

REVISTA

ABPV

Associação Brasileira de Pavimentação



PAVIMENTAÇÃO

Ano VI – Nº 22 – Set/Out/Nov de 2011 – www.abpv.org.br – ISSN 1809-1865

Nanotecnologia Aplicada à Pavimentação:

João Victor Staub de Melo

Glicério Trichês

Joe Villena

Ramon Knabben

REVISTA
PAVIMENTAÇÃO
5 anos

REVISTA PAVIMENTAÇÃO

Ano VI – Nº 22 – Set/Out/Nov de 2011

ISSN 1809-1865



Rua Miguel Couto, 105 – Sobrelojas 204 e 205

20070-030 – Rio de Janeiro – RJ

Tel: (21) 2233-2020 / 2263-5794 – Fax: (21) 2233-0709

CONSELHO EDITORIAL

Diretoria da ABPv

COORDENAÇÃO GERAL

Arq^{la} Georgina Libório Azevedo
georgina@abpv.org.br

JORNALISTA RESPONSÁVEL

Jean Pierre M. Santiago
MTb 27170-RJ
jpierrems@abpv.org.br

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

Presidente: Eng^o JOSÉ PEDRO DOS SANTOS VIEIRA COSTA

Vice-Presidente: Eng^o EDUARDO ALBERTO RICCI

Diretor Administrativo: Eng^o FERNANDO AUGUSTO JÚNIOR

Diretor Técnico: Eng^o MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE

Diretor Financeiro: Arq^{la} GEORGINA LIBÓRIO AZEVEDO

Diretor de Divulgação: Eng^o CRISTIANO DA COSTA MOREIRA

COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO

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

Tradução: Mariana Ricci

Editores: MURO Produções Gráficas – Revisão: Ellis Pinheiro

Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda

Periodicidade: Trimestral – Tiragem: 5.000 exemplares



Nossa capa:

O amanhecer na BR-277
que liga Paranaguá
a Curitiba - Ecovia

Foto: Georgina Libório Azevedo

Sumário

2 Editorial

3 Revista PAVIMENTAÇÃO
Um sonho realizado

OPINIÃO

5 Entrevista com Eder Gomes Vianna
diretor-presidente da ABEDA

9 Seção de notas

11 Discurso do Diretor-presidente

12 17ª RPU - Porto Alegre

ESPAÇO JURÍDICO

16 O Process Administrativo Minerário: Guia de Utilização

ARTIGOS TÉCNICOS

18 Nanotecnologia aplicada à pavimentação:
Peças pré-Moldadas de concreto fotocatalíticas
para purificação do ar

João Victor Staub de Melo, Glicério Trichês, Joe Villena e Ramon Knabben

28 Comportamento resiliente de um solo típico de subleito
de rodovias da região de Viçosa-MG

Tadeu Antonio Torquato de Souza Júnior, Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Prof. Claudio Henrique de Carvalho Silva, Prof. Dario Cardoso de Lima e Prof. Geraldo Luciano de Oliveira Marques

36 Princípios conceptivos sobre a modelização de estruturas
de pavimento de concreto asfáltico sob carregamento
cíclico

Breno Salgado Barra, Dr., Leto Momm, Dr., Yader Guerrero Pérez, M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Jean Maurice Balay, D.R. e Yves Brosseaud, D.R.

51 Avaliação e restauração de pavimentos Uma proposta
de adequação ao dimensionamento do reforço

Antoine Hennadipgil Junior, dwin Fernando Ruiz Blanco, Felipe Santana Lopes, Honório de Resende Morais, Regis Martins Rodrigues e Silvío Rodrigues Filho

Editorial

A 17ª Reunião Pavimentação Urbana realizada no mês de outubro em Porto Alegre promoveu um grande encontro entre os profissionais, acadêmicos e empresários da área de engenharia de pavimentos. O evento promovido pela ABPv em parceria a Akzo Nobel, Ciber, Pesa, Terex, ABCP, ABCR e apoio da Prefeitura da capital gaúcha, reuniu cerca de 600 participantes que debateram e discutiram uma diversidade de temas pertinentes. A troca de experiência e divulgação de estudos e pesquisa também foi outro ponto forte do encontro. Nesta edição a Revista PAVIMENTAÇÃO apresenta a cobertura completa do evento.

Na seção Opinião, Eder Gomes Vianna, presidente da ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos fala de sua experiência na área administrativa do mercado de asfaltos no Brasil. Assim, tece um panorama da situação atual da pavimentação.

Na segunda menção aos 5 anos de PAVIMENTAÇÃO, abordamos o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável, temas que a Revista chamou para si em função de terem se tornado inexoráveis às obras de infraestrutura. Poderão ser lembrados assuntos importantes relacionados à questão ambiental tratados em várias edições.

Os artigos desta edição de nº 22 abordam diversos temas, entre eles área de vanguarda tecnológica, como a nanotecnologia: “Nanotecnologia aplicada à pavimentação: Peças pré-Moldadas de concreto fotocatalíticas para purificação do ar”, de autoria de João Victor Staub de Melo, Glicério Trichès, Joe Villena e Ramon Knabben. O segundo artigo trata do comportamento resiliente de um solo típico de subleito de rodovias da região de Viçosa-MG, um estudo dos autores Tadeu Antônio Torquato de Souza Jr, Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Cláudio Henrique de Carvalho Silva, Dario Cardoso de Lima e Geraldo Luciano de Oliveira Marques.

O terceiro artigo versa sobre os princípios conceptivos sobre a modelização de estruturas de pavimento de concreto asfáltico sob carregamento cíclico, de autoria de Breno Salgado Barra, Leto Momm, Yarder Guerrero Perez, Jean Maurice Balay e Yves Brosseaud.

O quarto e último artigo trata da avaliação e restauração de pavimentos com uma proposta de adequação ao dimensionamento do reforço, um estudos dos autores Antoine Hennadipgil Jr, Edwin Fernando Ruiz Blanco, Felipe Santana Lopes, Honório de Resende Moraes, Regis Martins Rodrigues e Silvio Rodrigues Filho.

A ABPv deixa os seus cumprimentos a todos os engenheiros e arquitetos no Brasil pela comemoração ao seu dia, 11 de dezembro. Uma data justa e que merece ser acolhida com louvor aos profissionais que cuidam de projetar e erguer a infraestrutura deste País.

E oportunamente, deseja a todos boas festas um ano de 2012 repleto de realizações, muita saúde e paz em nossos corações.

