


REVISTA **ABRV**

Associação Brasileira de Pavimentação



PAVIMENTAÇÃO

ANO VIII – Nº 30 – Outubro a Dezembro de 2013 – www.abpv.org.br – ISSN 1809-1865



**Avaliação da Viabilidade do Emprego da
Fibra de Coco em Dosagens de Misturas
Asfálticas do Tipo SMA**

Aline Colares do Vale
Michéle Dal Toé Casagrande
Jorge Barbosa Soares



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; Engº Consuelo Alves da Freta; 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 Heltor 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; Engº Laura Mª Goretti da Motta; Engº Leni F. M. Leite; Engº Leto Momm; Engº Liedí Legi B. Bernucci; Engº Luciana Nogueira Dantas; Engº Luiz Miguel de Miranda; Engº Marcello Roberto Rangel Pestana; Engº Márcio Muniz de Farias; Engº Marçílio Augusto Neves; Engª Maria da Conceição M. Azevedo; Engª Michéle Dal Toé Casagrande; Engº Nilton de Souza Campelo; Engº Paulo Romeu Assunção Gontijo; Engª Prepedigna D. E. Almeida da Silva; Engª Rita Moura Fortes; Engº Silvío Rodrigues Filho; Engº Saul Birman; Engº Walter Canales Sant'ana; Engº Washington Pérez Nuñez.

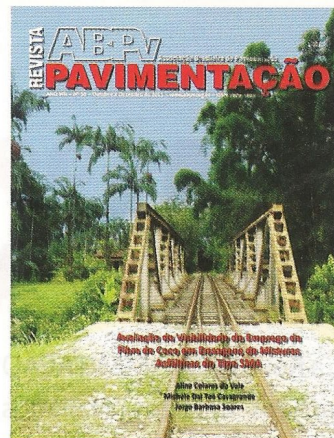
Capa: Alvaro Magalhães

Editoração: Algo+ Soluções – Maristela Carneiro

Revisão: Mariflor Rocha e Eveline Vieira Machado

Impressão: Grupo Smart Printer

Tiragem: 10.000 exemplares – Periodicidade: Trimestral



Nossa capa

Estrada de Ferro,
Morretes - PR

Foto de Georgina Libório

Sumário

- 2 EDITORIAL
- 3 SEÇÃO DE NOTAS
- 8 42ª RAPV E O 16º ENACOR – GRAMADO/RS
- 16 ENTREVISTA
Engº Carlos Pereira de Carvalho e Silva – DER/PB
- 17 ESPAÇO JURÍDICO
O Marco Regulatório da Mineração: Primeiras Impressões do Projeto de Lei
Victor Athayde
- 20 ARTIGOS TÉCNICOS
Avaliação da Viabilidade do Emprego da Fibra de Coco em Dosagens de Misturas Asfálticas do Tipo SMA
Aline Colares do Vale
Michéle Dal Toé Casagrande
Jorge Barbosa Soares
- 33 Algumas Considerações sobre o Tráfego no Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos
João Camilo Penna Coutinho
Laura Maria Goretti da Motta
- 48 Utilização da Escória da Aciaria Pura e com Adição de Argila como Camada de Base em Pavimentação Rodoviária
Gilberto Fernandes
Antonio Donizetti de Resende
- 58 Pavimentos Flexíveis com Revestimento Asfáltico – Avaliação Estrutural a Partir dos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação
Flaviane Melo Lopes
Rita Moura Fortes
Carlos Yukio Suzuki
- 66 CRÔNICA
Perfume de Saudade
Protasio F. Castro

EDITORIAL

Nesta edição de nº 30, a Revista PAVIMENTAÇÃO apresenta quatro artigos inéditos avaliados pelo Comitê Técnico-Científico. O primeiro deles trata-se de uma avaliação da viabilidade do emprego da fibra de coco em dosagens de misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt – Matriz Pétreas Asfálticas). Tais misturas já possuem histórico de utilização em diversos países e no Brasil, já há registros de experimentos. Os autores deste artigo são Aline Colares do Vale, Michéle Dal Toé Casagrande e Jorge Barbosa Soares.

O segundo trabalho apresenta algumas considerações sobre o tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos. De autoria de João Camilo Penna Coutinho e Laura Maria Goretti da Motta, o trabalho aduz que, um dos principais pontos que têm impacto significativo na confiabilidade de um projeto de dimensionamento, é a correta avaliação do carregamento do tráfego e sua representação no cálculo das espessuras das camadas.

O terceiro artigo aborda a utilização da escória da aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária. O trabalho é assinado pelos autores Gilberto Fernandes, da Universidade Federal de Ouro Preto, e Antônio Donizetti de Resende, mestrando da mesma universidade. Um estudo importantíssimo em atenção à destinação de resíduos, na qualidade de passivos ambientais gerados pela indústria.

Como quarto e último artigo, os autores Flaviane Melo Lopes, Rita Moura Fortes e Carlos Yukio Suzuki discorrem um estudo sobre pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico numa avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação.

Apresentamos uma entrevista com o Engº Carlos Pereira de Carvalho e Silva, diretor superintendente do DER da Paraíba, que aborda o Programa Rodoviário do seu Estado (entrevista cedida pelo jornalista Silvio Ferigato, Editor do Jornal da ABER). Nosso colunista,

Victor Athayde, está de volta com “O Marco Regulatório da Mineração: primeiras impressões do Projeto de Lei” e o Engº Protasio F. Castro nos presenteia com a crônica “Perfume de Saudade”.

Mostramos ainda o sucesso da 42ª RAPV e o 16º Enacor que aconteceram em novembro na belíssima cidade de Gramado no Rio Grande do Sul, com mais de 700 participantes.

Pedimos atenção nas propagandas, pois a 43ª Reunião Anual de Pavimentação e o 17º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária sofreram modificação nas datas. O evento será realizado entre os dias 29 de julho a 1º de agosto de 2014. A mudança se deveu a questões logísticas, no objetivo de facilitar a participação mais ampla de estudantes, profissionais e autoridades de todo o País.

Para obter mais informações sobre a participação, envio de trabalhos técnicos, exposição de produtos e serviços, visite a página eletrônica oficial do evento em www.rapv-enacor.com.br. A ABPv, ABDER e o DER-AL esperam toda a comunidade da engenharia de pavimentos para engrandecer mais este importante encontro num momento em que o Brasil passa por grandes reformas estruturais.

Aproveitamos o fechamento do ano para desejar a todos os associados e a todos os profissionais da área um excelente 2014. Parabenizamos os engenheiros e arquitetos pelos seus dias 11 e 15 de dezembro, e torcemos para que os nossos governantes nas três esferas - federal, estadual e municipal - consigam concluir a contento todas as obras necessárias para que façamos uma bela Copa do Mundo e que o prêmio por todo esse esforço coletivo seja a conquista da taça pela nossa seleção.

Conselho Editorial



Victor Athayde

O Marco Regulatório da Mineração: Primeiras Impressões do Projeto de Lei

A atividade minerária é a indústria de base de muitos segmentos da indústria nacional, como é certo, também é da pavimentação.

Por isso, este texto visa trazer ao conhecimento dos leitores fatos relacionados à discussão da nova legislação minerária que está sendo discutida no Poder Legislativo Federal.

1. O TRÂMITE NO CONGRESSO NACIONAL

O Projeto de Lei nº 5.807/2013 está em trâmite na Comissão Especial de Mineração da Câmara dos Deputados, em Brasília-DF.

Trata-se do Marco Regulatório da Mineração que vai alterar profundamente a gestão mineral no Brasil e, por isso, tem provocado acalorados debates.

O PL é de iniciativa do Executivo Federal e chegou à Câmara em Regime de Urgência, o que significaria trâmite acelerado na Casa de Leis. O Regime foi retirado a pedido do Governo, mas manteve-se a expectativa de que o deputado federal relator, Sr. Leonardo Quintão, concluísse seu parecer no dia 15 de outubro.

A data mudou e a previsão (até a data de 22/10/2013) é que seja finalizado no dia 06 de novembro.

Lembrando: apresentado o parecer do relator (que pode prever, inclusive, emendas ao PL), este deve ser votado na Comissão e seguir, se for o caso, para o plenário da Câmara dos Deputados para votação e, em seguida, para o Senado Federal.

Por sinal, alguns deputados defendem que a Relatoria deveria ser dividida em três assuntos: 1) a nova legislação mineral; 2) a criação do Conselho Nacional de Política Mineral e da Agência Nacional de Mineração (ANM); e 3) o aumento da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM), para que fossem debatidos separadamente.

Em que pese a discussão do Projeto de Lei, ele é parte do que está por vir, já que diversos pontos da nova lei terá sua disciplina reservada a regulamento (Decreto), que deve ser publicado pelo Poder Executivo Federal em ato contínuo à sanção da referida Lei Ordinária.

2. AS ALTERAÇÕES MAIS SIGNIFICATIVAS

2.1. A GESTÃO DO BEM MINERAL

O nome dado ao Projeto de Lei já é emblemático. “Marco Regulatório” nos induz a pensar em uma mudança radical no sistema legal da mineração, e é exatamente o que irá ocorrer.

*Sócio diretor de David & Athayde Advogados, das áreas de Direito Administrativo, Ambiental e Minerário. Membro da Comissão de Meio Ambiente da Ordem dos Advogados do Brasil da seccional Espírito Santo, membro da Câmara Técnica para assuntos jurídicos do Conselho Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo (CONSEMA) e membro do Conselho Temático de Meio Ambiente da FINDES (CONSUMA) da Federação das Indústrias do Estado do Espírito Santo (FINDES).

Toda estrutura administrativa (e aqui me refiro à Administração Pública) da gestão do patrimônio mineral mudará e, em tese, a justificativa política de fazê-lo seria a maior eficiência.

Refiro-me à extinção do DNPM e à criação da Agência Nacional de Mineração (ANM), que regulará a execução dos contratos que terão por objeto a exploração mineral, e está aí outra alteração marcante.

Ao invés de permitir a exploração mineral via Portaria de Lavra, por exemplo, essa será feita via contratos e termos de adesão (*ambos com prazos determinados de duração, hoje, não há limite temporal*), em alguns casos, precedida de licitação.

Os seguintes minerais terão exploração via autorização, por Termo de Adesão, e sem licitação (basta requerimento): I - minérios para o emprego imediato na construção civil; II - argilas destinadas à fabricação de tijolos, telhas e afins; III - rochas ornamentais; IV - água mineral; V - minérios empregados como corretivo de solo na agricultura (e outros que podem vir a ser definidos).

Os demais serão pela via da Concessão, por contrato, e somente via competição pública, umas mais, outras menos restritivas, sempre a critério do Executivo.

Reservo-me ao direito de opinar: Será que a ANM, que substituirá o DNPM (órgão que trabalha com notório déficit de pessoal e recursos, por isso, moroso além do máximo aceitável), terá condições de dar respostas rápidas, ou mesmo efetivas, no trâmite desses certames?

Diversos dos critérios dessas licitações só deverão ser fixados em Decreto (ou mesmo no edital respectivo).

Entretanto, é certo que o poder econômico do licitante será determinante, considerando que sua capacidade de investimento e valor a ser pago à União (por meio de “bônus de assinatura”; de “descoberta” e “participação no resultado da lavra”) serão critérios de competição.

Outro aspecto marcante é a forte tendência intervencionista estatal. Para citar um exemplo, alteração do quadro societário de empresas titulares de direitos minerários deverá ter a aquiescência da ANM, o que é uma severa interferência no direito de livre iniciativa dos empresários.

Também chama a atenção a possibilidade de a gestão mineral poder ser delegada aos demais entes federativos (Estados, Municípios e Distrito Federal).

2.2. O AUMENTO DOS ENCARGOS

No PL, há precisão de criação de uma taxa de fiscalização que leva em conta o porte da empresa.

Não se sabe ao certo como se dará sua incidência, se por empresa (por CNPJ) ou se será exigida por cada frente de lavra de uma mesma empresa ou grupo econômico. Isso, por si só, já gera discussões, porque irá gerar, no mínimo, um custo extra de cinco mil reais por ano ao minerador, por menor que ele seja. Se for o caso de grupo empresarial, com vários direitos de lavra, o valor poderá ser estratosférico, o que inviabilizaria a atividade, quando menos, oneraria a cadeia produtiva.

Mas não é só.

A compensação financeira pela exploração de recursos minerais passa dos atuais dois por cento para até quatro, o que vira a ser definido por Decreto.

Além disso, haverá ainda, na letra do PL:

“Bônus de assinatura - valor devido à União pelo concessionário a ser pago no momento da celebração e nos termos do contrato.”

“Bônus de descoberta - valor devido à União pelo concessionário ou autorizatário a ser pago após a declaração de comercialidade, nos prazos e condições estabelecidos no contrato de concessão ou termo de adesão.”

“Participação no resultado da lavra - valor devido à União que pode ser adotado como critério de julgamento na licitação para a concessão de direitos minerários.”

São muitas as fontes de arrecadação (e custo do empreendimento) sendo criadas no PL.

Por sinal, altera-se um conceito. A Constituição da República Federativa do Brasil, em seu art. 176, § 2º, diz que “é assegurada participação ao proprietário do solo nos resultados da lavra, na forma e no valor que dispuser a Lei.”

O PL dá a uma terminologia que tem definição constitucional sentido diverso, pois quem tem “participação no resultado da lavra” é o proprietário do solo, conforme a CF, não a União.

Em que pese essa contradição, os direitos econômicos dos proprietários do solo permanecem assegurados no PL.

2.3. ALGUMAS AUSÊNCIAS NOTADAS NO PL

Em emenda ao acima dito, é bom esclarecer que se o atual Código prevê o meio e rito judicial para que se acesse a jazida quando não há acordo entre o minerador e o superficiário, no PL, falta previsão idêntica.

A forma de estabelecimento da servidão (por falta de acordo entre as partes) prevista no PL não parece prática como é hoje, muito pelo contrário, é irrealizável.

Há ainda a questão dos licenciamentos ambientais.

Hoje, as fases do procedimento de licenciamento (que tramita em órgãos ambientais das diferentes esferas da federação) são ligadas aos estágios do procedimento de concessão de direito de exploração mineral (que tramita no DNPM).

Não há, no PL, aceno algum em relação a essa correspondência. Em que momento, no estágio prévio ou no ato de assinatura do contrato ou termo, determinada licença (prévia, de instalação ou de operação) será exigida?

Outro ponto que enseja atenção dos empresários é em relação às Guias de Utilização. Isso porque são instrumentos com limite de tempo e de volume de extração que permitem o teste mercadológico do bem mineral.

Essa espécie de título precário não está prevista no PL.

Aliás, as GUs vigentes, segundo o projeto, poderão ser revogadas em até 180 dias após a efetiva publicação da Lei,

o que considero um desacerto, já que em muitos Estados, a exploração mineral com base em Guia é regra, e não exceção, como deveria ser.

3. CONCLUSÃO

Mudanças causam receio, ainda mais quando ficam em um campo de incertezas, já que, no caso, muitas questões serão reguladas via Decreto, ao qual não temos acesso no momento.

Esse cenário de incertezas pode vir a desestimular os investimentos.

Em contrapartida, o que se vê é que se pretende criar mais ônus fiscais para a atividade minerária.

O ideal é que o Governo Federal dilua essas questões com respostas objetivas, desacelere o ritmo do trâmite do PL e não gere mais encargos a esse setor produtivo que, inclusive, é a atividade principal e condutora da economia de muitos municípios brasileiros.

Ademais, sob pena de pôr em risco seus direitos de exploração mineral e investimentos, os empresários e mineradores devem ficar atentos à fase de transição porque na mudança do regime, perde-se a vitaliciedade do Direito Minerário, para que se imponham prazos contratuais (de 10 a 40 anos).

ARTIGO TÉCNICO

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 da Viabilidade do Emprego da Fibra de Coco em Dosagens de Misturas Asfálticas do Tipo SMA

Aline Colares do Vale

Universidade do Minho, Portugal

Michéle Dal Toé Casagrande

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará, Brasil

RESUMO

A tecnologia do SMA (Stone Matrix Asphalt – Matriz Pétrea Asfáltica) já tem sua utilização consagrada em vários países e a literatura nacional já aponta algumas experiências também no Brasil. Estas misturas são caracterizadas por apresentarem uma graduação descontínua, com elevada quantidade de agregados graúdos. Durante as operações de mistura e compactação a elevadas temperaturas, são incorporadas fibras às misturas, em geral, de celulose. Estudos foram desenvolvidos no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC sobre a viabilidade da incorporação de fibras de coco verde em misturas do tipo SMA como alternativa à incorporação das fibras de celulose. A ideia é aproveitar a abundância da fibra de coco na Região Nordeste. Segundo a Associação de Produtores de Coco (Asbracoco) e a Empresa Brasi-

leira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), localizada em Fortaleza/CE, são gerados anualmente 40 milhões de toneladas de casca de coco verde no Brasil, sendo essa geração mais concentrada na Região Nordeste. Para isto, as misturas asfálticas do tipo SMA confeccionadas foram submetidas a ensaios de escorrimento, resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga e resistência à tração retida por umidade induzida. Os valores encontrados foram comparados a outros obtidos para as misturas SMA confeccionadas com fibra de celulose, apresentando a mesma granulometria, agregados e ligante asfáltico. Os resultados encontrados mostram que a fibra de coco atende às exigências do ensaio de escorrimento e não interfere nos parâmetros mecânicos da mistura.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. SMA. Fibra de coco. Fibra de celulose. Comportamento mecânico.

ABSTRACT

The use of SMA (Stone Matrix Asphalt) technology has been popular in some countries and the Brazilian literature presents already some experiences in Brazil. These mixtures are characterized by presenting a discontinuous gradation, with high coarse aggregate content. During mixing and compaction at high temperatures, fibers are incorporated into the mixtures. Typically, cellulose fibers are used. Studies have been conducted at LMP/UFC on the feasibility of the incorporation of coconut fibers in SMA mixtures as an alternative to the incorporation of cellulose fibers. The idea is to take advantage of the availability of coconut fibers in the Northeast region. According to the Association of Coconut Producers (Asbracoco)

and EMBRAPA, located in Fortaleza/CE, 40 million tons of green coconut skin are generated annually in Brazil, primarily in the Northeast region. This research presents the evaluation of the potential use of coconut fibers in the mixture by means of laboratory tests in which a flow parameter is analyzed, as well as the mechanical properties of the mixture: tensile strength, resilient modulus, fatigue life and resistance to moisture damage. The results are compared with the ones obtained from mixtures using cellulose fiber considering the same aggregate gradation. The results show that the coconut fibers meet the flow requirement and do not affect the mechanical properties of mixture.

Keywords: Asphalt mixtures. SMA. Coconut fibers. Cellulose fibers. Mechanical properties.

I. INTRODUÇÃO

O modelo rodoviário brasileiro, ao longo das últimas cinco décadas, evoluiu tornando-se a principal forma de transporte no País. O Brasil é o quinto país do mundo em termos de superfície territorial (8,5 milhões de quilômetros quadrados) e o sétimo em número de veículos automotores (65 milhões de unidades aproximadamente), porém, é um dos países que menos rodovias pavimentadas têm por área territorial, entre os que estão em desenvolvimento, o que faz ter custos de transportes expressivos.

Com o aumento do volume de tráfego e da carga dos veículos nas rodovias, torna-se cada vez mais importante que um pavimento atenda aos requisitos de alta durabilidade e segurança, proporcionando tranquilidade e conforto ao usuário. Além disso, a relação custo-benefício é um fator que exerce forte influência na escolha do revestimento asfáltico. A opção por uma alternativa de alta durabilidade reduz os custos de manutenção e de operação das vias durante o tempo de serviço. Para a camada de rolamento, a utilização de misturas asfálticas mais resistentes e mais duráveis vem crescendo nos países em desenvolvimento, podendo-se citar as misturas de graduação descontínua, como, por exemplo, as misturas do tipo SMA.

As experiências com o SMA têm mostrado, de forma geral, que se trata de um revestimento de alto desempenho estrutural e funcional. Essas misturas caracterizam-se por apresentarem uma granulometria descontínua definida pela predominância dos agregados graúdos (70% a 80% em peso) que conferem um esqueleto sólido de alta estabilidade, razão pela qual necessitam da adição de fibras, e geralmente são utilizadas as fibras de celulose para evitar o escorrimento do ligante asfáltico por entre os vazios da mistura. As misturas do tipo SMA apresentam normalmente uma elevada percentagem de ligante asfáltico, em geral, 6% a 7% em peso e percentagem de volume de vazios de aproximadamente 4%.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da incorporação de fibras de coco, devido à abundância desse material na Região Nordeste, em misturas do tipo SMA como alternativa à incorporação das fibras de celulose. Para isto, as misturas asfálticas do tipo SMA confeccionadas foram submetidas a ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga, de escorrimento e resistência à tração retida por umidade induzida. Os valores encontrados foram comparados a outros obtidos para as misturas SMA confeccionadas com fibra de celulose, apresentando a mesma granulometria, agregados e ligante asfáltico das misturas asfálticas confeccionadas com fibra de coco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O SMA tem sido muito utilizado na Europa, em países como Alemanha, Bélgica, entre outros, e na América do Norte, nos Estados Unidos e no Canadá. Sua aplicação tem sido realizada principalmente em vias de tráfego intenso e/ou pesado e aeroportos, seja como camada de alta resistência e alta durabilidade, seja para auxiliar na aderência em pista molhada, na diminuição efetiva do *spray* ou borrifo de água pelos pneus, na redução da reflexão de luzes de faróis em noites chuvosas e na redução de ruídos nas áreas lineares à via.

A mistura asfáltica SMA consiste basicamente de duas frações: agregado graúdo e um elevado teor de mástico, que é formado tipicamente por agregado miúdo, filer mineral, ligante asfáltico e fibras de celulose. A elevada porcentagem de agregado graúdo fornece à mistura um maior intertravamento entre os grãos, de forma que a mistura ganha em resistência, enquanto o elevado teor de mástico fornece à mistura uma maior durabilidade (MICHAEL *et alii*, 2003; PROWELL *et alii*, 2002; WATSON, 2003).

A mistura SMA é um concreto asfáltico usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão. A mistura se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos (70-80% retidos na peneira nº 10). Devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos, que, por sua vez, são preenchidos pelo agregado miúdo, filer mineral, ligante asfáltico e fibras de celulose (BROWN, 1992).

A mistura SMA é rica em ligante asfáltico devido à sua constituição granulométrica particular, com um consumo de ligante entre 6% e 7%. O SMA, após a compactação, é um revestimento impermeável, com menos de 4% de volume de vazios. Geralmente, é aplicado em espessuras variando entre 1,5 a 7,0 cm, dependendo da faixa granulométrica. Devido à graduação que apresenta e à alta concentração de agregados graúdos, as misturas do tipo SMA têm uma macrotextura rugosa, formando pequenos “canais” entre os agregados graúdos, responsáveis por uma drenagem superficial eficiente (MOTTA *et alii*, 2004).

