNOTEST e o tradutor intérprete Messias Junior.

Na oportunidade, foram apresentados e discutidos os seguintes equipamentos:

- 1º Prensa de concreto servo controlada digital, cap. 200 ton. com software
- 2º Compactador giratório SUPERPAVE — AASHTO T312-11, ASTM D6925-09
- 3º Prensa Multitest servo controlada — ASTM-D-1883 - AASHTO-T-193
- 4º Compactador de rolos - EN 12697 — UNI EN ISO12697-22
- 5º Estação de rompimento em CPs cúbicos de concreto (nova versão) KC 400/WG
- 6º Prensas especiais servo controladas para solo (edômetro, cisalhamento direto, triaxial estático etc.)

Essa foi uma excelente oportunidade de intercâmbio de conhecimentos e experiências entre as comunidades europeia e brasileira.

WORLD OF ASPHALT 2013



De 19 a 21 de março, aconteceu em San Antonio, Texas (EUA), a edição 2013 do World of Asphalt. O evento que tem foco em asfalto e agregados, manutenção de pavimentos e setores da indústria de segurança de tráfego contou com a participação de forne-

cedores de serviços e fabricantes que apresentaram seus mais novos produtos e tecnologias.

BAUMA - MUNIQUE



Uma das mais importantes feiras internacionais especializada em máquinas de construção, máquinas de mineração, veículos de construção e equipamento de construção. A BAUMA será realizada de 15 a 21 de abril, em Munique, na Alemanha. Diversas empresas brasileiras prometem estar presentes no evento que enseja grandes oportunidades de negócios por se tratar de bens de capital.

2º CBR

O 2º Congresso Brasileiro de Reologia será realizado em Aracajú (SE), entre os dias 19 e 21 de maio de 2013. O evento abordará, entre outros assuntos, os princípios básicos da reologia, viscoelasticidade, nanotecnologia e biocombustíveis.

Para obter mais informações, acesse: www.reologiadobrasil.com.br/reologia/2cbr-se/

AUTOSTRADA-POLSKA expo

Com quase 20 anos de experiência, a feira anual reúne aproximadamente 1.000 empresas de todo o mundo, com 20 mil visitantes, entre profissionais, empresários e investidores. Trata-se de uma vitrine de diversidade de produtos para a construção rodoviária.

Grandes empresas farão uma demonstração de equipamentos e tecnologia de ponta, assim como será oportunizada a troca de conhecimentos e experiências.

A feira vem acompanhada de outros eventos internacionais paralelos, como, por exemplo, a TRAFFIC-EXPO, MASZBUD e ROTRA. Será entre os dias 21 e 24 de maio de 2013 na Polônia, na cidade de Kielce, a 150 km da capital Varsóvia.

CONSTRUCTION EXPO 2013



A 2ª Feira Internacional de Edificações e Obras de Infraestrutura será realizada nos dias 5 a 8 de junho no Centro de Exposições Imigrantes, em São Paulo.

Para obter mais informações, acesse: www.constructionexpo.com.br

CONCRETE SHOW



A 7ª Feira Internacional de soluções tecnológicas, que reúne toda a construção civil com a cadeia produtiva do concreto, ocorrerá nos dias 28 a 30 de agosto no Centro de Exposições Imigrantes, em São Paulo.

Para obter mais informações, acesse: www.concreteshow.com.br

MUNDO E MEIO AMBIENTE

Em janeiro, o Governo do Camboja anunciou seus planos para a construção, em 2014, de uma barragem em um dos mais importantes afluentes do rio Mekong, bacia do rio 3-S (compreende os rios SeKong, Sesan e SrePok). O anúncio foi feito cinco dias antes da cerimônia de lançamento da construção da barragem controversa de Xayaburi, na parte baixa do rio Mekong pelo Governo de Laos.

A *Conservation International*, junto com outros grupos de proteção ambiental atuando na região, estão extremamente preocupados com a ação e pediram adiamento na decisão para que possam fazer uma pesquisa e, assim, entender melhor a relação entre a geração de energia e os impactos causados pela construção da barragem, de modo a oferecer alternativas sustentáveis para a economia cambojana. No país, apenas 5% dos projetos de infraestrutura chegam ao Ministério de Meio Ambiente e estes não possuem um estudo detalhado de todo o impacto ambiental.

Tais considerações são cruciais para o desenvolvimento da região no entorno do rio Mekong, já que podem garantir a sustentabilidade deste, ao mesmo tempo em que se utilizam seus recursos para o benefício do povo e da economia.

A bacia do rio 3-S faz fronteira com Laos, Camboja e Vietnã. Garantem 20% do escoamento da água do rio Mekong, assim como alimento e abastecimento de água para milhões de pessoas no entorno da bacia. Também possui a biodiversidade mais singular e rara da região.

A preocupação econômica é que as barragens irão reduzir a produtividade da agricultura e da *aquaculture* na região, aumentando ainda mais a pobreza. Uma avaliação recente das propostas para a construção de 42 barragens mostrou grandes chances de mudança no escoamento periódico. Isto causaria impactos severos na distribuição de nutrientes e outros aspectos importantes para a agricultura e a pesca.

Estas consequências já foram verificadas com outros projetos de construção de barragens no mundo, devido à falta de planejamento adequado e entendimento dos efeitos causados pelas barragens.

A *Conservation International* apoia o desenvolvimento da geração de eletricidade para o consumo doméstico e a exportação, pois são fatores importantes para o desenvolvimento de Laos, Camboja e Vietnã. Acredita-se que a Grande Região do Mekong tem potencial para se tornar um líder global por desenvolver um caminho verde de inovação e baixa produção de carbono, que fomentará o crescimento econômico e criará oportunidades para as pessoas, enquanto conserva o ambiente natural.

Entretanto, a região precisa integrar o desenvolvimento hidroelétrico e o planejamento de conservação para que a relação entre a geração de energia e outros recursos naturais, principalmente aqueles vitais para a sobrevivência das pessoas, seja entendida antes do desenvolvimento de tais barragens.

É preciso levar em consideração os impactos em potencial causados pela construção dessas barragens para que se possa evitar sérias perdas e criar uma solução positiva para a população local, suas necessidades e o ambiente do qual dependem.

Cursos da ABPv

no Rio de Janeiro

DRENAGEM RODOVIÁRIA
DE 22 A 25 DE ABRIL

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE CUSTOS – SICRO
29 DE JULHO A 02 DE AGOSTO

MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS
DE 05 A 08 DE AGOSTO

PAVIMENTOS DE AEROPORTOS -
DE 19 A 21 DE AGOSTO

Para obter mais informações, acesse: www.abpv.org.br

As vantagens do GLP nas usinas de asfalto



Vicente Logatti Neto

Várias cidades brasileiras transformaram-se em verdadeiros canteiros de obras. Investimentos superiores a R\$ 1 trilhão estão sendo feitos no segmento de obras de infraestrutura para cumprir as exigências tanto da FIFA quanto do Comitê Olímpico Internacional (COI) para a realização dos eventos esportivos que trarão pessoas de vários países para circular pelo Brasil. Além do segmento rodoviário, a verba também é destinada a obras em setores, tais como, logística, transporte, arenas desportivas, entre outros.

Esse cenário impactou de forma direta o segmento de usinas de asfalto, também alavancado há alguns anos por conta das obras previstas pelo PAC. Aumentar a produtividade sem deixar a sustentabilidade de lado e, ao mesmo tempo, reduzir custos, parece uma fórmula difícil de ser alcançada pelos usineiros. Era, mas não é mais.

Em grande parte, isso se deve à recente entrada do Gás Liquefeito de Petróleo, o GLP, nas operações das usinas de asfalto, que passaram a trocar o antigo sistema de combustão realizado via óleo BPF – conhecido como baixo ponto de fluidez – para o aquecimento de seus aquecedores de fluido térmico e fornos pelo Gás Liquefeito de Petróleo.

O que é o GLP? E quais as vantagens do uso do GLP na pavimentação?

Quem responde é Vicente Logatti Neto, gerente nacional de vendas industriais da Copagaz.

LOGATTI: *GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), ou gás de cozinha, consiste numa mistura gasosa de hidrocarboneto obtida do gás natural das reser-*

vas do subsolo ou do processo de refino do petróleo cru nas refinarias.

Quais vantagens o Senhor destaca do uso do GLP nas usinas de asfalto?

LOGATTI: *As vantagens do uso do GLP em substituição ao óleo BPF nas usinas de asfalto vão além das questões competitivas e envolvem também outro ponto crucial para a imagem da empresa para todos os seus públicos – a sustentabilidade.*

Como isto se dá?

LOGATTI: *Os benefícios gerados pelo sistema a gás impactam o usineiro e também o meio ambiente, principalmente no que se refere ao índice de emissão de poluentes. No uso do óleo, são corriqueiros os casos de vazamento por todos os canais que ele percorre, o que gera impacto direto no solo, que pode sofrer contaminação dos lençóis freáticos. Isso sem contar os malefícios que ele pode causar à saúde por conta do alto grau de enxofre contido na fumaça que sai pelas chaminés. Essa fumaça, associada à umidade do ar, gera ácido corrosivo, responsável por diminuir a vida útil da própria usina.*

O GLP seria, portanto, uma alternativa eficiente ao BPF?

LOGATTI: *Eu diria que é uma alternativa altamente eficiente, limpa e econômica para o processo de secagem de agregado e aquecimento de CAP. Sua aplicação em usinas de asfalto proporciona uma série de vantagens ao usineiro. Destaco também a diminuição de impactos ao meio ambiente, com a comprovada redução do índice de emissão de poluentes.*

Por exemplo?

LOGATTI: *A redução de custo com a manutenção de equipamentos, que pode chegar a até R\$ 30 mil/ano. Com o sistema a óleo, a troca de filtros precisa ser feita com muito mais frequência. Dependendo do ritmo de operação da usina, a troca com o sistema a óleo é realizada a cada três a seis meses, mais ou menos. Ao passo que com a opção de GLP, esse período passa a ser anual.*

E sobre a produtividade?

LOGATTI: *Mais eficiência e ganho de até 20% na produtividade por conta da aliança entre o menor consumo de combustível por tonelada produzida e o maior poder calorífico proporcionado pelo Gás Liquefeito de Petróleo. É o que chamamos de eficiência térmica do GLP.*

Redução de custo com consumo de energia elétrica também estaria entre as vantagens?

LOGATTI: *Sem dúvida, uma redução que pode chegar a uma média de R\$ 2 mil a R\$ 2,5 mil ao mês. Para queimar o óleo, ele tem que estar viscoso e para isso, precisa ser aquecido duas vezes, consumindo, assim, uma alta carga de energia elétrica. O GLP já chega pressurizado, não havendo, portanto, a necessidade desse processo de aquecimento.*

Com relação à segurança, o que o Senhor destaca?

LOGATTI: *O equipamento oferece segurança total em seu manuseio. Por exemplo, ele está equipado com Pressostato e com sensor de chama, e se ele identifica a chama, o sistema não liga.*

Projetos e soluções especiais
que darão o gás necessário para
a pavimentação do futuro do Brasil.



esorentino.com.br

A Copagaz atua em 19 estados do Brasil distribuindo, desde 1955, GLP (gás de cozinha) para residências, indústrias e estabelecimentos comerciais, com qualidade, respeito e segurança.

www.copagaz.com.br

Para mais informações, contate-nos pelo e-mail industrial@copagaz.com.br ou pelo telefone 0800 707 2672.



A SOLUÇÃO sempre presente em Equipamentos para execução de ensaios geotécnicos de laboratório | Solos, Asfalto, Concreto | Estabilizações, Ligantes e Misturas Betuminosas, Argamassas, Pré-Moldados, Tijolos e Telhas



Prensa de Concreto Hidráulica Elétrica Digital até 200T, servo-controlada



Compactador Giratório



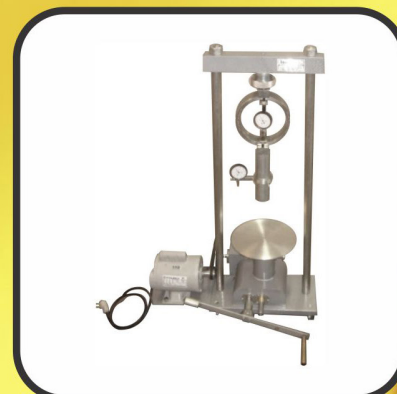
Prensa Multitest



Prensa de Concreto Hidráulica Manual 100T com leitor digital



Prensa de Concreto Hidráulica Manual 100T com manômetro analógico



Prensa CBR Analógica 4T



Prensa CBR Elétrica Digital



Viscosímetro Saybolt/ Furol



Ductilômetro Recuperador Elástico



SOLOCAP GEOTECNOLOGIA RODOVIÁRIA LTDA.
Av. dos Açudes, no. 99 | Alto dos Pinheiros | Belo Horizonte - MG
CEP: 30.530-720 | Fone: +55 (31) 3047-7460
www.solocap.com.br | www.facebook.com/solocap.geotecnologia

Cartas dos LEITORES

e-mail: georgina@revistapavimentacao.org.br

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.



Prezados editores e jornalistas da Revista PAVIMENTAÇÃO, gostaria de externar que a edição de número 26 estava excepcional. De fato, trata-se de uma primorosa publicação e quero parabenizá-los pelas excelentes reportagens que tenho lido.

Maria do Rocio Ferreira Pedalino –
Londrina, PR

Quero parabenizar o corpo editorial da Revista pela qualidade dos artigos publicados. Especificamente na edição de número 26. Contudo, verifiquei que a citação a meu respeito, página 20, terceiro parágrafo, foi feita de forma equivocada: "Coutinho, 2004", e o certo seria "Coutinho Neto, 2004". Na página 31, item 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, está "COUTINHO NETO, B. Reaproveitamento do resíduo de fundição em misturas asfálticas. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Transportes, São Carlos, 2004. 197 p." o certo seria "COUTINHO NETO, B. Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas. 304 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004." Agradeço a atenção.

Benedito Coutinho Neto – São Paulo, SP

Nota da Redação: Os dados dos artigos são de responsabilidade dos autores, que obedecem as normas de publicação. Endossamos a errata e ressaltamos a correção.

UM ACABAMENTO LISO EXIGE UMA VIAGEM SUAVE.



	Garantia de 48 meses para a correia Mobil-Trac	Alta Velocidade de transporte	Design de chassioscilante	Viagem suave e cobertura lisa	Excelente tração
Cat® Mobil-Trac™	✓	✓	✓	✓	✓
Esteira de aço Cat			✓	✓	✓
Esteira de aço rígida					✓

CAT® PAVIMENTADORAS COM CHASSIS™ MOBIL-TRAC OFERECEM A VIAGEM MAIS SUAVE DO SETOR... SEM MENCIONAR O ACABAMENTO MAIS LISO.

Tecnologias inovadoras minimizam o movimento dos pontos de reboque, resultando em coberturas mais lisas.

- ✓ Chassi oscilante
- ✓ Grande área de contato com o solo
- ✓ Correia com Autotensionamento
- ✓ Correia de barra trançada ou lisa

Disponível em AP555E, AP655D e AP1055E.

Para obter mais informações e saber quais máquinas estão disponíveis na sua área, consulte seu Revendedor Cat local ou visite cat.com.

PAVIMENTANDO O DIA TODO, TODOS OS DIAS.



Victor Athayde

O Superior Tribunal de Justiça e Algumas Importantes Decisões sobre a Responsabilidade Ambiental em Função do Tempo

1. Uma questão de terminologia

Antes de começarmos a discorrer sobre o tema que trata o título, prezado leitor, é importante fazer uma distinção sobre o emprego do termo “Responsabilidade Ambiental”.

Isso porque, não raro, campanhas publicitárias o empregam, mas em uma conotação traduzida como “dar importância”, “preocupar-se com” o meio ambiente.

Não é o caso deste texto, embora este escritor, e a própria Associação Brasileira de Pavimentação, tenham o meio ambiente como bem de inestimável valor e alvo de cuidados.

O termo “responsabilidade” aqui se refere ao emprego jurídico, que vem do latim *responsabilitas* (*respondere* traduzido como “responder”), que é a condição de responder pelos atos praticados.

Feita essa singela introdução, trago-lhes as decisões e as questões jurídicas que julgo interessantes para a atividade empresarial.

2. O STJ, a Responsabilidade Ambiental e os lapsos temporais

É certo que nas relações jurídicas, existem os detentores de direitos e, do outro lado, quem lhes deve obrigação.

Como se sabe, a inércia do titular de determinado direito pode levar à extinção desse. É a morte do direito pelo tempo.

Por exemplo, segundo o Código Civil (art. 206, § 3º, I), após três anos do vencimento, o direito de exigir judicialmente os valores devidos a título de aluguel de bem imóvel deixa de existir.

É a prescrição civil.

Entretanto, existe uma espécie de direito que não morre, seria imprescritível.

Há alguns anos, o Superior Tribunal de Justiça fixou dois importantes precedentes sobre a Responsabilidade Ambiental: (i) sua imprescritibilidade; (ii) sua solidariedade.

Explicando o primeiro: ao julgar uma Ação Civil Pública ajuizada em função da extração ilegal de madeiras no Acre, o STJ reconheceu a imprescritibilidade do dano, sob o fundamento de “se tratar de direito inerente à vida, fundamental e essencial à afirmação dos povos, independentemente de estar expresso ou não em texto legal.”

Ou seja, pode passar o tempo que for, quem for o causador do dano pode ser responsabilizado a qualquer tempo.

Advogado militante na área de Direito Ambiental, Direito Administrativo-Público e Direito Minerário, sócio-diretor do escritório David & Athayde Advogados (www.da.adv.br), professor de Pós-Graduação em Perícia Ambiental Judicial, ex-assessor jurídico do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo (Iema), idealizador do blog www.direitodomeioambiente.blogspot.com/ e-mail: victor@da.adv.br / twitter: [@DavidEAthayde](https://twitter.com/DavidEAthayde).

E não só ele (agora explico o segundo ponto), mas também quem adquiriu a área onde houve dano ambiental, pois segundo o STJ, não só quem causa o dano é responsável, mas, também, quem adquire a área com passivo ambiental fica solidariamente responsável e deve responder junto com o causador do dano.

Esses julgados, aos quais não me afilio, servem de exemplo para alertarmos para a importância de uma checagem mais cuidadosa em relação a imóveis que venham ou possam ser negociados (adquiridos).

Solicitar certidão negativa do órgão ambiental, ou do cartório distribuidor (no Fórum) em relação a problemas ambientais, pode evitar significativas dores de cabeça no futuro.

Outro exemplo é mais recente.

Neste ano, foi divulgada notícia de que o STJ decidiu que o Novo Código Florestal não anula a penalidade aplicada sob o fundamento do Código passado, que datava de 1965.

Os magistrados entenderam que não há anistia de multa em um determinado caso concreto, mas o autuado por infração ambiental, embora haja mudança de lei no tempo, permanece responsável só por outras obrigações administrativas.

Seriam elas, conforme o novo código: a inscrição do imóvel no Cadastro Ambiental Rural (CAR), a assinatura do termo de compromisso ou a abertura de procedimento administrativo no programa de regularização ambiental.

Por isso, nobre leitor, a questão ambiental, em função do tempo, demanda toda atenção, já que, por idiosincrasia, tem um apreço judicial elevado.

Victor Athayde



VICCOL VIEIRA COSTA CONSTRUÇÕES LTDA.

**EDIFICAÇÕES - SANEAMENTO - TERRAPLENAGEM - PAVIMENTAÇÃO
PONTES - VIADUTOS - INSTALAÇÕES ELÉTRICAS - SINALIZAÇÃO
ADMINISTRAÇÃO - LOCAÇÃO DE MÃO DE OBRA**

**RUA DR. WILSON BARBOSA DE MELO, 23 - ATALAIA - CEP 49.037 590
ARACAJU - SERGIPE - FONE: 79 - 3223 - 2159
CGC - 01-.662.968/0001-46 - INSC. ESTADUAL - 27.098.730-4**

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 georgina@revistapavimentacao.org.br de acordo com as normas vigentes no sítio www.revistapavimentacao.org.br. Os trabalhos são apresentados na íntegra, sendo de responsabilidade do autor toda a informação nele contida.

Avaliação de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas através do Ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda

Gerson Alves Bastos

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, gerson_abastos@yahoo.com.br

Michéle Dal Toé Casagrande

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, michele_casagrande@puc-rio.br

Laura Maria Goretti da Motta

Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, laura@coc.ufrj.br

RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, uma avaliação de misturas asfálticas ensaiadas em corpos de prova cilíndricos convencionais, tendo 15 centímetros de diâmetro, reforçadas ou não com dois diferentes tipos de geogrelhas (fibra de vidro e poliéster), através do ensaio de tração em disco circular com fenda. Esse ensaio, normalizado pela ASTM (ASTM D7313-07), busca avaliar a resistência ao fraturamento das misturas asfálticas. De acordo com os resultados obtidos, constatou-se que as amostras que apresentavam o reforço de geogrelha tiveram maiores resistência ao fraturamento, quantificada pela energia de fratura. Assim, pela comparação nos ensaios realizados, as amostras com geogrelhas tiveram um melhor comportamento quanto ao faturamento que as amostras sem presença de geogrelha.

Palavras-chave: misturas asfálticas, geogrelha, energia de fratura.

ABSTRACT

It is presented in this work, an evaluation of asphalt mixtures tested in conventional cylindrical specimens (15 cm in diameter) without reinforcement and with the reinforcement of two geogrids types (fiber-glass and polyester), through the Disk-Shaped Compact Tension Geometry Test. Prescribed in ASTM D7313-07, this test evaluates the resistance to fracture of asphalt mixtures. The results showed that the samples with geogrid reinforcement had higher resistance to fracture that were quantified by the fracture energy. By comparison in the tests, the samples with geogrids had a better performance on the fracturing that the samples without the presence of geogrid.

Keywords: asphalt mixtures, geogrid, fracture energy.