Revista PAVIMENTAÇÃO

Um sonho realizado

Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

Na segunda abordagem sobre os 5 anos da Revista PAVIMENTAÇÃO, trazemos à baila um aspecto desafiante que foi incorporado ao propósito desta publicação científica da ABPv: a questão ambiental. E no rol deste tema, sua expressão mais abrangente que se denomina “desenvolvimento sustentável”.

De fato, não é possível neste caminhar atual da humanidade qualquer área do saber avançar ao largo das questões relativas à preservação e manutenção do orbe. O tema ainda carece de definição que lhe formalize os novos tempos. Existem, nos temas ambientais, diferentes correntes, orientações e ideologias ambientalistas, e estas muitas vezes se confundem e nos confundem. Eis o desafio de caminhar *pari passu* com tais avanços.

O termo “desenvolvimento sustentável” foi consagrado e hoje, vê-se que foi adotado amplamente por instituições internacionais, governos e organizações comunitárias em todo o planeta. Pode-se afirmar que essa perspectiva do desenvolvimento sustentável é claramente antropocêntrica, isto é, direciona-se ao homem, seu propósito expressa a preocupação com o futuro das pessoas, e não da natureza em si mesma. Neste sentido, supõe-se que a natureza tenha limites, e que deve haver mecanismos de controle do progresso humano, o que implica erigir uma responsabilidade coletiva pelo uso dos recursos naturais. Assim, percebe-se que o desenvolvimento sustentável é uma ideologia, e permeia a seara dos valores e da ética.

A Revista PAVIMENTAÇÃO, premente a esta ideia de que é necessário atender às necessidades do presente sem comprometer a habilidade das gerações futuras nas suas demandas, tornou recorrente em suas edições a abordagem direta e indireta do



tema. E, com efeito, a engenharia há muito já vem buscando os mecanismos de menor interferência no meio ambiente, haja vista as pesquisas oriundas dos grandes centros de estudos e das melhores escolas no Brasil e no mundo cujos resultados são considerados por empresas e órgãos executivos, obviamente sob amparo e determinação legal.

Na edição de número 6 de 2007, as autoras Jacqueline Aparecida Marques e Elaine Carvalho Da Paz chamam a atenção para a possibilidade de diminuição do passivo ambiental ocasionado pelos pneus deixados à deriva das construções, principal responsável pela ocorrência de problemas de ordem sanitária e ambiental no artigo intitulado “Processos para reciclagem de pneus inservíveis”.

Na edição de número 08 do mesmo ano, uma reportagem especial abordou os danos causados pelo transporte de cargas perigosas nas rodovias. Uma situação recorrente nas estradas brasileiras que expõe a risco tanto a incolumidade pública quanto o meio ambiente circundante. O apelo se dirigia aos órgãos competentes para uma fiscalização dos itens de segurança no transporte das cargas, através da implementação de políticas públicas eficientes com abordagem educativa.

Nesta mesma temática, a edição de número 18, em 2010, apresentou o artigo das autoras Natália Magalhães Rosa Andrade e Maria Rachel Russo Seydell,

que versou sobre o transporte de cargas perigosas na malha rodoviária da região metropolitana de Campinas, SP.

Nas edições 13 e 14 de 2009, os autores Paulo Henrique Trombetta Zannin e Elaine Carvalho Da Paz explanam sobre a Avaliação do Impacto Ambiental Prévia: Poluição Sonora, onde é estudado em uma área de 20 quilômetros quadrados em Curitiba, a importância das medidas mitigadoras adotadas em fase de projeto. O mesmo tema foi abordado anteriormente ainda na edição de número 3 de 2006, pelas autoras Vânia Luzia do Espírito Santo Tizo Lao e Laura Maria Goretti da Motta no artigo intitulado “Efeitos do tipo de Revestimento de Pavimentos nos Ruídos Urbanos” e ainda na revista de número 10 de 2008 o trabalho “Avaliação Sonora de Pavimentos” do engenheiro José Luiz Lopes.

Nas revistas de números 11 e 12 de 2008, nas Notas Técnicas intituladas “Misturas Asfálticas Mornas”, de Luis Alberto H. do Nascimento, Marcos Chacur, Sergio Murilo e Laura M.^a Goretti da Motta, e “Aspectos de saúde, Meio Ambiente e Segurança (SMS) nas atividades do setor de asfalto” dos autores Margareth Cravo, Rosana Azevedo e Ronaldo Monteiro, são trabalhos que se complementam apontando a grande preocupação que estamos vivendo devido ao aquecimento global, alertando as cadeias produtivas quanto à necessidade da implantação de procedimentos SMS





no setor de pavimentação propondo soluções para o aquecimento do asfalto tais como misturas mornas.

No ano de 2010, na edição de número 16, a Revista trouxe em destaque na chamada de capa dois artigos científicos de temática ambiental. O primeiro deles abordava a gestão ambiental aplicada a projetos de engenharia. E nessa perspectiva, apresentava o estudo do caso da Rodovia BR-101 em seu trecho sul.

O artigo apontava para uma tendência de se considerar apenas as vantagens estratégicas do sistema de transportes para a sociedade, deixando de lado as diferentes interações dos modais de transporte com os meios físico e biótico. Atualmente, aponta o artigo, a consciência ambiental gerada ao longo dos anos faz com que hoje os sistemas de transportes sejam analisados à luz de uma problemática maior. A má conservação dos modais de transporte pode trazer prejuízos aos meios socioeconômicos, físico e biótico, da mesma forma que a implantação de sistemas ineficientes.

O trabalho das autoras Luiza Cantuaria Costa, Adriana Neves da Costa e Carla Franchini Martins explorou com propriedade os aspectos ambientais e seus impactos relacionados à implantação e operação de rodovias, bem como os dispositivos legais hoje requeridos e as vantagens associadas à concepção de projetos dentro da perspectiva de desenvolvimento sustentável.