São adicionadas fibras às misturas SMA, que podem ser de origem orgânica, inorgânica ou material mineral, com o intuito de evitar o escorrimento do ligante durante o processo de construção (produção, transporte e aplicação da mistura). As fibras, geralmente, não têm influência sobre o desempenho da mistura depois da compactação, embora possibilitem um maior teor de ligante, o que gera uma película mais espessa ao redor do agregado, retardando a oxidação, a penetração de umidade e a separação dos agregados. Essas vantagens servem para aumentar a resistência ao desgaste do concreto asfáltico produzido (NEVES *et alii*, 2004).

Algumas fibras já foram estudadas em misturas asfálticas, como, por exemplo, a fibra de celulose, vidro e mineral, cada uma com uma variação de porcentagem diferente, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Recomendações finlandesas para a adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante – agregado (PANK, 1995).

Tipo	Percentual de fibra na mistura (%)
Fibra de celulose	0,3-0,5
Fibra mineral	0,7-0,9
Fibra de vidro	0,4-0,6

Vale *et alii* (2006) realizaram estudos em misturas asfálticas do tipo SMA utilizando a fibra de coco, seguindo o ensaio de escorrimento da AASHTO T 305/97 para determinar o percentual de fibra utilizado na mistura, que deve ser, no máximo, de 0,3%. Nessa pesquisa, o percentual de fibras de coco utilizado durante o ensaio de escorrimento variou entre 0,1 a 0,7% do peso da mistura.

Os resultados mostraram que, para as misturas do tipo SMA, o percentual incorporado de fibras de coco, a uma temperatura de 70° C, variou entre 0,5 e 0,7%. A fibra de coco apresentou boa eficiência com relação ao escorrimento, sendo também, satisfatórios os resultados dos ensaios mecânicos (resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga) (VALE *et alii* 2006).

3. MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais utilizados na presente pesquisa são descritos a seguir.

3.1. AGREGADOS MINERAIS E FÍLER

Para a dosagem e a confecção das misturas asfálticas do tipo SMA, foram utilizados agregados minerais de natureza granítica (brita ¾" e pó de pedra) e como fíler mineral, cal hidratada. Os agregados foram obtidos na Pedreira de Itaitinga, localizada a aproximadamente 30 km da cidade de Fortaleza – Ceará, tendo sido convenientemente fracionados de modo a compor a curva granulométrica desejada para as misturas investigadas. A cal hidratada, utilizada como fíler artificial nas misturas, foi fornecida pela Carbomil S.A.

3.2. LIGANTE ASFÁLTICO

O CAP utilizado nessa pesquisa foi fornecido pela Lubrificantes do Nordeste (Lubnor/Petrobras) e é caracterizado por penetração como um CAP 50/70, de acordo com a nova especificação brasileira. Este é proveniente do petróleo nacional Fazenda Alegre e atendeu a todas as especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2005).

3.3. FIBRAS

As fibras de coco são constituídas de materiais lignocelulósicos, obtidos do mesocarpo (parte espessa fibrosa). O processo de desfibração do mesocarpo para a obtenção da fibra de coco pode ser feito por maceração em água ou por processos mecânicos. Comparada a outras fibras vegetais, a fibra de coco tem menor percentual de celulose (36 a 43%), entretanto, a quantidade de lignina (41 a 45%) tem cerca de duas vezes os valores existentes para a juta e o sisal, conferindo-lhe uma maior resistência e dureza frente às outras fibras (ESMERALDO, 2006).

As fibras de coco utilizadas na pesquisa foram cedidas pela EMBRAPA no Estado do Ceará. Na pesquisa, foi utilizada a fibra de coco com as características e as propriedades apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Características e propriedades da fibra de coco (VALE et alii, 2006).

Características do granulado	Resultados
Comprimento médio do granulado	10-20 mm
Espessura média	0,1 mm
Quantidade (percentual em peso)	0,5%-0,7%

Tabela 3 – Propriedades da fibra de coco (VALE et alii, 2006).

Propriedades	Especificação
PH	5,4
Condutividade elétrica (CE)	1,8 dS/m
Capacidade de troca catiônica (CTC)	92
Relação C/N	132
Massa específica	70 g/L
Retenção de água	538 ml/L
Capacidade de aeração	45,5%
Porosidade	95,6%

4. MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO SMA

4.1. DEFINIÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA

A curva granulométrica adotada nesta pesquisa para a dosagem e a confecção das misturas SMA foi aquela especificada pela norma AASHTO MP8-01, procurando atingir, dentro da faixa especificada, uma composição granulométrica que fornecesse uma maior descontinuidade. Essa seria a situação mais desfavorável para o escorrimento do ligante sem a aplicação de fibras, fornecendo, então, uma melhor percepção quanto ao efeito produzido pela adição das fibras de coco na mistura com relação ao escorrimento produzido. A curva granulométrica adotada neste trabalho é apresentada na Figura 1.

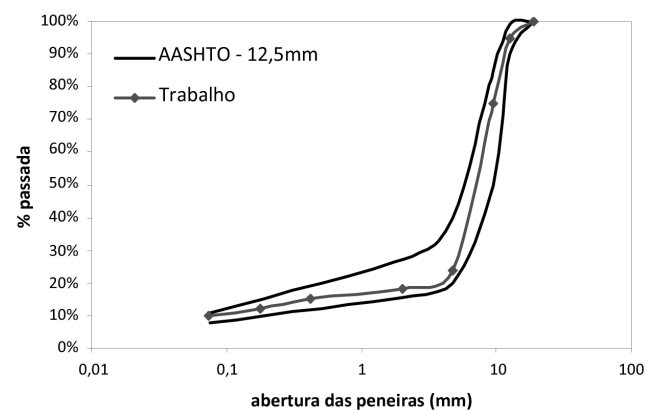


Figura 1 – Curva granulométrica da mistura asfáltica SMA.

Tabela 4 – Granulometria da mistura asfáltica SMA 12,5 mm.

Peneira	Abertura (mm)	Granulometria (%)
¾"	19,1	100,0
½"	12,5	95,0
3/8"	9,5	75,0
Nº 04	4,76	24,0
Nº 10	2,00	18,0
Nº 40	0,42	15,0
Nº 80	0,18	12,0
Nº 200	0,075	10,0

5. PROCEDIMENTO DE CONFEÇÃO DAS MISTURAS SMA

A dosagem de misturas asfálticas SMA segue alguns procedimentos peculiares em relação aos métodos de dosagem convencionalmente adotados para as misturas densas e contínuas. A norma da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO PP41-01) apresenta os passos necessários para a dosagem desse tipo de mistura, que podem ser resumidos como segue.

- seleção dos materiais;
- seleção da graduação ótima;
- determinação do teor de projeto de ligante asfáltico;
- avaliação da mistura quanto à susceptibilidade à umidade; e
- avaliação da mistura quanto à sensibilidade à segregação.

No preparo da mistura, primeiramente foram aquecidos separadamente o CAP a 165° C, os agregados e a fibra de coco a 175° C. Após todos os materiais atingirem a temperatura, foi incorporada aos agregados a fibra de coco (0,5% do total da mistura) para, então, ser feita a mistura desses materiais com o ligante asfáltico. Este procedimento simula a degradação das fibras de coco que, porventura, possa ocorrer durante o processo de usinagem das misturas. As principais dificuldades observadas foram relativas à diminuição da trabalhabilidade das misturas asfálticas com a incorporação da fibra de coco, devido à tendência de formação de gomos.

6. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ESCORRIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NÃO COMPACTADAS

Por meio deste método, é possível estabelecer a quantidade de material escorrido (gotejado) de uma amostra de mistura asfáltica a quente não compactada, no estado solto, quando a mesma é mantida a temperaturas elevadas. Segundo AASHTO T 305/97, o escorrimento ou o gotejamento da mistura é aquela porção de material que se separa da amostra inteira e é depositada fora da cesta de arame durante o ensaio, sendo o material drenado podendo ser CAP ou uma combinação de CAP, aditivos e/ou agregado miúdo.

O ensaio se resume em colocar certa quantidade de amostra de mistura asfáltica (1200 g ± 200 g) em uma cesta de arame posicionada sobre um prato (Figura 2). O conjunto (amostra, cesta e prato) é colocado em estufa por 60 ± 5 minutos. Em seguida, o conjunto é removido da estufa, sendo sua massa determinada. Se a temperatura da mistura baixar mais de 25° C da temperatura do ensaio, o tempo de permanência na estufa aumentará para 70 ± 5 minutos.



Figura 2 – Cesta usada no ensaio de escorrimento de misturas asfálticas não compactadas (AASHTO T 305/97).

Foi realizado um ensaio de escorrimento para misturas SMA sem fibras e com variações de percentagens entre 0,5 e 0,7% de fibra de coco, faixa recomendada por Vale *et alii* (2006) e 0,3 e 0,5% para a fibra de celulose, faixa recomendada por Pank (1995). Para cada percentagem de fibra, o ensaio foi realizado na temperatura

de 165° C, temperatura de mistura do ligante, e em 180° C, temperatura do ligante mais 15° C. Os resultados dos ensaios realizados nas misturas sem fibra, com fibra de coco e fibra de celulose são apresentados nas Figuras 3 a 7 e na Tabela 5.

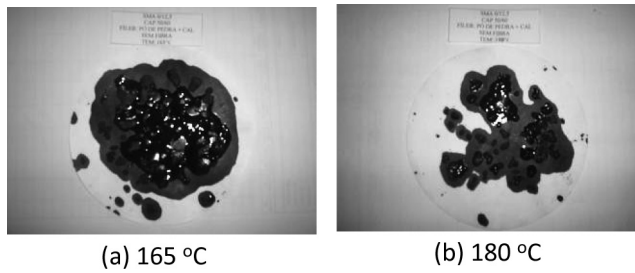


Figura 3 – Escorrimento sem fibra.

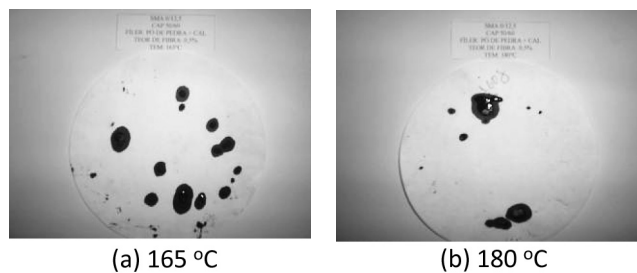


Figura 4 – Escorrimento com 0,5% de fibra de coco.

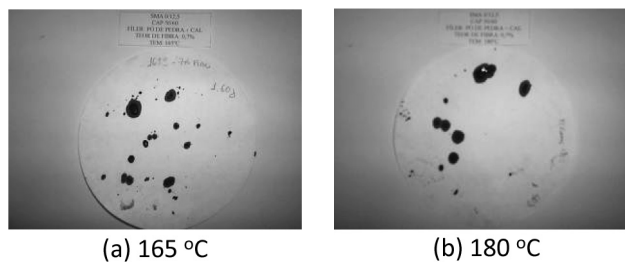


Figura 5 – Escorrimento com 0,7% de fibra de coco.

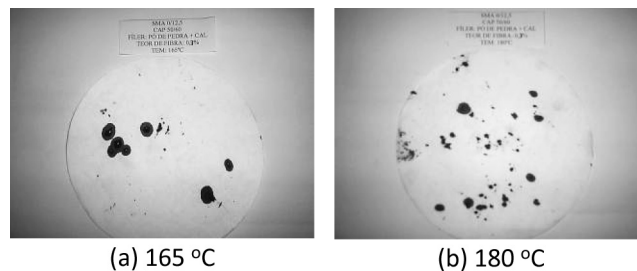


Figura 6 – Escorrimento com 0,3% de fibra de celulose.

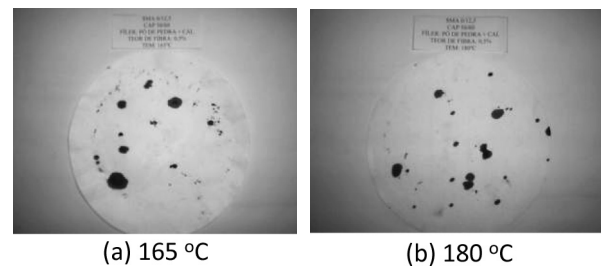


Figura 7 – Escorrimento com 0,5% de fibra de celulose.

Tabela 5 – Resultado do ensaio de escorrimento.

Fibra	Teor (%)	Escorrimento (%)	
		T = 165° C	T = 180° C
Sem	0,0	1,06	0,70
Coco	0,5	0,08	0,25
	0,7	0,04	0,09
Celulose	0,3	0,01	0,03
	0,5	0,01	0,02

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que o uso de fibras é essencial em misturas do tipo SMA com CAP 50/70 objetivando evitar o escorrimento, que deve ser, no máximo, de 0,3%. Os resultados mostram que esta exigência é atendida com a incorporação de fibras de coco variando entre 0,5 e 0,7%. O percentual de fibra utilizado na mistura para a confecção dos corpos de prova, nos quais serão realizados os ensaios mecânicos para a avaliação do comportamento das misturas do tipo SMA, foi de 0,5% para a fibra de coco e 0,3% para a fibra de celulose.

7. DOSAGEM MARSHALL

A dosagem Marshall das misturas SMA assemelhou-se à dosagem realizada para os CBUQs. As misturas SMA, porém, por apresentarem uma granulometria descontínua com elevado percentual de agregado graúdo, necessitam de cuidados durante a compactação das amostras.

Adotaram-se 75 golpes por face, a fim de obter uma percentagem de vazios para as misturas de 4%. O teor ótimo de CAP 50/70 encontrado para a confecção dos corpos de prova para as misturas asfálticas sem fibra,

com fibra de celulose e fibra de coco foi de 6,0%, 6,0% e 6,2%, respectivamente.

8. DOSAGEM SUPERPAVE

As amostras foram compactadas com um cilindro de 100 mm a fim de possibilitar uma comparação com os resultados obtidos no procedimento Marshall, sem trazer como variável o tamanho do molde.

Adotaram-se 100 giros para as misturas com fibra de celulose e sem fibra, e foram necessários 160 giros para a confecção das misturas com fibra de coco para atingir 4% de vazios estabelecidos. O elevado número de giros para a confecção das misturas com fibra de coco

deve-se provavelmente à heterogeneidade da mistura. A percentagem de vazios considerados para as misturas foi de 4% e o teor ótimo de CAP 50/70 encontrado para a confecção dos corpos de prova para as misturas asfálticas sem fibra, com fibra de celulose e fibra de coco foram de 5,9%, 6,0% e 6,3%, respectivamente.

9. COMPARAÇÃO DAS DOSAGENS MARSHALL E SUPERPAVE

Conforme observado na Tabela 6, os valores de teor do projeto foram semelhantes para as dosagens Superpave em relação às dosagens Marshall para todas as misturas, fato que não era esperado.

Tabela 6 – Parâmetros volumétricos dos corpos de prova moldados no teor do projeto.

Parâmetros volumétricos	Misturas asfálticas SMA					
	Com fibra de coco		Com fibra de celulose		Sem fibra	
	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave
D _a	2,285	2,295	2,338	2,345	2,340	2,349
Vv (%)	4,4	4,0	3,8	3,6	3,9	3,5
VCB (%)	14,0	14,1	13,7	13,7	13,4	13,5
VAM (%)	18,4	18,1	17,5	17,3	17,4	17,0
RBV (%)	76,1	77,7	78,2	79,4	77,5	79,2
TP (%)	6,3	6,2	6,0	6,0	6,0	6,0

*D_a: densidade aparente da mistura compactada
 Vv: volume de vazios
 VCB: vazios cheios com betume
 VAM: vazios do agregado mineral
 RBV: relação de betume vazios
 TP: teor ótimo de asfalto

Os corpos de prova dosados pela metodologia Marshall apresentaram maiores índices de volume de vazios quando comparados com os moldados na metodologia Superpave. Nas misturas asfálticas SMA sem fibra e com fibra de celulose, não houve variação de teor do projeto, apesar de terem sido moldadas em diferentes metodologias. Do ponto de vista prático, o mesmo pode ser dito das misturas asfálticas SMA com fibra de coco onde houve uma pequena variação de teor do projeto.

10. ABSORÇÃO DE ASFALTO NA MISTURA ASFÁLTICA SMA

A absorção de asfalto pelo agregado é um fenômeno de alta complexidade, influenciado por características do agregado e do asfalto, assim como por fatores externos. Segundo Gouveia (2006), a consequência direta do fenômeno da absorção é a diminuição do filme de asfalto, que envolve as partículas do agregado, ou seja, a diminuição da quantidade de asfalto efetivo na mistura. Essa diminuição torna a mistura mais suscetível

vel às tensões causadas pelo tráfego e às intempéries, influenciando também o endurecimento e o envelhecimento do asfalto prematuramente e, conseqüentemente, passa a ser uma causa importante para o surgimento de vários problemas no pavimento.

A maioria dos pesquisadores tem avaliado a absorção pelos agregados por meio de correlações com a absorção de outros líquidos, geralmente a água e o querosene. O pesquisador Rice (1953) desenvolveu um método de determinação indireta da absorção de asfalto da densidade máxima medida (DMM) das misturas, sendo que as limitações desse método foram contempladas pela norma ASTM D 2041. Atualmente, o Superpave estabelece o uso do Método Rice para a determinação da DMM das misturas, por

ser um ensaio de execução relativamente rápida, realístico e apropriado também para a determinação da absorção de asfalto.

Nesta pesquisa, foi avaliado o comportamento da absorção de asfalto pelos agregados durante a confecção das misturas asfálticas sem fibra, com fibra de coco e fibra de celulose, nos teores ótimos de CAP seguindo as metodologias Marshall e Superpave. A Tabela 7 apresenta os dados de entrada necessários para o cálculo da absorção de asfalto para as diferentes misturas estudadas e a Tabela 8 apresenta os resultados da taxa de absorção de asfalto nas misturas asfálticas com fibra de celulose, fibra de coco e sem fibra. A densidade do asfalto considerado na pesquisa foi de 1,02.

Tabela 7 – Dados de entrada das misturas asfálticas com fibra de celulose, fibra de coco e sem fibra.

	Fibra de celulose		Fibra de coco		Sem fibra	
	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall
Teor de asfalto ótimo (%)	6,0	6,0	6,3	6,2	5,9	6,0
Densidade aparente dos agregados	2,427	2,427	2,416	2,420	2,430	2,427
Densidade aparente da mistura compactada	2,296	2,343	2,291	2,296	2,320	2,327
DMM	2,431	2,431	2,407	2,417	2,412	2,400

Tabela 8 – Resultados da taxa de absorção de asfalto pelos agregados nas diferentes misturas analisadas.

	Fibra de celulose		Fibra de coco		Sem fibra	
	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall
Densidade efetiva do agregado	2,666	2,666	2,649	2,658	2,638	2,627
Absorção de asfalto (%)	0,2	0,2	0,03	0,1	0,2	0,4
Porcentagem de asfalto efetivo na mistura (%)	5,8	5,8	6,3	6,1	5,7	5,6

Ao analisar a Tabela 8, pode-se verificar que a absorção de asfalto nas misturas asfálticas sem fibra e com fibra de celulose foi semelhante e a mistura asfáltica com fibra de coco apresentou valores menores que das outras misturas. Essa diferença de resultados deve-se ao fato das fibras de celulose absorverem asfalto durante o processo de mistura.

Analisando as misturas com fibra de coco e sem fibra com maiores teores de asfalto, pode-se verificar que estas absorvem menos asfalto. Segundo Gouveia (2006), isso mostra uma tendência dos agregados de absorverem mais asfalto quanto menor a espessura da película que os envolve. Uma possível explicação para esse fato é que quando o teor de asfalto na mistura é

menor, também é menor a espessura da película de asfalto que envolve a partícula do agregado, permitindo que o asfalto migre com mais facilidade ao interior dos poros devido à diminuição de sua tensão superficial.

11. APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Para a determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas estudadas, foram realizados os seguintes ensaios: resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, vida de fadiga e resistência à tração retida por umidade induzida.

12. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) é um ensaio de ruptura, onde o corpo de prova é posicionado horizontalmente e a carga é aplicada diametralmente a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$

mm/s. Os ensaios foram conduzidos a 25° C e realizados segundo a norma DNER-ME 138/94.

Na análise tensão-deformação das estruturas dos pavimentos, o parâmetro de deformabilidade normalmente empregado para caracterizar as misturas asfálticas é o módulo de resiliência (MR) (MOTTA, 1995). O ensaio para a determinação desse parâmetro vem sendo realizado no Brasil em equipamentos pneumáticos com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, sistema de aplicação da carga, sistema de medição do deslocamento diametral horizontal do corpo de prova quando submetido à carga e sistema de controle de temperatura. Os ensaios da presente pesquisa foram realizados segundo a norma DNER-ME 133/94. O MR foi determinado em corpos de prova moldados em laboratório (diâmetro de $10 \pm 0,02$ cm e altura de $6,35 \pm 0,20$ cm) a 25° C e o resultado foi obtido por meio da leitura da deformação instantânea. Os resultados obtidos para os ensaios descritos acima são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de resistência à tração estática (RT) e módulo de resiliência (MR) à 25° C.

Mistura	Resistência à tração (MPa)		Módulo de resiliência (MPa)		Relação MR/RT	
	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave
SMA CAP 50/70 sem fibra	0,78	0,91	2165	3121	2776	3429
SMA CAP 50/70 fibra de coco	0,74	0,98	2784	3377	3745	3854
SMA CAP 50/70 fibra de celulose	0,76	0,95	2628	3486	3457	3669

Observa-se que os valores de RT foram inferiores quando adotada a metodologia Marshall de dosagem em relação à Superpave (que considerou o envelhecimento de curto prazo de duas horas). Vale salientar que os corpos de prova no teor de projeto confeccionados para a execução dos ensaios mecânicos foram moldados com 100 giros para as dosagens Superpave das misturas SMA sem fibra e com fibra de celulose, com 160 giros para as misturas de fibra de coco e 75 golpes para as dosagens Marshall.

O valor de aproximadamente 3.000 para a razão MR/RT é obtido para as diversas misturas do tipo CBUQ produzidas com o ligante da refinaria Lubnor/Petrobras. Alguns pesquisadores acreditam que quanto menor o valor dessa

razão, maior será a vida de fadiga obtida para esse mesmo tipo de mistura asfáltica. Para as três misturas SMA estudadas, a razão MR/RT variou de 2.700 a 3.900 e não houve a correlação dos valores inferiores com uma maior vida de fadiga, conforme será abordado no item a seguir.

13. VIDA DE FADIGA

A fadiga é um processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e deformações repetidas, que podem ser muito menores que a resistência última do material, resultando em trincas após um número suficiente de repetições do carregamento (PINTO e MOTTA, 1995).

No ensaio de vida de fadiga, os corpos de prova são submetidos à compressão diametral, à temperatura de 25º C. Nessa pesquisa, de acordo com o valor encontrado no ensaio de resistência à tração, ensaiaram-se os corpos de prova em diferentes níveis de

tensão, correspondentes a 30, 40 e 50% da RT. As Figuras 8 e 9 apresentam as curvas de fadiga das misturas SMA sem fibra, com fibra de coco e de celulose, confeccionadas na metodologia Marshall e Superpave, respectivamente.