I. INTRODUÇÃO

Buscam-se alternativas para evitar ou mitigar a ocorrência do trincamento dos pavimentos flexíveis, de modo a promover um incremento no seu desempenho, seja com a utilização de materiais não convencionais (asfalto-borracha, polímeros, fibras etc.), seja mesmo com o simples aumento da espessura da capa asfáltica. Para os pavimentos asfálticos, a forma mais comum de reforço é a superposição de uma camada asfáltica à outra já existente. Porém, seu desempenho é marcado pelas fraquezas estruturais do pavimento antigo subjacente (Rodrigues, 1991), pois esta técnica apenas retarda o aparecimento dos defeitos na superfície do pavimento.

Neste sentido, vários materiais têm sido empregados de modo a melhorar o comportamento dos revestimentos asfálticos em relação ao trincamento por fadiga ou reflexão. Um desses materiais é um tipo de geosintético, denominado por geogrelha, que funciona como verdadeiro elemento de reforço, incrementando consideravelmente a vida útil dos revestimentos betuminosos, com diversos trabalhos publicados relatando a eficácia deste sistema antirreflexão de trincas (por exemplo, Bühler, 2007 e Lao e Ramos, 2009).

Foram utilizadas amostras de misturas asfálticas convencionais extraídas de um modelo físico de pavimento, situado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, e amostras moldadas através de um compactador giratório. Tais amostras diferenciavam-se pela presença ou não da camada intermediária de geogrelha de dois tipos – poliéster e fibra de vidro - buscando-se, dessa forma, comparar os desempenhos destas misturas reforçadas ou não por meio do ensaio de tração em disco circular com fenda.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O modelo físico de pavimento, denominado por “Tanque-Teste de Pavimentos”, foi desenvolvido por Silva (2009) com o intuito de simular um pavimento que apresentasse dimensões próximas das reais em campo, principalmente as dimensões em profundidade. O objetivo daquele trabalho foi avaliar o comportamento do modelo físico submetido à variação do nível d’água, o que corresponderia a um lençol freático numa situação real.

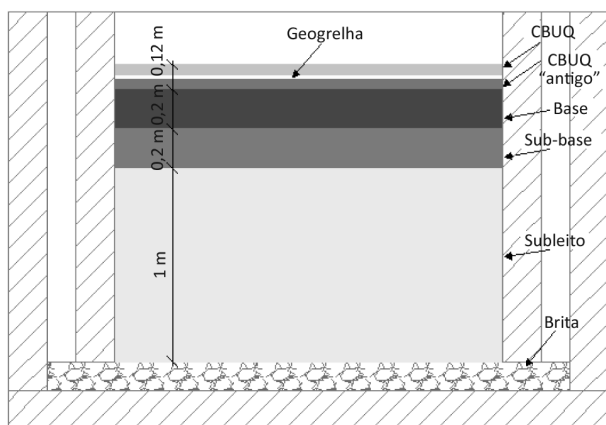
O “Tanque-Teste de Pavimentos” apresenta uma seção interna de 2,0 m x 2,0 m, uma altura interna de 1,80 m, com paredes duplas de concreto armado com 20 cm de espessura e possui uma estrutura típica de um pavimento rodoviário: subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. A figura 1 mostra o prédio onde está localizado o “Tanque-Teste de Pavimentos”, além da sua estrutura de camadas.

Para o presente trabalho, sua área foi subdividida em três seções de iguais dimensões (2,0 m x 0,66 m), cada uma apresentando diferentes soluções: sobreposição de camada asfáltica àquele revestimento já existente; sobreposição através de inserção da camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro, nova camada asfáltica e outra seção apresentando uma camada intermediária de geogrelha de poliéster com a superposição de uma nova capa asfáltica. Esta mistura asfáltica sobreposta ao revestimento existente foi fornecida pela empresa CRAFT Engenharia Ltda.

A partir deste pavimento experimental, extraíram-se corpos de prova da sua camada de revestimento nas três seções (seção sem presença da camada intermediária de geogrelha, seção com camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro e seção com camada intermediária de geogrelha de poliéster), por meio de um equipamento extrator rotativo. Cada corpo de prova apresentava duas camadas asfálticas: revestimento antigo (já existente) e camada de mistura asfáltica sobrejacente executada como reforço, e aqueles extraídos das seções que apresentavam geogrelha, possuíam este material como camada intermediária entre aquelas camadas asfálticas.



a)



b)

Figura 1 – a) Prédio onde está situado o “Tanque –Teste de Pavimentos” e b) Esquema das camadas existentes no pavimento

Para a moldagem de corpos de prova por compactador giratório, utilizou-se uma mistura dosada com o ligante asfáltico CAP 50/70, proveniente da Refinaria do Planalto Paulista (REPLAN) e agregados de origem granítica provenientes da Pedreira Sepetiba, no Rio de Janeiro. O ligante utilizado é do tipo convencional, PG 64-22, com as características dadas na tabela 1, fornecidas pelo Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello – CENPES/PETROBRAS, localizado na ilha do Fundão, no Rio de Janeiro.

Tabela 1 – Característica do ligante – CAP 50/70 (Fonte: CENPES)

Características	Método	Unidade	REPLAN
Penetração, PEN, 100 g, 5 s, 25° C	NBR 6576/1998 ASTM D 5/97	0,1mm	59
Ponto de amolecimento, PA, anel e bola	NBR 6560/2000 ASTM D 36/95	°C	52,4
Densidade 20° C/4° C	ABNT 6296/2004	g/cm ³	1,010
Viscosidade Brookfield a 135° C	NBR 15184/2004 ASTM D 4402/2002	cP	379
Viscosidade Brookfield a 150° C		cP	189
Viscosidade Brookfield a 177° C		cP	65
PG (Performance Grade)	ASTM D 6373/2002	PG	64-22

Os agregados utilizados (Brita 1, Brita 0 e pó de pedra) nesta mistura possuem as granulometrias apresentada na tabela 2. Tais agregados são comumente utilizados nas pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ. A tabela 3 apresenta as propriedades dos agregados.

A mistura foi executada na faixa B do DNIT. Para melhorar a adesividade do ligante asfáltico aos agregados, foi adicionado DOPE AD-HERE 6500, na proporção de 0,5 % (em relação ao ligante). A mistura do ligante com o DOPE foi realizada em laboratório antes da mistura com os agregados.

Tabela 2 – Granulometria dos agregados usados na moldagem dos corpos de prova desta pesquisa

Peneiras	#	mm	% Passante		
			Brita 1 (32 %)	Brita 0 (20 %)	Pó-de-Pedra (48 %)
1 1/2"		38,1	100,0	100,0	100,0
1"		25,0	100,0	100,0	100,0
3/4"		19,0	86,2	100,0	100,0
1/2"		12,7	22,7	100,0	100,0
3/8"		9,5	1,6	99,9	100,0
Nº 4		4,8	0,5	20,5	99,6
Nº 10		2,0	0,4	0,6	71,6
Nº 40		0,42	0,3	0,5	32,9
Nº 80		0,18	0,3	0,4	17,4
Nº 200		0,075	0,2	0,3	7,6

Tabela 3 – Propriedades dos agregados (Fonte: CENPES)

Propriedades	Agregados graúdos	Agregados miúdos
Abrasão Los Angeles, %	43,3	-
Partículas chatas e alongadas (1/5), %	1	-
Equivalente de areia, %	-	84
Angularidade, %	-	40,04
Índice de forma (C/E)	2,9	-
Massa específica real	2,792	2,781
Massa específica aparente	2,669	2,693
Absorção, %	0,8	3,01
Sanidade, %	10,3	-

Os corpos de prova extraídos do “Tanque-Teste de Pavimentos” possuíam dois tipos de misturas asfálticas: uma correspondente ao revestimento existente, executado por Silva (2009), e outro executado durante o presente trabalho, como camada de reforço.

As geogrelhas empregadas como camadas intermediárias nos dois conjuntos de amostras (extraídas ou moldadas por compactador giratório) foram de dois tipos: uma de fibra de vidro, cuja especificação indicava resistências mecânicas de 35 kN/m no sentido longitudinal e 70 kN/m no sentido transversal, e módulo de elasticidade de 70.000 MPa; e outra de poliéster que, de acordo com a sua especificação, possui resistência à tração nominal de 50 kN/m (em ambos os sentidos) e apresenta deformação na resistência nominal de 12 %.

Nas tabelas 4 e 5, apresentam-se as características das misturas asfálticas, das quais se obtiveram os corpos de prova extraídos do “Tanque-Teste de Pavimentos”.

Os ensaios executados nos corpos de prova foram de tração em disco circular com fenda (Disk-Shaped Compact Tension Geometry), sendo este realizado no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.

Tabela 4 – Características da mistura asfáltica previamente existente no “Tanque-Teste de Pavimentos” (Silva, 2009)

Granulometria	Densa TMN 19,1 mm Superpave
Faixa (DNIT)	B
Dosagem Superpave Ndes	100 giros teor de projeto: 4,7%
Resistência à Tração (RT)	0,87 MPa
Módulo Resiliente (MR)	4575 MPa (cp extraído)
Densidade aparente	2,378 (cp extraído)

Tabela 5 – Características da mistura asfáltica executada como camada de reforço no “Tanque-Teste de Pavimentos”

Teor de ligante ($\pm 0,3\%$)	5,3
Densidade teórica	2,475
Densidade aparente	2,380
V.A.M.	15,9
R.B.V.	75,9
Estabilidade	1210
Fluência	13

O ensaio de tração em disco circular com fenda constitui-se como uma forma de avaliar a resistência à fratura das misturas asfálticas e sua metodologia foi especificada internacionalmente em 2007. Sua principal especificação é a norma ASTM D7313-07 (*Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry*). No Brasil, esse método de ensaio foi

introduzido por Hirsch (2009), quando foram desenvolvidos procedimentos para a preparação dos corpos de prova para esse ensaio, pois a norma ASTM, de acordo com aquele autor, é bastante sucinta neste aspecto. Na figura 2, está um esquema de configuração do corpo de prova para a realização do ensaio de tração em disco circular com fenda prescrito pela norma ASTM D7313-07, que foi obtida através de várias pesquisas utilizando-se diferentes geometrias de corpos de prova, até alcançar a configuração em forma de disco (*Disk-Shaped*).

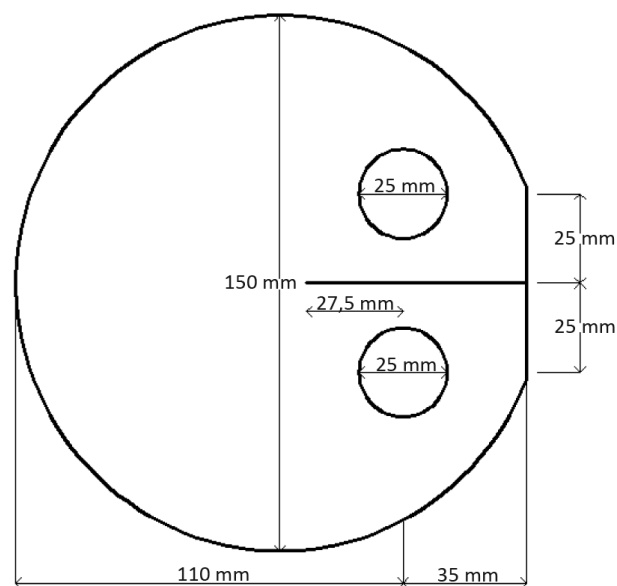


Figura 2 – Configuração do corpo de prova para a realização do ensaio de tração em disco circular com fenda (ASTM 7313-07)

Pesquisas, como, por exemplo, as de Wagoner *et al* (2004) e Wagoner *et al* (2005), apontaram que a geometria em formato de disco circular seria a mais conveniente na determinação da energia de fratura em misturas asfálticas por apresentar facilidade de obtenção de corpos de prova e por possuir área superficial de ruptura relativamente adequada às análises. Assim, a geometria em formato de disco dos corpos de prova realizados naqueles ensaios foi incorporada à norma ASTM E399-90, resultando no método de ensaio normalizado pela ASTM.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para a execução do ensaio de tração em disco circular com fenda, seguiram-se as especificações prescritas pela norma ASTM D7313-07, além das realizadas por Hirsch (2009), que apresenta esclarecimentos sobre

os procedimentos a serem seguidos nesse ensaio. O ensaio foi realizado à temperatura de 10º C, no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, sendo que um especial cuidado é necessário tanto na preparação dos corpos de prova quanto no condicionamento da temperatura das amostras, além da própria execução do ensaio. Maiores detalhes sobre a preparação e o condicionamento das amostras, bem como a realização dos ensaios, são encontrados nos trabalhos de Hirsch (2009) e Bastos (2010).

Os dados fornecidos por esse ensaio são uma força aplicada por uma prensa para promover a abertura da trinca produzida artificialmente no corpo de prova, para induzir o fraturamento e o deslocamento de abertura dessa mesma trinca, que é medido por um equipamento denominado *clip-on-gage*. Tais dados são plotados numa curva força *versus* abertura da trinca, o que permite calcular a energia de fratura de cada corpo de prova, de acordo com as recomendações da norma ASTM D7313-07.

Nas figuras 3 e 4, apresentam-se a configuração da execução do ensaio de tração em disco circular com fenda e um dos gráficos força *versus* abertura da trinca obtido para um dos conjuntos de corpos de prova ensaiados.

Nas tabelas 6, 7 e 8, mostram-se os resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova extraídos.

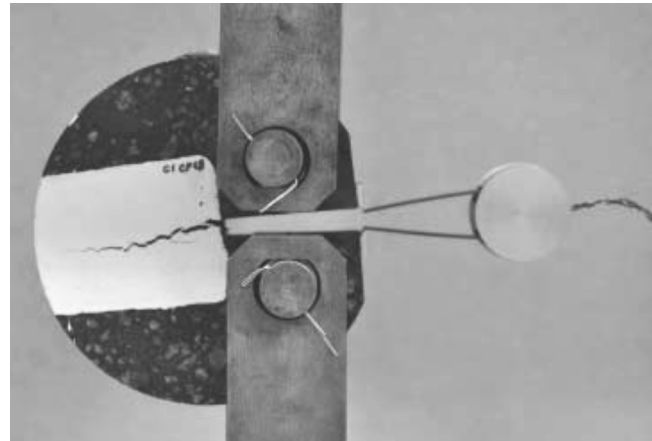


Figura 3 – Execução do ensaio de tração em disco circular com fenda

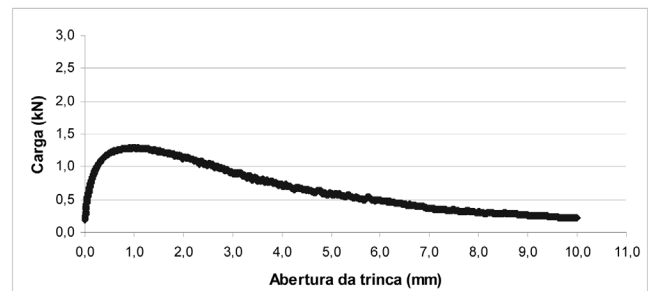


Figura 4 – Curva força versus abertura da trinca para o ensaio de tração em disco circular com fenda

Tabela 6 – Resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova extraídos sem geogrelha

Nº do CP	Energia da fratura G_f (J/m ²)	Média (J/m ²)	Desvio padrão (J/m ²)	Coef. de variação	Carga máxima (kN)
13971	586,0	919,6	341,3	37,1	1,30
13972	1396,2				1,70
13973	868,6				2,46
13975	827,6				1,55

Tabela 7 – Resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova extraídos com camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro

Nº do CP	Energia de fratura G_f (J/m ²)	Média (J/m ²)	Desvio padrão (J/m ²)	Coef. de variação	Carga máxima (kN)
13982	1372,1	1178,0	430,2	36,5	1,96
13985	919,2				1,43
13986	1259,1				1,80
13987	1730,5				2,05
13990	609,1				1,20

Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova extraídos com camada intermediária de geogrelha de poliéster

Nº do CP	Energia de fratura G_f (J/m ²)	Média (J/m ²)	Desvio padrão (J/m ²)	Coef. de variação	Carga máxima (kN)
13998	1474,9	1089,1	246,2	22,6	1,70
14001	1046,6				1,47
14002	1160,3				1,29
14004	902,2				1,11
14008	861,5				0,77

Para cada conjunto de amostras extraídos (sem ou com presença de geogrelha) foram destinados ao ensaio de tração em disco circular com fenda cinco corpos de prova, totalizando 15 corpos de prova. Entretanto, para um dos corpos de prova do conjunto de amostras sem camada de geogrelha, não foi possível utilizar os dados de seu ensaio, pois apresentou ruptura através de um dos furos de carregamento, sendo que a propagação do trincamento no ensaio deve seguir a mesma direção da pré-trinca, executada artificialmente durante a confecção das amostras. A figura 5 mostra o corpo de prova no qual houve a ruptura através de um dos furos de carregamento.

Nas figuras 6 e 7, apresentam-se estes valores médios de energia de fratura, além dos valores médios da carga máxima registrados nos ensaios de tração em disco circular com fenda.

Analisando a figura 6, observa-se que o maior valor médio para a energia de fratura (G_f) foi obtido para os corpos de prova que apresentavam a camada de geogrelha de fibra de vidro; já o menor valor médio de energia de fratura correspondeu às amostras sem a presença de camada intermediária de geogrelha. Entretanto, pela figura 7 observa-se que as amostras sem geogrelha apresentaram maior valor médio de carga máxima (1,75 kN), apesar de terem apresentado o menor valor médio de energia de fratura (919,6 J/m²).

Isto é indicativo da influência positiva da presença da geogrelha como camada destinada a atrasar a propagação de trincas, pois apesar das amostras com geogrelha apresentarem menores valores médios de carga máxima em relação àqueles sem camada de geogrelha, tiveram maiores valores médios de energia de fratura. Observa-se também que, apesar das amostras

com camada de geogrelha de poliéster apresentarem os menores valores médios de carga máxima, as mesmas apresentaram valores médios de energia de fratura próximos aos das amostras com geogrelha de fibra de vidro, o que mostra o bom comportamento destes corpos de prova quanto à resistência ao fraturamento neste ensaio.

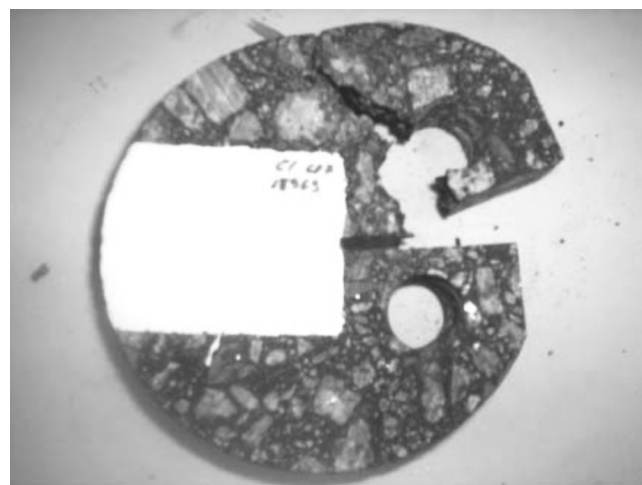


Figura 5 – Corpo de prova cuja fratura ocorreu através de um dos furos de carregamento

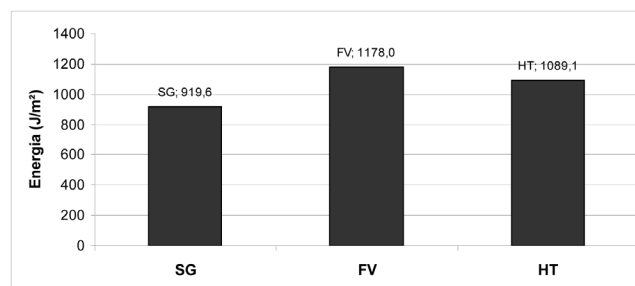


Figura 6 – Valores médios de energia de fratura para os corpos de prova extraídos (SG: sem camada de geogrelha; FV: camada de geogrelha de fibra de vidro; HT: camada de geogrelha de poliéster)

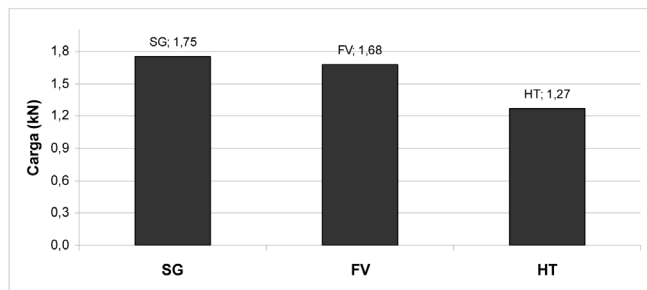


Figura 7 – Valores médios da carga máxima dos corpos de prova extraídos (SG: sem camada de geogrelha; FV: camada de geogrelha de fibra de vidro; HT: camada de geogrelha de poliéster)

Nas tabelas 9, 10 e 11, mostram-se os resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova moldados em laboratório.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova moldados sem geogrelha

N° do CP	Energia de fratura G_f (J/m ²)	Carga máxima (kN)
13921	1548,2	2,30

Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova moldados com camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro

N° do CP	Energia de fratura G_f (J/m ²)	Carga máxima (kN)
13891	1638,7	1,29

Tabela 11 – Resultados do ensaio de Tração em disco circular com fenda realizados nos corpos de prova moldados com camada intermediária de geogrelha de poliéster

N° do CP	Energia de fratura G_f (J/m ²)	Carga máxima (kN)
13865	1647,3	2,03

Para cada conjunto de amostras moldadas (sem ou com presença de geogrelha), foram destinados ao ensaio de tração em disco circular com fenda três corpos de prova, totalizando nove corpos de prova. Entretanto, apenas em um dos corpos de prova do conjunto de amostras (sem camada de geogrelha ou com camada de geogrelha) foi possível utilizar os dados do ensaio, pois os demais corpos de prova apresentaram ruptura através de um dos furos de carregamento, limitando a utilização dos parâmetros estatísticos.

Nas figuras 8 e 9, apresentam-se os valores da energia de fratura e os valores da carga máxima registrados nos ensaios de tração em disco circular com fenda.