O segundo artigo da edição de número 16 tinha

como título “Técnicas de reciclagem de pavimentos para minimizar os impactos ambientais nas obras rodoviárias no Brasil”. O autor Cláudio José Bandeira da Costa discorria que a necessidade de implantação de empreendimentos na área de engenharia e a constatação de sua viabilidade, segundo critérios técnicos e econômicos, sempre foram suficientes para a tomada de decisões nesta seara. Neste sentido, os danos ambientais decorrentes dessas atividades foram considerados por muitos anos uma consequência natural, compensados pelos benefícios oriundos da oferta de bens e serviços. Mas, o crescente impacto ambiental dessas atividades levou a sua regulamentação, destacando-se a obrigatoriedade do desenvolvimento de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e o respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). O gerenciamento ambiental das obras rodoviárias federais brasileiras tomou, então, grande impulso. O estudo teve como objetivo identificar as vantagens da aplicação de técnicas de reciclagem de pavimentos para minimizar os impactos ambientais.

O meio ambiente e o desenvolvimento sustentável tem sido temas constantes, em 2010 iniciou-se uma nova seção denominada Espaço Jurídico, onde o advogado Victor Athayde descreve de forma prática tudo de importante na Área de Direito Ambiental, outro avanço da Revista PAVIMENTAÇÃO. Na próxima edição, continuaremos falando sobre os 5 anos da Revista.

OPINIÃO

EDER GOMES VIANNA, diretor-presidente da ABEDA

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis.

Analisando a explicação vemos que o ser humano também cabe nesta e tal qual o pavimento é: rígido e flexível. Conviver em grupo torna-nos mais expostos e vulneráveis, mas cada dia mais pessoas sentem a necessidade de fazerem parte de coletivos e associações. A ABPV é uma prova disso. São 51 anos reunindo profissionais para intercâmbio de idéias e encontros. Um desses encontros aconteceu para a realização desta matéria.

Reunimos as opiniões de vários profissionais da área e seguimos nossa entrevista com o Sr. Eder Viana, do Rio de Janeiro da área administrativa e presidente da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (ABEDA) para um bate papo, nos comunicamos por email e como resultado temos um pequeno panorama da situação da pavimentação no Brasil.

Rosane Santiago

TEMPO E ORGANIZAÇÃO DO SETOR

Pavimentação: Há quanto tempo o senhor está neste mercado?

Eder Viana: Estou no mercado de asfaltos desde setembro de 1959, atuando na área comercial e administrativa (nunca atuei na área técnica).

Pavimentação: Historicamente como funciona a indústria de pavimentação? Quem o senhor citaria como fundamental para que estejamos na situação atual?

Eder Viana: A indústria da pavimentação asfáltica, em todo território nacional, funciona mediante a Contratação de Empreiteiras mediante Licitações Pú-



blicas. Em algumas cidades, eventualmente, algumas Prefeituras operam por administração direta. Mais recentemente contamos com as Concessões.

O asfalto é o mais nobre e democrático dentre todos os derivados do petróleo. Produto 100% reciclável, produz efeitos sociais, econômicos e de deslocamento mediante sua boa aplicação, entendendo-se como tal, a partir de projetos bem elaborados, com especial cuidado na base e sub base das rodovias, como também de seu revestimento e sinalização. Desta forma, quando a engenharia se propõe a executar todas as fases com qualidade e competência, ganha sempre o país como um todo e o contribuinte, individualmente. Em todos os tempos o Brasil contou com técnicos que deixaram suas marcas, posso citar aqui o Engenheiro Mello, Saul Birman, José Azevedo, entre outros.

A cadeia da pavimentação asfáltica no país, se inicia

nas REFINARIAS da PETROBRAS, que por monopólio de fato, produzem os asfaltos básicos, disponibilizados para as Distribuidoras autorizadas pela ANP para sua comercialização e modificações em seus terminais fábrica espalhados por todo território nacional, onde são produzidas emulsões asfálticas e asfaltos modificados por polímeros, produtos estes que, mediante uma bem aparelhada frota de veículos especializados, são entregues nos diversos canteiros de obras das Empreiteiras, onde são efetuadas as usinagens, Há de se destacar o controle tecnológico dos materiais, em laboratórios, além da utilização de equipamentos rodoviários. A fiscalização das obras cabe aos órgãos contratantes;

TECNOLOGIA

Pavimentação: Quais as mais recentes tecnologias que hoje envolvem o mercado de pavimentação? Qual o futuro destas tecnologias?

Eder Viana: Atualmente a utilização de asfaltos modificados por polímeros, pelas vantagens técnicas oferecidas, tem aumentado em nossas principais rodovias. Pelos resultados altamente oferecidos por estes produtos, comparativamente com os asfaltos tradicionais, bem como com a utilização exitosa por parte das Concessionárias, atentas a relação custo benefício, a expectativa é a de que estas tecnologias ganhem maior espaço no mercado.

O asfalto modificado com borracha de pneus, que muitos intitulam de asfalto ecológico, é mais um produto disponível para pavimentação rodoviária. Sua especificação em obras precisa ser bem avaliada, de forma a se levar em consideração os locais onde é recomendada sua utilização. Quanto à suposta preservação ambiental, é necessário avaliar cada situação.

PAC

Pavimentação: Com as obras por todo Brasil ocasionadas pelos PACs e grandes eventos internacio-

nais o senhor localiza muitas diferenças entre as diversas regiões? Como os Estados se comportam?

Eder Viana: É preciso entender o problema da infraestrutura no Brasil. Infelizmente, ainda não temos um projeto ou programa de país, mas programas de governo, o que, infelizmente, leva a eleição de regiões contempladas por motivos eleitoreiros. O PAC é um programa de governo, mas há de se reconhecer que em termos de utilização de materiais betuminosos, incrementou o seu consumo. Eventos como a Copa do Mundo e as Olimpíadas, pelas necessidades e exigências internacionais destes eventos, deverão nas regiões em que se realizarem estes eventos, ampliar o consumo de asfaltos.

CONDIÇÃO DAS ESTRADAS BRASILEIRAS

Pavimentação: Qual a verdadeira condição das estradas brasileiras?

Eder Viana: Infelizmente a rede rodoviária de estradas pavimentadas no Brasil é ainda insipiente. Tanto na área federal, como dos estados e prefeituras. Por falta de projetos executivos de qualidade, má fiscalização e até por fatores éticos, nossas estradas, comparadas com outros países ainda não ostentam o padrão de qualidade desejáveis. Há muito o que melhorar. Para tal, precisamos modificar totalmente o processo licitatório no país. A indústria rodoviária precisa ser tratada como tal. Ao contratar as obras por itens, perde-se na qualidade, encarecem-se os custos. A contratação a preço global, permitindo-se, se for o caso Consórcios, com bases sólidas, garantindo-se os recursos e, ao mesmo tempo o Contratado oferecendo seguro bancário (performance Bond), pode transformar para melhor o quadro de nossas rodovias.