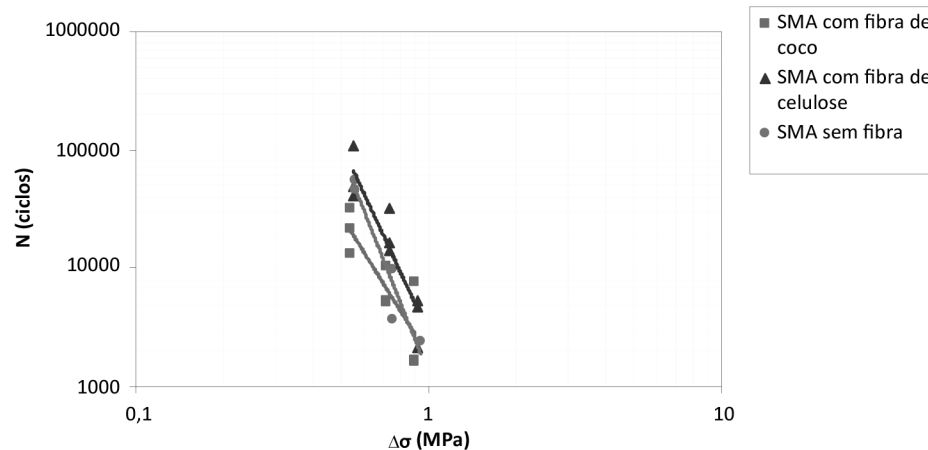


Figura 8 – Vida de fadiga para as misturas asfálticas SMA estudadas seguindo metodologia Marshall.

Analisando o gráfico de vida de fadiga, observa-se que as misturas SMA, seguindo a metodologia Marshall confeccionadas com fibras de celulose, apresentaram uma vida de fadiga equivalente à vida de fadiga das misturas asfálticas SMA sem fibras. Nos resultados apresentados, pode-se observar também uma grande variação nos valores de N (ciclos) para um mesmo nível de tensões. Essas variações elevadas não permitem avaliar corretamente, pelo menos nesta etapa já realizada, se a incorporação das fibras de coco, em especial, melhorou ou

prejudicou o comportamento das misturas. Essa variação pode ter ocorrido em virtude da grande heterogeneidade das misturas promovidas pelas fibras de coco.

Por esta razão, justifica-se o estudo de outras configurações para este tipo de fibra, como, por exemplo, a utilização de fibras com comprimentos menores em relação aos das fibras utilizadas nesta etapa, pois se imagina que a diminuição do comprimento das fibras produz uma melhoria na trabalhabilidade das misturas e conseqüente aumento da sua homogeneidade.

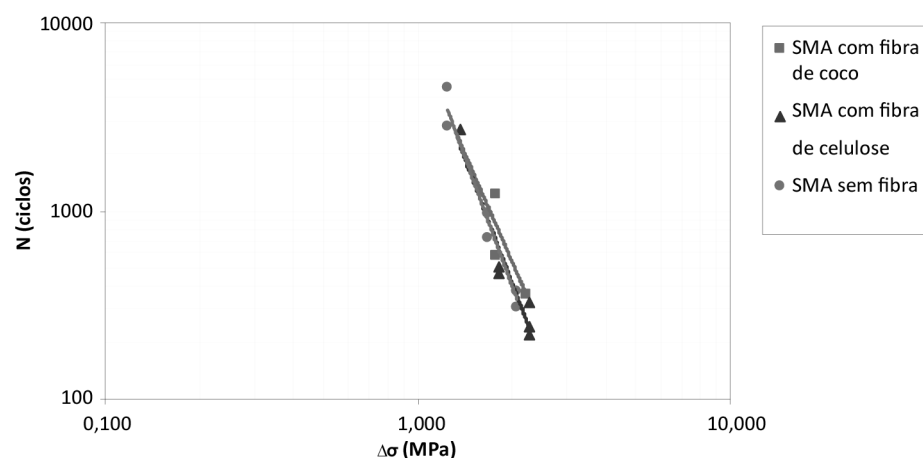


Figura 9 – Vida de fadiga para as misturas asfálticas SMA estudadas seguindo metodologia Superpave.

Analisando o gráfico de fadiga, observa-se que as misturas SMA, seguindo a metodologia Superpave, apresentaram uma vida de fadiga equivalente. A vida de fadiga dosada pela metodologia Marshall foi superior à vida de fadiga das misturas dosadas pela metodologia Superpave. A comparação entre as vidas de fadiga para este ensaio é limitada porque o desempenho das misturas em campo está associado às tensões na estrutura do sistema de camadas.

14. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA POR UMIDADE INDUZIDA

A avaliação do dano causado pela umidade é de grande importância, pois afeta diretamente o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. Os testes para a identificação do potencial ao dano por umidade em misturas asfálticas podem ser classificados em duas categorias: aqueles realizados em misturas não compactadas e os realizados em misturas compactadas (SOLAIMANIAN *et alii*, 2003).

O teste de sensibilidade à ação deletéria da água foi realizado seguindo o procedimento descrito em AASHTO T 283. Esse procedimento de ensaio foi elaborado com base no trabalho de R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08) e um posterior trabalho realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project10-17) (EPPS *et alii*, 2000; MOURA, 2001).

Para a confecção dos corpos de provas das dosagens Marshall com vazios entre 6 e 8%, foi necessária a moldagem de amostras com diferentes números de golpes, a fim de traçar um gráfico com o número de golpes \times volume de vazios, para que se obtivesse o número de golpes necessários. A Tabela 10 resume o número de golpes necessários para a obtenção dos vazios exigidos em norma para as três misturas SMA seguindo a metodologia Marshall.

Tabela 10 – Número de golpes para a obtenção dos vazios exigidos em AASHTO T 283 – Marshall.

Misturas SMA	Nº de golpes
Sem fibra	44
Com fibra de celulose	34
Com fibra de coco	37

Para as misturas dosadas pela metodologia Superpave, procedeu-se de forma diferente para a obtenção do número de giros necessários para a obtenção de vazios entre 6 e 8%. No procedimento de compactação Superpave, tem-se o acompanhamento das alturas do CP durante todo o processo. Dessa forma, é possível obter uma estimativa dos volumes de vazios para os diferentes números de giros. A Tabela 11 apresenta o resultado do número de giros necessários à obtenção dos vazios exigidos em AASHTO T 283 para as diferentes misturas.

Tabela 11 – Número de giros para a obtenção dos vazios exigidos em AASHTO T 283 – Superpave.

Misturas SMA	Nº de giros
Sem fibra	60
Com fibra de celulose	55
Com fibra de coco	80

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral após o condicionamento – saturação, congelamento e aquecimento em água – (RT_u), a resistência à tração por compressão diametral sem condicionamento (RT) e a resistência à tração retida por umidade induzida (RRT) para as misturas analisadas.

Tabela 12 – Resultados de RT, RT_u e RRT para as misturas asfálticas SMA de 12,5 mm analisadas.

		Misturas asfálticas SMA		
		Fibra de coco	Fibra de celulose	Sem fibra
Marshall	RT (MPa)	0,76	0,67	0,56
	RT_u (MPa)	0,70	0,48	0,28
	RRT	91%	71%	50%
Superpave	RT (MPa)	1,11	1,14	1,04
	RT_u (MPa)	0,97	1,04	0,58
	RRT	87%	91%	56%

Observa-se na Tabela 12 que a adição de fibras na mistura aumenta o valor de RRT. A mistura SMA com fibra de coco e com fibra de celulose, ambas dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave, apresentaram valores de RRT superiores a 70%.

Para as misturas SMA, o limite para o RRT é de 70% segundo a especificação AASHTO MP8-01. As misturas SMA com fibra de celulose e fibra de coco apresentaram valores superiores ao limite imposto pela norma. Outro fator importante a ser levado em consideração é o fato das misturas SMA terem em sua composição a cal hidratada, que é um melhorador de adesividade.

15. CONCLUSÕES

Para fazer uma comparação com os valores de RT, MR, vida de fadiga e resistência à tração retida por umidade induzida, escolheu-se trabalhar também com misturas do tipo SMA com fibra de celulose utilizando as mesmas características da mistura SMA com fibra de coco. A mistura que utiliza a fibra de celulose serviu como referência para a análise da mistura com fibra de coco, pois já existem diversos estudos que comprovaram a eficiência da fibra de celulose em misturas asfálticas.

A fibra de coco apresentou boa eficiência com relação ao escorrimento, porém, apresentou dificuldades na sua trabalhabilidade durante a confecção dos corpos de prova devido ao seu tamanho. Tal fato pode ser responsável pela diferença dos valores encontrados no gráfico de vida de fadiga. Essas diferenças motivaram o estudo de outras configurações da fibra de coco utilizadas na confecção das misturas SMA, especialmente, o estudo de fibras com menores comprimentos (apro-

ximadamente de 20 mm), de forma a melhorar a trabalhabilidade da mistura solta e aumentar a homogeneidade da mistura compactada.

A resistência à tração das misturas SMA dosadas pela metodologia Marshall apresentou valores inferiores às misturas dosadas pela metodologia Superpave.

Foram obtidos maiores valores de módulo de resiliência para as misturas Superpave em relação às misturas Marshall, provavelmente devido ao envelhecimento de curto prazo sofrido pelas primeiras.

Foi observada uma tendência de maior vida de fadiga das misturas dosadas pela metodologia Marshall com relação à dosagem Superpave, talvez pela influência da distribuição dos agregados obtida durante o processo de compactação e também o processo de envelhecimento a curto prazo.

Os valores da resistência à tração retida por umidade induzida (RRT) para as misturas asfálticas SMA com fibra de coco e fibra de celulose, ambas dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave, apresentaram resultados superiores ao limite imposto pela norma, ou seja, acima dos 70%.

Essa análise da viabilidade do uso da fibra local é importante para a Região Nordeste devido à valorização do material regional e, também, por ser economicamente viável quando comparado à fibra de celulose devido à sua abundância na região.

16. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 283 (1989) American Association of State Highway and Transportation Officials T-283 – Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.

AASHTO T-305 (1997) American Association of State Highway and Transportation Officials T-305 – Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures.

AASHTO PP-41 (2001) American Association of State Highway and Transportation Official PP-41 – Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA).

AASHTO MP-8 (2001) American Association of State Highway and Transportation Official MP-8 – Standard Specification for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA).

ASTM – American Society for Testing and Materials (2000) D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

ANP (2005) Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. **Regulamento técnico Nº 3/2005**. Agência Nacional do Petróleo.

Brown, E.R. Experience with Stone Matrix Asphalt in the United States. **NCAT Report No. 93-4**. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Ala., 1992.

DNER-ME 133/94 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência. **Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNER-ME 138/94 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. **Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Esmeraldo, M. A. (2006) Preparação de Novos Compósitos Suportados em Matriz de Fibra Vegetal/ Natural. **Dissertação de mestrado**, UFC, Fortaleza, CE, Brasil.

Epps, J.A.; Sebaaly, P.E.; Penaranda, J.; Maher, M.R.; McCann, M.B.; Hand, A.J. (2000) Compatibility of a Test for Moisture-Induced

Damage with Superpave Volumetric Mix Design. NCHRP Report 444. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

Gouveia, L.T. (2006) Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas. **Dissertação de mestrado**, USP, São Carlos, SP, Brasil.

Micheal, L., Burke, G.; Schwartz, C.W. (2003) Performance of Stone Matrix Asphalt Pavements in Maryland. In Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72, 2003, pp. 287-314.

Motta, L. M. G.; Leite, L. F. M.; Bernucci L. B.; Ceratti J. A. P. (2004) Síntese de Estudos Sobre Misturas Asfálticas Tipo SMA. **In: Anais do 17º Encontro de Asfalto, artigo IBP901_04**. Rio de Janeiro, Brasil.

Motta, L. M. G. (1995) Curva de Resiliência e fadiga de Misturas Asfálticas. **Instituto Brasileiro de Petróleo**, São Paulo, SP, Brasil.

Moura, E. (2001) Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas. **Tese de M.Sc., POLI/USP**, São Paulo, SP.

Neves Filho, C. L. D.; Bernucci, L. L. B.; Fernandes Jr, J. L. (2004) Avaliação de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante. Avaliação de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha quanto ao módulo de resiliência, a resistência à tração e fadiga. **In: 17º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro**. 17º. Encontro de Asfalto. v. 1. p. 128-136.

Pank, H. (1995) Finnish Asphalt Specifications. Finnish Pavement Technology Advisory Council.

Pinto, S.; Motta, L. M. G. (1995) Catálogo de Curvas de Fadiga. **Boletim Técnico Nº 16, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv**. Rio de Janeiro, Brasil

Prowell, B.D.; Cooley Jr. L.A.; Schreck, R.J. (2002) Virginia's Experience with 9.5-mm Nominal-Maximum-Aggregate-Size Stone Matrix Asphalt. **In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1813**, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 133-141.

Reis, R. M. I. M (2002) Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado. **Tese de M. Sc.**, EPUSP-USP, Brasil.

Rice, J. M. (1953). New Test Method for Direct Measurement of Maximum Density of Bituminous Mixtures Crushed Stone Journal.

Solamian; M.; Harvey, J.; Tahmoressl, M.; Tandon, V. (2003) Test Method to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. **In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, TRB, National Seminar, San Diego, California D.C., pp. 77-110.

Vale, A. C.; Pinto, I. C.; Soares, J.B.; Dantas Neto, S. A. (2006) Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA. **In: Anais do 18º Encontro de Asfalto, artigo IBP0049_06**. Rio de Janeiro, Brasil.

Watson, D.E. (2003) Updated Review of Stone Matrix Asphalt and Superpave Projects. **In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Nº 1832**, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 217-223.

Algumas Considerações sobre o Tráfego no Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

João Camilo Penna Coutinho

Engenheiro de Pavimentação da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), da Superintendência Regional do Sudeste (SRSE)

Laura Maria Goretti da Motta

Professora da COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Para dimensionar garantindo a sua vida útil de projeto, muitos parâmetros devem ser levados em consideração. Um dos principais pontos que têm impacto significativo na confiabilidade do projeto é a avaliação correta do carregamento do tráfego e sua representação no cálculo das espessuras das camadas. Para complicar, este também é o parâmetro de maior incerteza na determinação dos vários aspectos a serem considerados no ano inicial e na projeção para o período de análise. Este artigo discute alguns aspectos vinculados à representação do tráfego no método de dimensionamento brasileiro do CBR sob o ponto de vista histórico, especialmente quanto aos parâmetros empregados na determinação do número N. Faz-se, também, a seguir, uma breve comparação do efeito no dimensionamento mecanístico ao considerar o número N ou todo o espectro de eixos que solicitarão a via. Conclui-se que o número N é um meio simplificado de considerar a influência do tráfego na vida útil do pavimento e que a melhor maneira de prever essa influência é adoção de cada tipo de eixo de forma separadamente que proporciona uma análise mais acurada do desempenho funcional e estrutural do pavimento.

Palavras-chave: Número N. Fator de carga. Fator de eixo. Fator de veículo. Tráfego. Mecanístico-empírico.

ABSTRACT

To pavement design to life of the project, many parameters must be taken into consideration. One of the main points that have significant impact on the reliability of the project is the correct assessment of the traffic load and its influence in the calculation of the thicknesses of the layers. To complicate matters, this is also the parameter of greatest uncertainty in determining the various aspects to be considered in the initial year and projection for the period of analysis. This article discusses some aspects related to the representation of traffic in the Brazilian method of pavement design that use CBR, under the historical point of view, especially regarding the parameters used in determining the number N. It will be also hereinafter a brief comparison of the effect on sizing mechanistic when considering the number N or the entire spectrum that will seek the track axis. It is concluded that the number N is a method simplified to consider the influence of the traffic in the useful life of the pavement and that the best way to provide this influence is the adoption of each type axis separately. This leads to a more accurate prediction of performance of both structural and functional pavement.

Keywords: N Number. Load factor. Axle factor. Vehicle factor. Traffic. Mechanistic-empirical.

I. INTRODUÇÃO

Em muitas análises econômicas que são feitas para entender o Brasil de hoje e projetar o do futuro, é destacado o papel primordial da extensão e da qualidade da infraestrutura, inclusive a rodoviária, no desenvolvimento do País. Uma boa infraestrutura é condição necessária para o crescimento do País e, especialmente, a adequada provisão de infraestrutura de transportes tem-se mostrado capaz de potencializar ganhos de eficiência no sistema produtivo. Caso essa infraestrutura não funcione adequadamente, há comprometimento da economia, com elevação dos custos e perda da competitividade dos produtos para os mercados interno e externo.

No relatório do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em seu relatório, “SGP – Sistema de Gerência de Pavimentos”, de junho de 2010, apresenta-se a situação da malha rodoviária federal. Nesse relatório, fica evidente que a quantidade de rodovias pavimentadas ainda é deficitária, pois, ao todo, incluindo as jurisdições municipal, estadual e federal, o Brasil possui, apenas, 14% de rodovias pavimentadas.

Em função da enorme necessidade de crescimento da malha rodoviária pavimentada brasileira, uma nova metodologia de dimensionamento de pavimentos asfálticos deve ser implantada o quanto antes. Esta deverá ser capaz de analisar e maximizar as potencialidades dos materiais locais e suas inter-relações nas camadas dos pavimentos.

Não é mais possível continuar usando um método empírico da década de 1960, tendo em vista toda a evolução da frota de veículos e do conhecimento dos materiais atuais. Esperam-se obter pavimentos mais duráveis e uma relação custo/benefício mais adequada para os empreendimentos. A construção de estradas é muito cara, tendo em vista as distâncias a serem percorridas num País continental como o nosso.

A infraestrutura viária é de extrema importância para a manutenção do crescimento brasileiro e não é admissível continuar com uma malha viária pavimentada do tamanho e nas condições que se têm atualmente. Naturalmente, nenhum país do mundo tem 100% de sua malha pavimentada, mas a proporção no Brasil é

muito baixa em relação aos países desenvolvidos. Existe uma relação direta entre quantidade de quilômetros pavimentados e o PIB dos países, segundo várias publicações do Banco Mundial.

Há, também, um grande número de rodovias pavimentadas apresentando uma situação do pavimento de regular a ruim e, em alguns casos, até com tempo de vida útil menor do que o projetado. Certamente, essas condições não podem ser somente creditadas à falta de conservação das mesmas ou à má execução dos serviços. Talvez, também, a falta da utilização de uma metodologia mais analítica de dimensionamento de pavimentos, que proporcione uma análise mais racional dos materiais e análise mais realista das tensões-deformações, provocadas pelas diversidades do tráfego que existe hoje nas rodovias, possa estar contribuindo para a degradação acelerada dos pavimentos.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT é, até hoje, o mais utilizado no Brasil. Veio, ao longo dos anos, sofrendo algumas alterações, mas na sua base, é praticamente o mesmo desde sua origem. Ele é baseado no método CBR (*California Bearing Ratio*) do USACE (*United States Army Corps Engineers*) e nos ensaios da AASHO (*American Association of State Highway Officials*), hoje, AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). O método do DNIT possui caráter generalista: várias situações específicas são tratadas de forma média e muitas vezes simplificada. A utilização de um modelo generalista leva a uma análise superficial da situação particular de cada obra e das especificidades das diversas variáveis que influenciam no desempenho funcional e estrutural de um pavimento.

Um método mecanístico-empírico (ME) apresenta um caráter específico, com capacidade de determinar e analisar os pavimentos de acordo com suas diversas características e, assim, potencializando os desempenhos funcional e estrutural do pavimento. Esse caráter da metodologia ME é de extrema importância nos dias atuais, pois, hoje, a composição do tráfego rodoviário é mais diversificada do que décadas atrás, entre outros aspectos.

Neste artigo, é mostrado como foi historicamente estabelecido o cálculo do fator de carga (FC) utiliza-

do para converter o tráfego real em número de repetições de carga do eixo padrão, usado no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (SOUZA, 1961, 1966, DNER, 1981, DNER, 1996, DNIT, 2006). Esse método, também conhecido como método do CBR ou “do Murillo”, foi desenvolvido a partir de 1961 pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, com estabelecimento de suas bases principais em 1966, ano em que foi oficialmente adotado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e, desde então, passou a ser o mais utilizado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil, com atualizações em 1981, especialmente em relação ao tráfego. Apesar desta longevidade, as variáveis que influenciaram no estabelecimento dos fatores de carga (FC) do método não são, na sua totalidade, de conhecimento de muitos dos usuários do mesmo, especialmente os mais jovens. Assim, a ideia deste trabalho é resgatar estes princípios e, em seguida, analisar como, nas novas formas de dimensionar um pavimento pelo método mecanístico, se pode prescindir desta sistemática, com melhoria na representação do tráfego real e do seu impacto no dimensionamento.

2. BREVE HISTÓRICO DA CONSIDERAÇÃO DO TRÁFEGO NO MÉTODO DO MURILLO

No Brasil, conforme Santana (1989), o início da execução de pavimentos asfálticos de forma mais efetiva deu-se na década de 1950, com a vinda do engenheiro americano William Haynes Mills, que foi contratado para orientar e supervisionar a pavimentação da antiga BR-5, trecho Vitória/Cachoeira do Itapemirim.

O Eng. Murillo Lopes de Souza, baseando-se no ensaio CBR, no Índice de Grupo (IG) e em alguns conceitos trazidos pelo Eng. Mills, propôs um método de dimensionamento de pavimentos que foi oficializado pelo DNER em 1961 (SOUZA, 1961). Em 1966, esse método foi bastante reformulado pelo próprio Murillo e passou a ser o principal método de dimensionamento de pavimento asfáltico rodoviário brasileiro. Uma das principais modificações de 1961 para 1966 foi na forma de consideração do tráfego, que teve ainda um incremento em 1981, do próprio autor. Ao longo destes

anos, o método tem sido reeditado em vários manuais, com pouquíssimas alterações, sem perder a base fundamental lançada por Murillo.

No método do Murillo de 1961, a determinação da espessura do pavimento era baseada no Índice de Suporte (IS), no número de tráfego diário e na sua carga máxima por roda. O tráfego era dividido em três categorias:

- a. Tráfego Leve: número de veículos comerciais inferiores a 250 com, no máximo, 50 veículos com carga por roda igual ou abaixo da carga máxima estipulada;
- b. Tráfego Médio: número de veículos comerciais inferiores a 750 com, no máximo, 150 veículos com carga por roda igual ou abaixo da carga máxima estipulada;
- c. Tráfego Pesado: número de veículos comerciais acima de 750 com o número de 150 veículos com carga acima da carga máxima.

Foram consideradas três cargas máximas conforme a realidade dos veículos na época:

- a. Carga máxima de 4 toneladas onde fosse remota a possibilidade da circulação de veículos pesados;
- b. Carga máxima de 5 toneladas, considerado o caso geral do Brasil;
- c. Carga máxima de 6 toneladas para estradas em regiões especiais altamente industrializadas.

Não era possível considerar a repetição individual de todos os veículos comerciais, nem se distinguiam os tipos de eixos. Estes aspectos foram melhorados de forma bastante conveniente para o conhecimento da época, quando se passou a trabalhar com o conceito de equivalência de operações e poder destrutivo de cada eixo, que é o conceito de Número “N”, que passou a ser usado no método de 1966, como visto a seguir.