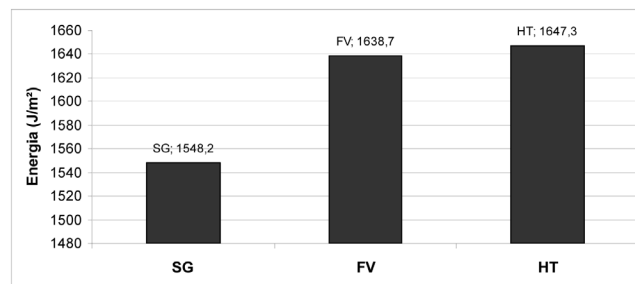


Figura 8 – Valores médios da energia de fratura para os corpos de prova moldados (SG: sem camada de geogrelha; FV: camada de geogrelha de fibra de vidro; HT: camada de geogrelha de poliéster)

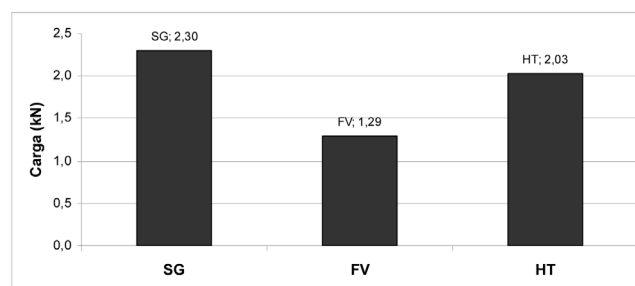


Figura 9 – Valores médios da carga máxima dos corpos de prova moldados (SG: sem camada de geogrelha; FV: camada de geogrelha de fibra de vidro; HT: camada de geogrelha de poliéster)

4. CONCLUSÕES

Para os corpos de prova extraídos, o maior valor médio da carga máxima atingida no ensaio foi obtido pelas amostras sem a presença da camada de geogrelha, sendo o menor valor médio correspondente às amostras com a camada de geogrelha de poliéster. Apesar disto, os valores médios da energia de fratura para as amostras com presença da camada de geogrelha foram superiores aos valores médios correspondentes às amostras sem essa camada.

Para os corpos de prova moldados em laboratório, o maior valor de carga máxima também foi obtido pela amostra sem camada de geogrelha. O menor valor de carga máxima correspondeu à amostra com geogrelha de fibra de vidro. Novamente, verifica-se que o maior valor de carga máxima obtida pela amostra sem geogrelha não correspondeu ao maior valor da energia de fratura. O maior valor da energia de fratura foi obtido pelo corpo de prova com camada de geogrelha de poliéster.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados indicaram que as amostras que apresentaram a camada intermediária de geogrelha possuíam maior resistência à fratura, mostrando uma melhoria de comportamento em relação ao faturamento das amostras avaliadas. Os valores de carga máxima mostraram independência dos reforços utilizados, sendo influenciados por outros fatores, tais como, teores de vazios. Os valores de carga máxima foram obtidos para níveis de deformação relativamente baixos, onde é relevante a rigidez da mistura compactada.

A geogrelha influencia na resistência ao faturamento das amostras, sendo que tal material necessita deformar-se para atuar como elemento de reforço e o valor de carga máxima ocorre logo no início do ensaio.

Por fim, as misturas contendo as camadas de geogrelhas apresentaram melhores resultados quanto

à resistência ao faturamento. As amostras contendo uma camada de geogrelha de poliéster, mesmo para as amostras extraídas, foram as que apresentaram o menor valor médio de carga máxima; o valor médio da energia de fratura ficou próximo do valor médio apresentado pelos corpos de prova com geogrelha de fibra de vidro, que foram as amostras extraídas de maior valor médio. E para as amostras moldadas, as que continham uma camada intermediária de geogrelha de poliéster foram as que apresentaram maior valor médio da energia de fratura. Diante dos resultados dos ensaios, a presença da camada intermediária de geogrelha aumentou a resistência à fratura das amostras analisadas, mostrando que, comparativamente, estes materiais geossintéticos melhoraram a resistência ao faturamento das amostras avaliadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM 7313-07. *Standard test method for determining fracture energy of asphalt-aggregate mixtures using the disk-shaped compact tension test geometry*. ASTM International: 2007.

BASTOS, G.A. *Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas para pavimentos flexíveis*. Dissertação. PUC-Rio: 2010.

BÜHLER, A. *Estudo do efeito de grelhas de reforço na restauração de pavimentos*. Tese. ITA: 2007.

HIRSCH, F. *Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaios de tração em disco circular com fenda*. Dissertação. COPPE/UFRJ: 2009.

LAO, V.L.E.S.T.; RAMOS, C.R. *Estudo e emprego de grelha polimérica antirreflexão de trincas em pavimentos flexíveis*. XV Congresso Íbero-Latinoamericano do Asfalto (CILA). Lisboa: 2009.

RODRIGUES, R.M. *Estudo do trincamento dos pavimentos*. Tese. COPPE/UFRJ: 1991.

SILVA, B.H. de A. *Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à oscilação do lençol freático simulada em modelo físico de verdadeira grandeza*. Tese. COPPE/UFRJ: 2009.

WAGONER, M.P. et al. *Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test*. Transportation Research Board. Washington: 2005.

WAGONER, M.P., BUTTLAR, W.G. e PAULINO, G.H. *Disk-Shaped Compact Tension Fracture Test: A Practical Specimen Geometry for Obtaining Asphalt Concrete Fracture Properties, Accepted to Experimental Mechanics*, 2004.

Avaliação Comparativa do Desempenho de Pavimentos Restaurados por Reciclagem Profunda dos Materiais de Pavimentação e Outras Técnicas

(Comparative Performance of Rehabilitated Pavements by Full Depth Reclamation and other Techniques)

Firmino Sávio Vasconcellos de Souza

Mestre em Geotecnia, consultor em Pavimentação, saviovsouza@gmail.com, savio@gruposantanna.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é evidenciar a importância da adoção de políticas de gestão da manutenção de pavimentos, o que propiciará melhores diagnósticos e, conseqüentemente, melhores e mais econômicas soluções técnicas para uma determinada rede de rodovias. Tal importância aumentará à medida que houver mais rodovias no contexto. Ficou evidente, por meio deste estudo, como a técnica de restauração dos pavimentos por reciclagem dos materiais é versátil ao permitir a adição de vários materiais ao pavimento original e sua trituração, mistura e compactação para a restauração, mantendo a homogeneidade do material reciclado. Os efeitos das técnicas de restauração dos pavimentos por reciclagem e de outras técnicas de restauração por intervenções só superficiais foram comparados em diferentes trechos da mesma rodovia. Portanto, é uma apologia à gestão da manutenção de pavimentos que foi praticada, neste caso específico, com grande sucesso. Apresenta-se um Estudo de Caso que compara o desempenho de aproxi-

madamente 70 km de extensão de pavimentos restaurados por diferentes técnicas, na rodovia SP-351, entre Bebedouro e Palmares Paulista, SP, ao longo de 10 anos, entre 1998 e 2008. Foram eleitas, como indicadores de desempenho dos pavimentos restaurados, as deflexões máximas reversíveis e a irregularidade do perfil longitudinal dos pavimentos, ou seja, deformabilidade elástica e deformabilidade plástica dos pavimentos. Por este estudo, confirmou-se a hipótese de que o diagnóstico feito a partir de um processo consistente de avaliação dos pavimentos permitiu a adoção das soluções de restauração conforme as necessidades de estabilização por enrijecimento ou aumento do atrito interno dos materiais componentes das camadas estruturais dos pavimentos (ou seja, revestimento e base), que as intervenções de reciclagem permitem com grande eficiência. Tais soluções diferenciadas e aplicadas em momentos estrategicamente selecionados da vida útil dos diferentes segmentos da rodovia favorecem a economia e a racionalidade da gestão da manutenção dos pavimentos. A gestão racional da manutenção dos pavimentos neste estudo de

caso foi produto da combinação da avaliação sistemática dos pavimentos, da aplicação da versatilidade da técnica de reciclagem e da seleção estratégica das intervenções para a restauração dos pavimentos que levam a uma máxima vida útil dos pavimentos. O Tratado de Kyoto, e mais recentemente a reunião de Copenhagen, evidenciam a necessidade imediata de se adotar medidas preventivas ou mitigatórias dos impactos ambientais causados pelas atividades produtivas no mundo com o intuito de promover a sustentabilidade do planeta. O presente trabalho aponta a conveniência da restauração dos pavimentos por reciclagem dos materiais já originalmente constituintes destes, considerando os grandes volumes dos materiais envolvidos e a eficácia da técnica, como fica evidente neste Estudo de Caso, gerando racionalidade de tanto técnica como econômica.

Palavras-chave: pavimentos, desempenho, materiais de pavimentação, restauração, reciclagem.

ABSTRACT

The objective of this paper is to show the efficacy of the pavement full depth reclamation technique and of other pavement rehabilitation techniques, mainly when applied at the right time, oriented by the right pavement

evaluation procedures and following the right pavement performance indicators; thus it constitutes an apology to pavement management procedures presently in effect with great success. A Study Case is presented to compare the performance of an extension of 70 km of the double lane Highway SP-351, between Bebedouro and Palmares Paulista, rehabilitated by different techniques for ten years between 1998 and 2008, using maximum deflections and roughness as performance indicators of the restored pavements, i. e., respectively, elastic and plastic deformation. The Study Case has confirmed the hypothesis that the Full Depth Reclamation technique has provided better pavement performance than the other maintenance measures applied in the Study Case. The Kyoto treaty and, more recently, the Copenhagen climate meeting, have shown the evidence for the immediate need to adopt preventive or mitigative measures to restrain environmental impacts caused by productive activities to make the world more sustainable. This paper indicates objectively how the recycling practices of the paving materials is technically feasible, mainly when the great volumes are accounted for such as it is the highway paving industry.

Keywords: pavements, pavement performance, rehabilitation, recycling, sustainability.

I. INTRODUÇÃO

Este artigo técnico divulga a importância da adoção de políticas de gestão da manutenção de pavimentos rodoviários. Para a confecção de uma dissertação de mestrado cujo objetivo foi demonstrar a viabilidade técnica e econômica das técnicas de restauração de pavimentos por reciclagem dos materiais de pavimentação, o autor realizou uma pesquisa empírica de dados reais característicos do desempenho funcional e estrutural de uma extensão de 70 km da rodovia SP-351 em pista dupla, entre Bebedouro e Palmares Paulista no Estado de São Paulo. Os dados foram coletados sistematicamente ao longo de 10 anos (1998 – 2008) pela Concessionária TEBE. No decorrer desses 10 anos, a concessionária realizou avaliações periódicas e regulares das condições funcionais e estruturais dos pavimentos da rodovia que permitiram bons diagnósticos, adotou soluções de restauração pertinentes e executou-as.

A seguir, na figura 1, apresenta-se um mapa da localização do trecho da rodovia SP-351 que foi objeto da pesquisa:



Figura 1 – Localização dos segmentos do Estudo de Caso na rodovia SP-351

No Estudo de Caso, foram executadas três diferentes soluções de restauração ao longo dos 140 km de pista. Duas delas incluíram a reciclagem dos materiais e uma terceira constituiu-se de intervenções superficiais. Por intervenções superficiais entenda-se fresagens, ou seja, a remoção de parte da espessura da capa e/ou recapamentos. Estas não terão tão profundo impacto ao restaurar as condições estruturais dos pavimentos como ocorre com a reciclagem. A técnica de reciclagem dos materiais é capaz de restaurar as condições estruturais dos pavimentos, atuando especificamente nos materiais, aumentando o atrito interno da mistura por adequação da faixa granulométrica às exigências do projeto (por meio da adição de agregados novos ou da trituração dos existentes), ajustando a plasticidade da parte *mástique* da mistura reciclada (por adição de agentes aglutinantes, tais como, cal, cimento ou outros) e, ainda, administrando o teor de umidade propício para atingir a compactação máxima com a energia adequada.

A estrutura original dos pavimentos incluídos no presente Estudo de Caso era constituída de revestimento asfáltico sobre base de solo-cimento. A espessura média original das camadas nos trechos que foram reciclados e recapados era de 0,05 m para a capa asfáltica e 0,15 m para a camada de base, conforme a figura 2 a seguir:

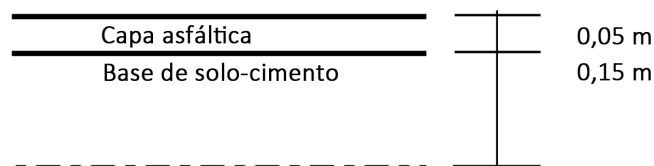


Figura 2 – Estrutura genérica original dos pavimentos restaurados neste Estudo de Caso

Para tornar possível o presente Estudo de Caso, que avaliou o desempenho dos três diferentes segmentos, objetos de três diferentes intervenções de restauração, foram realizados estudos estatísticos dos dados de campanhas de medições periódicas das deflexões máximas (1998, 2002, 2004, 2006 e 2008) e da irregularidade do perfil longitudinal (2000, 2002, 2004, 2006, 2007 e 2008) ao longo de 10 anos, numa extensão de aproximadamente 70 km da rodovia SP-351, extensão ao longo da qual se localizam os segmentos restaurados pelos três processos acima mencionados.

Os indicadores de desempenho dos pavimentos eleitos para esse estudo foram:

- deflexão máxima reversível externada pelos pavimentos e medidas pelo FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e
- irregularidade do perfil longitudinal dos pavimentos, medida com equipamentos a laser.

A seguir, conceituam-se deflexão máxima e irregularidade do perfil longitudinal dos pavimentos.

1.1. DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA DOS PAVIMENTOS

Segundo Bernucci, L. B. *et al*, (2006), os pavimentos são estruturas que, em geral, não apresentam ruptura súbita, mas sim, deteriorações funcional e estrutural acumuladas a partir de sua abertura ao tráfego. A parcela estrutural é associada aos danos ligados à capacidade de carga do pavimento e, por razões didáticas, é aqui considerada em um de seus principais indicadores, que é a resposta dos pavimentos quando solicitada por cargas de tráfego, chamada “deflexão”.

Ainda segundo Bernucci, L. B. *et al*, (2006), a avaliação estrutural mais adequada para ser feita em grandes extensões de pistas e com possibilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto, de forma a acompanhar a variação da capacidade de carga com o tempo, ou seja, o desempenho dos pavimentos no que tange à sua capacidade estrutural, é representada, neste estudo, pelos valores de deflexão máxima, medidos por meio de ensaios não destrutivos, isto é, campanhas de medição de deflexões realizadas com o aparelho FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

As tabelas contendo os valores de deflexão máxima, medidos ao longo dos anos, são apresentadas no item 4 deste artigo e esses valores são objeto do tratamento estatístico que tem por objetivo ressaltar, comparativamente, o desempenho estrutural das diferentes extensões dos pavimentos restaurados estudados nesta dissertação.

1.2. IRREGULARIDADE DO PERFIL LONGITUDINAL DOS PAVIMENTOS

A irregularidade do perfil longitudinal é a soma dos desvios da superfície de um pavimento em relação a

um plano de referência ideal de projeto geométrico, que afeta a dinâmica do veículo, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade do rolamento e a drenagem superficial da via, segundo Bernucci, L. B. *et al*, (2006).

Existe um índice internacional para a medida da irregularidade, designado de IRI (*international roughness index* ou índice internacional de irregularidade), que é um índice estatístico, expresso em m/km ou mm/m, que quantifica os desvios da superfície do pavimento em relação à superfície ideal do projeto. A figura 3.2 mostra as faixas de variação do IRI em diversas situações, segundo Sayers, M. W. e Karamihas, S. M. (1998). O IRI tem sido utilizado como ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços em alguns países.

A irregularidade longitudinal é medida ao longo de uma linha imaginária, paralela ao eixo da estrada e, em geral, transversalmente coincidente com as regiões de trilhas de roda, podendo, em alguns casos,

haver o interesse de melhor detalhar o perfil, levantando-o em diversas linhas paralelas imaginárias. A linha de levantamento longitudinal possui uma largura variável de alguns milímetros a centímetros e depende do tipo de equipamento empregado. A irregularidade pode ser levantada com medidas topográficas ou por equipamentos medidores do perfil longitudinal, com ou sem contato, ou ainda, indiretamente, avaliada por equipamentos do tipo “resposta”, que fornecem uma soma dos desvios do eixo de um veículo em relação à suspensão do próprio veículo.

Esta terminologia se deve ao fato de esses equipamentos medirem mais o efeito da irregularidade nos veículos do que, propriamente, a irregularidade.

A seguir, é dada uma representação gráfica dos valores de irregularidade do perfil longitudinal típicos observados em pavimentos de rodovias em diversas situações de sua natureza e conservação.

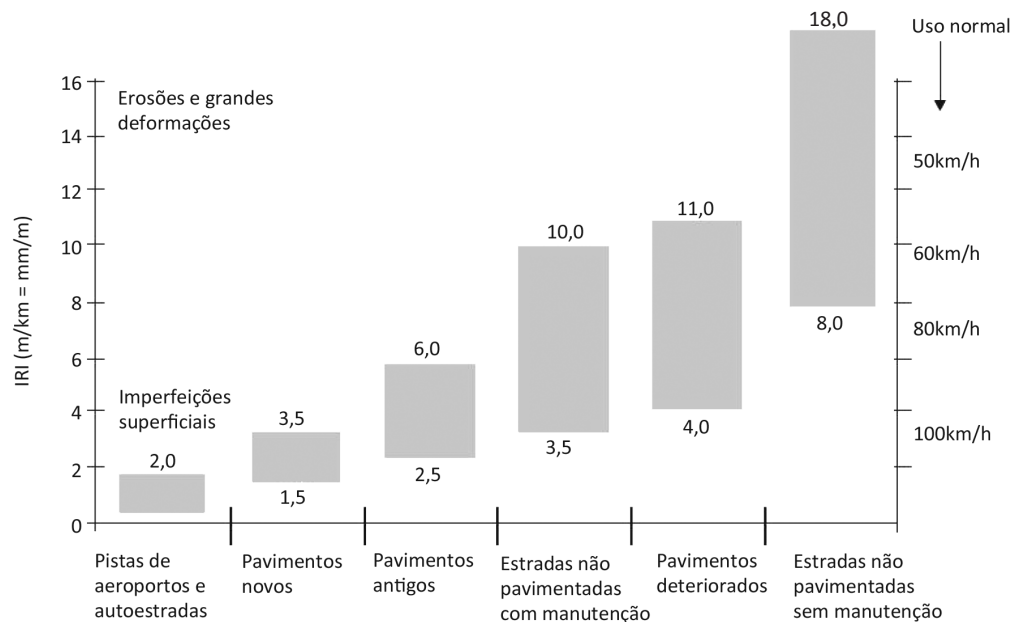


Figura 3 – Diversas faixas de variação do IRI, dependendo do caso e da situação. Fonte: Bernucci, L. B. *et al*, (2006) *apud* (Sayers e Karamihas, 1998).

2. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS TRECHOS RESTAURADOS POR DIFERENTES TÉCNICAS DE RECICLAGEM E RECAPEAMENTO NA RODOVIA SP-351, BEBEDOURO – PALMARES PAULISTA

O Estudo de Caso aqui apresentado foi adotado para ser a base experimental comparativa do desempenho

de três segmentos da mesma rodovia, com as seguintes características iguais e comuns aos três: tráfego, estruturas do pavimento iguais abaixo da espessura de intervenção da restauração, condições normais de drenagem e demais características geotécnicas do corpo estradal no período de 10 anos, considerado entre 1998 e 2008.

Um segmento foi restaurado por intervenções superficiais de fresagem e recapeamentos, destinadas a corrigir defeitos predominantemente funcionais, em que as deflexões máximas medidas situavam-se em torno de 40×10^{-3} mm; e outros dois segmentos foram restaurados utilizando-se duas técnicas de restauração por reciclagem: uma técnica destinada a corrigir deficiências da capacidade estrutural dos pavimentos que apresentavam deflexões máximas da ordem de 50×10^{-3} mm (reciclagem com adição de agregados) e outra técnica destinada a corrigir deficiências mais graves da capacidade estrutural, com deflexões máximas da ordem de 70×10^{-3} mm (reciclagem com adição de agregados e cimento *Portland*).

Descrevem-se, a seguir, mais detalhadamente, as intervenções para a restauração por recapeamento e reciclagem executadas nos três trechos:

1. Em uma extensão de 25.656 m da rodovia SP-351, foram realizadas as operações de fresagem, fresagem e lançamento de microrrevestimento asfáltico, recapeamentos em CBUQ com espessura de 0,04 m e fresagem com posterior recobrimento de TSD com polímeros;
2. Em uma extensão de 30.616 m da rodovia SP-351, foi lançada uma mistura de agregados britados es-

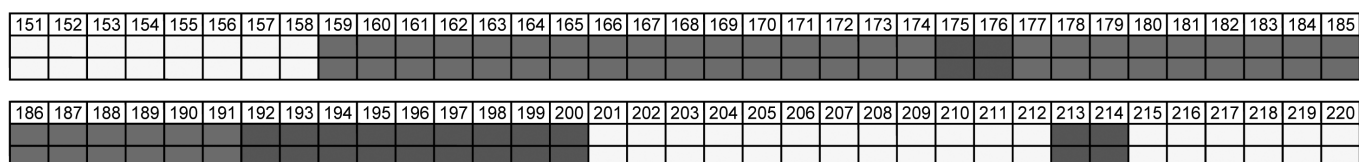
palhados na espessura de 0,03 m, sendo essa mistura composta de 50% de brita zero e 50% de brita um, mais a adição de 3,5% em peso de cimento *Portland*, recapeada com TSD, mais 0,05 m de concreto betuminoso;

3. Em outra extensão de 13.728 m da rodovia SP-351, foi lançada essa mesma mistura de agregados britados espalhados na espessura de 0,03 m, sendo essa mistura composta de 50% de brita zero e 50% de brita um, sem o cimento *Portland* e recapeada com 0,07 m de concreto betuminoso.

As três diferentes extensões restauradas foram submetidas à mesma solicitação do tráfego de 1998 a 2008 e contêm as mesmas características de fundação, porém, houve diferentes espessuras de recapeamento, diferentes intervenções de reciclagem e as restaurações foram executadas em diferentes momentos, ao longo de suas vidas úteis.