MERCADO E TRABALHO

Pavimentação: Qual a sua opinião a respeito da falta e/ou qualificação dos profissionais no mercado da construção, enfocando aqui a área de pavimentação?

Eder Viana: Apesar de ainda não termos atingido um programa rodoviário que corresponda às necessidades do país, há que se reconhecer que no período de baixa produção, nada se fez para a preparação de mão de obra qualificada, tanto de nível básico, médio, como também técnico e universitário.

O maquinário para a engenharia rodoviária se atualizou, com produtos computadorizados. Hoje, a indústria rodoviária carece de profissionais capacitados. Atentos a essa constatação, a PETROBRAS, ABEDA e ANEOR, fundaram o INSTITUTO PAVIMENTAR, com a proposta de qualificar mão de obra de nível básico, em parceria com o SENAI. Visando a atualização de professores universitários que dirigem a cadeira de pavimentos flexíveis, a ABEDA e PETROBRAS criaram o PRÓ ASFALTO, uma proposta de reciclagem destes profissionais do ensino, com efeito multiplicador.

Pavimentação: Uma nova postura dos governos e das concessionárias poderiam melhorar a situação deste mercado?

Eder Viana: Precisamos que nosso país tenha uma visão global, maiúscula, traçando um programa de estado. Por maiores que sejam as reclamações dos usuários às Rodovias Concessionadas, sem dúvida esta proposta tem se mostrado eficaz, garantindo-nos estradas com maior conforto e segurança, só não sendo melhores pelos diversos embargos à Lei da Balança; Ao observarmos a carência setorial, a indústria da pavimentação tende a um crescimento maior que a de outros setores. Cada dia a frota de automóveis aumenta mais; caminhões com capacidade de peso maiores obrigarão a todos os envolvidos à efetivação de investimentos e pesquisa para atender estas demandas. A pergunta crucial é: Estarão os governos focados para estas necessidades ou continuarão tratando-a como votos em temporadas eleitorais?

PONTO DE ENCONTRO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA EM PAVIMENTAÇÃO E INFRAESTRUTURA VIÁRIA E RODOVIÁRIA

BRAZIL ROAD EXPO 2012

O EVENTO MAIS PROCURADO DO SETOR

02-04 ABRIL

EXPO CENTER NORTE
São Paulo - Brasil

Realização



GARANTA ESSA OPORTUNIDADE PARA A SUA EMPRESA
CONFIRME SUA PARTICIPAÇÃO HOJE MESMO
55 11 2925-3430
info@brazilroadexpo.com.br



Patrocínio



ASFALTOS

Apoio de Mídia



Cia Aérea Oficial



Apoio Oficial



www.brazilroadexpo.com.br

Seção de notas da Revista PAVIMENTAÇÃO

AASHTO elege novo presidente

A diretoria da AASHTO elegeu o diretor da Michigan Transportation Kirk Steudle presidente da associação para o próximo ano. O diretor da Rhode Island Transportation Michael Lewis foi eleito vice presidente. Steudle irá enfatizar a implementação de novas tecnologias de transporte para reduzir gastos e melhorar o sistema de transporte. Também irá apoiar uma lei de nova autorização no congresso, para medidas de investimentos na infraestrutura.



Radar holográfico tridimensional

Uma empresa da Grã-Bretanha planeja fornecer a aeroportos sistemas de radares iguais aos melhores óculos de leitura, que faz a distinção entre as hélices das turbinas eólicas e uma aeronave se deslocando nas proximidades.

A empresa Aveillant irá desenvolver um sistema de radar especialmente projetado para parques eólicos. Assim radares de aeroportos e militares terão uma imagem precisa da localização de aeronaves próximas a turbinas eólicas, disse o administrador do centro de tecnologia da Aveillant Gordon Oswald. Em adaptação, o radar holográfico tridimensional já é usado contra o terrorismo e em operações militares.

O equipamento que parece uma pequena casa seria instalado próximo a parques eólicos e ao invés de escanear o horizonte com um feixe estreito, o radar holográfico “visualiza em todas as direções ao mesmo tempo” coletando enorme número de dados que pode ser processado por computadores e enviados aos sistemas de radares de aeroportos dentro de segundos.



AfricaRoads 2012

O 6º evento anual AfricaRoads 2012 será realizado em Johannesburg na África do Sul de 28 de fevereiro a 2 de Março de 2012. A conferência abrirá oportunidades para investimento, financiamento e crescimento no setor de rodovias da África. Informações no sítio WWW.terrapinn.com/2012/africaroads.

XVI - CILA

De 20 a 25 de novembro foi realizada no Rio de Janeiro a 16ª edição do Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto - CILA, com aproximadamente 600 participantes de 25 países, 212 trabalhos técnicos, 9 palestras e 1 painel.

O XVI CILA homenageou três grandes profissionais da história da Pavimentação Brasileira, os quais foram integrantes e diretores da ABPv. Os três auditórios do evento receberam os nomes dos engenheiros Jorge Eduardo Salathé, Salomão Pinto e Humberto Santana.

Oportunamente, o secretário municipal Alexandre Pinto da Silva, ministrou uma palestra intitulada: Desafio da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro na Restauração e Implantação de Novas Vias Visando a Copa de 2014 e as Olimpíadas de 2016. O painel Panorama das Atualidades da Pavimentação Asfáltica teve a participação dos delegados do CILA de diversos países que fizeram uma análise do setor.



Engenheiras Laura Motta, Luciana Dantas e Engenheiro Dultevir Mello

Na quarta-feira (21/11) foi o dia da integração, um momento livre para que todos conhecessem as maravilhas da capital fluminense. A confraternização dos participantes foi selada em um jantar no Museu Histórico Nacional, um dos mais importantes do Brasil.



Gulf Traffic 2011

A Gulf Traffic irá realizar entre os dias 12 e 14 de dezembro de 2011 a conferência e exposição sobre infraestrutura

rodoviária, estacionamento e transporte público no Dubai International Exhibition Centre nos Emirados Árabes. Web: WWW.gulftraffic.com



Benefícios da sincronização de sinais

O programa de sincronização de sinais (TLSP na sigla em inglês) de Orange County na Califórnia foi projetado para melhorar a mobilidade e a qualidade total do motorista assim como reduzir o consumo de combustível e emissão de gases de efeito estufa. Com o aumento da velocidade e redução no tempo do percurso pela diminuição de paradas, o programa procurou reduzir a aceleração e a desaceleração ao longo da via, ações identificadas como a causa principal da produção de gases de efeito estufa.