O método do Murillo de 1966, ou método do DNIT, para o dimensionamento de pavimento asfáltico, alicerçou-se em três referências: o próprio método de 1961 e os trabalhos de Turnbull *et alii* (1962) e de Carey e Irick (1960). Do primeiro, foram trazidos as curvas de dimensionamento e o conceito de Número N para representar o tráfego; do segundo, o conceito de coeficientes estruturais para considerar as diferenças de suporte dos materiais e o efeito do clima (MEDINA, 1997). Aqui, será mais analisada a questão do N.

O nível do tráfego real da rodovia passou a ser, então, traduzido pelo chamado número N, que corresponde à transformação da solicitação de todos os eixos em “passagens” de um eixo simbólico, arbitrariamente escolhido - eixo padrão - que provoque o mesmo dano ao pavimento do tráfego real: é o número de operações do eixo padrão que solicita a rodovia. O eixo padrão admitido é um eixo simples de rodas duplas (ESRD) com carga de 8,2 toneladas (18.000 lb).

O número N, da forma como foi adotado por Souza (1966), baseado em Turnbull *et alii* (1962), com diferenças, é dependente de cinco variáveis, conforme a expressão seguinte:

$$N=365 \cdot P \cdot V_{MD} \cdot FC \cdot FE \cdot FR \quad (1)$$

Onde:

N	Número de operações do eixo padrão
P	Período projetado, em anos, para a vida útil do pavimento
VMD	Volume de tráfego médio diário
FE	Fator de eixo
FC	Fator de carga ou fator de equivalência de operações
FR	Fator climático regional

As duas primeiras variáveis, volume de tráfego (VMD) e o fator de equivalência de operações (FEO), são exatamente as mesmas variáveis estabelecidas pelo método do CBR do USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Americano), sendo que Souza chamou o fator de equivalência de operações (FEO) de fator de carga (FC). Pereira (1985) fez um estudo aprofundado sobre os fatores de equivalência de cargas adotadas pelo DNER em 1981 no dimensionamento de pavimentos flexíveis, sendo uma excelente referência para o leitor que deseja mais detalhes.

O fator climático regional (FR) foi baseado no fator climático R do método da AASHO (*American Association of State Highway Officials*), referido em Carey e Irick (1960). Conforme Souza (1966), o fator climático regional é usado para levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento. O seu valor pondera o número N e varia entre 0,2 (ocasiões em que prevalecem baixos teores de umidade) a 5,0 (ocasiões em que os materiais estão praticamente saturados). No entanto, o próprio Eng. Murillo dizia ser redundância seu em-

prego, tendo em vista que, no ensaio do CBR, já se usa deixar o corpo de prova embebido por quatro dias.

O fator de eixo, FE, é original do método do Eng. Murillo Lopes de Souza de 1966. Esse fator é utilizado por Murillo para considerar, de forma percentual e ponderada, todos os tipos de eixos que trafegam na rodovia. Motta e Soares (2001), de forma clara, esclarecem como se deve aplicar o fator FE.

O fator FE é dado pela seguinte equação:

$$FE = P_2 \times 2 + P_3 \times 3 + P_n \times n \quad (2)$$

Onde:

FE	Fator de eixo
P ₂	Porcentagem de veículo de 2 eixos
P ₃	Porcentagem de veículos de 3 eixos
P _n	Porcentagem de veículos de n eixos
n	Número de eixos do veículo

O fator FC, que é analisado neste artigo, é o principal fator que compõe o número N. Esse fator pondera o dano sofrido por um pavimento em função do tipo de eixo e sua carga, bem como sua oscilação lateral em relação ao dano provocado no mesmo pavimento por um eixo tomado como padrão. Os fatores de FC adotados por Murillo são os originais do método sugerido por Turnbull *et alii* (1962) para o dimensionamento de um pavimento rodoviário com base no CBR.

Existem duas variáveis determinantes no valor do fator de carga: a que expressa a influência do tipo de eixo e da carga do caminhão e a que é determinada em função da oscilação lateral dos veículos. A oscilação lateral é influenciada pela composição dos eixos e pela largura da faixa de rodagem. Este parâmetro, fundamental no dimensionamento porque define o tráfego, muitas vezes, não é percebido pela grande maioria dos projetistas que “recebe” o N pronto para o projeto, sem participar do seu cálculo diretamente. No gráfico de dimensionamento, só aparecem de forma explícita o N e o CBR das camadas.

Para simplificar a utilização do fator FC, Turnbull *et alii* (1962) criaram dois gráficos que determinam o fator de carga em função do tipo de eixo (eixos simples e duplo) e em função da carga por eixo que estão apresentados a seguir na Figura 1, na sua forma original.

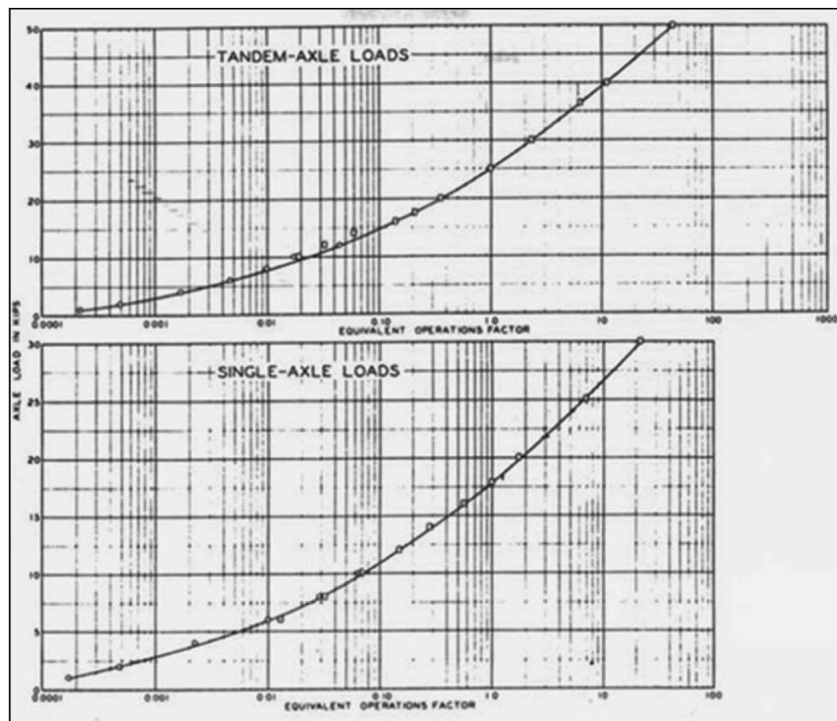


Figura 1 – Gráficos históricos de determinação do Fator de Carga (Fator de equivalência de operações) originais de Turnbull et alii (1962).

Estes ábacos foram adotados por Murillo para a determinação do seu FC para o cálculo do número N exatamente com os mesmos valores dos originais, variando apenas na sua apresentação, visto que os originais são

em função de libras e o de Murillo, em função de toneladas. Os gráficos originais de Murillo de 1966 estão mostrados na Figura 2, que também considerou o mesmo eixo padrão para o Brasil.

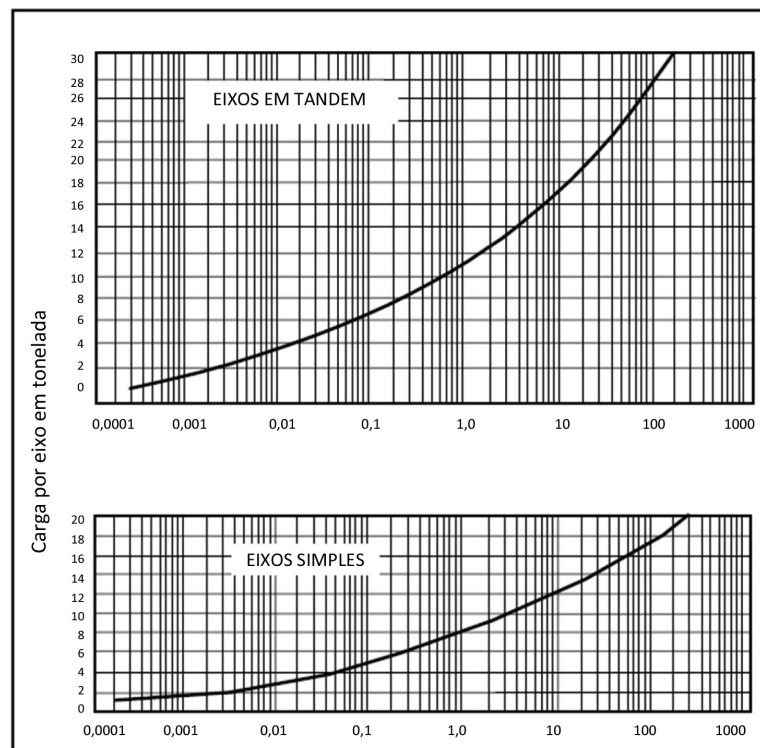


Figura 2 – Gráficos de determinação do Fator de Carga (DNER, 1996).

3. DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES INDICADOS NAS FIGURAS I E 2

O método do DNIT não apresenta de forma explícita os passos percorridos para chegar a estes valores de fatores de carga. Assim, fez-se o resgate histórico das referências da origem dos mesmos, mas ainda assim, foi preciso aplicar a um exemplo para explicar de forma mais didática em relação ao que foi encontrado nos textos históricos.

Para a compreensão de como se chegou a esses FCs, deve-se, antes, compreender os conceitos fundamentais necessários para o dimensionamento do pavimento pelo método do CBR proposto por Turnbull *et alii* (1962) do USACE, o que passa a ser feito de forma resumida. Os detalhes da origem do método do CBR, proposto pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano e que foi base para o método brasileiro, estão apresentados em Medina (1997) e Coutinho (2011). Na dissertação de Coutinho (2011), é explicado como se chegou à equação seguinte, que dá a espessura necessária de pavimento para proteger um determinado subleito quanto à excessiva deformação plástica ou ruptura por cisalhamento:

$$t = (0,23 \log C + 0,15) \sqrt{ESWL \left(\frac{1}{8,1 \text{ CBR}} - \frac{1}{\pi p} \right)} \quad (3)$$

Onde:

- t Espessura total do pavimento
- C Número de coberturas
- ESWL Carga Equivalente (*Equivalent Single Wheel Load*)
- CBR Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Load*)
- p Pressão de inflação ou contato dos pneus

A Equação nº 3 foi apresentada em 1956, sendo resultado do desenvolvimento inicial feito por O. J. Potter na década de 1920 e, posteriormente, a partir da década de 1940, por estudos e testes de campo do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE). A variável C, que é o número de coberturas de um eixo padrão que o pavimento suporta, é dependente da O/C, isto é, do número de operações (passagens) do eixo padrão para acontecer uma cobertura. De acordo com Turnbull *et alii* (1962), Alhvin e Brown, utilizando

a distância entre os pneus, a largura dos pneus e conhecendo a oscilação lateral dos veículos, é possível determinar a relação da O/C. Essas relações de O/C para os eixos da época é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Operações para uma cobertura em função do tipo de eixo e da carga (Turnbull *et alii* 1962).

Configuração dos eixos dos veículos	Faixa de carga (kips)	Operações por cobertura
Eixo simples, roda simples	0 - 5	9,59
	5 - 10	6,25
Eixo simples, roda dupla	0 - 10	2,95
	10 - 20	2,64
	20 - 30	2,37
Eixo tandem, roda simples	0 - 10	4,05
	10 - 15	2,73
Eixo tandem, roda dupla	10 - 15	1,93
	15 - 20	1,13
	20 - 50	1,03

Como o Eixo Padrão (EP), foi escolhido um Eixo Simples de Roda Dupla (ESRD), carregado com 18.000 lb (8,2 t) e o número de operações deste para se ter uma cobertura é de 2,64, conforme indicado na Tabela 1. Assim, são necessárias 2,64 operações (passagens) de um eixo do caminhão padrão para acontecer uma cobertura numa trilha de roda do pavimento.

Como o número de passagens total do tráfego é exatamente representado pelo número N (número de passagens do eixo padrão), a Equação nº 3 pode ser escrita conforme a seguir:

$$t = (0,23 \log (N/2,64) + 0,15) \sqrt{ESWLP \left(\frac{1}{8,1 \text{ CBR}} - \frac{1}{\pi p} \right)} \quad (4)$$

A equação da espessura do pavimento também é dependente do CBR do subleito, da pressão de contato entre o pneumático e o revestimento asfáltico (p), e da ESWLP (Carga da Roda Equivalente Simples Padrão). A Carga da Roda Equivalente Simples Padrão varia conforme a espessura do pavimento, então, apresenta um valor em função da profundidade. O cálculo da ESWL (Carga de Roda Equivalente Simples), isto é, para qualquer tipo de eixo, é explicado por Coutinho (2011). Em função disso, pode-se dizer que a equação de dimensionamento da espessura do pavimento é função do

eixo padrão (EP) e o número N é função do EP, assim, é necessário definir o fator de equivalência de operações que transformará todos os eixos que solicitam o pavimento em Eixo Equivalente Padrão (EEP). O método mostrado na sequência para a execução dessa equivalência baseia-se nas informações de Turnbull *et alii* (1962) para realizar as curvas de equivalência mostradas na Figura 1.

Para calcular o FC, deve-se, antes de qualquer coisa, determinar a ESWL dos eixos em comparação com a ESWLP para uma determinada profundidade. Para isso, utilizam-se ábacos ou pode-se calcular de forma algébrica a ESWL(P) para os eixos, conforme explicado por Coutinho (2011).

O fator FC é o produto de dois fatores, o Fator 1 e o Fator 2, a seguir explicados e é mostrado como calculá-los.

a) Fator 1: pondera a influência sobre a estrutura do pavimento das composições e cargas dos eixos dos veículos que passam sobre o pavimento solicitando-o. É obtido por definição como:

$$\sqrt{\frac{ESWL_{eix}}{ESWL_{pad}}} = (0,23 \log Ceq + 0,15) \quad (5)$$

$$FATOR 1 = \frac{Ceq}{5000} \quad (6)$$

$ESWL_{eix}$ Carga de roda equivalente simples de um eixo qualquer

$ESWL_{pad}$ Carga de roda equivalente simples do eixo padrão

Ceq Número de coberturas que o pavimento dimensionado para 5.000 coberturas de um eixo qualquer suportaria, caso fosse solicitado pelo EP

b) Fator 2: pondera os diferentes tipos de eixos em relação ao eixo padrão em função da oscilação lateral diferenciada dos eixos dos veículos sobre uma faixa específica de circulação. Esse fator, sendo diferente

entre os diversos veículos que circulam na faixa de rolamento, provoca diferentes número de passagens (operações) dos eixos para se obter o mesmo número de cobertura.

$$FATOR 2 = (O_{PAD}) / (O_{EIXO}) \quad (7)$$

O_{PAD} Número de operações do eixo padrão para se ter uma cobertura

O_{EIX} Número de operações de um eixo qualquer para se ter uma cobertura

O Fator 2 é a razão entre o número de operações do eixo padrão pelo número de operações de um eixo qualquer, isto é, quantas vezes é necessário ter a operação do eixo padrão para se obter uma cobertura em relação à operação de um eixo qualquer.

Conforme a Tabela 1, um veículo com eixo simples e rodas simples precisaria de 9,59 operações sobre uma trilha da faixa de rolamento para uma cobertura, enquanto o eixo padrão precisaria apenas de 2,64 operações.

A partir destas definições, aplicadas a várias situações, são apresentados os resultados, Tabela 2, dos valores calculados para o FC em comparação com os valores obtidos do ábaco (Figura 3) para os diversos tipos de eixos e composições de cargas.

Para o cálculo da ESWL e da ESWLP, utilizou-se o ábaco da Figura 3 para as profundidade de 0 polegada (0 m) e para 20 polegadas (0,508 m). O ideal seria determinar uma ESWL(P) para cada profundidade, visto que a mesma varia conforme a profundidade, mas como isso levaria a inúmeros ábacos de fator FC, utilizaram-se, por simplificação, os dois valores de profundidades citados com sua respectiva média.

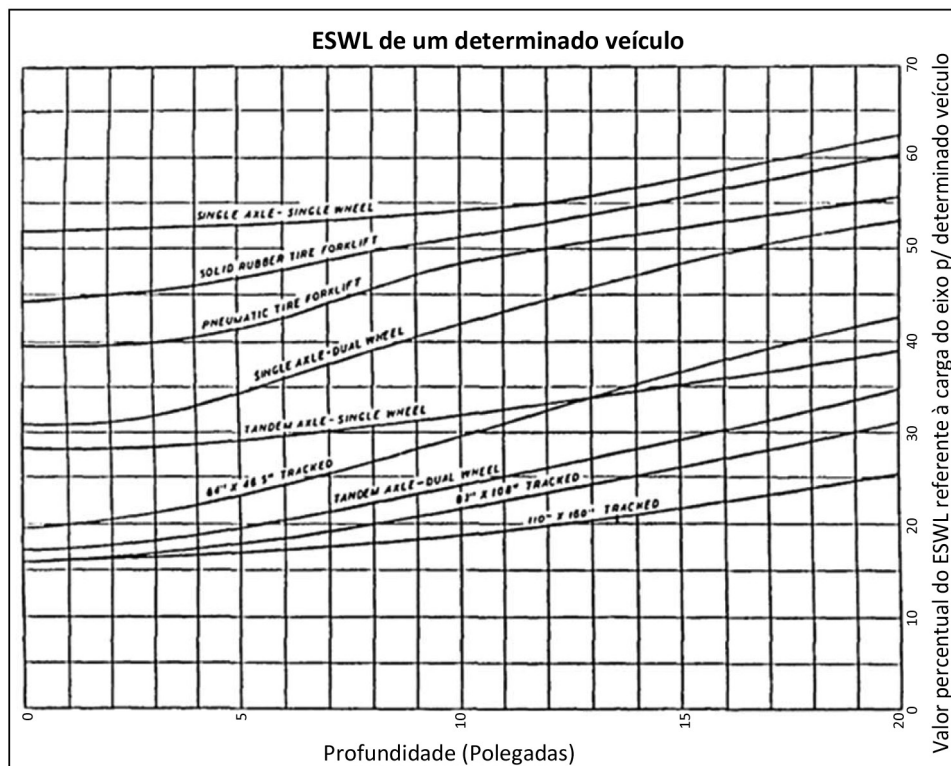


Figura 3 – Gráfico utilizado para a obtenção dos eixos simples equivalentes de vários tipos de configurações (CHOU, 1992).

Na Tabela 2, são mostrados os valores encontrados para o FC utilizando o método proposto por Coutinho (2011), comparados com os valores retirados do ábaco

de Turnbull *et alii* (Figura 1) que foram adotados por Murillo no método brasileiro (Figura 2).

Tabela 2 – Fatores de equivalência de carga calculados e comparados com os valores adotados no método do DNIT.

EP - 18.000 lb (Eixo Padrão)	ESWL _{pad} (lb)											
	5.580	9.360										
Cargas Equivalentes	ESWL (lb)		$(\frac{ESWL_{eix}}{ESWL_{pad}})^{1/2}$	$(\frac{ESWL_{eix}}{ESWL_{pad}})^{1/2}$	$(\frac{ESWL_{eix}}{ESWL_{pad/med}})^{1/2}$	Ceq _{med}	FATOR 1	O _{eix} / C	O _{pad} / C	FATOR 2	FC (Calculado)	FC (ÁBACO)
Profundidade (pol)	0	20	0	20	(0+20)/2							
ETD - 5000	850	1750	0,390	0,432	0,411	14	0,0028	1,93	2,64	1,368	0,0038	0,0035
ETD - 10000	1700	3500	0,552	0,611	0,582	75	0,015	1,93	2,64	1,368	0,02	0,02
ETD - 15000	2550	5250	0,676	0,749	0,713	280	0,056	1,13	2,64	2,336	0,13	0,10
ETD - 20000	3400	7000	0,781	0,865	0,823	860	0,172	1,13	2,64	2,336	0,40	0,37
ETD - 30000	5100	10500	0,956	1,059	1,008	5400	1,08	1,03	2,64	2,563	2,77	2,40
ETD - 40000	6800	14000	1,104	1,223	1,164	25250	5,05	1,03	2,64	2,563	12,94	11,00
ETD - 50000	8500	17500	1,234	1,367	1,301	100100	20,02	1,03	2,64	2,563	51,31	45,00
ESRS - 1250	650	775	0,341	0,288	0,315	5	0,001	9,59	2,64	0,275	0,00028	0,00018
ESRS - 2500	1.300	1.550	0,483	0,407	0,445	19	0,0038	9,59	2,64	0,275	0,0010	0,0006
ESRS - 5000	2.600	3.100	0,683	0,575	0,629	121	0,0242	9,59	2,64	0,275	0,007	0,005

EP - 18.000 lb (Eixo Padrão)	ESWL _{pad} (lb)											
	5.580	9.360										
Cargas Equivalentes	ESWL (lb)		$(\frac{ESWL_{eix}}{ESWL_{pad}})^{(1/2)}$	$(\frac{ESWL_{eix}}{ESWL_{pad}})^{(1/2)}$	$(\frac{ESWL_{eix}}{ESWL_{pad/med}})^{(1/2)}$	Ceq _{med}	FATOR 1	O _{eix} / C	O _{PAD} / C	FATOR 2	FC (Calculado)	FC (ÁBACO)
Profundidade (pol)	0	20	0	20	(0+20)/2							
ESRD - 7500	2.325	3.900	0,645	0,645	0,645	142	0,0284	2,95	2,64	0,895	0,025	0,025
ESRD - 10000	3.100	5.200	0,745	0,745	0,745	387	0,0774	2,95	2,64	0,895	0,069	0,065
ESRD - 15000	4.650	7.800	0,913	0,913	0,913	2075	0,415	2,64	2,64	1,000	0,42	0,44
ESRD - 20000	6.200	10.400	1,054	1,054	1,054	8500	1,7	2,64	2,64	1,000	1,70	1,80
ESRD - 25000	7750	13000	1,179	1,179	1,179	29750	5,95	2,37	2,64	1,114	6,63	6,50
ESRD - 30000	9300	15600	1,291	1,291	1,291	91500	18,3	2,37	2,64	1,114	20,4	21,0

Os resultados para os ESRS, ESRD e ETD apresentaram valores bem aproximados, com dispersão mínima entre os valores dos fatores de carga do ábaco de Turnbull *et alii* e o valor de FC calculado neste artigo. O gráfico comparativo entre os dois valores, apresentado na Figura 4, mostra o quanto os valores ficaram próximos entre si, com a maior diferença estando nos menores valores de carga. Essa diferença pode ser explicada em função dos valores para a carga dos eixos serem extremamente baixos e estarem em local de leitura do ábaco ruim. Também, a profundidade média considerada no cálculo pode ter sido diferente da que foi considerada na montagem do ábaco por Turnbull *et alii* (1962), que não é especificada no seu artigo.