Para melhor ilustrar a localização e a organização dos três grupos das diferentes intervenções para a restauração dos pavimentos, mostra-se a seguir, com as diferentes extensões restauradas codificadas por três cores diferentes, a representação esquemática das extensões restauradas, conforme a figura 4 apresentada a seguir:

Representação esquemática das extensões restauradas da rodovia SP-351 nas pistas leste e oeste



Legenda

- Extensão restaurada por intervenções superficiais e recapeamentos
- Extensões recicladas (espessura de 18cm) com adição de agregados e recapeamento com 7 cm de CBUQ
- Extensões recicladas (espessura de 18cm) com adição de agregados, 3,5% de cimento e recapeamento com TSD e 5 cm de CBUQ

Figura 4 – Representação esquemática da localização das extensões restauradas pelas três técnicas, nas pistas leste e oeste da rodovia SP-351, pelas três intervenções consideradas para o Estudo de Caso.

3. METODOLOGIA PARA A COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS TRECHOS RESTAURADOS NESTE ESTUDO DE CASO

A metodologia adotada neste Estudo de Caso, para comparar o desempenho dos pavimentos restaurados pelos três tipos de intervenções citados, no período

entre os anos de 1998 e 2008, foi verificar, quantitativa e comparativamente, o desempenho das diferentes estruturas de pavimentos consideradas segundo parâmetros de natureza técnica, ou seja, valores de deflexão e de irregularidade do perfil longitudinal do pavimento, obtidos em campanhas de medição feitas

em cinco momentos para as deflexões e seis momentos para a irregularidade do perfil longitudinal, a intervalos regulares de aproximadamente dois anos da vida útil dos pavimentos, ao longo de toda a extensão da rodovia SP-351 envolvida no Estudo de Caso, entre Bebedouro e Palmares Paulista.

A Concessionária de Rodovias TEBE realiza regularmente campanhas de medição das deflexões e dos valores de irregularidade do perfil longitudinal dos pavimentos de sua rede de rodovias, na condição de gestora de uma malha de rodovias. Tais dados relativos à rodovia SP-351 foram gentilmente cedidos pela TEBE, com aquiescência da ARTESP (Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo), ao autor para a realização do presente Estudo de Caso.

3.1. PLANILHAS DE DADOS DE DEFLEXÕES MÁXIMAS E DE IRREGULARIDADE DO PERFIL LONGITUDINAL

As planilhas 1, 2, 3 e 4 apresentadas a seguir, adotadas pela TEBE, registram os valores médios, por quilômetro da via, das deflexões máximas e dos valores da irregularidade do perfil longitudinal em toda a extensão do segmento do Estudo de Caso, compreendendo os três segmentos restaurados pelas três diferentes técnicas de restauração, nos anos das medições citados em cada planilha.

3.2. ESTUDOS GRÁFICOS COMPARATIVOS DO DESEMPENHO DOS TRECHOS DO ESTUDO DE CASO

A partir dos dados das planilhas 1 a 4, foram elaborados dois estudos gráficos para evidenciar a redução gradativa das deflexões e das irregularidades dos trechos restaurados pelas três técnicas ao longo do trecho-objeto do Estudo de Caso e, assim, proceder à comparação do desempenho dos trechos restaurados de forma objetiva.

Deflexão máxima (mm x 10⁻²)

Rodovia		SP-351(s) - Rodovia Comendador Pedro Monteleone			
Trecho		Leste - Catanduva - Bebedouro			
Referência		Limites			
Inicial	218,020	<input type="radio"/> Inferior	<input type="radio"/> Intermediário	<input type="radio"/> Superior	
Final	151,400	30	30 80	80	

km	1998	2002	2004	2006	2008	km
	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	
217,000	37	25	30	26	20	217,000
216,000	49	28	43	38	26	216,000
215,000	41	32	33	36	25	215,000
214,000	38	27	33	35	24	214,000
213,000	31	46	33	36	31	213,000
212,000	33	48	35	29	23	212,000
211,000	36	32	31	27	24	211,000
210,000	27	32	22	23	19	210,000
209,000	30	35	24	23	16	209,000
208,000	42	27	29	29	21	208,000
207,000	38	33	24	22	16	207,000
206,000	46	30	22	22	17	206,000
205,000	35	22	35	25	20	205,000
204,000	62	62	29	28	18	204,000
203,000	56	42	31	30	16	203,000
202,000	28	31	20	21	17	202,000
201,000	43	26	33	34	24	201,000
200,000	42	34	37	33	22	200,000
199,000	41	56	43	44	35	199,000
198,000	47	60	47	40	29	198,000
197,000	53	57	38	50	38	197,000
196,000	50	55	67	56	44	196,000
195,000	50	46	39	40	35	195,000
194,000	50	38	41	42	32	194,000
193,000	55	54	42	38	34	193,000
192,000	59	46	41	38	37	192,000
191,000	61	41	40	37	43	191,000
190,000	54	66	22	20	18	190,000
189,000	66	69	23	21	18	189,000
188,000	65	65	22	20	18	188,000
187,000	80	68	27	19	18	187,000
186,000	80	63	22	17	15	186,000
185,000	67	65	23	19	16	185,000
184,000	65		28	27	29	184,000
183,000	68		19	20	19	183,000
182,000	71	56	19	23	19	182,000
181,000	84	54	18	22	21	181,000
180,000	85	52	19	18	23	180,000
179,000	85	60	17	15	19	179,000
178,000	55	73	21	22	19	178,000
177,000	78	63	23	20	21	177,000
176,000	52	80	38	42	36	176,000
175,000	80	74	38	46	44	175,000
174,000	72	41	42	33	38	174,000
173,000	59	73	27	21	21	173,000
172,000	66	49	19	15	17	172,000
171,000	73	64	25	16	16	171,000
170,000	72	75	24	17	19	170,000
169,000	91	66	24	19	21	169,000
168,000	54	64	20	15	17	168,000
167,000	76	60	19	14	16	167,000
166,000	65	66	26	17	16	166,000
165,000	60	67	22	14	17	165,000
164,000	91	54	18	14	14	164,000
163,000	66	71	15	15	17	163,000
162,000	76	55	14	13	15	162,000
161,000	75	57	14	13	14	161,000
160,000	71	61	14	13	13	160,000
159,000	69	54	16	14	15	159,000
158,000	52	53	19	15	18	158,000
157,000	52	45	31	27	22	157,000
156,000	40	48	49	48	42	156,000
155,000	39	31	43	33	27	155,000
154,000	49	40	35	34		154,000
153,000	31	37	37	26		153,000
152,000	38	30	26	28		152,000
151,000	36	32	34			151,000

Planilha I – Planilha representativa dos valores médios da deflexão máxima por quilômetro da pista leste da rodovia SP-351, entre Bebedouro e Palmares Paulista, resultado das campanhas realizadas entre 1998 e 2008.

Deflexão máxima (mm x 10⁻²)

Rodovia		SP-351(s) - Rodovia Comendador Pedro Montealeone					
Trecho		Oeste - Bebedouro - Catanduva					
Referência		Limites					
Inicial	151,400	<input type="radio"/>	Inferior	<input type="radio"/>	Intermediário	<input checked="" type="radio"/>	Superior
Final	218,020		30	30	80	80	

km	1998	2002	2004	2006	2008	km
	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	
151,000	41	32	47			151,000
152,000	38	24	32	29		152,000
153,000	45	37	39			153,000
154,000	41	30	30	27		154,000
155,000	51	30	46	25	16	155,000
156,000	76	56	50	47	43	156,000
157,000	61	54	41	25	39	157,000
158,000	83	55	17	16	17	158,000
159,000	50	50	16	17	15	159,000
160,000	63	52	18	19	17	160,000
161,000	90	54	14	14	13	161,000
162,000	86	63	14	17	16	162,000
163,000	56	65	17	15	12	163,000
164,000	78	54	17	16	15	164,000
165,000	92	74	19	17	16	165,000
166,000	94	70	20	20	15	166,000
167,000	109	62	20	19	16	167,000
168,000	82	90	22	19	17	168,000
169,000	67	56	23	20	20	169,000
170,000	83	64	23	18	21	170,000
171,000	80	64	25	17	15	171,000
172,000	77	72	23	16	18	172,000
173,000	105	55	28	21	23	173,000
174,000	67	43	44	40	42	174,000
175,000	54	57	49	49	47	175,000
176,000	63	71	32	35	37	176,000
177,000	75	75	22	20	20	177,000
178,000	84	59	22	21	24	178,000
179,000	92	68	20	17	26	179,000
180,000	96	86	23	19	17	180,000
181,000	90	85	20	19	17	181,000
182,000	70	64	23	18	17	182,000
183,000	69	77	27	19	16	183,000
184,000	71	72	29	21	25	184,000
185,000	90	77	20	22	17	185,000
186,000	89	56	24	15	15	186,000
187,000	72	69	23	18	15	187,000
188,000	64	55	25	17	16	188,000
189,000	73	63	22	17	14	189,000
190,000	60	60	24	17	16	190,000
191,000	44	51	39	36	34	191,000
192,000	59	41	40	43	39	192,000
193,000	56	51	47	42	39	193,000
194,000	32	56	40	40	30	194,000
195,000	74	45	34	31	34	195,000
196,000	42	48	59	55	43	196,000
197,000	49	36	37	33	24	197,000
198,000	55	49	41	32	33	198,000
199,000	40	50	47	38	35	199,000
200,000	54	38	37	37	25	200,000
201,000	39	45	26	29	24	201,000
202,000	50	37	21	22	24	202,000
203,000	40	37	24	23	23	203,000
204,000	49	36	26	26	26	204,000
205,000	37	31	26	30	24	205,000
206,000	28	25	18	23	21	206,000
207,000	28	30	19	19	18	207,000
208,000	46	53	30	25	23	208,000
209,000	33	34	24	21	16	209,000
210,000	35	36	21	23	21	210,000
211,000	28	39	29	27	21	211,000
212,000	32	41	29	29	28	212,000
213,000	37	48	26	36	33	213,000
214,000	58	47	34	28	27	214,000
215,000	41	41	37	29	33	215,000
216,000	51	38	36	32	38	216,000
217,000	37	30	28	22	26	217,000
218,000	40	19	13			218,000

Planilha 2 – Planilha representativa dos valores médios da deflexão máxima por quilômetro da pista oeste da rodovia SP-351, entre Bebedouro e Palmares Paulista, resultado das campanhas realizadas entre 1998 e 2008.

Irregularidade do Perfil Longitudinal (m/Km)

Rodovia		SP-351(s) - Rodovia Comendador Pedro Montealeone					
Trecho		Leste - Catanduva - Bebedouro					
Referência		Limites					
Inicial	218,020	<input type="radio"/>	Inferior	<input type="radio"/>	Intermediário	<input checked="" type="radio"/>	Superior
Final	151,400		25	25	35	35	

km	2000	2002	2004	2006	2007	2008	km
	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	
217,000				37		28	217,000
217,000	26	22	25	18	22	18	217,000
216,000	21	21	22	20	19	42	216,000
215,000	25	24	25	19	21	21	215,000
214,000	29	28	18	34	29	34	214,000
213,000	40	27	27	22	23	24	213,000
212,000	41	27	26	21	22	21	212,000
211,000	37	24	24	19	20	22	211,000
210,000	23	21	22	17	17	21	210,000
209,000	26	22	23	19	19	18	209,000
208,000	33	23	24	19	18	19	208,000
207,000	26	24	25	27	22	22	207,000
206,000	26	25	28	26	27	24	206,000
205,000	24	25	29	25	25	23	205,000
204,000	40	27	29	27	27	28	204,000
203,000	29	26	26	20	23	23	203,000
202,000	23	24	23	20	20	20	202,000
201,000	23	21	21	18	17	18	201,000
200,000	23	23	21	17	18	19	200,000
199,000	41	22	21	18	18	18	199,000
198,000	31	22	23	19	19	20	198,000
197,000	25	23	23	18	20	22	197,000
196,000	36	23	24	20	22	21	196,000
195,000	24	21	21	18	18	19	195,000
194,000	26	23	22	19	22	19	194,000
193,000	34	23	24	21	26	33	193,000
192,000	29	25	26	22	21	22	192,000
191,000	35	27	28	24	25	26	191,000
190,000	42	37	30	27	27	25	190,000
189,000	43	38	29	26	25	26	189,000
188,000	30	28	31	24	25	26	188,000
187,000	35	32	30	24	24	24	187,000
186,000	37	36	30	25	24	25	186,000
185,000	35	32	29	22	24	25	185,000
184,000		34	27	36	35	34	184,000
183,000	36	32	24	20	22	22	183,000
182,000	35	32	24	23	21	23	182,000
181,000	47	37	25	19	20	19	181,000
180,000	39	35	25	22	22	21	180,000
179,000	39	35	28	24	24	24	179,000
178,000	39	34	27	22	24	24	178,000
177,000	32	31	26	23	21	21	177,000
176,000	33	34	28	22	23	24	176,000
175,000	37	35	24	18	20	20	175,000
174,000	47	43	25	22	20	21	174,000
173,000	48	41	28	24	27	25	173,000
172,000	40	34	30	23	23	23	172,000
171,000	38	35	28	23	24	24	171,000
170,000	40	34	29	25	24	23	170,000
169,000	39	35	36	33	32	32	169,000
168,000	36	33	36	32	35	33	168,000
167,000	40	36	29	23	24	26	167,000
166,000	44	37	31	28	25	25	166,000
165,000	36	34	32	27	29	29	165,000
164,000	36	35	33	26	27	27	164,000
163,000	37	33	30	27	26	26	163,000
162,000	31	31	30	24	26	25	162,000
161,000	35	34	29	27	26	26	161,000
160,000	41	36	31	26	26	27	160,000
159,000	40	33	31	26	27	27	159,000
158,000	49	41	31	28	26	28	158,000
157,000	30	30	35	26	25	28	157,000
156,000	59	42	56	37	33	37	156,000
155,000	47	34	42		46		155,000
154,000	61	27	40				154,000
153,000	58	33	50				153,000
152,000	36	30	39				152,000
151,000	30	30	41				151,000

Planilha 3 – Planilha representativa dos valores médios da irregularidade do perfil longitudinal por quilômetro da pista leste da rodovia SP-351, entre Bebedouro e Palmares Paulista, resultado das campanhas realizadas entre 1998 e 2008.

Irregularidade do Perfil Longitudinal (m/Km)

Rodovia	SP-351(s) - Rodovia Comendador Pedro Monteleone				
Trecho	Oeste - Bebedouro - Catanduva				
Referência	Limites				
Inicial	151,400	<input type="radio"/> Inferior	<input type="radio"/> Intermediário	<input type="radio"/> Superior	
Final	218,020	25	25 35	35	

km	2000	2002	2004	2006	2007	2008	km
	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	1ª Faixa	
151,000	45	33					151,000
152,000	48	33	43				152,000
153,000	45	36	44				153,000
154,000	68	33	40				154,000
155,000	53	38	54		48	43	155,000
156,000	48	33	43	33	30	35	156,000
157,000	50	37	39	29	27	34	157,000
158,000	44	37	32	26	27	27	158,000
159,000	41	40	29	25	24	25	159,000
160,000	42	37	30	26	27	27	160,000
161,000	41	34	30	27	26	27	161,000
162,000	31	32	31	25	26	25	162,000
163,000	36	34	31	27	27	28	163,000
164,000	39	34	30	25	26	26	164,000
165,000	47	37	31	29	29	29	165,000
166,000	43	36	32	27	27	28	166,000
167,000	43	37	29	25	25	25	167,000
168,000	36	33	33	28	30	30	168,000
169,000	45	37	36	34	35	35	169,000
170,000	47	35	30	26	26	27	170,000
171,000	52	40	28	24	25	25	171,000
172,000	45	37	28	24	24	24	172,000
173,000	43	37	29	25	27	27	173,000
174,000	39	36	23	20	19	21	174,000
175,000	40	34	24	18	20	20	175,000
176,000	35	35	27	20	20	21	176,000
177,000	42	35	28	23	22	23	177,000
178,000	40	36	28	21	22	22	178,000
179,000	42	35	29	24	25	25	179,000
180,000	44	41	25	23	22	23	180,000
181,000	53	42	24	20	20	20	181,000
182,000	32	32	23	20	21	21	182,000
183,000	43	35	25	22	23	23	183,000
184,000	38	37	29	42	41	42	184,000
185,000	41	36	27	24	25	24	185,000
186,000	34	32	27	23	22	22	186,000
187,000	35	32	27	22	24	23	187,000
188,000	36	33	30	24	23	24	188,000
189,000	35	33	30	26	26	26	189,000
190,000	36	33	30	24	24	24	190,000
191,000	31	24	29	23	24	24	191,000
192,000	30	25	26	23	23	24	192,000
193,000	23	24	25	21	27	28	193,000
194,000	35	25	27	22	28	28	194,000
195,000	43	23	24	19	20	20	195,000
196,000	30	24	25	23	26	25	196,000
197,000	26	22	23	18	18	19	197,000
198,000	48	24	24	20	20	21	198,000
199,000	27	23	23	19	20	21	199,000
200,000	24	22	22	20	19	18	200,000
201,000	29	24	25	20	21	20	201,000
202,000	33	24	23	20	20	20	202,000
203,000	34	27	27	23	23	24	203,000
204,000	36	29	28	27	26	27	204,000
205,000	18	24	25	25	24	24	205,000
206,000	21	32	33	29	29	28	206,000
207,000	23	24	24	21	20	19	207,000
208,000	36	24	24	19	19	20	208,000
209,000	26	23	23	20	21	19	209,000
210,000	36	31	32	23	22	26	210,000
211,000	41	29	30	24	24	25	211,000
212,000	42	22	22	21	23	21	212,000
213,000	33	25	24	22	23	22	213,000
214,000	19	21	20	23	24	27	214,000
215,000	21	20	22	17	16	17	215,000
216,000	19	22	22	17	18	29	216,000
217,000	26	25	25	23	22	28	217,000
218,000		28					218,000

Planilha 4 – Planilha representativa dos valores médios da irregularidade do perfil longitudinal por quilômetro da pista oeste da rodovia SP-351, entre Bebedouro e Palmares Paulista, resultado das campanhas realizadas entre 1998 e 2008.

3.2.1. Primeiro Estudo Gráfico

Para o primeiro estudo, tomaram-se os valores médios por quilômetro das deflexões máximas medidos ao longo de toda a extensão do trecho do Estudo de Caso, constantes das planilhas acima, e esses valores foram lançados no eixo das ordenadas dos gráficos 1 a 5, todos apresentados na mesma escala, demonstrativos da redução dos valores de deflexão ao longo do tempo entre 1998 e 2008. O desempenho dos pavimentos dos três segmentos restaurados pelas três técnicas é representado por esses gráficos, demonstrando claramente a tendência de queda das deflexões ao longo de 10 anos. Os gráficos representam as campanhas realizadas nos anos de 1998, 2002, 2004, 2006 e 2008, com os valores de deflexão em ordenada e a extensão do trecho em quilômetros, em abscissa. Cabe ressaltar, ainda, que diminuem mais as deflexões dos trechos reciclados e, mais acen-tuadamente ainda, as deflexões do trecho reciclado com a adição de agregados e cimento *Portland*. Note que as deflexões máximas ocorrentes no segmento objeto do Estudo de Caso, medidas em 1998, são da ordem de 90 centésimos de mm; em 2002, são da ordem de 78 centésimos de mm; em 2004, da ordem de 60 centésimos de mm; em 2006, da ordem de 55 centésimos de mm; e, em 2008, atingem valores de, no máximo, 43 centésimos de mm. É uma redução das deflexões muito significativa e importante para a melhoria do desempenho das estruturas dos pavimentos gerenciados e restaurados pelas três técnicas dos três diferentes portes de intervenções para a restauração da capacidade funcional e estrutural dos pavimentos ao longo de toda a extensão dos trechos envolvidos no Estudo de Caso. Os gráficos 1 a 5 facilitam decisivamente a visão da eficácia da restauração dos pavimentos contemplados no Estudo de Caso, quando examinados sequencialmente, conforme se apresenta a seguir, observando o decréscimo dos valores das deflexões (registradas na mesma escala no eixo das ordenadas de todos os gráficos).