Estudos conduzidos antes e depois do tempo de percurso em duas vias e durante vários períodos do dia mostraram que as paradas reduziram em 75% durante a manhã e tarde. A velocidade aumentou em 31% e, além disso, a emissão de gases de efeito estufa diminuiu em 7%. Sem falar na economia de 1.1 milhão de galões em três anos!

CURIOSIDADE

Centenário da faixa de sinalização tracejada

A Fundação Paul Mijksenaar, um grupo na Holanda especializada em projetos tais como sinalização de aeroportos e rodovias homenageou o pioneiro das estradas de Michigan Edward Hines por conceber a primeira faixa de sinalização tracejada do mundo. Falecido em 1938, era membro da comissão de estradas de Wayne County em 1911 quando teve a ideia de pintar uma linha branca no meio da River Road em Trenton para separar as direções do tráfego. O departamento de transporte de Michigan (MDOT na sigla em inglês) disse que Hines se inspirou ao ver o leite que vazava de uma carroça deixando um rastro branco na estrada empoeirada. "Linhas brancas no meio da estrada: O que poderia ser mais óbvio?" afirmou a fundação ao anunciar o prêmio. "E em 1911, para ser exato – uma ideia brilhante." O presidente do MDOT Kirk Steudle recebeu o prêmio em nome de Hines e afirmou que a faixa de sinalização é o artifício de segurança no tráfego mais importante na história do transporte automobilístico e que Edward Hines o criou lá mesmo, em Michigan.

Cursos da ABPv



Dimensionamento de Pavimentos de Concreto, Rio de Janeiro, RJ
Realizado de 3 a 7/10/2011



Drenagem Rodoviária - Diurno, Rio de Janeiro, RJ : Realizado de 22 a 24/11/11

Prático de Laboratório de Solos, Rio de Janeiro, RJ: Realizado de 19 a 22/09/2011



Discurso de Abertura – 17ª RPU – do Diretor Presidente da ABPv.

É com grande honra que a Associação Brasileira de Pavimentação retorna à cidade de Porto Alegre para a realização da 17ª Reunião de Pavimentação Urbana. Digo “retorna” porque esta é a segunda vez que a capital gaúcha abriga este importante evento, a primeira vez foi em 2002 por conta da 11ª RPU. E não somente! Outro grande evento realizado por nossa Associação é a RAPv – Reunião Anual de Pavimentação que teve duas edições, a 9ª e a 18ª, realizadas nestas terras do Sul, em 1968 e 1983, respectivamente.

A ABPv é gaúcha. Como também é fluminense, paulista, mineira, baiana, alagoana, cearense, sergipana, mato-grossense e todos os demais gentílicos dessa imensa pátria. Afinal, nossa Associação já é brasileira no nome.

Porto Alegre, conhecida e reconhecida por suas ruas e avenidas arborizadas, excelentes indicadores econômicos e sociais, vanguardista do Fórum Social Mundial e uma das cidades-sede da Copa do Mundo de 2014, abriga a partir de hoje até a próxima quinta-feira os profissionais, acadêmicos, empresários, gestores e autoridades reunidos em torno dos temas da engenharia de pavimentação.

Meus amigos, é necessário avançar com o pensamento em perspectiva. O Brasil se tona neste momento um verdadeiro canteiro de obras de infraestrutura para atender aos imperativos dos eventos esportivos mundiais que serão aqui realizados. Neste tempo de esforços contínuos é preciso que saibamos realizar com impecável competência os afazeres que consolidarão nosso país como uma nação organizada e desenvolvida. Não é utopia o que vos falo, tão pouco mora



Diretor-presidente da ABPv

na filosofia o meu ideal. Ele é possível, desde que nosso povo se dedique com ética, profissionalismo e empreendedorismo. Sem contudo, agredir o meio ambiente, que hoje nos importa preocupação quando em outros tempos idos o ignorávamos. Por isso é mister o conhecimento do impacto de nossas investidas de desenvolvimento.

Digo-lhes, senhoras e senhores, que todo este contexto é motivo de atenção da ABPv, expressando em tudo aquilo que ela promove, seja nos eventos, seja nos cursos, seja na Revista PAVIMENTAÇÃO.

A contribuição que cada um de vocês traz é de sublime valia. Pois a mais simples atenção é elemento fundamental para uma sociedade mais participativa. Os trabalhos técnicos são elementos primordiais para o avanço tecnológico, abrindo caminho para os avanços em todas as áreas do conhecimento humano. Os debates permitirão a troca de ideias e experiências de elevada monta para todos nós. Os expositores nos trazem o que de novo e melhor existe, pro-

porcionando um incremento nas técnicas ora aplicadas, o que resulta em uma melhoria sensível na qualidade do nosso trabalho.

Desejamos não apenas um encontro com trocas de experiência e integração, mas uma verdadeira fonte de conhecimento e solução eficazes. Assim é que acredito, estaremos oferecendo à sociedade o que temos de melhor: o compromisso com seu desenvolvimento, seja no que concerne ao econômico, técnico ou social. Em nossa área, qual seja, a Engenharia de Pavimentação, se faz necessário e urgente que o País melhore as vias de comunicação terrestre, melhore a mobilidade urbana, crie novas rodovias para atender a crescente demanda econômica e social, com segurança e eficácia, e promova a necessária manutenção de toda malha viária.

Agradeço a todos os presentes, particularizando as autoridades locais (Governo Estadual e Prefeitura) pelo acolhimento, ao comitê organizador, aos nossos patrocinadores, apoiadores e a todos os participantes que se deslocaram de seus Estados para nos prestigiar. Temos a certeza de que nos anais desta 17ª RPU serão escritos com cores fortes a expressão de produtividade e sucesso do nosso encontro.

Valorizem os trabalhos técnicos, participem com questionamentos, interajam com os colegas, prestigiem os nossos expositores e patrocinadores, divulguem a Revista PAVIMENTAÇÃO que receberam em mãos, visitem o stand da ABPv e acreditem: juntos podemos mais; porém, juntos e determinados podemos muito mais ainda!

Muito obrigado a todos.