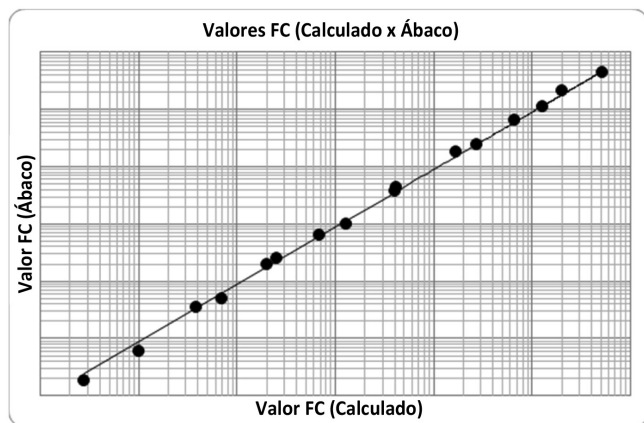


Figura 4 – Comparação entre os valores de FC calculados neste trabalho e os valores adotados no método do Murillo (SOUZA, 1966).

Em 1981, a configuração do eixo triplo, que não existia à época em que esses fatores de carga foram estabele-

cidos (década de 1960), passou a estar presente nas estradas brasileiras de forma significativa. Assim, o Engenheiro Murillo Lopes de Souza resolveu estabelecer um FC para a configuração do eixo. Não há demonstração de como ele fez esta definição nem memória de cálculo nas publicações da época. Os valores do FC para o eixo triplo foram estabelecidos em forma de tabela.

Na Lei da Balança estabelecida à época, foram consideradas as cargas legais dos eixos básicos nas seguintes condições:

- eixo simples de roda simples: limite legal 5 t;
- eixo simples de roda dupla: limite legal 10t;
- eixo duplo de roda dupla: limite legal 17t;
- eixo triplo de roda dupla: limite legal 25,5t.

Estes valores dão uma pista de que foram considerados os efeitos destrutivos e indiretamente algum conceito de cobertura nos valores de eixos duplo e triplo, já que correspondem a 85% da carga do eixo simples correspondente, multiplicada pelo número de rodas em cada caso.

Na Figura 5, mostram-se os três gráficos dos FCs de eixos simples, duplo e triplo do método do Murillo, a partir de 1981, segundo Medina (1997). Não se pode esquecer que as curvas de eixo simples e eixo duplo são originais do “USACE”, como referidas no meio técnico, adaptadas nas unidades, mas a do eixo triplo foi criada pelo Murillo, embora apareça citada como sendo de

mesma origem. No Manual de Restauração do DNER de 1998, apareceram, pela primeira vez, as expressões numéricas das curvas de FC que facilitaram o emprego padronizado dos valores sem o erro decorrente de estimar o valor dos gráficos. As expressões são as apresentadas na Tabela 3, segundo o DNIT (2006).

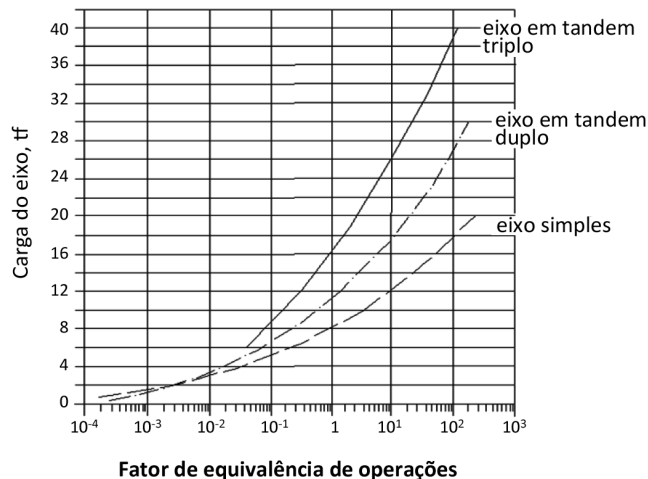


Figura 5 – Fatores de equivalência de operações do eixo de 8,2 tf para diferentes pesos de eixos; método do DNER (1966, 1981) segundo Medina e Motta (2005).

Tabela 3 – Expressões matemáticas dos fatores de equivalência de carga para os diferentes pesos de eixo (DNER, 1998).

Tipo de Eixo	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 – 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 – 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Tandem triplo	0 – 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Obs.: P = peso bruto total sobre o eixo

4. NOVA FORMA DE CONSIDERAR O TRÁFEGO NO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO

No caso do dimensionamento de pavimento novo de revestimento asfáltico, muitos países já adotam um método denominado mecanístico-empírico, onde se dá atenção à predição do efeito de todos os mecanismos de degradação: fadiga das camadas de maior ri-

gidez (revestimento de concreto asfáltico e camadas cimentadas), afundamento de trilha de roda (deformação permanente acumulada) e ruptura plástica (a poucas repetições), conforme comentam Medina e Motta (2005).

O dimensionamento de um pavimento novo por um método mecanístico-empírico deve seguir um fluxograma que tem como dados de entrada os fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas, leva em conta o processamento por via mecanística e incorpora os critérios de decisão para evitar que a degradação atinja valores maiores que os estabelecidos para o trecho, antes que o N do projeto seja alcançado. O conhecimento do tráfego por pesagens sistemáticas permite que o método mecanístico trate com maior racionalidade os efeitos das cargas por eixo. Não se utiliza mais o número N de repetições de eixo padrão, cujo poder destrutivo foi estabelecido, como visto, de forma bastante simplificada, admitindo-se somente o dano por ruptura por cisalhamento.

O procedimento de dimensionamento ME é genérico e pode ser usado no dimensionamento de qualquer tipo de pavimento, seja de concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico, seja rodoviário, aeroportuário ou ferroviário. Os ajustes são feitos especialmente na consideração do tráfego e no método de cálculo das tensões e deformações. Também é válido para o dimensionamento de restauração de pavimentos por reforço. O cálculo das tensões e deformações refere-se às provenientes da ação do tráfego e, na maioria dos sistemas de dimensionamento, leva em conta os eixos individuais (MEDINA e MOTTA, 2005).

Dizem Medina e Motta (2005): “O estágio atual do conhecimento da mecânica dos pavimentos por parte de centros de pesquisa universitários, órgãos públicos, empresas de consultoria, empresas concessionárias, permite afirmar que já existe massa crítica suficiente para que se promova a apresentação de um método de referência que venha a substituir o “Método do DNER”. A história da pavimentação no país saberá reconhecer sempre o papel importante desta contribuição do Eng. Murillo Lopes de Souza.”

Os projetistas que já têm a prática do dimensionamento do pavimento de concreto pelo método ado-

tado pelo DNIT (2005), que é um método mecanístico-empírico, já trabalham com o tráfego considerado de forma individualizada pelos seus eixos, por tipo e por peso, não se fazendo transformações em fator de equivalência de operações e em número N.

Trata-se de também utilizar este procedimento agora para os pavimentos asfálticos, como proposto em Franco (2007). No entanto, neste caso, há que se estabelecer um fator de ajuste das curvas de fadiga obtidas em laboratório em relação aos trincamentos observados no campo - o chamado fator campo-laboratório (FCL). Naturalmente, para estabelecer esse FCL, o uso do número N, tradicional, facilita. Assim, no Brasil, até o momento, muitos projetistas têm empregado um método mecanístico ainda usando o N para representar o tráfego. Porém, aos poucos, essa fase será superada.

Para demonstrar as diferenças de dimensionamento entre o método do CBR, o método mecanístico com uso de N e o método mecanístico considerando os eixos individuais, passa-se a apresentar um estudo de caso, detalhado em Coutinho (2011).

Podem ser citados os trabalhos de Franco (2007) e Oliveira (2011) como outros exemplos de estudos semelhantes.

Para a comparação dos métodos de dimensionamento, foram ensaiados os materiais que compõem a estrutura do projeto de um pavimento de um trecho utilizado como caso de estudo por Coutinho (2011), que foram os seguintes:

- a. Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) para a capa.
- b. Pré-misturado a Quente (PMQ) para a camada de ligação.
- c. Brita Graduada + 3% cimento (BGTC) para a base.
- d. Cascalho + 3% de cal para a sub-base.
- e. Solo argiloso do subleito.

Para cada um desses materiais, foi realizada uma série de ensaios que correspondem aos necessários e suficientes para a aplicação do método do DNER e do método mecanístico-empírico. Em Coutinho (2011), são apresentados detalhadamente os resultados dos ensaios e as simulações realizadas com o programa SisPav que compõe o método de Franco (2007). As varia-

ções das estruturas analisadas foram feitas no sentido de ilustrar a versatilidade de um método mecanístico em contraposição ao método tradicional, muito mais restringido pelos critérios de seleção de materiais e espessuras.

Foram coletadas amostras dos materiais pétreos e do ligante asfáltico para a confecção de corpos de prova de CBUQ e PMQ, também agregados e cimento Portland para os corpos de prova de BGTC, cada um deles na usina de britagem indicada na obra. Já o cascalho e a argila do subleito foram coletados na pista após a homogeneização dos mesmos. Após a coleta dos materiais, os mesmos foram encaminhados para o laboratório do DER/MG, onde todos os ensaios foram realizados. Os materiais foram ensaiados respeitando as normas brasileiras pertinentes.

Os resultados tradicionais resumidos dos materiais das camadas estão mostrados nas Tabelas 4 e 5, enquanto os resultados dos ensaios de resiliência para o uso no método mecanístico-empírico estão indicados na Tabela 6.

Tabela 4 – Características básicas dos materiais (SL, SB e B) para o método do CBR.

Ensaio	Materiais		
	Subleito - solo argiloso	Sub-base - cascalho +3% cal	Base - Brita graduada + 3% cimento
CBR (%)	19	176	270
Umidade ótima (%)	28	10,4	5,2
Expansão (%)	0,21	0,0	0,0
Massa específica máxima (kg/cm³)	1478	2004	2318
LL (%)	62	42	NL
IP (%)	24	10	NP
Pass # 200	96	23	16

Tabela 5 – Características básicas dos materiais do revestimento para o método do CBR.

Ensaio/ características	Camada de ligação (PMQ)	Capa (CBUQ)
Faixa granulométrica	D (DNIT)	C (DNIT)
Tipo de CAP	30/45	30/45

Ensaio/ características	Camada de liga- ção (PMQ)	Capa (CBUQ)
Teor de ligante	3	4,5
Estabilidade (kgf)	877	1240
Fluência (mm)	-	4,0
Densidade	2520	2385
Resistência à tração (MPa)	0,4	1,70

O pavimento projetado pela empresa projetista pelo método do CBR (do Murillo) para este trecho, para o número N de $5,8 \times 10^7$, é composto pelas seguintes espessuras:

- Revestimento: 6 cm de CBUQ – Coeficiente estrutural igual 2; 2ª camada – 8 cm de PMQ – Coeficiente estrutural igual a 1,7.
- Base: 15 cm de espessura de BGTC, com resistência f_{ck} aos sete dias de, no mínimo, igual a 45 kg/cm². Energia Proctor modificada. O coeficiente estrutural K utilizado foi igual a 1,7.
- Sub-base: cascalho quartzoso + 3% de cal com 15 cm de espessura. A energia de compactação utilizada foi a energia Proctor intermodificada (uma vez e meia a energia intermediária). O coeficiente estrutural utilizado K foi igual a 1,2.
- Subleito ou camada final de terraplenagem: solo argiloso com CBR de 9% na energia internormal (uma vez e meia a energia do Proctor normal).

Neste trabalho, a metodologia ME selecionada para a comparação é basicamente apoiada no método da

COPPE/RJ que vem desenvolvendo modelos para o dimensionamento de pavimentos desde 1977. Em 2007, Franco desenvolveu o programa SisPav que contém uma sub-rotina chamada AEMC para os cálculos das tensões e deformações no pavimento por meio da teoria da elasticidade. Foi utilizado tanto o programa SisPav para o dimensionamento das estruturas do pavimento quanto a sub-rotina AEMC para a execução dos cálculos de tensões e deformações ocorridas no pavimento.

Os parâmetros de desempenho ou critérios de aceitação adotados pela COPPE para o dimensionamento do pavimento são:

- Tensão vertical máxima admissível no topo do subleito;
- Deflexão máxima admissível no topo do revestimento;
- Deformação permanente máxima no topo do revestimento (ATR);
- Tensão ou deformação de tração máxima admissível no revestimento asfáltico.

Os modelos de comportamento dos materiais foram baseados nos ensaios de carga repetida e estão resumidamente apresentados para cada uma das camadas e subleito nas tabelas seguintes, e em detalhes em Coutinho (2011).

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de carga repetida para os materiais do estudo de caso.

Característica	Materiais				
	Subleito	Sub-base	Base	PMQ	CBUQ
MR (MPa)	$77 \cdot (\sigma_d)^{-0,352}$	$1527 \cdot \sigma_3^{0,528}$	$2046 \cdot \sigma_3^{0,309}$	6755	10720
Desvio padrão (MPa)				1575	1997
Fadiga: $N = K1 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^n$					
K1	-	-	-	$1,4453 \times 10^{-13}$	$1,4125 \times 10^{-12}$
n	-	-	-	3,362	3,519

Foram comparados dois dimensionamentos com uso do SisPav:

Pavimento TIPO-A: possui camadas e materiais iguais aos do projeto do trecho real estudado, determinados pelo método convencional. A composição do tráfego utilizado para a análise desse pavimento foi o número N de operações do eixo padrão fornecido no projeto. Analisado para a confiabilidade de 50%. A variação lateral foi considerada igual a 0, visto que para calcular o número N, já se considera a variação lateral no valor FC.

- Pavimento TIPO-B: possui as mesmas camadas e materiais iguais aos do projeto. A composição do tráfego utilizada para a análise desse pavimento levou em consideração os eixos e suas cargas separadamente. Os eixos foram o contados pela empresa projetista por três dias consecutivos de acordo com as normas atuais. O pavimento foi analisado para a confiabilidade de 50%. O desvio

padrão da variação lateral foi considerado igual a 0,30 m.

Foram escolhidos dois pontos distintos no pavimento para a análise, quais sejam:

Ponto 1 – localizado exatamente no centro de gravidade da área de contato entre o pneu e o revestimento asfáltico;

Ponto 2 – localizado na distância média entre os dois pneus que compõem o EP.

A Tabela 7 mostra as cargas que solicitam o pavimento e suas cargas máxima e mínima consideradas. A coluna 1 da Tabela apresenta o tipo de eixo, a coluna 2 a quantidade de rodas por eixo, a coluna 3 o volume médio diário (VMD) e a coluna 4 a carga por eixo considerada para a obtenção do número N e para o cálculo do pavimento por eixos separadamente.

A Tabela 8 mostra os resultados dos danos para cada tipo. A coluna 1 determina o local do ponto analisado e a coluna 2 determina o tipo de pavimento analisado. Já a coluna 3 apresenta o percentual de dano crítico no revestimento asfáltico em relação à fadiga do revestimento. A coluna 4 apresenta o percentual de dano em relação à deflexão máxima do pavimento. A coluna 5

apresenta o valor de deformação permanente total do pavimento.

Tabela 7 – Composição dos eixos por faixa e suas cargas respectivas deste estudo.

COMPOSIÇÃO DOS EIXOS	RODAS (UN)	VMD (POR FAIXA)	PESO (KG)
EIXO SIMPLES (ESRS)	2	1.282	6.300
EIXO SIMPLES DE RODA DUPLA (ESRD)	4	719	10.500
EIXO ESPECIAL (EE)	6	537	14.200
DOIS EIXOS DUPLOS EM TANDEM (ETD)	8	175	17.900
TRÊS EIXOS DUPLOS EM TANDEM (ETT)	12	387	26.800
EIXO SIMPLES (ESRS)	2	622	2.160
EIXO SIMPLES DE RODA DUPLA (ESRD)	4	348	3.600
EIXO ESPECIAL (EE)	6	265	5.900
DOIS EIXOS DUPLOS EM TANDEM (ETD)	8	47	5.900
TRÊS EIXOS DUPLOS EM TANDEM (ETT)	12	103	9.240

Tabela 8 – Resultados dos cálculos executados pelo SisPav para os pavimentos TIPO A e B.

Ponto Considerado e Camada Asfáltica	Pavimento Analisado	Dano Crítico no CBUQ (%)	Dano da Deflexão Máxima (%)	Def. Permanente (cm)
PONTO 1 – Revestimento Asfáltico (CBUQ)	TIPO-A	5,16	0,17	0,09
	TIPO-B	0,27	0,03	0,22
PONTO 2 – Revestimento Asfáltico (CBUQ)	TIPO-A	2,50	0,17	0,04
	TIPO-B	0,72	0,06	0,32
PONTO 1 – Binder (PMQ)	TIPO-A	33905	-	-
	TIPO-B	2267	-	-
PONTO 2 – Binder (PMQ)	TIPO-A	33002	-	-
	TIPO-B	5856	-	-

Sobre os danos causados no pavimento (CBUQ) calculado pelo SisPav, devem-se interpretar os resultados da seguinte forma:

- a. O fator campo/laboratório, da fadiga do revestimento betuminoso, considerado no cálculo desta dissertação, foi estabelecido por Pinto (1991) e este é referente à fissuração de 20% da área fissurada no pavimento para o final da sua vida útil estabelecida;
- b. Um pavimento com 100% de dano no final da sua vida útil quer dizer que possui 20% da sua área fissurada;
- c. Um pavimento com 200% de dano no final da sua vida útil possui uma área fissurada de 40% ou metade da vida útil estabelecida;
- d. Um pavimento com 50% de dano no final da sua vida útil possui uma área fissurada de 10% ou o dobro da vida útil estabelecida em projeto.

Quanto aos critérios estabelecidos no SisPav, pode-se dizer que ambos os pavimentos apresentaram:

- a. Deformação plástica ou permanente total – afundamento de trilha de roda menor do que o limite admitido de 12,5 mm ou 1,25 cm;
- b. Nível de trincamento no CBUQ, referente à deflexão no topo do revestimento, menor que o limite do projeto (100%);
- c. Nível de trincamento no CBUQ, referente à deformação específica de tração na fibra inferior, inferior à especificação máxima do projeto (100%);
- d. Ruptura plástica no subleito referente às tensões no topo do subleito – não foi atingido o valor limite dado pela expressão de Heukelom e Klomp.

Os pavimentos TIPO A e B tiveram os seus resultados analisados, também, para verificar qual a diferença ao dimensionar um pavimento utilizando o número N e utilizando os eixos de forma separada.

Observou-se que todos os pavimentos, que utilizaram N como modo de dimensionamento, apresentaram resultados bem mais conservadores do que os pavimentos dimensionados por eixos considerados separadamente. O pavimento TIPO A apresentou resultados de danos da ordem de 14 vezes maiores no ponto 1 e da ordem de 2,5 vezes maiores no ponto 2 do que o pavimento TIPO B. Isto é consequência direta dos FCs adotados na conversão do tráfego real para N. Dependendo da composição do *mix* de cargas, as diferenças poderão ser maiores ou menores.

A fissuração no PMQ mostrou ser o ponto fraco do pavimento. A utilização de um material de baixa resistência à fadiga e com elevado nível de rigidez relativamente,

transformou-o no grande problema para os pavimentos simulados. Uma camada de pavimento com elevada rigidez tende a “atrair” para si grande partes das tensões aplicadas no pavimento e estas deverão ser dissipadas ao longo da camada. Assim sendo, o PMQ será uma camada altamente exigida e que, ao mesmo tempo, apresenta baixa resistência à tração e à fadiga, conforme os ensaios mostraram. Então, a fissuração precoce esperada no PMQ, calculada pelo SisPav, poderá provocar a reflexão das fissuras para o CBUQ e, também, as redistribuições das tensões que eram absorvidas pelo PMQ, agora deverão ser absorvidas pela BGTC e pelo CBUQ. A confirmar no campo esta mesma condição da mistura moldada no laboratório, é provável que essa combinação de materiais não tenha sido boa para o projeto. A tendência hoje é usar na camada de ligação a melhor mistura asfáltica em relação à fadiga, já que na maioria das vezes as trincas por fadiga começam de baixo para cima. Veja a linha dos franceses de uso de mistura asfáltica de módulo elevado nesta posição do pavimento, como comentado em Bernucci *et alii* (2008).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações principais são as seguintes:

- a) A utilização do número N para o dimensionamento pelo método ME deve ser evitada, pois leva ao dimensionamento mais ou menos conservador, dependente da composição do tráfego. Caso se utilize o número N para o dimensionamento do pavimento, deve-se usar o valor igual a 0 (zero) para a variação lateral do tráfego, tendo em vista que essa variação já foi considerada no cálculo do fator de carga (FEO ou FC);
- b) A deformação permanente não é o ponto crítico do dimensionamento do pavimento;
- c) Pavimentos com a mesma espessura ou com espessuras inferiores podem ser mais eficientes do ponto de vista flexibilidade-resistência em função dos tipos de materiais que se utilizam;
- d) Uma mistura asfáltica mal dosada do ponto de vista da flexibilidade-resistência pode comprometer completamente a vida útil de um pavimento;
- e) Para a camada de ligação, o melhor a usar é uma mistura asfáltica com boa resistência à fadiga.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLVIN, R. G.; BROWN, D. N. Stress repetitions in pavement design. 1965.

BERNUCCI, L. B. *et alii*. Pavimentação asfáltica: formação básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: 2008

CAREY, W. N. e IRICK, P.E The pavement serviceability – performance concept – HRB Bulletin, nº 250, 1960.

COUTINHO, J. C. P. Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método Mecanístico-Empírico aplicada a um trecho. 2011. 184p. **Dissertação (Mestre em Geotecnia de Pavimentos)** – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

DNER. Manual de implantação básica. **Ministério dos Transportes**. Dep. Nacional de Estradas de Rodagem. 1996.

DNER. Método de projeto de pavimentos flexíveis. **Ministério dos Transportes**. Dep. Nacional de Estradas de Rodagem. 1981.

DNIT. Manual de pavimentos Rígidos. Publicação IPR-714. **Ministério dos Transportes**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2005.

DNIT. Manual de pavimentação. Publicação IPR-719. **Ministério dos Transportes**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2006.

FRANCO, F.A.C.P., Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV, 2007, 294p. **Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil)** - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEDINA, J. Mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. Mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

MOTTA, L. M. G.; SOARES, J.B. Considerações sobre a determinação do fator de veículo no cálculo do número N. 2001. 13p. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, R. F. V. de. Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos, 2011, 142p. **Dissertação (Mestre em Geotecnia de Pavimentos)** – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

PEREIRA, A.M. (1985). Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação às rodovias de tráfego pesado. **Tese para concurso de professor titular da UFPR**.

PINTO, S. Estudo do comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. **Tese, COPPE/UFRJ**, Rio de Janeiro, 1991, 478p.

SANTANA, H. (1989). Evolução dos métodos de projeto, avaliação e reforço de pavimentos asfálticos no Brasil. **2º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço** – ABPV.

SOUZA, M. L. Método de projeto de pavimentos flexíveis. **DNER**. - 1966. 25p.

SOUZA, M. L. Método de projeto de pavimentos flexíveis. **DNER**. - 1961. 26p.

TURNBULL, W. J.; FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. 1962.