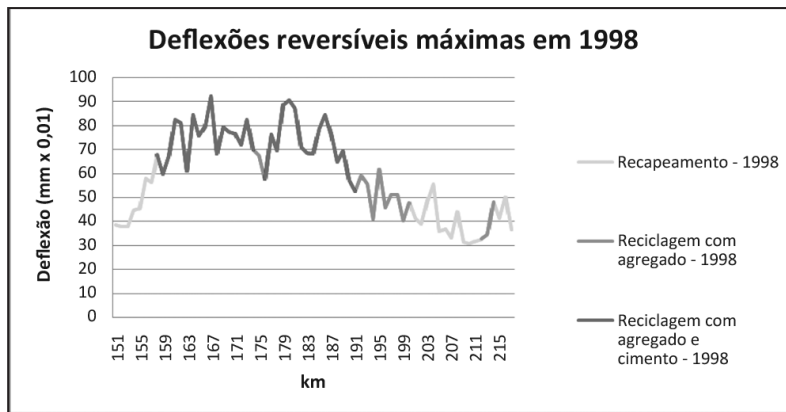


Gráfico 1 – Gráfico dos valores das deflexões reversíveis máximas ao longo de toda a extensão do Estudo de Caso em 1998

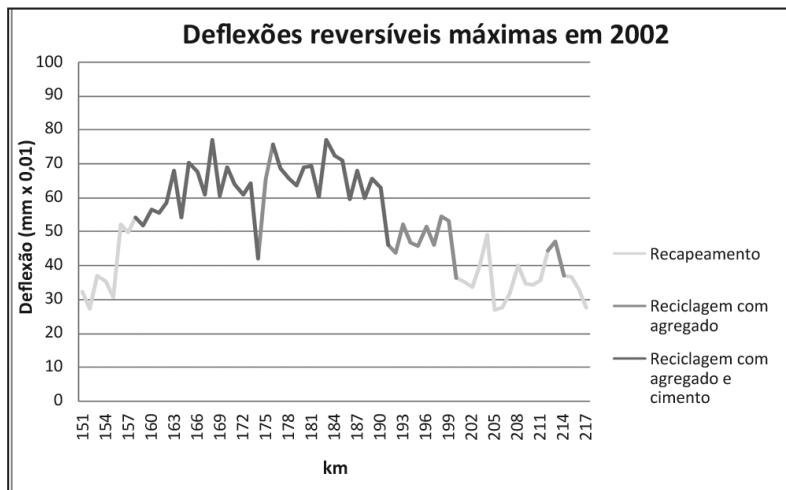


Gráfico 2 – Gráfico dos valores das deflexões reversíveis máximas ao longo de toda a extensão do Estudo de Caso em 2002

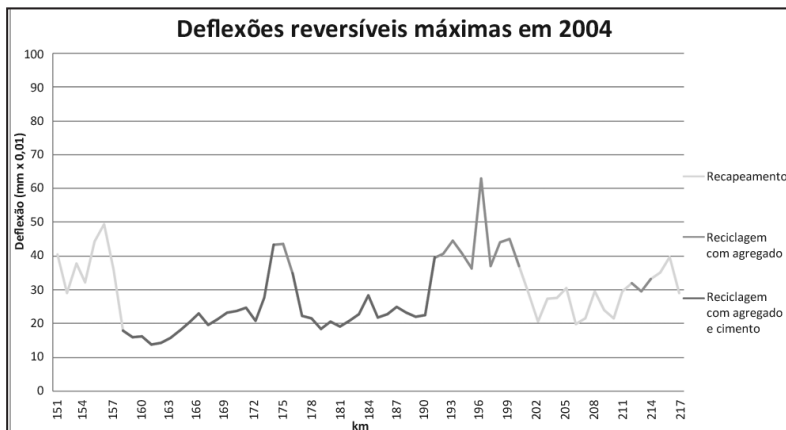


Gráfico 3 – Gráfico dos valores das deflexões reversíveis máximas ao longo de toda a extensão do Estudo de Caso em 2004

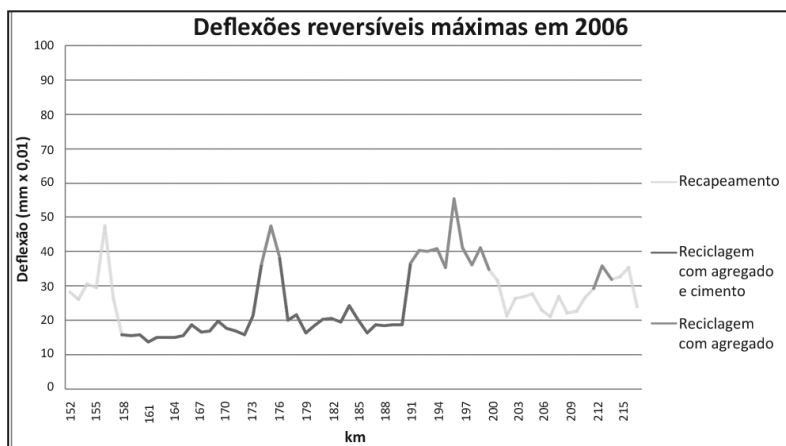


Gráfico 4 – Gráfico dos valores das deflexões reversíveis máximas ao longo de toda a extensão do Estudo de Caso em 2006

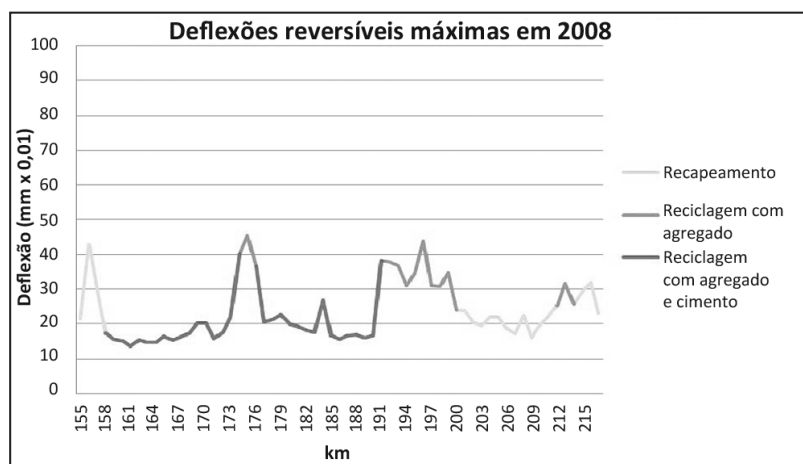


Gráfico 5 – Gráfico dos valores das deflexões reversíveis máximas ao longo de toda a extensão do Estudo de Caso em 2008

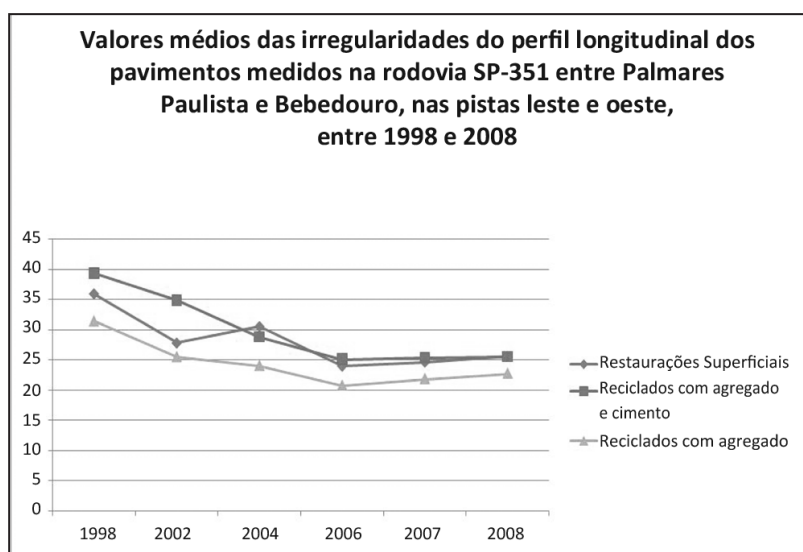


Gráfico 6 – Gráfico representativo da evolução dos valores médios das deflexões máximas medidas em toda a extensão restaurada pelas diferentes técnicas, entre 1998 e 2008, na rodovia SP-351, pistas leste e oeste.

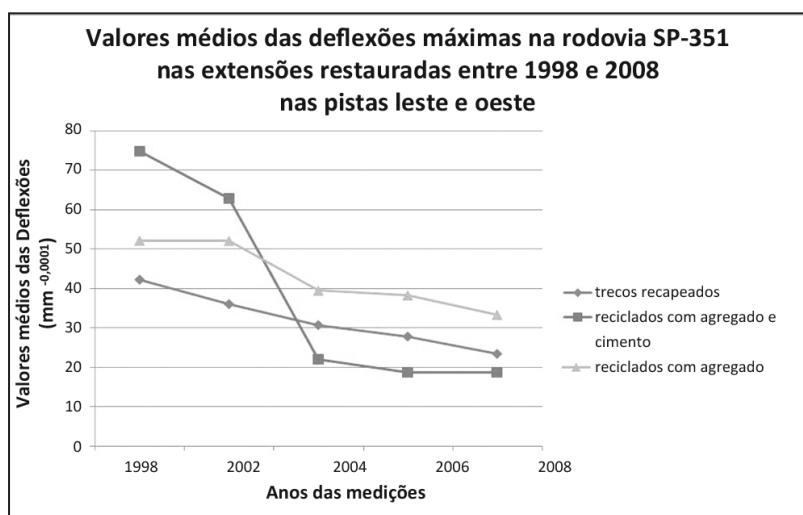


Gráfico 7 – Gráfico representativo da evolução dos valores médios por quilômetro, pistas leste e oeste, da irregularidade do perfil longitudinal dos pavimentos na rodovia SP-351, medidos nas campanhas realizadas entre 1998 e 2008.

3.2.2. Segundo Estudo Gráfico

O segundo estudo consiste de uma série de gráficos demonstrando, no eixo das ordenadas, a média de todos os valores das deflexões máximas e a média de todos os valores da irregularidade do perfil longitudinal, divididas pelo número de quilômetros da rodovia restaurados por cada uma das três extensões-objeto dos três diferentes tipos de intervenções de restauração contemplados e, no eixo das abscissas, os anos em que foram realizadas as campanhas de medição das deflexões e da irregularidade, de 1998 a 2008. As reduções dos valores da deflexão máxima e da irregularidade são notórias após as restaurações, porém, são mais acentuadas após as intervenções de restauração por reciclagem, sobretudo, após a reciclagem com adição de agregados e cimento *Portland*. Ressalta-se, principalmente, que a redução uniforme das deflexões e das irregularidades do perfil longitudinal verificada ao cabo do período de estudo em 2008, que denota um aumento uniforme do prazo de vida útil de toda a extensão do Estudo de Caso, é consequência direta da aplicação das três técnicas de restauração aplicadas combinadamente, constituindo uma política acertada de manutenção de pavimentos. O resultado dessa política, observada no trecho-objeto do Estudo de Caso, é facilmente inteligível por meio dos gráficos 6 e 7 mostrados na página anterior.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que a adoção de uma política de manutenção de pavimentos baseada no desempenho dos pavimentos medido por indicadores objetivos das respostas dos pavimentos (tais como, deflexões e irregularidades dos perfis longitudinais), considerado cada trecho ou rede de rodovias por vez, é uma conduta sempre positiva. Essa política deverá compreender o cotejamento do binômio eficácia (portanto, custos) da aplicação das técnicas de restauração dos pavimentos segundo seu desempenho verificado por sua resposta e o momento da aplicação da intervenção de restauração. O Estudo de Caso constitui uma evidência da eficácia dessa ponderação. A restauração por reciclagem com brita e cimento apresenta-se como sendo a mais eficaz intervenção para a restauração de pavimentos, para o caso em questão, onde há deficiência estrutural, reduzindo as deflexões e as irregularidades mais altas. A restauração por reciclagem com brita reduz as deflexões e as irregularidades médias, e, finalmente,

as intervenções superficiais reduz as deflexões e as irregularidades mais baixas. As três intervenções, combinadamente, garantem um melhor desempenho dos pavimentos com o prolongamento proporcional de suas vidas úteis, com o paulatino decréscimo das deflexões e das irregularidades dos perfis longitudinais e o custo inversamente proporcional das intervenções de maior porte em relação àquelas de menor porte.

A gestão da manutenção dos pavimentos torna-se, portanto, uma atividade imprescindível para gerar confiabilidade suficiente para a adoção de projetos com reciclagem. Quando submetidos à gestão da sua manutenção, os pavimentos têm suas variações de desempenho minimizadas e, assim, são mais aptos a serem reciclados nessa escala industrial, prescindindo dos cuidados artesanais em larga escala que se fazem necessários quando as iniciativas de boa construção ou manutenção dos pavimentos são manietadas. A aplicação combinada das três intervenções consideradas constituiu uma política de manutenção correta, que gerou o resultado da diminuição uniforme das deflexões reversíveis e consequente aumento da vida útil média dos pavimentos do Estudo de Caso.

A pretensão imediata deste artigo é sensibilizar a comunidade rodoviária brasileira com a divulgação de dados técnicos confiáveis sobre o desempenho dos pavimentos reciclados, de modo a tornar mais factível para os projetistas, construtores e supervisores de obras de restauração de pavimentos os resultados econômicos, ecológicos e sociais decorrentes da reciclagem profunda e da gestão da manutenção de pavimentos de um modo geral, para que as técnicas se tornem mais amplamente utilizadas.

5. BIBLIOGRAFIA

SOUZA, F. S. V. *Avaliação do desempenho de pavimentos restaurados por meio de técnicas de reciclagem de materiais de pavimentação*. Dissertação de mestrado em Geotecnia apresentada e aprovada pela UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) em novembro de 2009.

BERNUCCI, L. B. *et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006.

FRESAR Tecnologia de Pavimentos Ltda., *Manual Básico de Reciclagem de Pavimentos* – tradução do “*Basic Asphalt Recycling Manual*” – publicação da ARRA – Asphalt Recycling and Reclaiming Association, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – Estados Unidos da América, 2001, realizada em Belo Horizonte, MG, Brasil, 2009.

Dimensionamento de um Pavimento Utilizando Conceitos Mecanísticos na Reabilitação de Pavimentos Rígidos – A Técnica da Fragmentação

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

luiz.mello@dnit.gov.br

Márcio Muniz de Farias

muniz@unb.br

Euclides Bandeira Neto

euclides.souza@dnit.gov.br

Ariosvaldo Roriz

aroriz@maiamelo.com.br

José Maria Morheb

jose.morheb@gmail.com

RESUMO

A reabilitação de pavimentos rígidos em rodovias nacionais, mais especificamente na malha federal, vem ganhando importância em função do incremento da malha rodoviária com esse tipo de pavimento nos últimos anos. Porém, novas alternativas para a reabilitação de pavimentos rígidos vêm sendo aplicadas em outros países, tal como, a técnica conhecida como fragmentação. A utilização de sobrecamadas no revestimento asfáltico sobre uma placa fragmentada é a solução frequentemente escolhida quando essa técnica é aplicada. Neste trabalho, serão apresentadas considerações para a obtenção de propriedades dos materiais que são utilizadas em análises mecanísticas para o cálculo da espessura do revestimento asfáltico considerando-se um caso real. Foram realizados ensaios de cisalhamento dinâmico (DSR) no ligante asfáltico, o que permitiu a construção de curvas mestras das misturas asfálticas do revestimento, com base em suas características volumétricas. Os resultados permitem determinar o módulo dinâmico ($|E^*|$) do revestimento sob diferentes combinações de temperatura e frequência. O módulo de resiliência do subleito foi estimado com base em retroanálises de bacias de deflexão obtidas com um defletômetro de impacto (FWD). Por fim, considerando a variabilidade do comportamento mecânico do revestimento asfáltico com a temperatura e a característica da camada fragmentada por meio do módulo elástico, pode-se avaliar a espessura

necessária do revestimento asfáltico com o auxílio do programa BISAR da Shell. Concluiu-se, também, que apesar de a fragmentação ser uma técnica ainda nova no Brasil, as metodologias baseadas nos conceitos mecanísticos permitem uma análise adequada do comportamento do pavimento reabilitado com essa técnica.

Palavras-chave: pavimento rígido, restauração, fragmentação.

ABSTRACT

The rehabilitation of concrete pavements in federal highways in Brazil is becoming an important issue due to the increase of the highway constructions with this type of pavement in recent years. However, new alternatives for rehabilitation of concrete pavements are being applied in other countries, such as the technique known as “rubblization”. The use of overlays with hot mix asphalt (HMA) over a rubblized layer is a usual solution that is often chosen when this technique is applied. This work presents considerations to obtain material properties that are used in analyzes to calculate the thickness of the HMA layer based on mechanistic concepts and considering a real case. Dynamic Shear Rheometer (DSR) tests were performed in the asphalt binder, thus allowing to produce the so called master curves of the HMA based on their volumetric characteristics. These curves give an esti-

mate of the dynamic modulus ($|E^*|$) of the asphalt layer for different combinations of temperature and load frequency. The resilient modulus of the subgrade layer was estimated from backanalysis of deflection data obtained with a falling weight deflectometer (FWD). Finally, considering the variability of the mechanical behavior of HMA with the temperature and the characteristics of the rubblized layer based on its elastic modulus, it was possible

to evaluate the thickness of HMA needed. Also, despite the fact that rubblization is a technique which is new in Brazil, the methodologies based on mechanistic concepts allow a detailed analysis of pavement performance when rubblization technique is applied.

Keywords: *Portland cement concrete pavement, rehabilitation, rubblization*

I. INTRODUÇÃO

A reabilitação de pavimentos rígidos, na esfera federal, ainda utiliza técnicas tradicionais, tal como, a intervenção pontual em placas ou a utilização de sobrecamadas em revestimento asfáltico cujo objetivo é permitir a trafegabilidade do pavimento por um período extra. Porém, novas tecnologias estão sendo utilizadas em outros países cujas metodologias podem permitir maior agilidade na execução e menos probabilidade de aparecimento de defeitos prematuros. Assim, fica demonstrada a tarefa a ser assumida pela administração federal que, por meio de seus órgãos técnicos, tem o dever de promover uma atualização nas especificações e manuais relativos ao assunto, tendo em vista o acréscimo da malha em pavimento rígido nos últimos anos.

Quando se trata da reabilitação de pavimentos rígidos utilizando sobrecamadas de revestimento asfáltico, a principal preocupação é com a reflexão das fissuras oriundas das juntas e das trincas existentes nas placas. Diversas metodologias são adotadas para esses casos, tais como, a inclusão de mantas sintéticas sob o revestimento, modificação do ligante asfáltico com polímeros ou até utilização de ambas as técnicas.

Porém, um conceito desenvolvido nos EUA, na década de 1980, propôs a quebra das placas como uma das formas de reduzir a probabilidade de reflexão de fissuras, visando reduzir a movimentação do concreto por expansão e contração térmica, bem como a movimentação de “placas bailarinas”. Originalmente, essa metodologia ficou conhecida como *crack and seat*, que poderia ser traduzida como “craqueamento”, em tradução livre. Outras técnicas evoluíram desse processo, tais como, o *break and seat* e a metodologia conhecida como *rubblization*, denominada aqui como fragmen-

tação. Informações mais detalhadas destas e outras metodologias podem ser obtidas na literatura técnica (Schutzbach, 1988; Witczak e Rada, 1992; Thompson, 1999; Freeman, 2002; Von Quintus *et al*, 2007).

Este trabalho, contudo, trata mais especificamente da metodologia de reabilitação de pavimentos rígidos conhecida como fragmentação. Essa técnica vem sendo largamente utilizada em outros países e vem apresentando resultados satisfatórios. Entre as vantagens dessa nova metodologia, cita-se, por exemplo, a inexistência de produção de entulhos para bota-fora, assim como sua rapidez executiva. A figura 1 ilustra a execução da fragmentação sobre um pavimento rígido com um equipamento específico.

A técnica da fragmentação já foi apresentada em Mello *et al* (2011). Aqui, será ilustrado um exemplo de dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico necessário sobre uma camada fragmentada utilizando-se, para tanto, conceitos da Mecânica dos Pavimentos.



Figura 1 – Execução da fragmentação de um pavimento rígido

2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para realizar o dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico sobre uma placa de concreto fragmentada, utilizando-se conceitos da Mecânica dos Pavimentos, é preciso determinar, ou estimar, o comportamento mecânico de todas as camadas do pavimento. Para tanto, são utilizados ensaios em laboratório, correlações com parâmetros físicos, retroanálises etc.

Um caso prático que estudou a viabilidade de se utilizar a técnica da fragmentação em uma rodovia nacional foi apresentado em Mello *et al* (2011). A rodovia em questão, a BR-101/PE, passa por um processo de reabilitação do pavimento rígido em operação há cerca de 50 anos e a metodologia a ser aplicada na reabilitação ainda está sendo discutida pelos responsáveis. O pavimento rígido existente é composto por placas com seção transversal variável (23-17-23 cm), apoiadas em um colchão de areia, seguido de uma sub-base granular de solo de melhor qualidade e subleito. Segundo os ensaios de campo, obtidos com a utilização do DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), o CBR do subleito é de boa qualidade, com valores mínimos de 20%, o que indica a possibilidade de aplicação da técnica da fragmentação. A figura 2 ilustra o estado do pavimento atual.

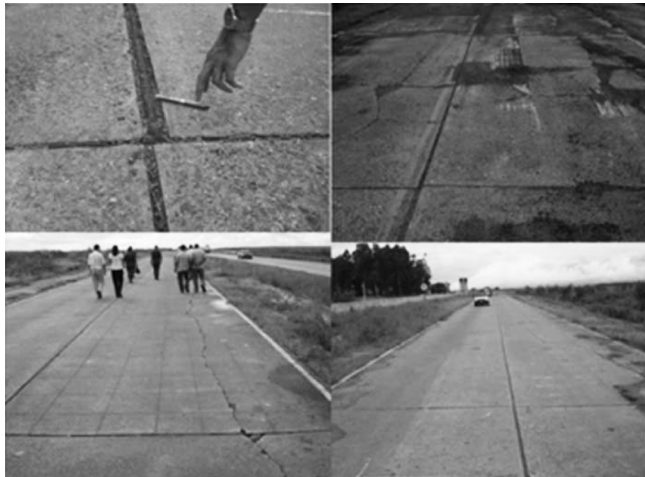


Figura 2 – Estado do pavimento rígido da BR-101/PE.

A caracterização mecânica do subleito, por exemplo, pode ser realizada por meio de retroanálises a partir dos ensaios com FWD. Podem-se, também, realizar ensaios laboratoriais para determinar o comportamento do solo sob diversas tensões confinantes, então, criar

um modelo constitutivo próprio para o subleito. Para o presente caso, foram realizados estudos para caracterizar o comportamento mecânico do subleito. A figura 3a ilustra as bacias de deflexões obtidas no pavimento, indicando um bom comportamento estrutural da rodovia, enquanto que a figura 3b apresenta os valores dos módulos elásticos obtidos por retroanálise.

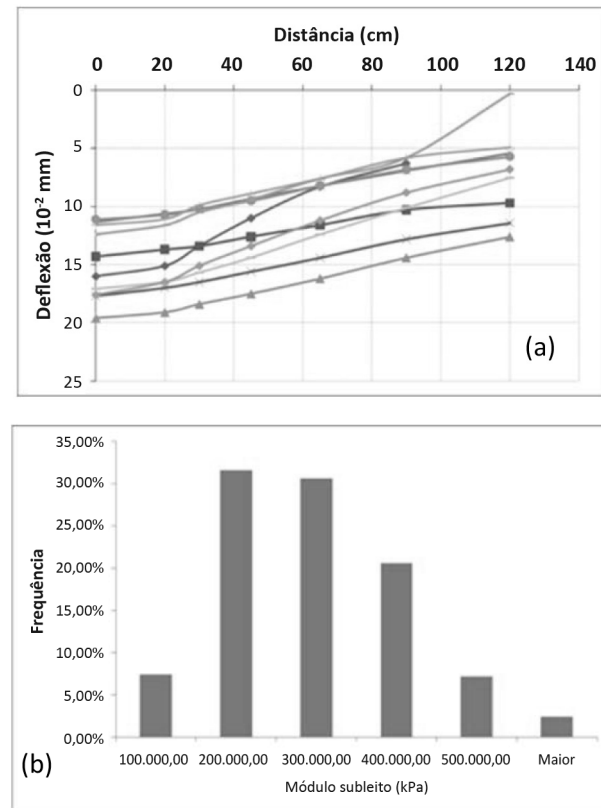


Figura 3 – (a) Bacias deflectométricas; (b) Valores dos módulos elásticos retroanalizados.