17ª RPU – Porto Alegre

Reunião de Pavimentação Urbana movimentou a agenda de outubro

Fotos: Cirineu Brauner



Painel: Diego Casagrande, Jeanette H. Lontra, Luís Carlos Bueno, José Pedro Costa, Jair Fernando Ninho, Eduardo Ricci

Entre os dias 18 e 20 de outubro foi realizada na capital gaúcha a 17ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana, que reuniu profissionais, autoridades públicas, acadêmicos e empresários do setor de infraestrutura rodoviária do Brasil e do exterior.

O evento ocorreu no Centro de Eventos do Hotel Plaza São Rafael, e foi realizado pela ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação, em parceria com a Secretaria Municipal de Obras e Viação – SMOV/PMPA, da Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

Os trabalhos tiveram início da manhã do dia 18 com sessão técnica, palestras e painel. O tema de destaque foi o Financiamento a Municípios, cujo debate contou com a presença de Jeanette H. Lontra – supervisora de Operações do setor Público BADESUL, Jair Fernando



Cássio Torgildo, Maurício Dieziedrich, prefeito José Fortunatti, José Pedro Costa

Ninho – coordenador de Sustentação ao Negócio CEF, Luis Carlos Bueno – secretário Nacional de Transportes e da Mobilidade Urbana, José Pedro dos Santos Vieira

Costa diretor-presidente da ABPv e Eduardo Alberto Ricci, diretor vice-presidente da ABPv. A moderação foi do jornalista Diego Casagrande.

A solenidade de abertura aconteceu às 19 horas com as seguintes autoridades: José Pedro dos Santos Vieira Costa, diretor-presidente da ABPv, Cássio Torgildo, secretário municipal de obras e viação, Maurício Dieziedrich secretário de Estado de economia solidária e apoio a micro e pequena empresa e José Fortunatti, prefeito de Porto Alegre. Foram destacadas as presenças do vereador de Porto Alegre Nelcir Tessaro, do prefeito da cidade de Canela, Constantino Orzolin, do diretor técnico da Carris Vital, Pedro Abreu, do presidente da SERGS, Sérgio Luiz Duarte Zimmermann, do presidente da SICEPOT, Nelson Sperb, e do presidente da AREOP Athos Cordeiro. Em seguida houve a execução dos hinos Nacional e do Rio Grande do Sul, interpretados pela cantora Fátima Gimenez.



Engenheiros Sundaram Logaraj e José Cedeval Bozze



Cantora Fátima Gimenez

Na abertura oficial da feira vários expositores receberam o público com seus produtos e serviços, como a Akzo Nobel, Conterra, SMOV, LINTEC, Tichel, Aco, Equipavi, Revista VOTO, Secretaria de Turismo de Porto Alegre, Ciber, ABPv, Terex, ABCP, Lenc, Fremix, Maccaferri, Brazil Road Expo 2012, Betunel, Asfaltec e Pesa - Paraná Equipamentos S.A.

Ao longo dos três dias de evento, temas relevantes e atuais foram abordados por importantes nomes da engenharia brasileira **(Veja boxe)**.

Um tema de destaque foi “O Código Florestal no Tocante à Área Urbana”, palestra proferida pelo deputado federal, José Aldo Rebelo Figueiredo, relator do Novo Código Florestal brasileiro, hoje,



Ministro dos Esportes, deputado federal Aldo Rebelo

Ministro dos Esportes. O deputado, que também é jornalista, abordou a preocupação que hoje se faz necessária na área ambiental e seus entraves a qualquer obra de grande vulto como é o caso das vias e rodovias.

A RPU é um dos dois grandes eventos realizados anualmente pela ABPv. Configura-se como uma excelente oportunidade de interação, troca de experiências entre profissionais, acadêmicos e empresários, permitindo assim a movimentação de toda a cadeia produtiva. Dessa forma, a ABPv cumpre sua função social de promoção do conhecimento, incentivo à pesquisa e transferência de tecnologia.

Na quarta-feira um jantar no Galpão Crioulo, tradicional churrascaria com dança típica, selou a confraternização do encontro.



Stands durante o evento

Galpão Crioulo – Dançarinos



Palestras

Gerência de Pavimentos e Revitalização de Vias no Município de POA
Márcia Rodrigues Dias – SMOV/PMPA

A Mobilidade Urbana versus Execução de Obras Viárias
Carlos Pires – EPTC

Programa Asfalto Liso Implantado na Cidade do Rio de Janeiro
Eng. Celso Ramos – Coordenador da Comissão de Asfalto – IBP

O Planejamento do Ministério no Tocate aos Transportes Urbanos
Luís Carlos Bueno – Secretário Nacional de Transportes e da Mobilidade Urbana – Ministério das Cidades

A Pavimentação Urbana em Concreto no Brasil
Eng. Ronaldo Vizzoni – ABCP

Reciclagem de Material Fresado
Eng. Valmir Bonfim – Grupo ANE - Fremix

O Código Florestal no Tocante à Área Urbana”
Dep. Fed. Aldo Rebelo Figueiredo

Misturas Mornas em Pavimentos Asfálticos
Eng. Sundaram Logaraj – AKZO NOBEL

Reciclagem de Pavimentos Flexíveis e Pavimentos de Concreto na Guatemala
Eng. William Olivero – Guatemala – ABCP

Reaterro de Valas de Redes Subterrâneas – Conflitos e Processos
Eng. Cristiano Costa Moreira – ABPv / SOLOCAP

Treinamento dos Operadores – O Investimento com o Melhor Retorno
Eng. Fred B. Rio – CATERPILLAR / EUA

Programa de Reabilitação de Pavimentos Urbanos com Financiamentos Externos
Eng. Marcilio Augusto Neves – Consultor em Financiamentos Externos

Asfalto Natural como Modificador de Ligantes Asfáltico
Eng. Osvaldo Tuchumantel Junior – BETUNEL

Gestão de Pavimentação Asfáltica e Malhas Viárias Urbanas
Eng. Jorge Augusto Pereira Ceratti – UFRGS

A Engenharia e Análise de Valor Aplicada ao Setor de Infraestrutura de Transportes no Brasil – Uma década de resultados
Eng. Danilo Pitta e Eng. Marcos Augusto Jabor

A Importância do Banco de Projetos para os Municípios
Eng. Jorge Hori – SINAENCO

O evento encerrou-se na tarde de quinta-feira, dia 20, com o público total de 468 participantes que puderam conferir 17 palestras, 1 painel, 24 papers e 32 artigos técnicos distribuídos em 7 sessões técnicas. O diretor-presidente da ABPv, Eng. José Pedro dos Santos Vieira Costa, na sua fala de encerramento agradeceu a todos que colaboraram em maior ou menor grau para o sucesso do evento (**Ver boxe**).