Utilização da Escória da Aciaria Pura e com Adição de Argila como Camada de Base em Pavimentação Rodoviária

Dr. Gilberto Fernandes - Autor

Universidade Federal de Ouro Preto/Escola de Minas/Núcleo de Geotecnia/Doutor em Geotecnia
gilberto@em.ufop.br

Antonio Donizetti de Resende - Coautor

Universidade Federal de Ouro Preto/Escola de Minas/Núcleo de Geotecnia/Mestrando em Engenharia Geotécnica
antoniodonizetti@netsite.com.br

RESUMO

Um dos principais problemas defrontados pela Engenharia Rodoviária atualmente consiste na escassez de materiais naturais em condições adequadas para a utilização nas obras de implantação e pavimentação. Entretanto, paradoxalmente, as siderúrgicas geram diversos resíduos, constituindo passivos ambientais que necessitam urgentemente serem mitigados. Desta forma, podem-se equacionar ambos os problemas, utilizando, por exemplo, a escória de aciaria na confecção da camada de base rodoviária, onde a mesma passa de um resíduo indesejável a um valioso coproduto. Desta maneira, através deste estudo, visando comprovar a eficácia da citada utilização da escória de aciaria, analisou-se o comportamento geotécnico do pavimento da Rodovia MG-232 - trecho: Mesquita a Santana do Paraíso, integrante da malha rodoviária do Estado de Minas Gerais, com 20 km de extensão. Esse trecho rodoviário é constituído por seis segmentos homogêneos, onde o pavimento é composto por revestimento em pré-misturado a frio, tratamento superficial duplo e camadas de base estabilizadas granulometricamente, em cascalho, escória de aciaria pura e com adição de argila. Desta forma, para subsidiar os estudos, foram coletadas algumas amostras

da escória de aciaria diretamente da pilha de depósito na siderúrgica USIMINAS, na cidade de Ipatinga - MG. Sequencialmente, amostragens representativas dos materiais que compõem todos os referidos seis segmentos foram extraídas de todas as camadas do pavimento e também do subleito, que, analisado pelo método Miniatura Compactado Tropical, mostrou-se laterítico argiloso - LG⁷. Implementaram-se, ainda, estudos e caracterização físico-química e mineralógica dos diversificados materiais, componentes da estrutura deste pavimento rodoviário. Por intermédio da viga Benkelman, efetivaram-se em todo o trecho levantamentos das bacias de deflexão e dos raios de curvatura. O módulo de resiliência foi definido por retroanálise e ratificado pelo laboratório, e concluindo os estudos, promoveu-se um dimensionamento para a vida útil de 10 anos. A base em escória de aciaria analisada apresentou um bom comportamento, principalmente quando comparada aos resultados exibidos pela base confeccionada em cascalho. Demonstrou-se, assim, a eficácia da utilização da escória de aciaria Linz-Donawitz nesta referida camada dos pavimentos rodoviários, tanto pura quanto com adição de argila.

Palavras-chave: Escória. Aciaria. Pavimento.

ABSTRACT

One of the major problems in the road engineering construction nowadays consists in the shortage of natural materials in adequate conditions for utilization at implantation and paving jobs. However, paradoxically, the steel industries generate diverse residues, which constitute liable environmental materials that need urgently to be mitigated. This way, we can equated both problems, using, for example, the steel mill slag in the confection of road base layer, where this same residues goes from an undesirable material to a valuable co-product. This way, based in studies, focusing to prove the efficiency of such utilization of the steel mill slag, it was analyzed the geotechnical behavior of the pavement on the road MG-232 - stretch: Mesquita to Santana do Paraíso, part of the Minas Gerais State highways system, with twenty kilometers of extension. This road section is formed by six segments homogeneous, where the pavement is compost by a covering in a cold pre-mix and double superficial treatment, with stabilized granulated layers, gravel fill, pure steel mill slag and with the addition of argyle. This way, to subsidize the studies, in has been collected

samples from the steel mill slag, directly from the piles at the deposit within USIMINAS steel plant, in the city of Ipatinga, Minas Gerais. Following that, samples representing the materials that form all the represented six segments pavements, were extracted from all of those layers an also from the sub grade, which was analyzed by the Miniature Compacted Tropical Method, showing it as lateritic clayey - LG'. Also, it has being implemented studies and characterization physiochemical and mineralogical for the diversified materials, components of the road pavement structure. Through Benkelman beam, it was done throughout the whole road stretch, detailed data information from the bay deflections and curvature rays. The resilience module was defined by retro-analysis and ratified by the laboratory studies conclusion; it was promoted a ten years utility life dimension. The road foundation done with steel mill slag in analysis presented a good behavior, mainly when compared to the results showed for the base foundation composted with gravel fill. Thus demonstrating the effectiveness of the using the Linz-Donawitz steel slag on this said layer of the road pavement, pure, or with the addition of clay.

Keywords: Slag. Steel mill. Pavement.

I. INTRODUÇÃO

A utilização da escória de aciaria como agregado para a pavimentação rodoviária já ocorre no Brasil por um considerável período de tempo, porém, em pequena escala. Este fenômeno é parcialmente atribuído a alguns insucessos decorrentes da utilização incorreta da escória de aciaria, aliado às parcas e historicamente, ainda recentes, normas ambientais de conteúdo e caráter coercitivo. Porém, este paradigma foi alterado com as novas políticas de proteção ao meio ambiente consolidadas pelo art. 225 da Constituição da República Federativa do Brasil 1988 e mais recente com a Lei Federal nº 9.605/98, a lei de crimes ambientais, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas para as condutas e as atividades lesivas ao meio ambiente.

Visando demonstrar a relevância das reciclagens e do devido reaproveitamento da escória de aciaria nas pavimentações rodoviárias, este estudo promoveu uma detida análise do comportamento técnico e operacional do segmento rodoviário pertencente a MG-232 no trecho que interliga as cidades de Mesquita a Santana do Paraíso, com 20 km de extensão, pertencente à malha rodoviária do Estado de Minas Gerais.

O referido trecho é composto por seis SH (segmentos homogêneos). Alguns subtrechos são constituídos por duas camadas intermediárias, sub-base e base, e outros somente com a camada de base. Os materiais empregados para a confecção das camadas de bases variam em cascalho, escória de aciaria pura (Figura 1) e escória de aciaria com adição de 20% de argila. O

revestimento também é composto por modalidades diferentes. Alguns segmentos foram construídos utilizando o pré-misturado a frio e outros foram confeccionados em tratamento superficial duplo.



Figura 1 – Confeção da camada de base em escória de aciaria - MG-232 - Mesquita - Santana do Paraíso - Est. 46 (DER/MG, 2006)

Este estudo visou promover uma análise comparativa do comportamento técnico do pavimento e de maneira singular a verificação da eficiência e da eficácia da utilização da escória de aciaria pura e com mistura na proporção de 20% (Figura 2) de argila para a construção de bases rodoviárias.



Figura 2 - Base de escória + 20% de argila em execução - MG-232 - Mesquita -Santana do Paraíso - est. 424 (DER/MG, 2007).

A utilização deste coproduto da produção do aço é extremamente relevante para o equacionamento dos interesses do setor rodoviário, tão carente em materiais alternativos de boa qualidade e baixo custo, e das siderúrgicas, que necessitam mitigar os passivos ambientais, como, neste caso, os depósitos a céu aberto da escória de aciaria.

2. METODOLOGIA

O trecho da MG 232 - Santana do Paraíso – Mesquita foi subdividido em seis segmentos homogêneos:

1. Subtrecho 1 (SH 1) - est.: 0 – 49, 980 m: revestimento em PMF (1998), lama asfáltica (2008), base em escória de aciaria de aciaria, sub-base em cascalho e subleito em argila;
2. Subtrecho 2 (SH 2) – est.: 49 – 192, 2.860 m: revestimento em PMF (2007), base: escória de aciaria + 20% de argila (2007), 1ª camada de sub-base: composta pelo revestimento em PMF, remanescente do pavimento anterior (1998), 2ª camada de sub-base: composta pelas antigas camadas de base em escória de aciaria (1998) e de sub-base em cascalho (1998), ambas, também, remanescentes do pavimento anterior e subleito em argila;
3. Subtrecho 3 (SH 3) – est.: 192 – 362, 3.400 m: revestimento em PMF (1998), lama asfáltica (2008), base em cascalho (1998), sub-base em cascalho e subleito em argila;
4. Subtrecho 4 (SH 4) – est.: 362 – 533, 3.420 m: revestimento em TSD (2007) e lama asfáltica (aplicada entre as est.: 385 e 510 (2008), base em escória de aciaria com adição de 20% de argila e subleito em argila;
5. Subtrecho 5 (SH 5) – est.: 533 – 784, 5.020 m: revestimento em PMF (2005 – 2006), base em escória de aciaria pura e subleito em argila;
6. Subtrecho 6 (SH 6) – est.: 784 – 1000, 4.320 m: revestimento em PMF (2000), lama asfáltica (2008), base em cascalho (2000), sub-base em cascalho e subleito em argila.

A escória de aciaria LD utilizada para a confecção da camada de base do trecho em comento da rodovia MG-232 é oriunda da USIMINAS (Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.). As extrações das amostras para alguns dos ensaios deste estudo foram coletadas *in loco* no trecho em referência da MG-232 em 03 de fev. de 2009 e as outras foram obtidas nas pilhas no pátio da USIMINAS.

A escória de aciaria da siderúrgica, retrocitada, demonstrou, em estudo efetuado por Gustavo M. de Souza (2007), possuir em sua composição química uma preponderância do óxido de ferro, óxido de cálcio, óxido de magnésio, dióxido de silício e óxido de manganês, apresentando baixa incidência de metais pesados, além de um reduzido percentual de perda ao

fogo. Pode-se concluir pelos ensaios de lixiviação e solubilização, efetuados pelo citado estudo, que a mesma não é perigosa, porém, não é inerte, recebendo a classificação Classe II A (Não perigoso – Não inerte), por apresentar teor de alumínio, na amostra solubilizada, acima do limite máximo permitido. Entretanto, segundo as prescrições da NBR 10.004 (ABNT, 2004), esse referido coproduto da produção do aço não apresenta características corrosivas e também não é reativo, encontrando-se em condições de ser utilizado nas pavimentações rodoviárias.

A metodologia utilizada embasa-se nos estudos das propriedades do material do subleito, bem como nas características dos agregados utilizados na confecção das respectivas camadas do pavimento rodoviário, além da análise físico-química da escória de aciaria e da verificação do comportamento mecânico da estrutura sob os efeitos das cargas e do tempo. Foram realizados os seguintes estudos:

1. Granulometria antes e após a compactação;
2. Limites de Atterberg: limite de plasticidade (w_p) e limite de liquidez (w_L) com a determinação do índice de plasticidade (IP);
3. Índice de suporte Califórnia (ISC);
4. Abrasão Los Angeles;
5. Determinação da absorção e da densidade real do agregado miúdo da escória de aciaria;
6. Determinação do índice de forma do agregado;
7. Avaliação da durabilidade de agregado;
8. Índice de grupo do material;
9. Índice de lamelaridade;
10. Avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria - método PTM 130 "Pensylvania Test Method";
11. Misturas betuminosas – percentagem de betume;
12. Caracterização pela metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical);
13. Difração de raios X (DRX);
14. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
15. Resistência à tração estática máxima em misturas betuminosas (σ_R);
16. Determinação do módulo de resiliência (MR) em solos – ensaio triaxial de carga repetida;
17. Determinação do módulo de resiliência (MR) em misturas betuminosas – ensaio de compressão diametral de carga repetida.

Nas avaliações de campo, utilizando a viga Benkelman, foram medidas as bacias de deflexões e, através da treliça, cadastraram-se as deformações permanentes do pavimento, possibilitando a composição do banco de dados, viabilizando, assim, o estudo do comportamento geotécnico do pavimento do trecho rodoviário em análise. Como o objetivo principal deste estudo consiste em demonstrar a eficácia, ou não, da utilização da escória de aciaria reciclada para a confecção de bases rodoviárias, foi realizada em seguida uma avaliação estrutural do pavimento por retroanálise, estudo este reiterado pelo laboratório (amostras coletadas *in loco*). Foi efetuado ainda, em caráter supletivo, um dimensionamento do pavimento para uma vida útil de 10 anos, utilizando os programas RETRAN5-L e ELSYM5, visando verificar se, nesse intervalo, haveria necessidade de reforçar a atual estrutura utilizando o CBUQ e, caso necessário, em qual dimensão. Desta forma, os citados estudos possibilitaram efetivar uma síntese conclusiva sobre a eficiência e a eficácia da utilização da escória de aciaria neste segmento rodoviário.

3. RESULTADOS

A escória de aciaria e o cascalho foram classificados, segundo a tabela TRB, como sendo escória de aciaria A-1-a e o cascalho variou nos SH em: A-2-4, A-1-a, A-1-b, A-2-5 e A-2-6. Na análise granulométrica dos materiais utilizados para a confecção das camadas de base do trecho em estudo, utilizando a metodologia da ES 303 (DNER, 1997), as amostras representativas do cascalho enquadraram-se à faixa D, tanto antes quanto depois da compactação, e a escória de aciaria pura e com adição de 20% de argila ajustou-se à faixa B antes da compactação e após a compactação das referidas amostras, e estas se enquadraram na faixa C. Esta alteração granulométrica é justificada, pois esse material ficou exposto a uma energia de compactação elevada para o mesmo, foi compactado durante a execução da obra e também no ensaio de ISC, ou seja, foi duplamente compactado. Mais graúdo que o cascalho, foi levado a um processo de degradação e quebra, assim, ao ser analisado posteriormente, o material enquadrou-se em uma faixa mais fechada.

Tanto a escória de aciaria quanto o cascalho apresentaram um ISC > 80%. Segundo a norma ES 303 (DNER,

1997), estão aptos para a utilização em bases de rodovias com $N > 5 \times 10^6$. No cascalho, o ISC indicou o valor de 179,4% na est. 998 + 19 e na escória de aciaria, o valor foi ainda melhor, alcançando o excepcional ISC de 270% na estaca 410.

Nos SH entre as est. 0 e 362 - 784 e 1000, onde o pavimento possui a camada de sub-base, a energia utilizada na compactação do subleito foi a normal. No SH desprovido da sub-base, entre as est. 362 e 784, utilizou-se a energia internormal para compactar o subleito, visando à melhoria do suporte (ISC). A sub-base foi compactada com a energia intermediária. A base, em todo o trecho estudado, foi compactada utilizando a energia modificada. No segmento entre as est. 49 e 192, foi executado um novo pavimento sobre o antigo. Com referência ao limite de liquidez (w_L) e o índice de plasticidade (I_p) do material de base, constataram-se algumas divergências entre a escória de aciaria e o cascalho. O cascalho ficou muito no limite de aceitação da norma ES 303 (DNER, 1997) e em algumas amostras, *v. g.*, a amostra de cascalho da base da est. 810 + 1, após a compactação, classificada como A-2-6, os referidos limites foram extrapolados. O IG foi adequado, apresentou valor igual a zero. A proporção granulométrica do material passante na peneira 200 e a expansão - ME 049 (DNER, 1994) conforme específica a norma ES 303 (DNER, 1997), foram atendidos, tanto pelo cascalho quanto pela escória de aciaria pura e com adição de argila, materiais utilizados para a confecção da base em estudo.

A EM 262 (DNER, 1994) determina para a escória de aciaria, quando utilizada como camada de base rodoviária, um desgaste - ensaio ME 035 (DNER, 1998) Los Angeles máximo $\leq 25\%$. Este estudo constatou um desgaste de 18,7% para a escória de aciaria, portanto, adequada para o uso.

O valor médio verificado de absorção de água pela escória de aciaria foi de 1,97%, atendendo as normas PRO 263 (DNER, 1994) e ME 262 (DNER, 1994), que estabelecem a absorção de 1,0 a 2,0% em peso.

A escória de aciaria, segundo o ensaio ME 086 (DNER, 1994), possui ótimas características de cubicidade, apresentando o valor médio de 0,914.

Na determinação do índice de lamelaridade da escória de aciaria, pelo método do Instituto do Asfalto - MS-

13 (BORTOLETTI *et al.*, sd), observou-se o resultado de 16,9% em média.

O resultado do ensaio de durabilidade da escória de aciaria ME 089 (DNER, 1994) obteve como resultado 0,19% de perda.

No ensaio de determinação do percentual de betume nas misturas betuminosas em amostras da camada de revestimento ME 053 (DNER, 1994), executado com o PMF da MG-232, foram obtidas as seguintes taxas: o ensaio nº 1 apresentou uma taxa de 7,36; no ensaio nº 2, a taxa apresentada foi de 6,7; e no ensaio nº 3, a taxa foi de 7,7. As referidas taxas dos percentuais de material betuminoso foram compatíveis com o projeto, com um pequeno desvio no valor encontrado pelo ensaio número um.

Para a determinação da expansibilidade da escória de aciaria pelo método PTM-130 adaptado pelo DER/MG (1992), foram realizados dois ensaios, cada um, com três corpos de prova. Compactou-se um CP no ramo saturado, outro na umidade ótima e outro no ramo seco. A taxa de expansão da escória de aciaria LD utilizada na camada de base do trecho rodoviário em estudo pelo PTM-130 foi $\leq 0,60\%$.

Pelo MCT, o material de subleito da MG-232, caracterizado pelas amostras registradas como 1091, 1092, 1093 e 1094, indicou a classificação LG' - Laterítico argiloso.

O ensaio de DRX constatou que os principais constituintes mineralógicos presentes nas amostras da escória de aciaria, proveniente da USIMINAS, foram o talco, akaganeite, calcita, quartzo, hidróxido de alumínio e hematita.

No ensaio de MEV, foram identificados nas amostras de escória de aciaria os elementos químicos majoritários magnésio, cálcio, silício e ferro, e os elementos químicos minoritários alumínio, fósforo, boro, manganês e titânio.

Os resultados do ensaio ME 138 (DNER, 1994) realizado nas amostras de PMF e confeccionado com RL-1C, extraídas do revestimento da MG-232, est. 0 e 362 - 553 e 1000, indicaram um $\sigma_r = 0,98$ MPa.

Os resultados do MR obtidos pelo ensaio triaxial dinâmico - f ($\sigma_3 \times \sigma_d$) MPa com as amostras obtidas na MG-232:

1. Est. 509 + 10 E (base/escória + 20% de argila) - E-1089;
2. Est. 710 + 5 E (base/escória de aciaria pura) - E-1090;
3. Est. 09 + 12 D (subleito/LG') - E-1091;
4. Est. 309 + 1 D (subleito/LG') - E-1092;
5. Est. 710 + 5 E (subleito/LG') - E-1093;
6. Est. 509 + 10 E - subleito/LG' - E-1094;
7. Est. 309 + 19 D (base/cascalho) - E-1095;
8. Est. 998 + 19 D (sub-base/ cascalho) - E-1096.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência indicaram que na base em escória de aciaria com adição de 20% de argila E-1089, o MR variou entre 263 e 612 MPa, no E-1090, escória de aciaria pura, o MR foi ainda melhor, ficou entre 300 e 816 MPa. Já na base em cascalho, E-1095, o MR oscilou entre 253 e 393 MPa e na sub-base em cascalho, E-1096, constatou-se um MR com valores entre 207 e 420 MPa, próximos ao MR exibidos para o subleito LG' (material argiloso laterítico), conforme indicado pelos resultados dos ensaios E-1091, E-1092, E-1093 e E-1094, que apresentaram um MR variando entre 132 e 578 MPa. A escória de aciaria, além de apresentar um melhor desempenho que o cascalho, revelou possuir um excelente suporte, quando submetida a elevadas energias durante o ensaio triaxial dinâmico, pois não atingiu nem 1 mm de deformação total do CP.

O resultado do ensaio ME 133 (DNER, 1994) MR - a compressão diametral de carga repetida nas amostras de PMF do trecho da MG-232, estudado - apresentou um valor médio de MR = 3.456 MPa.

Os dados defletométricos foram levantados em todos os SHs utilizando a viga Benkelman e uma carga de 80,4 kN. Também foram obtidos os raios de curvatura e as flechas nas trilhas de rodas. A média dos MRs calculados por retroanálise no trecho em referência foram:

1. Revestimento: 2.980 MPa;
2. Base em cascalho: 452 MPa;
3. Base em escória de aciaria: 432 MPa;
4. Base em escória + 20% de argila: 720 MPa;
5. Sub-base em cascalho: 150 MPa;
6. Subleito laterítico argiloso: 132 MPa.

Pelos resultados de MR apresentados na retroanálise, utilizando o programa RETRAN5-L desenvolvido pelo eng. Claudio A. V. Albernaz (2009), ficou evidenciado na distribuição das camadas críticas que o subleito foi a camada que mais contribuiu para a composição da deflexão, fenômeno este gerador da fadiga, decorrendo no trincamento do pavimento.

4. CONCLUSÃO

A escória de aciaria foi caracterizada como não plástica (NP), já o cascalho teve o IP variando de NP até o extremo de 17,4% na est. 907 + 1 (após a compactação).

Os ISCs da escória de aciaria e do cascalho mostraram-se adequados, pois ambos apresentaram um ISC > 80%, portanto, segundo a norma ES 303 (DNER, 1997), aptos para a utilização em bases de rodovias com $N > 5 \times 10^6$. O número "N" calculado para o ano de 2011, utilizando os parâmetros do USACE (United States Army Corps of Engineers) para este trecho da rodovia, ora em estudo, será de $1,03 \times 10^5$ e para o ano de 2020, o "N" estará no patamar de $1,18 \times 10^6$. Utilizando os parâmetros da AASHTO (Association of State Highway and Transportation of Officials), o número "N" para o ano de 2011 estará em $6,83 \times 10^4$ e para o ano de 2020, será igual a $7,82 \times 10^5$. Portanto, atualmente atende à ES 303 (DNER, 1997) e mesmo no decorrer de 10 anos, nas duas projeções, a rodovia ainda estará em conformidade com essa norma.

No ensaio ME 086 (DNER, 1994), a escória de aciaria apresentou ótimas características de cubicidade, com valor médio de 0,914, destarte, habilitada para uso em sub-bases e bases rodoviárias, podendo ser empregada inclusive como agregado nas misturas betuminosas que compõem os revestimentos asfálticos flexíveis. Assim, conforme a norma ES 031 (DNIT, 2004) para o uso nesta finalidade referida, deverá apresentar um índice de forma superior a 0,5.

O índice de lamelaridade da escória de aciaria pelo método do Instituto do Asfalto (MS-13) indicou um resultado médio de 16,9%, valor menor que o limite máximo especificado, que, dependendo do tamanho médio da fração considerada, varia entre 35% e 40%; abaixo também do valor máximo especificado

pelo DER/MG, que é de 30%. Este material é apropriado para a utilização em pavimentação rodoviária nas camadas de base ou sub-base, objeto deste estudo.

No ensaio de durabilidade, a escória de aciaria, norma ME 089 (DNER, 1994), teve uma perda de 0,19%, portanto, é um material de excelente durabilidade, atendendo à norma EM 262 (DNER, 1994), a qual estabelece que a durabilidade ao sulfato de sódio, cinco ciclos, poderá variar de zero e meio por cento.