A caracterização mecânica do revestimento asfáltico, para simplificar, foi estimada considerando as formulações encontradas na literatura que utilizam as características volumétricas das misturas e as propriedades mecânicas do ligante asfáltico. Da mesma forma, considerando um dimensionamento mais elaborado, ensaios laboratoriais podem ser realizados para determinar o módulo dinâmico do concreto asfáltico, considerando seu comportamento viscoelástico por meio da superposição tempo-temperatura (Mello, 2008).

Para o exemplo de dimensionamento apresentado neste trabalho, será adotada a estrutura do pavimento ilustrada pela figura 4, composta por subleito e sub-base, bem como por ruma camada fragmentada

e duas sobrecamadas de revestimento asfáltico com misturas nas faixas B e C especificadas pelo DNIT.

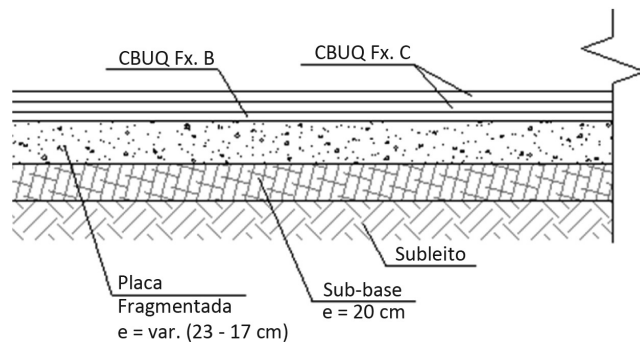


Figura 4 – Estrutura do pavimento utilizada no exemplo de dimensionamento

2.1. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO ASFÁLTICO

A caracterização mecânica da mistura asfáltica depende, principalmente, do comportamento do ligante asfáltico. O ligante asfáltico utilizado usualmente no Brasil, classificado como CAP 50/70, possui per q sairenetração variando em torno de 50 a 70 centésimos de milímetros a 25° C. Para obter o comportamento me-

cânico do ligante, variando a temperatura e a frequência de aplicação da carga, foram realizados ensaios com reômetro de cisalhamento dinâmico no laboratório do *Advanced Materials Services LLC*, em Auburn, no Estado do Alabama, EUA. Os ensaios foram realizados em temperaturas variando entre 10 e 58° C, e frequências entre 0,6 e 100 rad/s. Os resultados obtidos permitem determinar as chamadas curvas mestras do ligante asfáltico, curvas essas que fornecem o módulo cisalhante do ligante asfáltico sobre as diferentes combinações de temperatura e frequência. Os valores do módulo dinâmico do ligante (G^*) e do ângulo de fase (δ) estão apresentados na tabela 1.

Nos revestimentos asfálticos com espessuras acima de 10 cm, é prática comum do DNIT utilizar dois tipos de misturas de forma a atender à espessura do projeto. Considerando as características volumétricas dos dois tipos de concreto asfáltico utilizados em campo (faixa B e faixa C – DNIT), bem como as propriedades mecânicas do ligante asfáltico, foi possível construir curvas mestras da mistura asfáltica utilizando a formulação baseada no modelo de Hirsch (Christensen *et al*, 2003), conforme as equações 1 e 2.

Tabela I – Valores do módulo dinâmico e do ângulo de fase do ligante asfáltico

Temp. (°C)	Frequência (Hz)	G^* (kPa)	δ (°)	Temp. (°C)	Frequência (Hz)	G^* (kPa)	δ (°)
10	15,92	45.000,00	38,43	22	15,92	8.386,67	48,60
	10,04	37.333,33	39,70		10,04	6.620,00	49,93
	5,03	27.666,67	41,63		5,03	4.550,00	52,03
	1,00	12.766,67	46,17		1,00	1.750,00	56,47
	0,50	8.890,00	48,17		0,50	1.130,00	58,07
	0,10	3.553,33	52,80		0,10	383,67	61,67
34	15,92	1.710,00	58,43	46	15,92	295,67	67,97
	10,04	1.250,00	59,83		10,04	215,00	68,27
	5,03	781,67	61,50		5,03	131,00	68,97
	1,00	251,67	64,63		1,00	38,40	71,93
	0,50	152,33	65,97		0,50	22,10	73,70
	0,10	45,43	69,77		0,10	5,69	78,60
58	15,92	65,47	72,70				
	10,04	45,60	73,40				
	5,03	26,13	74,80				
	1,00	6,68	79,00				
	0,50	3,62	80,90				
	0,10	0,82	84,90				

$$|E^*| = P_c \cdot \left[4.200.000 \cdot \left(1 - \frac{VAM}{100} \right) + 3 \cdot |G^*|_{binder} \cdot \left(\frac{VAM \cdot VCB}{10.000} \right) \right] + (1 - P_c) \cdot \left[\frac{1 - VAM/100}{4.200.000} + \frac{VAM}{3 \cdot VCB \cdot |G^*|_{binder}} \right] \quad (1)$$

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VCB \cdot 3 \cdot |G^*|_{binder}}{VAM} \right)^{0,58}}{650 + \left(\frac{VCB \cdot 3 \cdot |G^*|_{binder}}{VAM} \right)^{0,58}} \quad (2)$$

Onde:

VAM = vazios no agregado mineral (%);

VCB = vazios cheio de ligante (%);

$|E^*|$ = módulo dinâmico da mistura (psi);

$|G^*|$ = módulo dinâmico do ligante (psi).

A figura 5 e a figura 6 mostram as curvas mestras para as duas misturas B e C, respectivamente. As curvas apresentadas mostram certa equivalência nos resultados entre os dois tipos de misturas, com valores pouco maiores para a mistura B demonstrando a coerência dos resultados. A tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros volumétricos Marshall, utilizados na determinação das curvas mestras para as duas faixas de mistura do concreto asfáltico.

Tabela 2 – Valores utilizados no cálculo do módulo dinâmico

Propriedades	Unid.	Faixa B	Faixa C
Volume de vazios	%	4,7	3,4
Estabilidade	kgf/cm ²	1100	971
Resistência à tração	MPa	1,04	0,96
VAM	%	15,10	16,30
VCB	%	68,87	78,53
Densidade agregado	kg/cm ³	2,761	2,765
Densidade máxima	kg/cm ³	2,579	2,533
Densidade volumétrica compactada	kg/cm ³	2,457	2,446

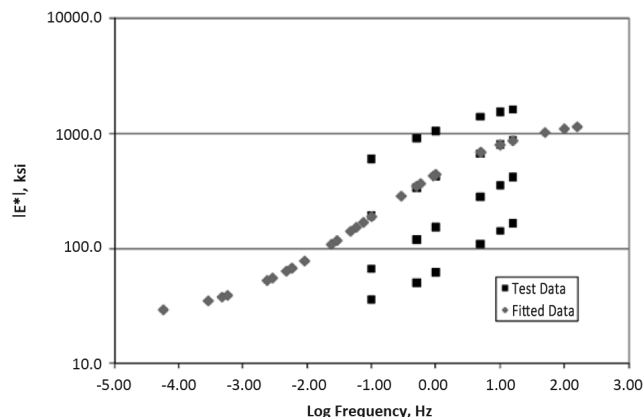


Figura 5 – Curva mestra para a mistura na Faixa B

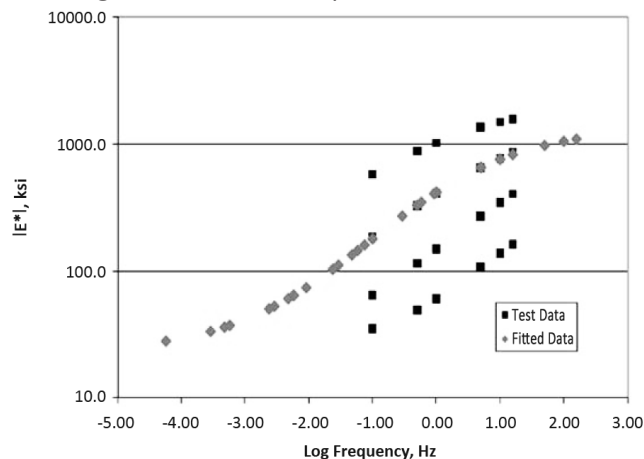


Figura 6 – Curva mestra para a mistura na Faixa C

Como mencionado anteriormente, considerando a variação da temperatura anualmente na região, deve-se determinar a variação dos módulos da camada em concreto asfáltico para a consideração nas análises mecânicas. Neste artigo, a temperatura do pavimento, numa determinada profundidade, foi calculada de acordo com a seguinte expressão, proposta pela USA-CE (2001):

$$MMTP = MMTA \cdot \left(1 + \frac{1}{z+4}\right) - \frac{34}{z+4} + 6 \quad (3)$$

Onde:

z = profundidade abaixo da superfície (polegadas);

MMTP = média mensal da temperatura do pavimento (°F);

MMTA = média mensal da temperatura do ar (°F).

Para o caso do carregamento sofrido pelo pavimento, deve-se atentar para a velocidade do tráfego, já que essa característica pode influenciar a resposta mecânica da camada asfáltica por estar diretamente relacionada à frequência de aplicação da carga. Nesse sentido, foram utilizadas as premissas adotadas no trabalho de Garcia & Thompson (2008), que definem as seguintes expressões para o cálculo da frequência:

$$t = \frac{200 + 2 \cdot z}{V} \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot t} \quad (5)$$

Onde:

f = frequência (Hz);

t = tempo de carregamento (s);

z = profundidade no pavimento (mm);

V = velocidade (mm/s).

Considerando, de forma preliminar, uma espessura de concreto asfáltico próxima a 20,0 cm, pode-se determinar as frequências de carregamento a serem consideradas para as velocidades de 80 e 110 km/h, que serão de aproximadamente 5,0 e 10,0 Hz. Esses dois valores serão utilizados nas análises mais à frente. A tabela 3 e a tabela 4 apresentam os valores de módulo do revestimento asfáltico ao longo do ano para os dois tipos de mistura e para as duas frequên-

cias de carregamento, considerando a temperatura média mensal da região de Pernambuco obtida após consultas em sítios da Internet especializados. Serão consideradas, portanto, duas fases durante o ano para caracterizar mecanicamente a camada asfáltica nas análises pelo método das múltiplas camadas lineares elásticas.

Tabela 3 – Valores do módulo do revestimento asfáltico – frequência de 5 Hz

Mês	Mistura B		Mistura C	
	Temp. (°C)	E* (kPa)	Temp. (°C)	E* (kPa)
jan	32,7	2.275.620,00	34,8	1.884.390,00
fev	32,7	2.275.620,00	34,8	1.884.390,00
mar	32,7	2.275.620,00	34,8	1.884.390,00
abr	32,1	2.381.880,00	34,1	1.983.060,00
mai	30,9	2.603.370,00	32,8	2.191.440,00
jun	30,3	2.718.600,00	32,2	2.301.840,00
jul	29,7	2.836.590,00	31,5	2.415.000,00
ago	29,7	2.836.590,00	31,5	2.415.000,00
set	30,3	2.718.600,00	32,2	2.301.840,00
out	31,5	2.490.900,00	33,5	2.085.870,00
nov	32,1	2.381.880,00	34,1	1.983.060,00
dez	32,1	2.381.880,00	34,1	1.983.060,00
Jun - Set		2.777.595,00		2.358.420,00
Restante		2.383.346,25		1.984.957,50

Tabela 4 – Valores do módulo do revestimento asfáltico – frequência de 10 Hz

Mês	Mistura B		Mistura C	
	Temp. (°C)	E* (kPa)	Temp. (°C)	E* (kPa)
jan	32,7	2.888.340,00	34,8	2.423.280,00
fev	32,7	2.888.340,00	34,8	2.423.280,00
mar	32,7	2.888.340,00	34,8	2.423.280,00
abr	32,1	3.010.470,00	34,1	2.540.580,00
mai	30,9	3.260.940,00	32,8	2.784.840,00
jun	30,3	3.389.970,00	32,2	2.911.800,00
jul	29,7	3.520.380,00	31,5	3.041.520,00
ago	29,7	3.520.380,00	31,5	3.041.520,00
set	30,3	3.389.970,00	32,2	2.911.800,00
out	31,5	3.134.670,00	33,5	2.660.640,00
nov	32,1	3.010.470,00	34,1	2.540.580,00
dez	32,1	3.010.470,00	34,1	2.540.580,00
Jun - Set		3.455.175,00		2.976.660,00
Restante		3.011.505,00		2.542.132,50

2.1.1. Caracterização Mecânica Da Camada Fragmentada

O comportamento mecânico da placa fragmentada, neste caso, será estimado baseando-se nos valores obtidos na literatura técnica. Ainda que seja uma metodologia ainda inédita no Brasil, a técnica da fragmentação é amplamente utilizada nos EUA. A título de exemplo, o *Winsconsin DOT* possui, em suas especificações, valores referenciais de coeficiente estrutural de um pavimento rígido após a fragmentação que auxiliam o dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico necessária. Esses valores foram obtidos por meio de retroanálises realizadas em diversos projetos, onde a técnica da fragmentação foi aplicada naquele Estado.

Além disso, diversos autores indicam valores de módulo elástico a serem utilizados para caracterizar uma camada fragmentada nas análises mecânicas. A tabela 5 apresenta alguns valores de módulo da camada fragmentada obtidos na literatura.

Tabela 5 – Valores do módulo da camada fragmentada encontrados na literatura

Autores	Módulos (MPa)
Sebesta <i>et al</i> (2005)	600,0/1.500,0
Witczak & Rada (1992)	5.800,00
Von Quintus <i>et al</i> (2007)	240,0/700,00/1.000,00 (diversos projetos)
MEPDG (AASHTO)	345,00 – 1.000,00
Thompson (1999)	690,00 – 980,00
Gucunski <i>et al</i> (2009)	550,0 – 2.800,00

Conforme demonstrado, os valores do módulo da camada fragmentada relatados na literatura técnica são bem elevados, levando em consideração os valores usuais das camadas de base em pavimentos flexíveis. Obviamente, o comportamento mecânico das camadas está diretamente ligado ao fraturamento aplicado nas placas. Quanto mais fraturado, menor o módulo e vice-versa. Por outro lado, quanto menos fraturado, maior a possibilidade de aparecimento das trincas por reflexão. O ideal, portanto, é achar uma combinação que reduza a possibilidade de reflexão das fissuras, enquanto que, ao mesmo tempo, o comportamento mecânico não fique tão comprometido.

Após a caracterização dos materiais que serão parte da estrutura do pavimento, a próxima etapa contempla o dimensionamento da espessura da sobrecamada

sobre a placa fragmentada. Serão consideradas duas metodologias para o cálculo da espessura do revestimento asfáltico, descritas a seguir.

3. CÁLCULO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Inicialmente, o dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico será feito considerando a metodologia AASHTO/1993 (Huang, 2003), baseada nos resultados obtidos nas pistas de teste monitoradas nos EUA. Os principais parâmetros de entrada são o número de repetições do eixo padrão (W_{18}), módulo de resiliência do subleito (M_r), confiabilidade (Z_r) e mudança no índice PSI (*serviceability index*). O número de repetições foi determinado durante a atualização do estudo de tráfego realizado em 2008, resultando em um valor de $6,5 \cdot 10^7$ para um período de 20 anos pela metodologia AASHTO. Os valores do módulo de resiliência do subleito já foram objeto de avaliação em Mello *et al* (2011).

Por meio das retroanálises obtidas com base nas bacias de deflexão oriundas de ensaios com FWD, observou-se que o subleito do pavimento da rodovia BR-101/PE é bom, cujos valores de módulo estão acima de 100,0 Mpa para grande parte dos pontos estudados (figura 3). Este é o valor mínimo considerado para que se possa utilizar a técnica por fragmentação com segurança, segundo Von Quintus *et al* (2007).

A confiabilidade do projeto é baseada na probabilidade de previsão correta do período de vida útil do pavimento para um determinado tráfego. O valor recomendável e adotado, neste caso, foi de 90 %. Além disso, as incertezas referentes à previsão do tráfego (número N) e a serventia do pavimento ao fim de sua vida útil são representadas pelo desvio padrão S_0 , também considerado nas análises. Por fim, adotou-se o valor de PSI ao final da vida útil do pavimento igual a 3,0, assumindo como valor inicial 4,2. Maiores detalhes sobre a metodologia do dimensionamento podem ser encontrados em Huang (2003) e Papagianakis e Masad (2008). A equação 6 deve ser resolvida para o cálculo do número estrutural SN:

$$\log W_{18} = Z_r \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log M_r - 8,07 \quad (6)$$

Onde:

W_{18} = número de repetições do eixo padrão;

Z_r = desvio na curva normal para um nível de confiabilidade de 90 %;

S_0 = desvio padrão (adotado 0,45);

SN = número estrutural;

ΔPSI = diferença no índice PSI;

M_r = módulo resiliente do subleito (psi).

O número estrutural, por sua vez, pode ser determinado pela equação 7, a seguir:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (7)$$

Onde:

a_1 = coeficientes das estruturas das camadas do pavimento;

D_1 = espessuras das camadas do pavimento.

Para o cálculo da espessura do revestimento asfáltico, é necessário definir o coeficiente estrutural da camada fragmentada. Segundo as informações obtidas no WDOT, o coeficiente varia de 0,20 a 0,24 (WDOT, 2009). Adotou-se, neste projeto, o valor médio de 0,22. Para o revestimento asfáltico, o coeficiente estrutural adotado foi de 0,42, enquanto que para a sub-base, o coeficiente estrutural adotado foi de 0,19, considerando a formulação apresentada abaixo (Huang, 2003).

$$a_3 = 0,227 \cdot (\log E_3) - 0,839 \quad (8)$$

Onde:

a_3 = coeficiente estrutural da sub-base;

E_3 = módulo elástico da sub-base (adotado como 250 MPa).

A tabela 6 apresenta os resultados das espessuras do revestimento asfáltico necessárias, considerando uma gama de valores de CBR do subleito. Como pode ser observado, os valores de CBR = 10 % resultam na necessidade de uma espessura de aproximadamente 17,0 cm de concreto asfáltico. Considerando os valores observados nos ensaios realizados em campo e aqueles obtidos pelas retroanálises, cujos valores, em sua maioria, estão acima de 20 %, a espessura requerida é de 9,0 cm. Contudo, deve-se ter em mente as recomendações existentes na literatura sobre a espessura

mínima requerida sobre uma placa fragmentada, independentemente do comportamento mecânico da camada de fundação do pavimento.

Tabela 6 – Espessura do revestimento asfáltico em função do subleito

CBR	M_r (kPa)	SN requerido	Espessura do concreto asfáltico (cm)
8	82.800,00	6,15	20
10	103.500,00	5,70	17
15	155.250,00	4,95	12
20	207.000,00	4,45	9
25	258.750,00	4,10	7

Tomando como base o dimensionamento e considerando a mecânica dos pavimentos, é preciso a utilização de programas que determinem as respostas mecânicas por meio do método das camadas elásticas semi-infinitas. Neste trabalho, o software BISAR da Shell foi utilizado para as análises. Várias combinações de uma estrutura de pavimento foram analisadas, variando o módulo da camada fragmentada e o módulo do concreto asfáltico, este último em função da velocidade de aplicação da carga e da variação da temperatura ao longo dos meses.

A figura 7 ilustra a variação das deformações horizontais (e_x e e_y) na fibra inferior do revestimento asfáltico (17 cm de espessura) em função da variação do módulo da base, ou seja, da camada fragmentada. Foram utilizados três valores de módulo baseando-se nos valores observados na literatura, sendo eles 500, 700 e 1000 MPa. A caracterização com concreto asfáltico deu-se considerando os valores médios apresentados na tabela 3 e na tabela 4, para frequências de carregamento de 5,0 Hz e 10,0 Hz. Observa-se que as deformações na direção x, ou longitudinal, são maiores que na direção transversal (e_y). Os resultados demonstrados são relativos ao ponto no centro da área de contato de um pneu.

As deformações não tiveram grandes variações em função da variação do módulo do concreto asfáltico por conta da temperatura e da frequência de carregamento. Porém, quanto menor o valor do módulo da base, maior a diferença em função da variação do módulo do CBUQ. Observa-se, como esperado, uma grande variabilidade das deformações em função da característica mecânica da base. Esse parâmetro é, portanto, decisivo no dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico, baseando-se nos conceitos mecanísticos.

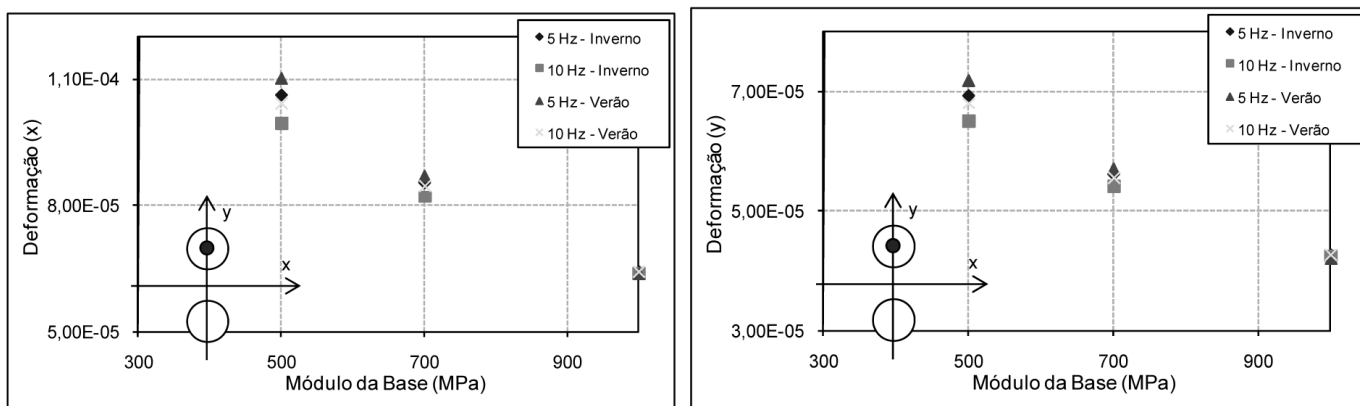


Figura 7 –Variação das deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico em função da variação do módulo da camada fragmentada

As deformações verticais no subleito também foram determinadas. Pode-se observar pela figura 8 que as deformações são maiores para os menores valores de módulo da camada fragmentada, como era esperado. Da mesma forma, as variações do módulo do concreto

asfáltico também influenciaram os valores de deformação. Ao contrário do ocorrido para as deformações horizontais na fibra inferior da camada asfáltica, o ponto crítico da deformação vertical no subleito é no ponto central entre os dois pneus.