Roberto Lage, João Vicente, Georgina Libório, João Menescal Fabrício e Terezinha Dias

Agradecimentos

1- Comissão Organizadora 17ª RPU

Eng. Adriano Gularte – SMOV/PMPA
 Prof. Eng. Jorge Augusto Ceratti – UFRGS
 Eng.ª Bibiana Fogaça -DAER
 Eng. Emídio Marques Ferreira – CREA/RS
 Eng.ª Márcia Rodrigues Dias – SMOV/PMPA
 Eng.ª Maria Cristina Ferreira Passos - DAER
 Eng. Fernando Druck – ABCP/RS
 Eng. Caetano Alfredo Silva Pinheiro – SINCEPOT/RS

2- Patrocinadores:

Akzo Nobel Ltda – Divisão Química, Ciber Equipamentos Rodoviários, Pesa - Paraná Equipamentos, Terex Cifali Equipamentos, ABCP, ABCR e Pavesys Engenharia de Pavimentos.

3- Apoiadores:

Diversas instituições, empresas e órgãos de classe deram apoio ao evento, como a ABNT, CREA-RS, SENGE-RS, FAMURS, SICEPOT-RS, SOCIEDADE DE ENGENHARIA DO RS, SOLOTEST, SINAENCO-RS, MARCÍLIO ENGENHARIA e SOLOCAP.



José Pedro Costa, Adriano Goularte, Márcia R. Dias e Fernando Druck - Diretor Presidente e Comissão Organizadora

4- Expositores:

A Akzo Nobel, Conterra, SMOV, LINTEC, Tichel, Aco, Equipavi, Revista VOTO, Secretaria de Turismo de Porto Alegre, Ciber, ABPv, Terex, ABCP, Lenc, Fremix, Maccaferri, Brazil Road Expo 2012, Betunel, Asfaltec e Pesa - Paraná Equipamentos S.A.

E também agradeceu aos realizadores e participantes, convidando a todos para a próxima RPU, edição de nº 18, que será realizada de 18 a 20 de junho de 2012, em São Luís, no Maranhão, ano em que a cidade completará 400 anos de fundação. E, por consequin-

te, o convite estendeu-se para a 41ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, que no ano de 2012 acontecerá em Fortaleza - CE, entre os dias 3 e 5 de outubro, juntamente com a EXPO PAVIMENTAÇÃO - Feira de Materiais e Equipamentos para Pavimentação.

O Processo Administrativo Minerário: Guia de Utilização



Victor Athayde*

A presente coluna vem trazendo, sistematicamente, considerações acerca do Direito do Meio Ambiente e as atividades relacionadas com a pavimentação.

Como se deve ter notado, e isso é uma constatação que decorre da simples leitura da Constituição Federal (§1º, do art. 225 – texto que recomendo a leitura), falar de Direito ao Meio Ambiente é, além do seu conceito ontológico, é analisar o trato com a Administração Pública.

Seja no exercício do poder de polícia preventivo (o licenciamento ambiental); seja no repressivo (aplicação de penalidades, tais como multas; embargos; interdições, por exemplo), estaremos sempre nos referindo na relação Administrador Público e Administrado.

Aliás, é curioso notar que, nesse tema o “Administrado” pode ser a própria “Administração Pública”, por mais paradoxal que isso possa parecer.

Ora, isso acontece frequentemente no licenciamento ambiental das atividades de pavimentação, pois é certo que os Entes Federativos (União; Estados

e Municípios) tenham que licenciar suas rodovias; aeroportos; portos; usinas e etc.

Nesse caso, o Poder Público está requerendo ato a ser concedido por outro órgão da Administração, por exemplo, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT, ao licenciar uma rodovia que atravesse dois ou mais estados da Federação, deve fazê-lo junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA.

Esse singelo exemplo dá conta da dimensão dessa intersecção entre disciplinas do Direito.

Mas não é só, há casos em que o Direito Administrativo e Ambiental se deparam com outras questões; de outra natureza jurídica, como por exemplo, com o Direito Minerário, por isso, fundamental abordar o tema nesta oportunidade.

Em breves palavras, e já trazendo mais ramos do Direito para a discussão, deve-se esclarecer que o Direito de Propriedade (relacionado ao Direito Civil e Constitucional) sobre um bem imóvel é meramente superficial.

Isso quer dizer que o proprietário exerce seu direito somente sobre a superfície, uma vez que o subsolo é de propriedade da União (art. 20, IX da Constituição Federal).

Por isso, exploração (econômica ou não) do subsolo somente se dá, com a anuência da União Federal.

Nesse caso, o órgão que gere tais recursos minerais é o Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM, que é uma autarquia federal, vinculada ao Ministério de Minas e Energia.

* Advogado militante na Área de Direito Ambiental, Sócio-Diretor do escritório David & Athayde Advogados (www.da.adv.br), Professor de Pós-Graduação em Perícia Ambiental Judicial, ex-Assessor Jurídico do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo - IEMA, idealizador do Blog www.direitodomeioambiente.blogspot.com/ email: victor@da.adv.br

Pois bem, é certo que a pavimentação, a atividade minerária e o produto da mineração são indissociáveis. Não existe pavimentação (e muitas outros empreendimentos) sem a matéria prima mineral.

Pode afirmar, categoricamente, por isso, que a atividade de pavimentação pode ser afetada pelo trâmite do processo de concessão do Direito Minerário. Isso é um fato.

Pois bem, se se for analisar a norma, o procedimento para a obtenção da autorização para lavrar o mineral pretendido, seria algo sem maiores complexidades. Seria...

Em muitos estados da federação, o atendimento aos prazos legais, por parte do DNPM, não é feito, por carências de aparelhamento ou de pessoal. O minerador requer a concessão de lavra, mas não obtém o título autorizativo em tempo legal e nem mesmo razoável.

A análise de projetos e relatórios é lenta e o empreendimento que depende da substância mineral, no caso desses depender de uma extração específica, pode ter que ficar paralisado até a emissão do título autorizativo.

Para compor esse quadro, o próprio Código de Mineração (Decreto-Lei Nº 227, de 28 de fevereiro de 1967), no parágrafo 2º. do artigo 22 já admitia, "em caráter excepcional, a extração de substâncias minerais em área titulada, antes da outorga da concessão de lavra, mediante prévia autorização do D.N.P.M., observada a legislação ambiental pertinente."