No ensaio de determinação do percentual de betume nas misturas betuminosas ME 053 (DNER, 1994), utilizando amostras do PMF/MG-232, foi obtida em um dos três ensaios realizados uma taxa maior que as projetadas. Foi indicado, em projeto, utilizar uma taxa de 7,36% em peso sobre o agregado, porém, neste estudo, obteve-se no ensaio com registro nº 148 uma taxa de 7,4% em peso sobre o agregado. Na análise granulométrica, realizada após a extração, ficou evidenciado que os agregados se enquadraram na faixa preestabelecida em projeto.

No ensaio da expansibilidade da escória de aciaria - método PTM-130, adaptado pelo DER/MG - a taxa de expansão da escória de aciaria LD utilizada na camada de base do trecho rodoviário em estudo foi $\leq 0,60\%$, inferior ao limite máximo estabelecido pela norma, que é de 3,0%, apresentando, desta forma, um excelente resultado.

Pelo ensaio de MCT, o material do subleito da MG-232 foi classificado como MCT = LG' - Laterítico argiloso, material de subleito considerado nobre.

A resistência à tração estática máxima, ensaio ME 138 (DNER, 1994) realizado nas amostras de PMF (RL-1C), apresentou um resultado médio satisfatório para esse tipo de mistura betuminosa, $\sigma_R = 0,98$ MPa, próximo dos valores médios de σ_R obtidos para misturas betuminosas executadas a quente, como, por exemplo, o concreto betuminoso usinado a quente convencional.

Pelo ensaio de compressão diametral, as amostras de PMF apresentaram um valor médio de MR = 3.456 MPa, elevado para esse tipo de mistura betuminosa confeccionada a frio, utilizando a emulsão asfáltica RL-1C.

Nos estudos mecanísticos para a definição do MR, laboratório e retroanálise, foi constatado um adequado comportamento da escória de aciaria e também do cascalho. Entretanto, verifica-se um melhor desempenho da escória de aciaria, evidenciado pela retroanálise no SH com a base executada em escória de aciaria com adição de 20% de argila; já a camada de base construída em escória de aciaria pura obteve melhores resultados de MR, quando analisada pelo laboratório. Todavia, nessas duas modalidades de estudos, retrociadas, os resultados foram convergentes e na mesma linha de tendência.

O pavimento analisado da Rodovia MG-232 apresentou boas condições estruturais nas deflexões recuperáveis máximas (D_o), com valores bastante reduzidos, conjugado a elevados raios de curvatura, compondo uma deformada suave, quando submetido à prova de carga. O referido pavimento apresentou um comportamento mecânico adequado e na retroanálise, a camada de revestimento não concorreu para a formação da deflexão máxima (D_o) em nenhum dos segmentos homogêneos.

Deformações permanentes foram verificadas em toda a extensão do trecho rodoviário estudado utilizando a treliça, apresentando resultados de deformação permanentes bastante reduzidos.

No dimensionamento do reforço do pavimento da MG 232 para 10 anos (ano de 2020), na verificação das espessuras de CBUQ necessárias para que o mesmo suporte o período de projeto, naqueles SHs com a base em escória de aciaria pura e também com adição de 20% de argila, o comportamento foi melhor do que o apresentado nas bases em cascalho. Esses subtrechos são os representados pelos SH-1 - figuras 3 e 4; SH-4 - figura 5 e SH-5 - figura 6.

EYY = Deformação específica horizontal de tração (esforços gerados na fibra inferior do revestimento) = $\epsilon_t = 1,70 \times 10^{-04}$.

EZZ = Deformação específica vertical de compressão (esforços gerados no topo do subleito) = $\epsilon_v = - 4,33 \times 10^{-04}$.

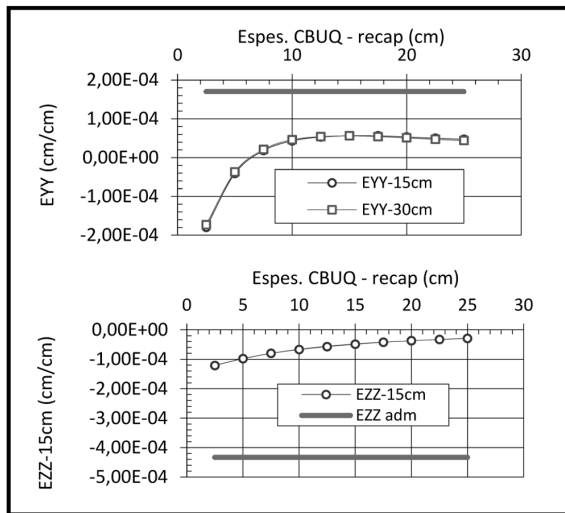


Figura 3 – Espessuras do CBUQ - Est. 1 – SH-1E (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

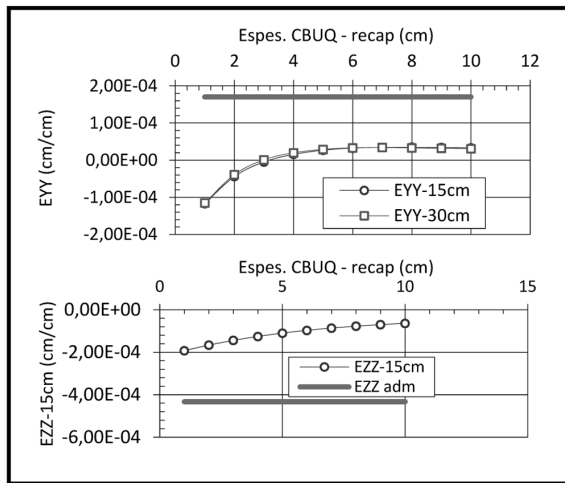


Figura 4 – Espessuras do CBUQ – Est. 4 – SH-1D (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

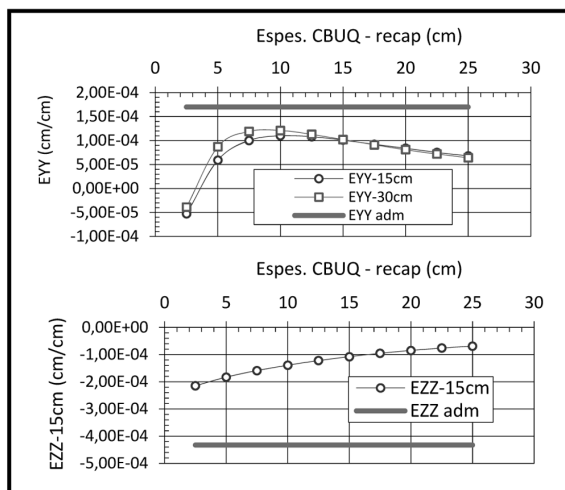


Figura 5 – Espessuras do CBUQ – Est. 364 - SH-4D (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

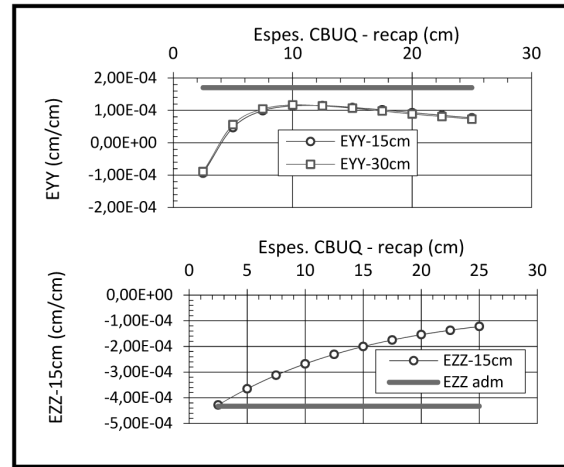


Figura 6 – Espessuras do CBUQ – Est. 535 – SH-5E (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

O SH-1 não necessitará da recuperação estrutural. Nos demais SHs com a base em escória de aciaria pura ou com adição de argila, poucos carecem receber o reforço estrutural, conforme a figura 7. O SH-5D, est. 718, precisará receber reforço estrutural de 7 cm, pois as deformações geradas no topo do subleito (EZZ-15 cm) superaram a EZZ admissível.

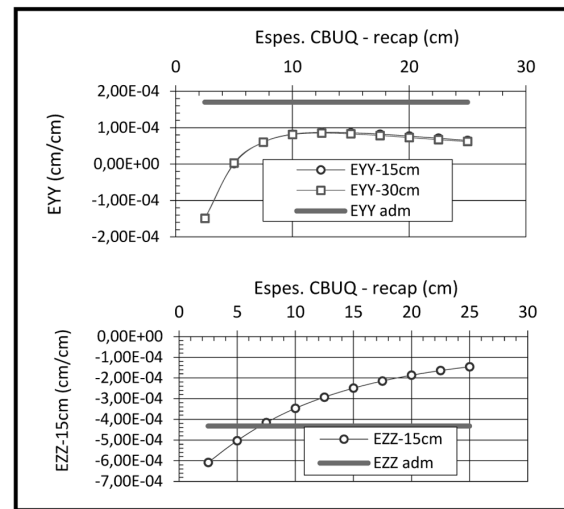


Figura 7 – Espessuras do CBUQ – Est. 718 – SH-5D (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

Os SHs com a base em cascalho, representados pelo SH-3, figura 8, e o SH-6, figuras 9, 10 e 11, apresentaram um bom desempenho, porém necessitam receber reforço estrutural em maior escala que os executados em escória de aciaria, *v. g.*, as estacas estudadas do SH-6 (est.: 790 – 1000), a curva EZZ-15 cm cruza o limite admissível em quase todos os subtrechos analisados, necessitando reforço estrutural.

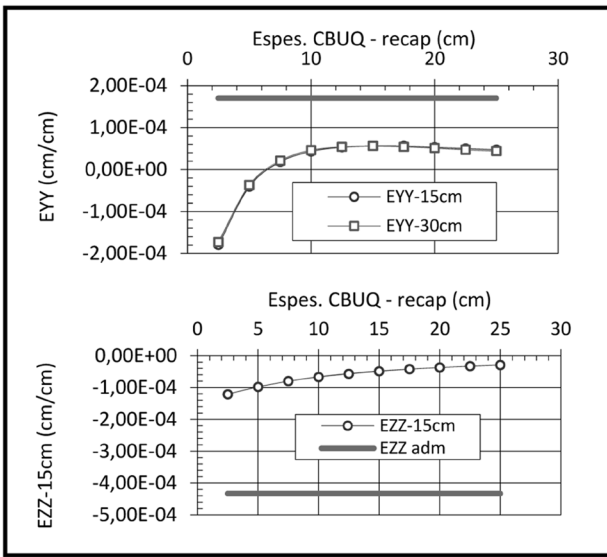


Figura 8 – Espessuras do CBUQ – Est. 361 – SH-3E (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

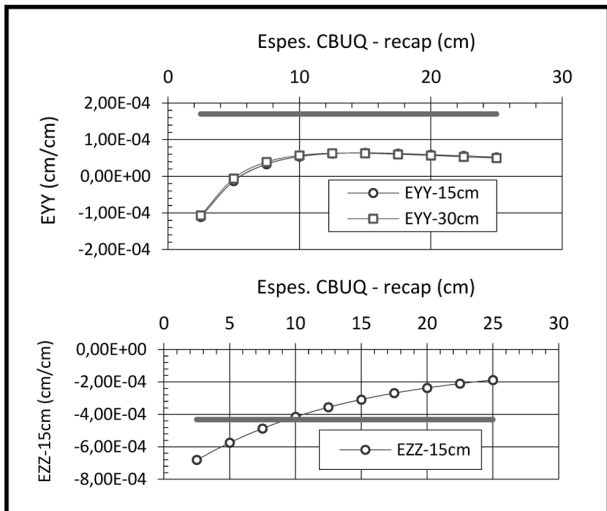


Figura 9 – Espessuras do CBUQ – Est. 790 – SH-6D (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

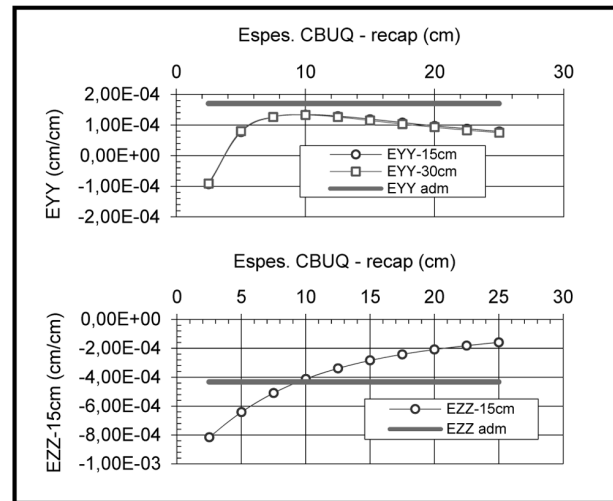


Figura 10 – Espessuras do CBUQ – Est. 961 – SH-6E (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

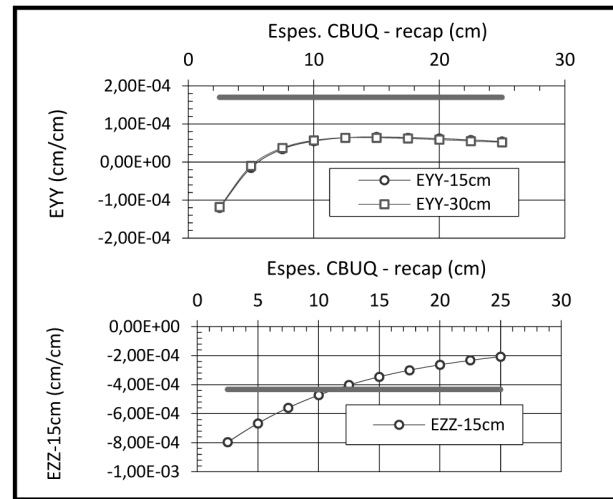


Figura 11 – Espessuras do CBUQ – Est. 970 – SH-6D (RETRANS5-L - DER/MG, 2010)

A confecção de base rodoviária e a utilização da escória de aciaria LD, tanto pura quanto com adição de 20% de argila, conforme analisado, são eficientes e eficazes, desde que se executem os devidos controles, principalmente os relativos à expansão volumétrica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, Claudio A. Valadão. *Dimensionamento mecânico de pavimentos asfálticos: conceitos e sistemática de cálculo*. Belo Horizonte: Abr. de 2010.

_____. *NBR 10004*: – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro 2004.

BORTOLETTI A. C. R., et al. *Noções básicas sobre agregados, ligantes e misturas betuminosas*. Publicação técnica. DER/MG-DP/DMA-DMA1. 83 p. Belo Horizonte, sd.

BRASIL. Congresso Nacional. *Lei Federal nº 9605* de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. In: Acquaviva, M. C. *Vade Mecum* da Legislação Pátria. 5. ed. São Paulo: J. Brasileira, 2004.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil (1988)*. In: Pinto A. L. de T. et al. *Coleção Saraiva de Legislação*. Constituição da República Federativa do Brasil. 42. ed. São Paulo: Saraiva, 2009.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS. *Análise mecânica - Retroanálise - Carregamento viga Benkelman. Determinação das espessuras válidas (programa RETRANS5-L) e esforços gerados na estrutura (programa ELSYM5)*. Belo Horizonte, 2010.

_____. *Deflectometria - RETRANS5-L*. Belo Horizonte, 2009.

_____. *DMA-1(1992). Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria adaptação do PTM 130*. Belo Horizonte, 1992.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Em 262/94. *Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *ES 303/97: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro, 1997.

_____. *ME 035/98: Agregados – determinação da abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998.

_____. *ME 049/94: Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *ME 053/94: Misturas betuminosas – percentagem de betume*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *ME 089/94: Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*. Rio de Janeiro.

_____. *ME 133/94: Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *ME 138/94: Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *PRO 003/94: Coletas de amostras deformadas de solos*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *PRO 263/94: Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários*. Rio de Janeiro, 1994.

SOUZA, G. Marçal de. *Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas*. 124 f. (Dissertação de mestrado em Engenharia geotécnica) – Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

Pavimentos Flexíveis com Revestimento Asfáltico – Avaliação Estrutural a Partir dos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação

Flaviane Melo Lopes

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. e-mail: flaviane-ml@globo.com

Rita Moura Fortes

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas – e-mail: ritamfortes@gmail.com

Carlos Yukio Suzuki

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – e-mail: suzuki@planservi.com.br

RESUMO

No Brasil, é significativo o crescimento do uso do equipamento tipo Falling Weight Deflectometer (FWD) para o levantamento deflectométrico e posterior caracterização estrutural dos pavimentos existentes. Essa caracterização ainda é realizada somente por meio da medida de deflexão máxima. Contudo, o conhecimento isolado da deflexão máxima (D_0) pode não ser suficientemente conclusivo para diagnosticar a condição estrutural do pavimento. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo, por meio de dados do estudo paramétrico, propor uma metodologia simplificada de avaliação da condição estrutural de pavimentos asfálticos com base granular utilizando as medições da bacia deflectométrica. Com as correlações conhecidas, propõem-se modelos simplificados para estimar a vida remanescente de um pavimento em função dos parâmetros deflectométricos. A metodologia proposta mostrou-se promissora. O aproveitamento das informações da bacia deflectométrica pode auxiliar na solução de restauração do pavimento, evitando defeitos precoces por falhas no diagnóstico.

Palavras-chave: Avaliação estrutural. Parâmetros deflectométricos. Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico. Modelos de vida remanescente.

ABSTRACT

In Brazil it is significant the increase in the use of an equipment type FWD for deflection analysis and structural characterization of existing pavements. This characterization is still held only through a maximum deflection measure. However, the isolated association of maximum deflection (D_0) may not be conclusive enough to diagnose the structural condition of the pavement. Thus, the current study aims, through parametric study, to propose a simplified structural assessment methodology of asphalt pavement condition with granular base using measurements of deflection basin. Through the known correlations simplified models will be proposed to estimate the remaining life of a pavement according to deflection parameters. The proposed methodology has proved to be promising. The use of the information on deflection basin can help out in troubleshooting pavement rehabilitation, avoiding premature failures in diagnosing faults.

Keywords: Structural evaluation. Deflection basin parameters. Flexible pavements. Remaining pavement life.

I. INTRODUÇÃO

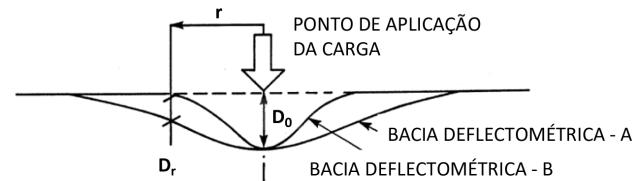
No Brasil, é notório o crescimento no uso do equipamento tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD) para o levantamento deflectométrico e posterior caracterização estrutural dos pavimentos existentes. Esse crescimento pode ser atribuído ao fato desse tipo de equipamento oferecer maior rapidez e segurança na execução dos trabalhos de campo, confiabilidade dos resultados quanto à repetibilidade e a possibilidade de obter com precisão a forma completa da bacia de deformação. Essas são as vantagens desse tipo de equipamento em relação à tradicional Viga Benkelman, que é um equipamento de fácil operação e de custo inferior ao FWD, entretanto, seu uso consiste em um ensaio lento e trabalhoso. Atualmente, nas normas de restauração brasileiras, são utilizadas como referência medições com o equipamento Viga Benkelman bastante difundido no meio técnico rodoviário do País.

No intuito de ampliar a forma de interpretação da bacia deflectométrica, a presente dissertação tem como objetivo, por meio de um estudo paramétrico, propor uma metodologia de avaliação expedita da condição estrutural de pavimentos asfálticos utilizando parâmetros da bacia deflectométrica.

Os parâmetros de curvatura da bacia deflectométrica (PBD) utilizados são conhecidos internacionalmente e facilmente obtidos com o levantamento deflectométrico com o equipamento FWD. Esses PBDs são utilizados para o desenvolvimento de correlações destes com as deformações críticas geradas na estrutura do pavimento quando solicitado. As características geométricas e elásticas das camadas são utilizadas nas correlações visando verificar sua representatividade na forma da bacia e nos valores dos PBDs. Utilizando as correlações obtidas, pretende-se determinar uma metodologia que possa fornecer modelos simplificados para a estimativa da vida remanescente de um pavimento em operação por meio dos parâmetros deflectométricos.

Os métodos brasileiros para o cálculo do reforço de pavimentos, como o DNER-PRO-10/79, DNER-PRO-11/79 e DNER-PRO-269/94, recomendam a determinação da bacia de deformação por meio de levantamentos deflectométricos, contudo, somente o segundo método utiliza medidas suplementares, mesmo que restritamente, para a obtenção do raio de curvatura.

A importância do conhecimento da bacia de deformação é analisada em Moreira (1977), de acordo com a Figura 1, onde as duas curvas representam as deformadas obtidas em dois diferentes locais da superfície de um mesmo tipo de pavimento, causadas pela aplicação da carga de roda.



D_0 = DEFLEXÃO NO PONTO DE APLICAÇÃO DA CARGA

D_r = DEFLEXÃO NO PONTO AFASTADO A UMA DISTÂNCIA r DO PONTO DE APLICAÇÃO DA CARGA

Figura 1 – Deflexão máxima (D_0) para duas bacias de deformação diferentes (adaptado de HORAK, 1987).

O valor da deflexão máxima recuperável (D_0) é o mesmo em ambos os casos, o que aparentemente indica uma mesma capacidade estrutural. Entretanto, sabe-se que, analisando a bacia de deformação, as condições estruturais são diferentes, mesmo expressas por um valor de deflexão máxima recuperável (D_0) igual.

Na literatura, pode-se observar que inúmeros pesquisadores buscaram o desenvolvimento de métodos para a avaliação dos pavimentos utilizando diferentes equipamentos e parâmetros de curvatura para a obtenção das deflexões.

2. MODELO DE PREVISÃO DA VIDA REMANESCENTE DO PAVIMENTO

Na literatura, encontram-se estudos dos parâmetros de deflexão que apresentam modelo de previsão do número N em função de alguns desses parâmetros, conforme apresentado por Maree e Jooste (1992) e Horak (2006) na Figura 2, onde diferentes números de tráfego e diferentes parâmetros são estimados para os pavimentos asfálticos com bases dos tipos granular, asfáltica e cimentada.

Kilareski *et alii* (1982) relataram que muitos departamentos rodoviários estimam a vida útil do pavimento utilizando somente as medidas de deflexões. Sendo assim, os autores buscaram relacionar a tensão máxima de tração com os parâmetros de curvatura, e para tornar mais prática a análise, elaboraram o gráfico apresentado na Figura 3, onde introduziram o conceito do número estrutural (SN).

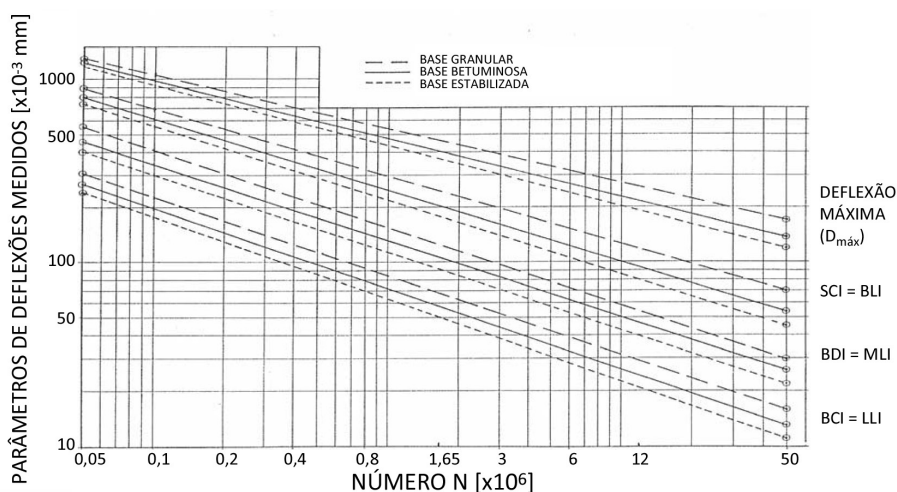


Figura 2 – Correlação entre PBD e a previsão do número N (adaptado de MAREE; JOOSTE, 1992).