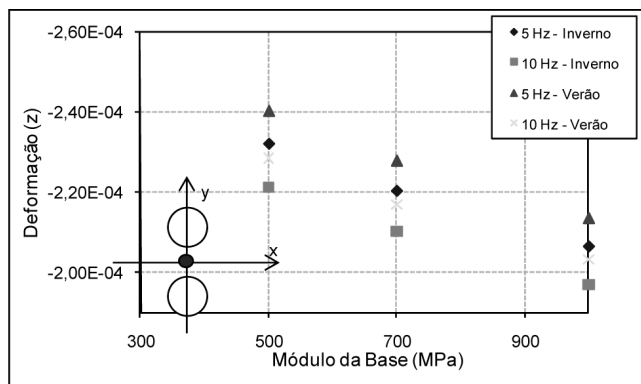


Figura 8 –Variação da deformação vertical no subleito em função da variação do módulo da camada fragmentada

A estimativa da vida útil, considerando as respostas mecânicas obtidas anteriormente, é feita por meio de modelos que determinam o número de repetições possíveis em função das deformações observadas. Em relação ao subleito, optou-se por utilizar o modelo do *Asphalt Institute*, cuja formulação é:

$$N = f_4 \cdot \varepsilon_z^{-f_5} \quad (9)$$

Onde:

N = número de repetições do eixo padrão para a ruptura;

f_4, f_5 = constantes do material iguais a $1,365 \times 10^{-9}$ e $4,477$, respectivamente;

ε_z = deformação vertical no subleito.

Já para o revestimento asfáltico, o número de repetições para alcançar a vida útil, considerando a fadiga do material, pode ser obtido do seguinte modelo:

$$N = f_1 \cdot \varepsilon_x^{-f_2} \cdot E_{ac}^{-f_3} \quad (10)$$

Onde:

N = número de repetições do eixo padrão para a ruptura;

f_1, f_2, f_3 = constantes do material iguais a $0,0796$, $3,291$ e $0,854$, respectivamente;

ε_x = deformação horizontal na fibra inferior do revestimento asfáltico;

E_{ac} = módulo elástico do revestimento asfáltico.

Considerando a formulação acima e as respostas mecânicas obtidas para uma espessura de revestimento asfáltico de $17,0$ cm e módulo da base de $500,0$ MPa, o tráfego previsto de $6,5 \times 10^7$ não seria suportado pela estrutura do pavimento para o período do projeto, considerando os dois critérios de ruptura - do subleito e do

revestimento asfáltico - conforme a figura 9. Nessa figura, D_r representa a relação entre o número de repetições previstas no projeto e o número de repetições admissíveis pela estrutura do pavimento. Já para uma camada de base com módulo de $700,0$ MPa, a relação entre o tráfego previsto e admissível estaria próxima da unidade, demonstrando que a estrutura proposta seria suficiente.

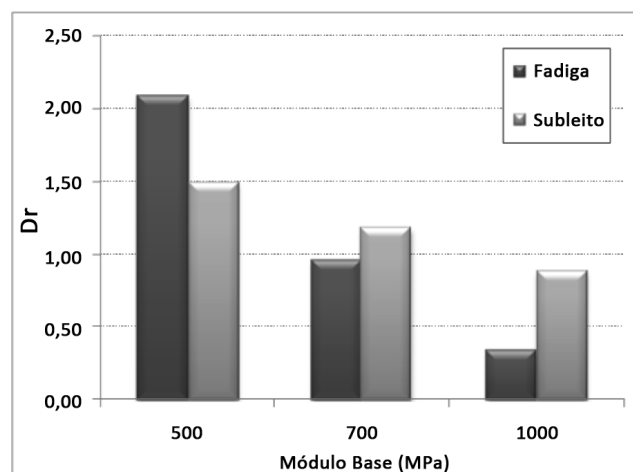


Figura 9 – Relação entre o tráfego previsto e o admissível com a variação do módulo da base para dois critérios de ruptura

A garantia da funcionalidade do projeto seria, portanto, dependente das características mecânicas da camada fragmentada. A adoção de um valor específico durante a elaboração do projeto deveria vir, juntamente, com uma proposta de estudo por meio de retroanálises do comportamento mecânico das camadas do pavimento, a fim de verificar e garantir que as respostas mecânicas estejam dentro do estipulado no projeto. Quaisquer desvios nos valores adotados resultam na necessidade de uma reavaliação em relação à espessura da sobrecamada em revestimento asfáltico.

Decker (2006) apresenta um critério de dimensionamento para determinar a espessura de revestimento asfáltico, considerando os modelos obtidos de projetos desenvolvidos em Minnesota e baseados nos conceitos dos chamados pavimentos perpétuos. Neste caso, são impostos limites às respostas mecânicas do pavimento, de forma a evitar o acúmulo de dano por fadiga e deformação permanente. Como exemplo, tem-se uma limitação da deformação na fibra inferior do revestimento asfáltico em 70×10^{-6} .

Pelo exposto acima, a metodologia de dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico sobre a camada fragmentada depende, principalmente, do com-

portamento mecânico da mesma. Levando em conta o método de dimensionamento, qualquer procedimento baseado em conceitos mecanísticos é aplicável ao caso. Devem-se, entretanto, realizar verificações do dimensionamento por meio de trechos experimentais com o objetivo de conferir, ou até mesmo regular, a espessura do revestimento asfáltico a ser aplicada.

4. CONCLUSÕES

A restauração de pavimentos rígidos será, muito em breve, um dos principais problemas que a Engenharia Rodoviária brasileira irá enfrentar para os pavimentos construídos nos últimos anos. Métodos e processos executivos são constantemente aperfeiçoados e novas técnicas surgem com o avanço tecnológico e conceitual da mecânica dos pavimentos.

Conceitos baseados no acúmulo de dano no interior das camadas do pavimento e aqueles que consideram a evolução da fissura no revestimento asfáltico são objetos de constantes pesquisas e estudos. Neste senti-

6. REFERÊNCIAS

CHRISTENSEN, D. W., PELLINEN, T., NONAQUIST, R. F. (2003). *Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 72, págs. 97-121.

DECKER, D. S. (2006). *Rubblization – Design and Construction Guidelines on Rubblization and Overlaying PCC Pavements with Hot-mix Asphalt*. NAPA – National Asphalt Pavement Association, Information Series 132, pág. 32.

FREEMAN, T. E. (2002). *Evaluation of Concrete Slab Fracturing Techniques in Mitigating Reflective Cracking Through Asphalt Overlays*. Final Report, Virginia Transportation Research Council.

GARCIA, G. e THOMPSON, M. R. (2008). *Strain and Pulse Duration Considerations for Extended-Life Hot-Mix Asphalt Pavement Design*. Transportation Research Record, n° 2087, págs. 3-11.

GUCUNSKI, N., SAUBER, R., MAHER, A., RASCOE, C. (2009). *Modulus of Rubblized Portland Cement Concrete from Surface Wave Testing*. Transportation Research Record, 2104, págs. 34-41.

HUANG, Y.H. (2003). *Pavement Analysis and Design*. Pearson Prentice Hall, 2ª edição, pág. 775.

MELLO, L. G. R. (2008). *O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-055/08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, pág. 263.

MELLO, L. G. R., FARIAS, M. M., NETO, E. B., RORIZ, A., MORHEB, J. M. (2011). *Restauração de Pavimentos Rígidos – Novas Alternativas*. Revista Pavimentação – ABPV, volume VI, págs. 51-66.

do, permitem interpretações diversas e, conseqüentemente, uma gama de aplicações de soluções técnicas quando o assunto são as superposições de camadas asfálticas sobre pavimentos rígidos.

Este trabalho apresentou considerações para a obtenção dos parâmetros de materiais para o uso em análises mecanísticas no intuito de determinar a estrutura de um pavimento, considerando a técnica da fragmentação aplicada em pavimentos rígidos. Partindo do princípio de que é viável técnica e economicamente, é importante demonstrar a metodologia usualmente utilizada para o dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico nesses casos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as empresas envolvidas neste trabalho, permitindo a obtenção dos resultados dos ensaios e das informações mais detalhadas sobre a técnica da fragmentação. Especial atenção aos técnicos do *Wisconsin Department of Transportation (WDOT)*.

MEPDG - Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (AASHTO). www.trb.org/mepdg

PAPAGIANNAKIS, A. T. e MASAD, E. A. (2008). *Pavement Design and Materials*. John Wiley & Sons, Inc., pág. 542.

SCHUTZBACH, A. M. (1988). *The crack and seat method of pavement rehabilitation*. Physical Research Report n° 104, Illinois Department of Transportation, pág. 44.

SEBESTA, S., SCULLION, T., HOLDT, C. V. (2005). *Rubblization for Rehabilitation of Concrete Pavement in Texas: Preliminary Guidelines and Case Studies*. Report n° FHWA/TX-060/0-4687-1, pág. 56.

THOMPSON, M. (1999). *Hot-Mix Asphalt Overlay Design Concepts for Rubblized Portland Cement Concrete Pavements*. Transportation Research Record, 1684, págs. 147-155.

USACE (2001). *United Facilities Criteria Pavement Design for Airfields*. UFC 3-260-02.

VON QUINTUS, H. L., RAO, C., MALLELA, J., AHO, B. (2007). *Guidance, Parameters and Recommendations for Rubblized Pavements*. Wisconsin Highway Research Program, WHRP 06-13, pág. 77.

WDOT (2009). *Facilities Development Manual 14-25-15 – Concrete Pavement Rubblization*. Wisconsin Department of Transportation Roadway Standards.

WITCZAK, M. W. e RADA G. R. (1992). *Asphalt Concrete Overlay Design Methodology for Fractured PCC Pavements*. Transportation Research Record 1374, TRB, National Research Council, Washington D.C., págs. 19-26.

Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Escória de Aciaria e Resíduos Industriais de Minério de Ferro

Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva

Universidade Federal de Ouro Preto – LFA / UFOP – Ouro Preto, Brasil – rodolfo.civil@yahoo.com.br

Gilberto Fernandes

Universidade Federal de Ouro Preto – LFA / UFOP – Ouro Preto, Brasil – gilberto@em.ufop.br

RESUMO

A geração de grandes volumes de resíduos sólidos provenientes das mineradoras e das usinas siderúrgicas tem sido fonte de preocupação em todo o Brasil, principalmente na região do chamado Quadrilátero Ferrífero, em função de questões ambientais, econômicas e até sociais. O presente trabalho teve como finalidade contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico das misturas asfálticas convencionais e modificadas, e verificar a viabilidade técnica do uso de rejeito de minério de ferro e escória de aciaria em pavimentos rodoviários. O projeto de pesquisa analisou laboratorialmente os aspectos físicos e químicos dos agregados convencionais e alternativos para o uso em revestimento asfáltico. As misturas asfálticas do tipo CBUQ foram dosadas segundo a metodologia Marshall, sendo adotada a mesma granulometria, Faixa C do DNIT, com a utilização de brita graduada e escória de aciaria, em diferentes proporções, como agregados graúdos e miúdos, e o rejeito de minério de ferro como material de enchimento alternativo (*filler*). A caracterização mecânica das misturas asfálticas foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e deformação permanente por compressão axial (*creep* estático). Todas as misturas alternativas analisadas apresentaram um desempenho mecânico satisfatório, comprovando a qualidade destes resíduos para o uso em camadas de rolamento. Neste trabalho, constatou-se o grande potencial de uso do rejeito de minério de ferro e da escória de aciaria como agregados alternativos para os revestimentos asfálticos com ganhos de natureza ambiental quando comparados aos agregados pétreos.

Palavras-chave: misturas asfálticas, escória de aciaria, rejeito de minério de ferro.

ABSTRACT

The generation of solid wastes in mining and steel industries has been a problem in Brazil and researches have been done aiming to minimize this generation or to apply the wastes as raw material in another industry. This work analyzed an asphalt mixture made with furnace slag and iron ore waste as aggregates. This investigation analyzed volumetric and mechanical parameters of the mixtures with slag and iron ore residues were compared to those of a mix with conventional rock aggregates. The hot mix asphalt concretes analyzed in this study were designed following the Marshall procedure. The size distribution of aggregates used in this work was the gradation "C" presented by DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) standard with steel slag and natural gravel applied as coarser aggregates, and iron ore waste used as filler. This alternative mixture was compared with asphalt mixtures using conventional filler and gravel in terms of volumetric and mechanical parameters. The mechanical behavior of the asphalt mixtures was evaluated by indirect tensile strength, Resilient Modulus and permanent deformation (static creep). The mixtures applying industrial wastes as aggregates presented satisfactory mechanical performance, showing that the iron ore waste and the furnace slag can be used as aggregate in hot mix asphalt applied in road pavements.

Keywords: asphalt mixtures, steel slag, iron ore waste.

I. INTRODUÇÃO

A preocupação com a escassez de recursos naturais e com os impactos que a extração de matérias-primas naturais pode provocar ao meio ambiente tem mobilizado a indústria da construção civil para buscar alternativas que atenuem os danos ambientais através do melhor aproveitamento dos materiais, da redução da geração e do reaproveitamento dos resíduos gerados e sua devida disposição.

Além disso, o aperfeiçoamento dos processos de beneficiamento dos minerais de ferro tem acarretado um aumento significativo dos volumes de estéreis e rejeitos gerados, resultando cada vez mais na crescente ocupação de áreas para a disposição e a estocagem desses resíduos, além de contribuir para o potencial de degradação do meio ambiente. A investigação de materiais alternativos, tais como, resíduos de siderurgia e resíduos de minério de ferro, em substituição aos agregados graúdos, miúdos e material de enchimento naturais empregados na construção de infraestrutura rodoviária, torna-se necessária, uma vez que a utilização desses materiais constitui uma ferramenta importante no aumento da sustentabilidade da construção, contribuindo para um ambiente saudável e a redução dos custos de pavimentação.

A princípio, o principal atrativo dos agregados alternativos é o aspecto econômico, pois estes materiais normalmente podem ser vendidos por preços inferiores aos dos granulares tradicionalmente empregados na pavimentação. O estudo tem como objetivo analisar laboratorialmente a influência do tipo de agregado (escória de aciaria *versus* agregado convencional) e do tipo de material de enchimento (rejeito de minério de ferro *versus* *filler* mineral) no desempenho de misturas asfálticas do tipo CBUQ. Foram realizados ensaios para a caracterização mecânica das misturas asfálticas com o intuito de avaliar e comparar o desempenho estrutural dos revestimentos em concreto asfáltico com a utilização de agregados alternativos e agregados convencionais

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, ainda há uma carência de pesquisas e trabalhos publicados que abordam o uso de rejeito de minério de ferro em pavimentação, em comparação

com os resíduos industriais. A escória de aciaria, gerada pela indústria siderúrgica, vem sendo amplamente estudada e utilizada como material granular nas camadas de pavimentos rodoviários em vários países, tais como, Estados Unidos, Inglaterra, Japão, França, Alemanha, Rússia e Canadá (Silva e Mendonça, 2001; Castelo Branco, 2004).

Saraiva (2006) utilizou resíduos de mineração de ferro como materiais alternativos na construção de um trecho experimental rodoviário e analisou o comportamento geotécnico dos rejeitos de minério de ferro misturados a solos argilosos, como materiais da camada de base, combinando-os com geossintéticos. Os resultados de CBR apresentados atendem as normas para materiais de base em pavimentos rodoviários e a granulometria atende as faixas E e F do DNIT.

Ferreira (2007) estudou o comportamento geotécnico e mecânico dos estéreis de minério de ferro aplicados como materiais de infra e superestrutura em um pavimento rodoviário experimental para o tráfego de caminhões. Os resultados demonstraram que o pavimento executado com estéreis apresentou um desempenho mecânico satisfatório quanto à capacidade de suporte e durabilidade ante a ação dos veículos e das intempéries.

Castelo Branco (2004) apresenta uma ampla revisão bibliográfica do uso da escória de aciaria em camadas de pavimentos rodoviários, além de mostrar o processo de formação desse rejeito desde a fabricação do aço. A autora avaliou o desempenho das misturas asfálticas do tipo CBUQ contendo escória de aciaria elétrica como agregado e os resultados obtidos demonstraram a possibilidade do uso da escória em revestimentos asfálticos. Entretanto, a autora recomenda o aperfeiçoamento da metodologia devido às dificuldades encontradas na dosagem das misturas relacionadas com as grandes variações nos parâmetros volumétricos, causadas pela heterogeneidade dos grãos da escória.

Um dos principais fatores responsáveis pela limitação do uso da escória de aciaria em pavimentação asfáltica deve-se ao fato do resíduo apresentar características volumétricas expansivas, o que ocasiona a maioria dos defeitos encontrados nos pavimentos que utilizaram esse material como agregado.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A escória de aciaria utilizada como agregado graúdo e miúdo neste estudo é do tipo LD, sendo originada pelo processo de fabricação do aço denominado Linz-Donawitz. As amostras coletadas não seguiram nenhum procedimento específico, recomendou-se apenas que a tomada do material ocorresse em diferentes pontos das pilhas para que se pudesse garantir uma boa representatividade do agregado siderúrgico. Foram co-

letados aproximadamente 450 kg de escória de aciaria (material passante na peneira de abertura de 19,0 mm) e que já apresentavam um período de exposição a céu aberto de oito meses.

Os resultados da caracterização físico-química da escória, os limites especificados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) para cada parâmetro determinado e os métodos utilizados para a realização dos ensaios são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos parâmetros de caracterização da escória de aciaria

Parâmetro	Resultado	Limites especificados pelo DNIT e IPR	Método de ensaio	
Densidade real - agregado miúdo	3,61	-	DNER-ME 084/95	
Densidade real - agregado graúdo	3,59	-	DNER-ME 081/98	
Densidade aparente - agregado graúdo	3,33	-	DNER-ME 081/98	
Absorção - agregado graúdo (%)	2,2	< 2	DNER-ME 081/98	
Equivalente de areia (%)	90,2	> 55	DNER-ME 054/97	
Índice de forma - graduação D	0,74	> 0,5	DNER-ME 086/94	
Treton (%)	14,17	< 60	DNER-ME 399/99	
Durabilidade (%)	4,79	< 5	DNER-ME 089/94	
Expansão (%)	4,47	< 3	PTM-130/78	
Adesividade	Satisfatória	-	DNER-ME 078/94	
Abrasão Los Angeles (%)	Graduação C	15,8	< 25	DNER-ME 035/98
	Graduação D	19,1	< 25	DNER-ME 035/98

Realizaram-se ensaios de lixiviação e solubilização para a avaliação do resíduo em relação ao seu potencial contaminante. O relatório emitido caracteriza a escória como resíduo não perigoso e classificado como material inerte (Classe IIB), isto é, não apresenta riscos à saúde pública ou efeitos nocivos ao meio ambiente.

Através do processo de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram avaliados aspectos relacio-

nados à morfologia e à composição mineralógica na superfície dos grãos de escória. A figura 1 ilustra as características morfológicas dos minerais presentes na superfície de um fragmento de escória de aciaria (material retido na peneira de nº 4). A observação visual revela que as amostras de escória apresentam um aspecto textural superficial áspero e bastante irregular, compostos de cristais com granulação grossa, destacando-se a presença de partículas com forma angulosa e bordas agudas.

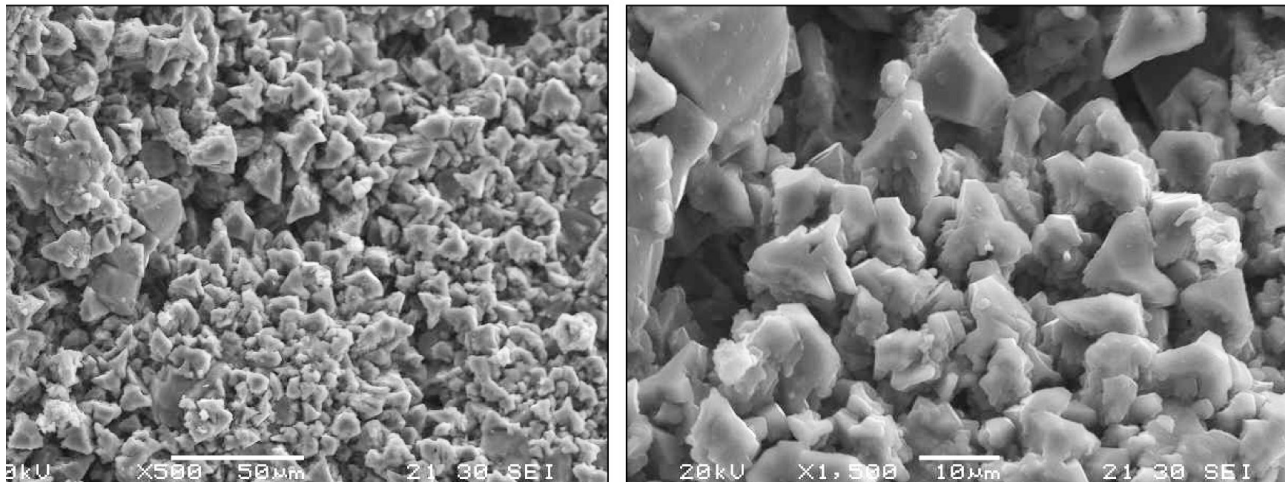


Figura 1 – Fotomicrografias dos grãos de escória com ampliações de 500x e 1.500x

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

O rejeito de minério de ferro utilizado neste estudo como *filer* alternativo é proveniente da mina de Gongo Soco, localizada na cidade de Barão de Cocais - Brasil, e que está inserida na região do chamado Quadrilátero Ferrífero. As amostras foram coletadas ao longo da praia de rejeito da mina de Gongo Soco em diferentes pontos para garantir maior representatividade do resíduo de minério de ferro, totalizando aproximadamente 420 kg de material. O rejeito foi transportado e estocado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto (LFA) da Universidade Federal de Ouro Preto, onde o mesmo foi homogeneizado.

A massa específica real do rejeito de minério de ferro utilizado como *filer* (material passante na peneira de abertura de 0,075 mm) foi obtida através do método DNER-ME 085/94 e o resultado encontrado foi de 4,084 g/cm³.

Pelo microscópio de varredura eletrônica, é possível observar a heterogeneidade da forma e as dimensões das partículas que compõe a amostra do rejeito, com predominância de grãos lamelares, conforme mostrado na figura 2. Os diferentes processos do beneficiamento do minério de ferro contribuem para a variedade das características morfológicas do material.

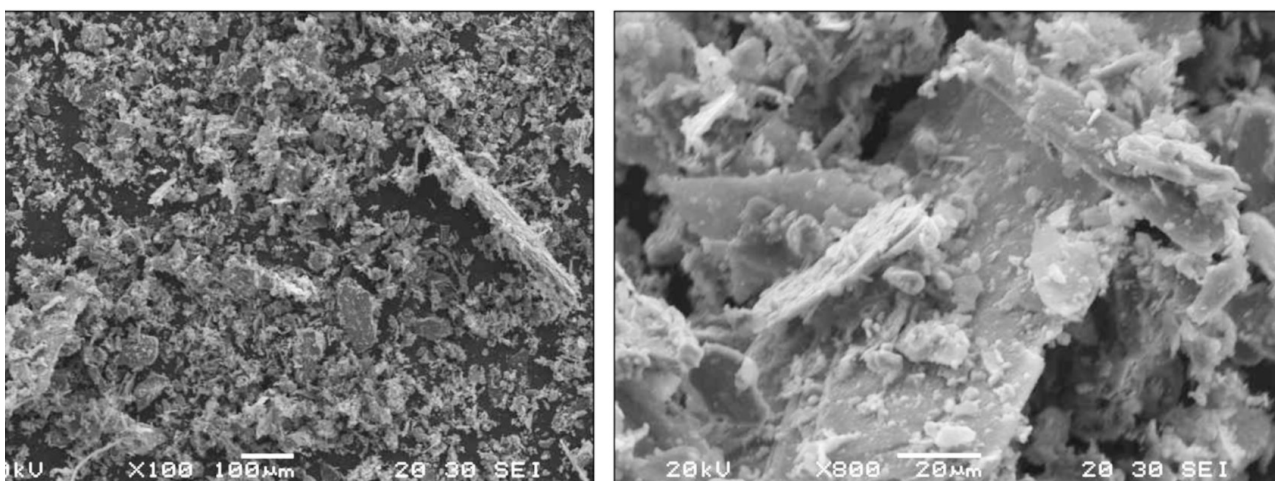


Figura 2 – Fotomicrografias do resíduo de mineração com ampliações de 100x e 800x

3.3. AGREGADO CONVENCIONAL E LIGANTE BETUMINOSO

Nesta pesquisa, foi utilizada pedra britada (brita 1, brita 0 e pó de pedra) como agregado convencional. O material é composto por rocha gnáissica de coloração predominantemente cinza esbranquiçada.

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), utilizado nesta pesquisa, é classificado por penetração como um CAP 50/70, de acordo com as novas especificações da Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2005).

4. DOSAGEM MARSHALL

Todas as misturas foram dosadas com a mesma curva granulométrica correspondente à faixa C do DNIT (figura 3), com o objetivo de diminuir o número de variáveis a serem analisadas. As misturas foram denominadas M1 (mistura comparativa convencional), M2 (mistura com 80% de escória), M3 (mistura com 80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro) e M4 (mistura com 6% de rejeito de minério de ferro), sendo a porcentagem em peso de cada agregado.

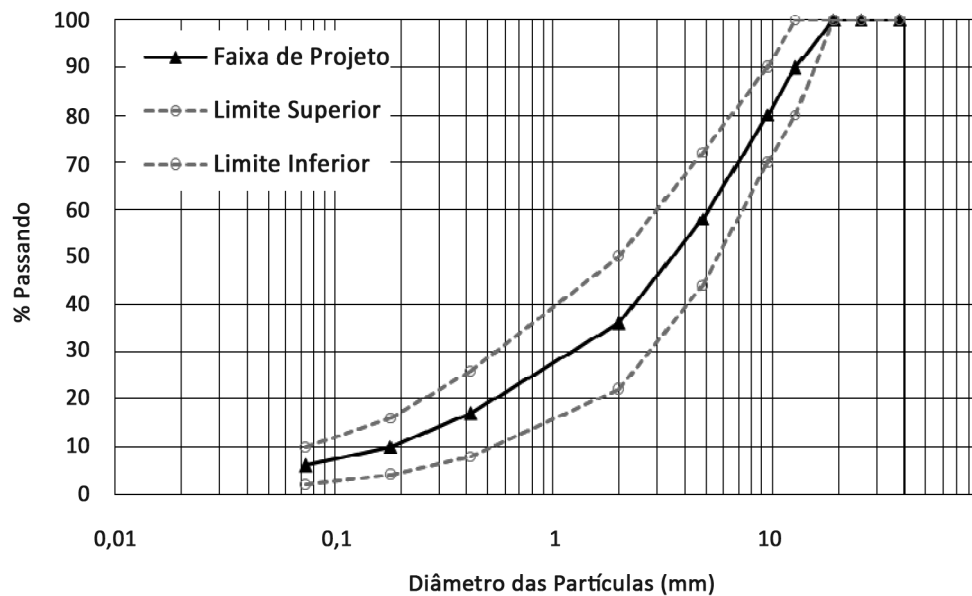


Figura 3 – Enquadramento granulométrico das misturas

A granulometria das misturas foi preparada de maneira que todas as misturas possuíssem a mesma

curva granulométrica, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica das misturas asfálticas do tipo CBUQ

Peneiras (mm)	Faixa de projeto % retido	Mistura M1 comparativa	Mistura M2 80% escória	Mistura M3 86% resíduos	Mistura M4 6% rejeito
12,7	10	Brita graduada	Brita graduada	Brita graduada	Brita graduada
9,52	10	Brita graduada	Escória de aciaria	Escória de aciaria	Brita graduada
4,76	22	Brita graduada	Escória de aciaria	Escória de aciaria	Brita graduada
2	22	Brita graduada	Escória de aciaria	Escória de aciaria	Brita graduada
0,42	19	Brita graduada	Escória de aciaria	Escória de aciaria	Brita graduada
0,2	7	Brita graduada	Escória de aciaria	Escória de aciaria	Brita graduada
0,07	4	Brita graduada	Brita graduada	Brita graduada	Brita graduada
Fundo	6	Filer mineral	Filer mineral	Rejeito minério de ferro	Rejeito minério de ferro

As temperaturas de trabalho adotadas para a dosagem das misturas asfálticas seguiram os procedimentos DNER ME 043/95. A temperatura do ligante betuminoso e dos agregados durante a mistura foi de 150° C e 163° C, respectivamente, sendo a temperatura de compactação fixada em 139° C. Com o objetivo de simular o efeito do envelhecimento em curto prazo, segundo as especificações da AASHTO – PP2/2001, e melhorar a interação entre o ligante e o agregado, as misturas foram condicionadas na temperatura de compactação por 2 horas (Freitas, 2007).

Para simular a intensidade de um tráfego médio, os corpos de prova foram compactados mecanicamente com a aplicação de 50 golpes do soquete por face. As massas dos corpos de prova foram determinadas para atender a altura de 63,5 ± 1,3 mm, especificadas pela metodologia DNER – ME 043/95.

4.1. DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA

O valor da densidade máxima teórica (DMT) no Brasil é calculado através de uma ponderação das massas específicas reais dos materiais constituintes da mistura asfáltica (Bernucci *et al*, 2008). A fórmula adotada para o cálculo da DMT através dos pesos (P_i) e das densidades reais (G_i) dos materiais constituintes é apresentada abaixo.

$$DMT = \frac{P_{cap} + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_{cap}}{G_{cap}} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (1)$$

A determinação da DMT através da equação 1 é diretamente influenciada pela metodologia utilizada para a determinação das densidades reais dos materiais granulares, ASTM ou DNER. Para este trabalho, optou-se por utilizar as normas nacionais, através das especificações DNER-ME 084/95, DNER-ME 081/98 e DNER-ME 085/94.

O valor da densidade real dos agregados miúdos foi determinado seguindo os procedimentos do método DNER-ME 084/95 (método convencional). Para fins de comparação, a etapa de fervura dos picnômetros foi complementada com a aplicação de -73,3 kPa de pressão, durante 15 minutos, através de uma bomba de vácuo (método adaptado), visando tornar mais eficiente o processo de expulsão das bolhas de ar da amostra (Vasconcelos e Soares, 2003). O valor da densidade real da escória miúda passou de 3,60 para 3,61 e no agregado convencional, o valor permaneceu o mesmo. Os valores encontrados para as DMTs calculadas com a utilização dos valores de densidades reais para as misturas contendo escória de aciaria LD são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Resultados das DMTs calculadas com os valores de densidades reais de maneira convencional (DMT) e pelo método adaptado (DMT*)

Mistura	Teor de CAP (%)									
	5,5		6,0		6,5		7,0		7,5	
	DMT	DMT*	DMT	DMT*	DMT	DMT*	DMT	DMT*	DMT	DMT*
M2	2,991	2,995	2,960	2,964	2,930	2,933	2,900	2,903	2,871	2,874
M3	3,053	3,057	3,021	3,024	2,989	2,992	2,957	2,961	2,927	2,930

4.2. TEOR DE PROJETO

A determinação dos teores de projeto (TP) foi baseada na metodologia usualmente utilizada pelo 3ª UNIT/DNIT através da especificação DNIT 031/2006-ES, que determina um teor de projeto para atender aos limites de Volume de vazios (Vv) entre 3,0% a 5,0% e à Relação Betume-Vazios (RBV) entre 75,0% a 82,0% para as misturas do tipo CBUQ (Castelo Branco, 2004). Esse método é exposto em Soares *et al* (2000). Foram considerados, para a determinação do TP, os valores de DMTs calculados pelo método adaptado, por conside-

rar estes resultados mais consistentes do que aqueles obtidos pelo método convencional.

Para cada tipo de mistura, foram moldados cinco grupos de corpos de prova com diferentes teores de ligante asfáltico, diferenciados entre si em 0,5% com dois grupos acima e dois grupos abaixo do teor de projeto considerado.

A tabela 6 apresenta o teor de projeto obtido para as misturas deste estudo e as figuras 4 e 5 apresentam a variação do volume de vazios em relação aos teores de ligante das misturas asfálticas.

Tabela 6 – Teores de projeto obtidos para as misturas de CBUQ

Misturas	M1	M2	M3	M4
Teor de projeto (%)	5,8	6,5	6,3	5,8
Vv (%)	3,6	4,8	4,7	3,8
RBV (%)	80,4	80,2	81,3	78,1

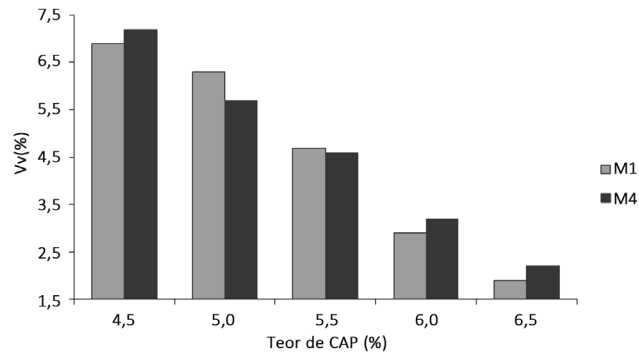


Figura 4 – Variação do volume de vazios com o teor de CAP para as misturas sem escória

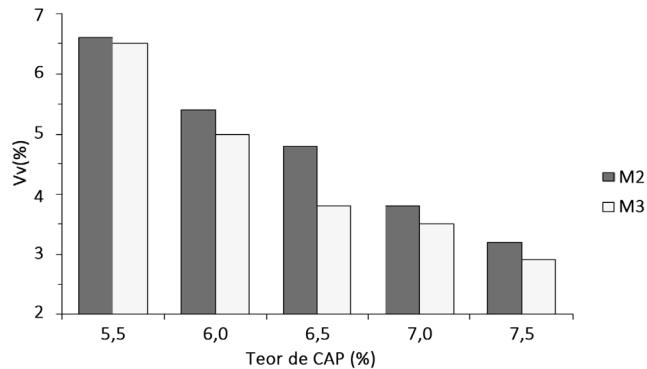


Figura 5 – Variação do volume de vazios com o teor de CAP para as misturas com escória

5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para a avaliação do desempenho mecânico das misturas asfálticas, foram realizados ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração estática por

compressão diametral (RT) seguindo os procedimentos DNER-ME 133/94 e DNER-ME 138/94, respectivamente. Também foram realizados ensaios de *creep* estático. Para a realização da análise de deformação permanente por compressão axial (*creep* estático) das misturas asfálticas desta pesquisa, foi adotada a metodologia detalhada por Silva (2010).

Os ensaios foram realizados para todas as misturas em seus correspondentes teores de projeto. A tabela 7 apresenta os valores médios do módulo de resiliência das misturas M1, M2, M3 e M4 e na tabela 8, estão dispostos os resultados dos valores médios de RT das misturas deste estudo. Os valores médios foram obtidos para cinco amostras.

Tabela 7 – Valores médios de MR para todas as misturas asfálticas a 25° C

Misturas CBUQ	Teor de CAP (%)	MR (MPa)	Desvio padrão (MPa)
M1	5,8	4478	420
M2	6,5	6185	334
M3	6,3	5603	853
M4	5,8	4530	557

Tabela 8 – Valores médios de RT para todas as misturas asfálticas a 25° C

Misturas CBUQ	Teor de CAP (%)	RT (MPa)	Desvio padrão (MPa)
M1	5,8	1,36	0,12
M2	6,5	1,27	0,08
M3	6,3	1,31	0,08
M4	5,8	1,29	0,08

Na tabela 9, encontram-se os resultados médios da deformação específica plástica final obtidos para cada tipo de mistura asfáltica desta pesquisa. A princípio, foram realizados seis ensaios para cada mistura, mas algumas amostras apresentaram resultados e comportamentos irregulares, sendo, então, excluídas da análise.

Tabela 9 – Resultados da deformação plástica específica das misturas asfálticas

Mistura	Teor de CAP (%)	Deformação específica plástica (%)	Desvio padrão (%)	Amostras ensaiadas (n)
M1	5,8	0,257	0,059	6
M2	6,5	0,227	0,032	4
M3	6,3	0,149	0,038	5
M4	5,8	0,189	0,044	5

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados de DTM encontrados foram praticamente os mesmos quando utilizados os valores de densidade real da escória miúda pelo método convencional e adaptado. Ressalta-se que os procedimentos mais eficientes para a determinação da densidade real da escória de aciarias graúda e miúda podem levar a valores de DMTs diferentes dos obtidos pelo método convencional.

As misturas asfálticas contendo escória de aciaria M2 (80% de escória) e M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro) apresentaram teores de projeto 6,5% e 6,3%, respectivamente. Esses valores foram superiores ao da mistura convencional (M1), com teor de 5,8%, fato este que pode ser explicado pela elevada porosidade da escória, o que resulta em uma maior absorção de ligante pelo resíduo. Fazendo uma análise preliminar dos custos, parte do que se economiza com a redução do preço do agregado seria atenuado com o aumento do teor de ligante, porém, deve-se destacar o ganho ambiental não quantificado de mitigação de danos com a não fabricação de agregado convencional e a não estocagem do agregado alternativo.

Os valores dos teores de projeto das misturas contendo escória de aciaria M2 (80% de escória) e M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro) são semelhantes aos encontrados por Castelo Branco (2004) para as escórias de aciaria. A autora encontrou grandes variações nos parâmetros volumétricos das misturas contendo escória do tipo EAF, tendo em vista a grande heterogeneidade dos grãos do resíduo, fato não verificado neste presente estudo por se tratar de uma amostra de escória de aciaria do tipo LD com maior homogeneidade entre os grãos.

Observou-se uma diminuição nos valores de volume de vazios para as misturas contendo escória de aciaria M2 (80% de escória) e M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro), quando substituído o *filer* mineral pelo rejeito de minério de ferro. Este comportamento não foi notado nas misturas asfálticas compostas apenas por agregados convencionais M1 e M4 (6% de rejeito de minério de ferro).

A incorporação de resíduos (rejeito de minério de ferro ou escória de aciaria) provocou um aumento nos valores de MR em relação à mistura convencional (M1) nos seus respectivos teores de projeto. Os valores de RT estão dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT para as misturas asfálticas.

Constatou-se uma significativa influência do rejeito de minério de ferro no desempenho mecânico quanto à deformação permanente. Os resultados obtidos no ensaio *creep* estático demonstraram uma diminuição da deformação plástica das misturas ao substituir o *filer* convencional pelo rejeito de minério de ferro.

7. CONCLUSÃO

A utilização da escória de aciaria LD e do rejeito de minério de ferro nos revestimentos asfálticos mostrou-se, a princípio, uma alternativa tecnicamente viável. Pesquisas para o estudo da degradação das intempéries, observação e monitoramento de trechos experimentais em trabalhos futuros contribuiriam para uma análise mais detalhada dessas misturas asfálticas. A escória de aciaria utilizada nesta pesquisa apresenta um grande potencial de uso como agregado alternativo, mesmo apresentando um valor de absorção superior ao especificado, visto que o material apresentou um desempenho igual ou superior em relação aos valores dos parâmetros de caracterização ensaiados. O resultado do método de ensaio PTM-130/78 apresentou valores de expansão acumulada superiores ao limite estabelecido na norma EM 262/94, conforme apresentado na tabela 1. Uma readequação do processo de estocagem do resíduo através do controle de umectação, idade das pilhas de escória e da cura deste material seria recomendado.

O rejeito de minério de ferro demonstra potencial de uso como *filer* nas misturas asfálticas, pois a mistura M4 (6% de rejeito de minério de ferro) apresentou o mesmo teor de projeto que a mistura comparativa M1 e teor de projeto inferior, 6,3%, para a mistura M3 (80% de escória e 6% de rejeito minério de ferro) se comparado com a mistura M2 (80% de escória), que é composta por *filer* convencional. Sendo assim, a economia com a redução do valor do agregado seria sustentada pela mesma quantidade de ligante utilizada na mistura.

A utilização de rejeito juntamente com a escória na mistura M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro) apresentou uma redução do teor de ligante se comparado com a mistura M2 (80% de escória), demonstrando grande vantagem econômica em relação ao consumo de CAP nas misturas de CBUQ.

Com o exposto, podemos assegurar que a utilização dos agregados alternativos estudados neste trabalho apresentam um grande potencial de uso com ganhos substanciais de natureza ambiental.

8. AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à Petrobras pelo apoio e pelo fornecimento do CAP utilizado nesta pesquisa, à Gerdau Açominas pelo fornecimento da escória, ao NUGEO, à equipe do LFA (Laboratório de Ferrovias e

Asfalto) da Universidade Federal de Ouro Preto pela caracterização do ligante e dos agregados, ao DE-GEO/UFOP, aos amigos da COPPE/UFRJ pelo apoio e pelo suporte técnico dado a este trabalho, à Vale e à Fundação Gorceix.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (2001), PP2. Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA).

ANP - Agência Nacional de Petróleo (2005). Regulamento Técnico.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. (2008). *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro, Petrobrás: ABEDA.

CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004). *Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Tese de M. Sc., COPPE/UFJR, Rio de Janeiro, RJ.

DINIZ, D. H., PEIXOTO, R. A. F., PADULA, F. R. G. (2008). *O Emprego de Agregados de Escória de Aciaria na Fabricação de Blocos Intertravados para Pavimentação*. 39ª Reunião Anual de Pavimentação, Recife, PE.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). EM 262, Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 078, Agregado Graúdo – Adesividade a Ligante Betuminoso.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 085, Material Finamente Pulverizado – Determinação da Massa Específica Real.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 086, Agregado – Determinação do Índice de Forma.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 089, Agregados – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 117, Mistura Betuminosa – Determinação da Densidade Aparente.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 133, Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 138, Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995). ME 043, Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). ME 054, Equivalente de Areia.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 035, Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 081, Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 083, Agregados – Análise Granulométrica.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). ME 399, Agregados – Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton.

DINIZ, D. H., PEIXOTO, R. A. F., PADULA, F. R. G. (2008). *O Emprego de Agregados de Escória de Aciaria na Fabricação de Blocos Intertravados para Pavimentação*. 39ª Reunião Anual de Pavimentação, Recife, PE.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). Plano Nacional de Viação - PNV.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). ES 031, Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço.

FERNANDES, G. (2005). *Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos*. Tese de Doutorado, UnB, Brasília.

FERREIRA, R. F. (2007). *Dimensionamento de um Pavimento Experimental para Tráfego de Caminhões Fora de Estrada em Planta de Mina*. Tese de M. Sc., UFOP, Ouro Preto, MG.

FREITAS, V. T. F. (2007). *Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Tese de M. Sc., COPPE/UFJR, Rio de Janeiro, RJ.

SARAIVA, S. L. C. (2006). *Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários*. Tese de M. Sc., UFOP, Ouro Preto, MG.

SILVA, E. A. e MENDONÇA, R. L. (2001). *Brésil: Laiter d'Aciérie à Tous les Étages, Laitiers Sidérurgiques*, nº 81, págs.11-24.

SILVA, R. G. O. (2010). *Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduos Industriais de Minério de Ferro*. Tese de M. Sc., UFOP, Ouro Preto, MG.

SOARES, J. B., FREITAS, F. A. C., BRANCO, J. V. C. e MOTTA, L. M. G. (2000). *Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ*. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, vol. 1, págs. 149-162, Brasília.

VASCONCELOS, K. L., SOARES, J. B. (2003). *Influência dos Métodos de Ensaio para Determinação das Densidades Real e Aparente de Agregados na Dosagem de Misturas Asfálticas*. 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Campinas.