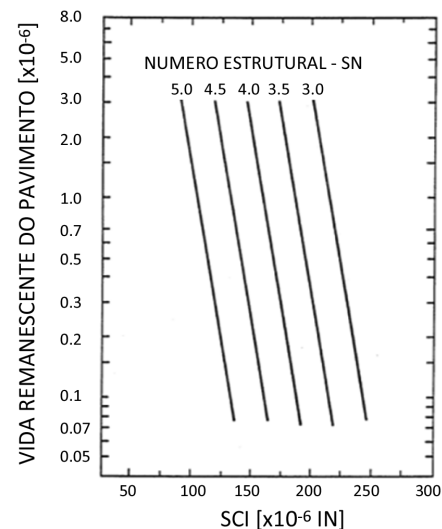


Figura 3 – Estimativa de vida útil baseando no SCI e no SN (adaptado de KILARESKI et alii, 1982).

3. ESTUDO PARAMÉTRICO

O objetivo do estudo paramétrico já realizado na dissertação de mestrado de Lopes (2012) foi determinar relações entre os parâmetros da bacia deflectométrica (PBD) e os indicadores que refletem a capacidade estrutural dos pavimentos asfálticos para auxiliar na avaliação da estimativa da vida útil remanescente da estrutura a partir dos levantamentos deflectométricos realizados com o equipamento do tipo FWD.

Para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos nas estruturas simuladas, fez-se uso do programa ELSYM-5 (*Elastic Layered System*). Esse progra-

ma admite até cinco camadas, incluindo o subleito, e até 10 cargas de roda com área de contato pneu-pavimento circular. O ELSYM-5 é um programa conhecido e muito utilizado por causa de seu baixo tempo de processamento e a facilidade de uso.

As estruturas de pavimento asfáltico flexível simuladas são compostas por três camadas: revestimento, base e subleito. Sendo a primeira camada composta por revestimento em concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), a base composta por material granular sobreposta ao subleito com módulo de resiliência variando entre 250 e 1.500 kgf/cm². O resumo das características das camadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz com as características das estruturas.

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson
H _{CAUQ}	5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 60	7.500 - 15.000 - 22.500 - 30.000 - 37.500 - 45.000	0,35
H _{BASE}	15 - 30 - 45 - 60	750 - 1.500 - 2.250 - 3.000 - 3.750 - 4.500	0,40
H _{SL}	-	250 - 500 - 750 - 1.000 - 1.250 - 1.500	0,45

Por meio das equações de correlação de Lopes (2012), os PBDs mais representativos em relação aos indicadores estruturais são SCI, BDI e BCI, formando um conjunto de medições adequadas para fornecer informações que representem todas as camadas do pavimento, des-

de o subleito até o revestimento. Além da seleção dos parâmetros SCI, BDI e BCI para os estudos subsequentes, também foram analisados D₀ e R, parâmetros já consolidados no meio rodoviário. A Tabela 2 apresenta as fórmulas e as unidades dos PBDs citados acima.

Tabela 2 – Parâmetros deflectométricos do estudo paramétrico.

Parâmetro	Fórmula	Unidades
D₀ - DEFLEXÃO MÁXIMA	-	D ₀ [10 ⁻² mm]
R - RAIO DE CURVATURA	$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})}$	R[m]
SCI - ÍNDICE DA CURVATURA DA SUPERFÍCIE	$SCI = D_0 - D_{30}$	SCI[10 ⁻² mm]
BDI - ÍNDICE DE DANOS À BASE	$BDI = D_{30} - D_{60}$	BD[10 ⁻² mm]
BCI - ÍNDICE DA CURVATURA DA BASE	$BCI = D_{60} - D_{90}$	BCI[10 ⁻² mm]

OBS: D₀, D₂₅, D₃₀, D₆₀, D₉₀ [10⁻²mm]

Deflexões com afastamento de 25 cm, 30 cm, 60 cm e 90 cm do ponto de aplicação de carga.

4. MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

Em função dos modelos de desempenho encontrados, pode-se efetuar a avaliação estrutural de pavimentos, estimando sua vida útil remanescente, a partir dos valores dos PBDs de forma direta e relativamente simples.

Com o objetivo de determinar os modelos de parâmetros deflectométricos em função do tráfego para pavimentos asfálticos flexíveis, foram utilizados modelos de fadiga recomendados na literatura, no qual correlacionam o número N com a deflexão máxima (D₀), a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (ε_t) e a deformação vertical de compressão no topo do subleito (ε_v).

Cabe ressaltar que, para a adoção de uma equação matemática de fadiga que avalie a qualidade e o desempenho de um determinado pavimento, é necessário compreender como e em quais condições essa

equação foi determinada, ou seja, ensaios de campo ou de laboratório, magnitude, frequência e duração das cargas cíclicas, tipos de ensaios etc.

Para cada parâmetro deflectométrico, foram elaboradas correlações entre ε_t, ε_v isoladamente ou em conjunto, selecionando, ao final, aquela que apresentasse melhor representatividade.

A metodologia proposta possibilitou a obtenção do ábaco apresentado na Figura 2, que mostra os modelos de fadiga propostos para estimar a vida remanescente do pavimento e auxiliar a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis em função de D₀, R, SCI, BDI e BCI, e de modelos de fadiga já consolidados no Brasil.

Para a elaboração do ábaco da Figura 2, foram utilizados separadamente ou em conjunto o modelo do Asphalt Institute em relação a ε_t e o modelo da Shell com 50% de confiabilidade em relação a ε_v.

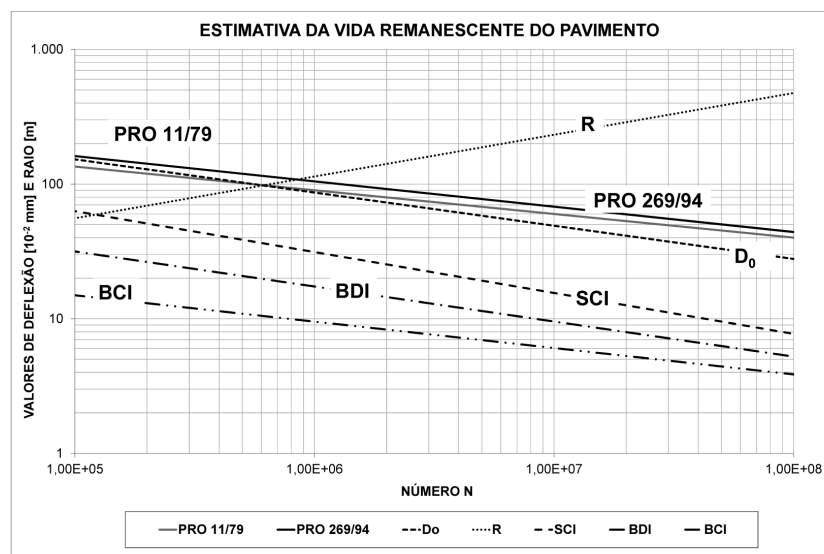


Figura 2 – Ábaco dos modelos de fadiga propostos.

Na Figura 3, são apresentados dois conjuntos de equações que representam o ábaco do modelo proposto no presente trabalho e a diferença consiste no tipo de formulação matemática adotada. Para qualquer uma das três estruturas, o conjunto de respostas será o mesmo.

$D_0 = 2.605,3602 N^{-0,2465}$ $SCI = 2.077,7335 N^{-0,3037}$ $BDI = 632,4255 N^{-0,2603}$ $BCI = 142,4329 N^{-0,1959}$ $R = 1,5727 N^{0,3099}$	OU	$N = 7,2024 \times 10^{13} \times D_0^{-4,0568}$ $N = 8,3928 \times 10^{10} \times SCI^{-3,2927}$ $N = 5,7636 \times 10^{10} \times BDI^{-3,8417}$ $N = 9,8496 \times 10^{10} \times BCI^{-5,1046}$ $N = 0,2320 \times R^{3,2268}$
---	----	--

Figura 3 – Equações dos modelos de fadiga propostos para estimar a vida remanescente do pavimento.

Foram elaboradas faixas de valores referentes ao estudo e aos modelos de fadiga propostos. Essas faixas de valores são apresentadas na Tabela 3 para os parâmetros D_0 , R, SCI, BDI e BCI, e para as faixas de tráfego usualmente adotadas nos métodos brasileiros de dimensionamento, como pode ser visto no manual do DNIT (2006).

Tabela 3 – Faixa de valores recomendados para o modelo proposto.

PBD	$N \geq 1 \times 10^7$	$1 \times 10^7 > N \geq 1 \times 10^6$	$1 \times 10^6 > N \geq 1 \times 10^5$	$N \leq 1 \times 10^5$
D_0 [10^{-2} mm]	< 50	50 - 90	90 - 150	> 150
R[m]	> 230	230 - 110	110 - 60	< 60
SCI [10^{-2} mm]	< 15	15 - 30	30 - 60	> 60
BDI [10^{-2} mm]	< 10	10 - 15	15 - 30	> 30
BCI [10^{-2} mm]	< 6	6 - 10	10 - 15	> 15

Para ilustrar os modelos de fadiga propostos, foi elaborado um exemplo teórico que estimou a vida remanescente das estruturas e foram analisados os pontos críticos das estruturas escolhidas e estas comparadas com as características geométricas e elásticas das mesmas.

5. EXEMPLO TEÓRICO

Para o exemplo teórico, foram utilizadas as três estruturas nomeadas pela letra D com deflexão igual a $62,9 \times 10^{-2}$ mm, e são apresentadas nas Figuras 4 e 5.

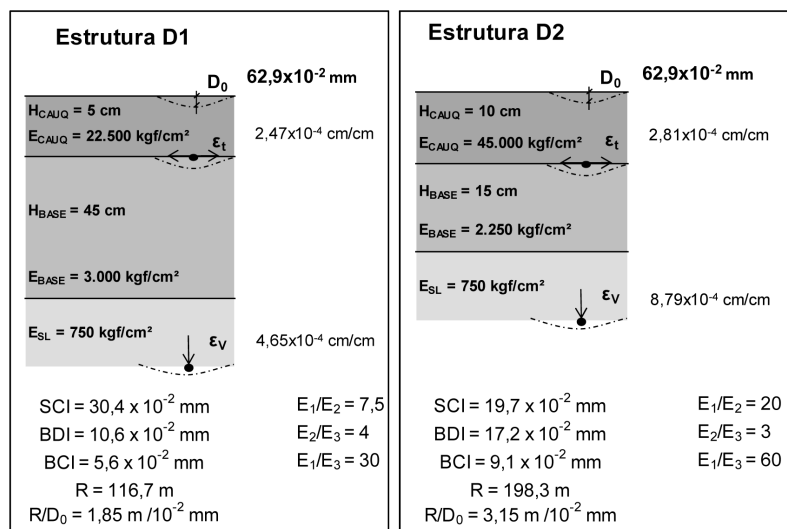


Figura 4 – Bacias deflectométricas das estruturas D1 e D2

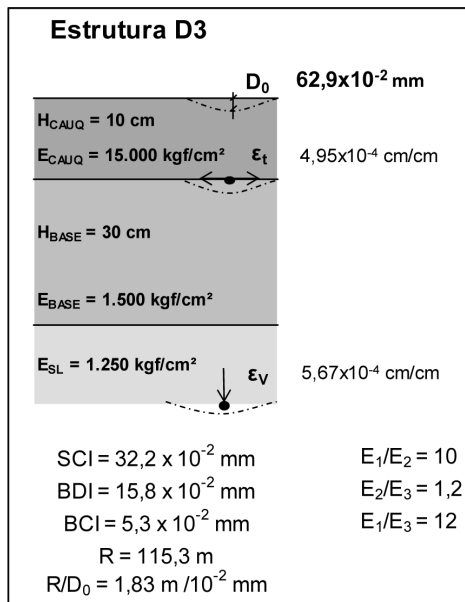


Figura 5 – Bacia deflectométrica da estrutura D3.

Para cada estrutura, foi estimada a vida remanescente por meio dos PBDs calculados com os valores de deflexões da bacia, e são apresentados nas Figuras 6 a 8.

A estrutura D1 que apresentou para $D_0 = 62,9 \times 10^{-2} \text{ mm}$ um $N_{\text{remanescente}} = 3,63 \times 10^6$ (Figura 6). Contudo, o número N crítico é igual a $1,08 \times 10^6$ para o parâmetro R, muito próximo do resultado para o parâmetro SCI ($N_{\text{remanescente}} = 1,10 \times 10^6$). Ambos refletem a camada de revestimento asfáltico com 5,0 cm de espessura e módulo (ECAUQ) igual a 22.500 kgf/cm².

A estrutura D2 que também apresentou para $D_0 = 62,9 \times 10^{-2} \text{ mm}$ um $N_{\text{remanescente}} = 3,63 \times 10^6$ (Figura 7). Contudo, o número N crítico é igual a $1,04 \times 10^6$ para o parâmetro BDI. Ao contrário da estrutura D1 com deficiência no revestimento asfáltico, a estrutura D2 possui uma base mais delgada ($H_{\text{BASE}} = 15,0 \text{ cm}$) com módulo de resiliência inferior, portanto, refletiu no menor número N. Como seu revestimento asfáltico tem 10,0 cm de espessura e módulo de 45.000 kgf/cm², seu número N para os parâmetros SCI e R são superiores a $4,63 \times 10^6$.

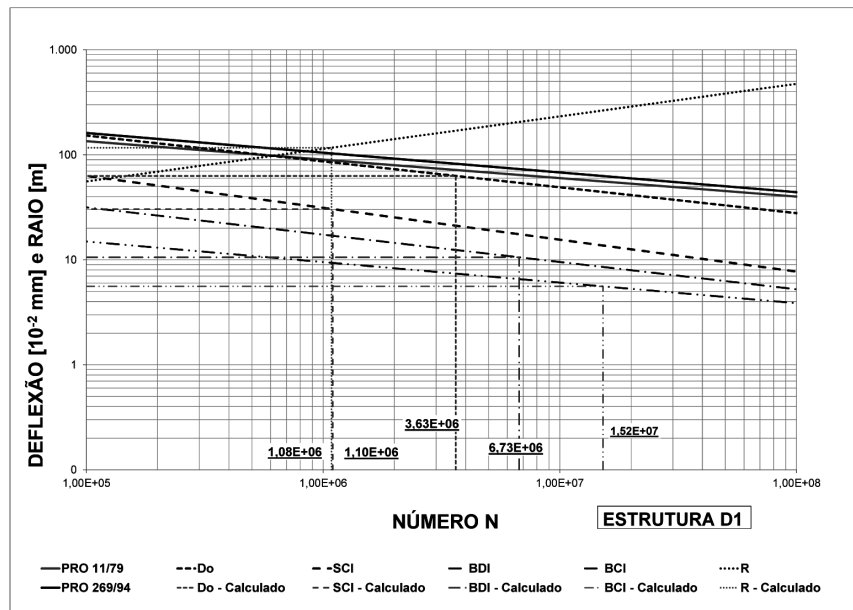


Figura 6 – Estimativa de vida remanescente para a estrutura D1.

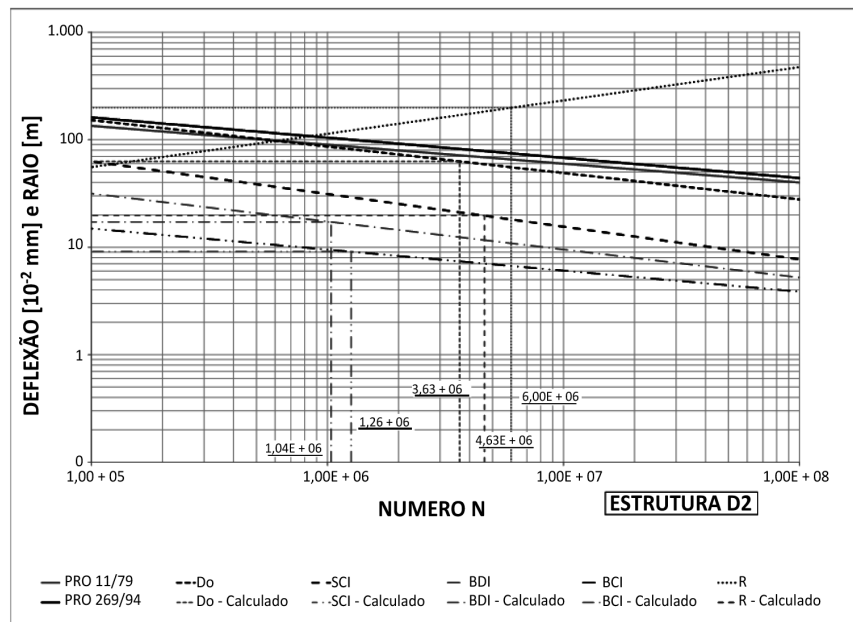


Figura 7 – Estimativa de vida remanescente para a estrutura D2.

A estimativa de vida remanescente para a estrutura D3 é apresentada na Figura 8 e seu número N crítico é igual a $9,13 \times 10^5$ para o parâmetro SCI. Apesar da estrutura ter 10,0 cm de espessura de revestimento asfáltico, seu módulo de resiliência é igual a 15.000 kgf/cm², assim, esse valor contribuiu para o resultado do número N crítico. Essa estrutura possui um valor de módulo do subleito igual a 1.250 kgf/cm², caracterizado por um número N, para o parâmetro BCI igual a $1,92 \times 10^7$.

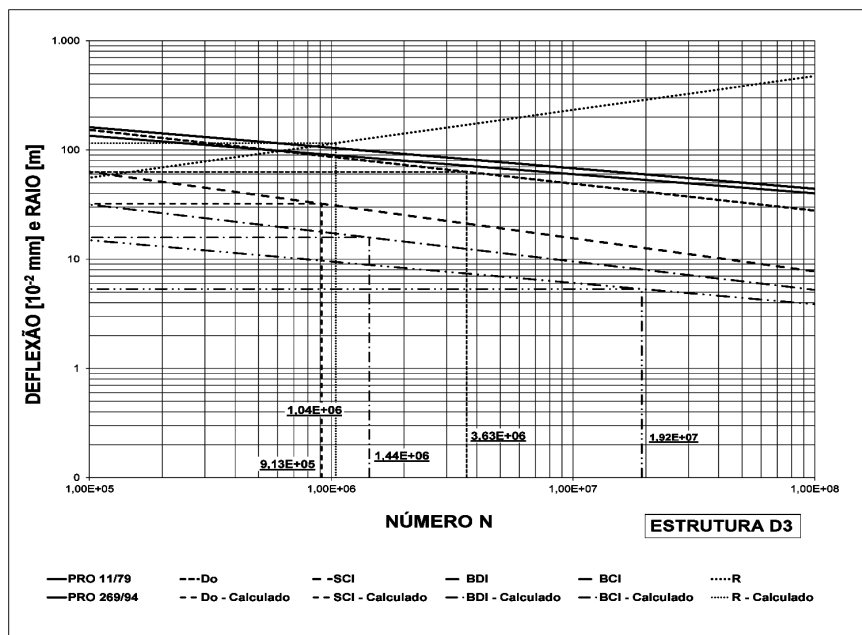


Figura 8 – Estimativa de vida remanescente para a estrutura D3.

6. CONCLUSÕES

A utilização dos PBDs (Parâmetros da Bacia Deflectométrica) possibilita uma avaliação estrutural do pavimento flexível existente mais abrangente, identificando quais são as camadas críticas por meio do completo aproveitamento dos dados deflectométricos já usualmente obtidos no campo, empregando-se o equipamento FWD.

Observou-se que, embora alguns pavimentos apresentem o mesmo valor de deflexão máxima (D_0), os mesmos podem apresentar outros parâmetros de deflexão diferenciados, demonstrando que a deflexão máxima

(D_0), isoladamente, não é suficiente para caracterizar perfeitamente a condição do pavimento, corroborando os estudos encontrados na literatura, como Paiva (1989), Suzuki (1992), Souza (1995), Nagao (2001) e outros.

Com esses modelos, pode-se verificar, de forma expedita e simplificada com os resultados do FWD, a evolução dos parâmetros estruturais em função das solicitações do tráfego e do tempo, ou ainda estimar o período de vida remanescente para uma estrutura em função da forma de sua bacia deflectométrica.

Apesar das três estruturas possuírem o mesmo valor de deflexão, as deficiências em cada uma delas ocorrem em camadas diferentes. Por meio das metodologias de restauração disponíveis, como, por exemplo, o procedimento DNER PRO-11/79, a solução de restauração para três estruturas seria exatamente a mesma, já que os valores de deflexão máxima são idênticos.

A utilização dos PBDs auxilia na identificação das deficiências nas camadas do pavimento e corroboram uma melhor solução de restauração do pavimento existente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-PRO 010/79. **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: Procedimento A.** Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-PRO 011/79. **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: Procedimento B.** Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-PRO 269/94. **Projeto de restauração de pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro, 1994.

HORAK, E. Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa. 1987. **Thesis (PhD of Civil Engineering) - Department of Civil Engineering,** University of Pretoria, Pretoria - South Pretoria, 1987.

HORAK, E.; EMERY, S. Falling Weight Deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. In: **ARRB CONFERENCE, 22.**, 2006, Canberra. Proceedings... Australian Road Research Board, 2006.

KILARESKI, W. P.; ANANI, B. A. Evaluation of in-situ moduli and pavement life from deflection basins. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 5.**, 1982, The Netherlands. Proceedings... Ann Arbor: University of Michigan, 1982.

LOPES, F. M. Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico – avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação. 2012. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Progra-**

ma de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MAREE, J. H.; JOOSTE, F. J. Structural classification of pavements through the use of IDM deflection basin parameters. **PR-91/325,** South African Roads Board, Sandton, 1992.

MOREIRA, M. R. P. Um método de avaliação de pavimento flexíveis com base no raio de curvatura da linha elástica das deflexões. In: **REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 13.**, 1977, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, 1977.

NAGAO, E. M. Considerações de parâmetros de curvatura da bacia de deformação e do número estrutural no dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis. 2001. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica,** Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PAIVA, C. E. L. Contribuição para análise e interpretação de bacias de deformação. 1989. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica,** Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SOUZA, P. R. B. Considerações sobre a utilização de parâmetros de curvatura da bacia de deformação para avaliação estrutural de pavimentos. 1995. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica,** Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SUZUKI, C. Y. Contribuição do estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada). 1992. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica,** Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

Revista PAVIMENTAÇÃO

Normas básicas para submissão de artigos e contribuições técnicas

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