Note, caro leitor, que se faz alusão, na própria legislação mineraria, à norma ambiental. Isso evidencia ainda mais o caráter multidisciplinar do assunto¹.

Voltando ao ponto em debate, viu-se na transcrição supra que há a possibilidade de se explorar o bem mineral antes mesmo da concessão definitiva do título minerário.

O Ato que permite tal feito é denominado Guia de Utilização, e a sua concessão está regida pela Portaria Nº 367, de 27/08/2003, publicada no Diário Oficial da União de 04/09/2003.

Lá, descreve-se todo o trâmite e momento processual para se obtê-la, sem dúvida, é um importante instrumento que facilita a vida do minerador.

Destaca-se que a norma impõe limites objetivos para a exploração mineral fundamentada em Guia de Utilização, como o tempo de vigência e o volume a ser extraído².

Ocorre que instrumento que outrora foi uma excepcionalidade, hoje em dia, é uma regra.

Por isso, ainda que tenha vindo ao mundo jurídico para facilitar a vida do minerador, a sua emissão tem sido tão complexa quanto a do ato final do processo de concessão mineral, a portaria de lavra.

Assim, o procedimento de obtenção do Direito de Minerar continua a comprometer os empreendimentos que dele dependem.

Diante do quadro, advertimos que há solução, existe remédio processual para que se sane a demora do Poder Público e, através do Judiciário, se determine o cumprimento dos prazos legais.

Essa caminho, desde que o Minerador tenha cumprido as exigência anteriormente formuladas, tem sido efetivo, no mínimo pra que o órgão analise os requerimentos pendentes e impulse o procedimento para mais próximo de sua conclusão.

¹Com efeito, as Resoluções CONAMA nos. 009/1990 e 010/1990 tratam especificamente da interface em ter o licenciamento ambiental da atividade mineraria e obtenção do respectivo direito ao bem mineral.

² É fundamental lembrar que a extração de substância mineral sem a autorização devida é considerado crime de usurpação de bem público, (art. 2º da Lei nº 8.176/91) e também uma infração ambiental, pois geralmente se trata de uma extração sem a devida licença ambiental art. 55, Lei nº 9.605/98). Nesse caso, descreveu-se uma lavra clandestina, que não ser confundida com a lavra ambiciosa, que é a "conduzida sem observância do plano preestabelecido, ou efetuada de modo a impossibilitar o ulterior aproveitamento econômico da jazida" (art. 48 do Código de Mineração em vigor)..

Este espaço destina-se à publicação de artigos encaminhados à Revista pelos profissionais que se dispõem a colaborar promovendo com os demais técnicos o debate de diversos temas atuais e relevantes. Os artigos devem ser enviados para redacao@revistapavimentacao.org.br 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.

Nanotecnologia aplicada à pavimentação: Peças pré-moldadas de concreto fotocatalíticas para purificação do ar

João Victor Staub de Melo

Doutorando em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, victor@ecv.ufsc.br

Glicério Trichês

Professor Doutor da Universidade Federal de Santa Catarina, ecv1gtri@ecv.ufsc.br

Joe Villena

Doutorando em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, villena@ecv.ufsc.br

Ramon Knabben

Mestrando em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, ramonk@pop.com.br

RESUMO

Atualmente um dos grandes responsáveis pela falta de qualidade do ar nas metrópoles são os óxidos de nitrogênio (NOx). Uma abordagem promissora para contribuir com a minimização das elevadas concentrações deste poluente é a conversão fotoquímica dos NOx em íons de nitratos (NO₃⁻), a partir da fotocatalise heterogênea, utilizando semicondutores como o dióxido de titânio (TiO₂). Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa sobre a nano modificação da superfície de peças pré-moldadas de concreto (PPC) para pavimentação, com o objetivo da purificação do ar em grandes metrópoles a partir da degradação dos NOx. Para tanto, foram produzidas PPCs com superfície fotocatalítica através da incorporação de dióxido de titânio. Foram testadas 3 espessuras de camada de argamassa fotocatalítica (3, 6 e 10 mm), dois tipos de TiO₂ (rutilo e anatase) e 3 porcentagens de TiO₂ incorporado (3, 6 e 10%) em relação ao peso de cimento Portland. Para quantificar e avaliar a eficiência das PPCs na degradação dos NOx, um reator de teste foi desenvolvido. Neste reator, as peças fo-

tocatalíticas e de referência foram submetidas a um procedimento de ensaio sob condições controladas de concentração de poluente, umidade relativa do ar, radiação UV-A e taxa de fluxo, simulando dessa forma uma atmosfera poluída. Os resultados experimentais apontam uma grande eficiência das peças fotocatalíticas na degradação dos NOx, podendo alcançar sob determinadas condições uma taxa de conversão do poluente (NOx) de até 95%. Observou-se também que as peças com superfícies mais rugosas apresentaram melhores resultados na taxa de degradação dos NOx. Desta mesma maneira, os aumentos do teor de TiO₂ podem agregar melhor eficiência da peça. Pode-se concluir que a pavimentação com PPCs fotocatalíticas é uma relevante tecnologia para contribuir com a minimização dos NOx na atmosfera.

PALAVRA-CHAVE: Peças Pré-Moldadas de Concreto; Nanotecnologia; Dióxido de Titânio; Fotocatalise Heterogênea; Purificação do Ar.

1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar causada pelo desenvolvimento urbano se tornou uma grande preocupação em todo planeta, originando uma série de programas e regulamentos a serem implementados para reduzi-la. Dentre as substâncias causadoras da poluição atmosférica, se destacam como resultado da combustão em centrais elétricas e veículos, os óxidos de nitrogênio (NOx). Durante o processo de combustão, temperaturas altas ativam a reação entre o nitrogênio (N₂) e o oxigênio (O₂) provenientes do ambiente, formando monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) (FREEDMAN, 1995).

O aumento da emissão de gases como os óxidos de nitrogênio (NOx) pode causar chuva ácida, ozônio ao nível do solo (troposférico) além de contribuir com o aquecimento global. Ressalta-se também que o NOx na atmosfera é de grande preocupação, pois a exposição em longo prazo pode causar agravos à saúde humana. Este problema se intensifica nas metrópoles onde se tem grande concentração destes gases (LEITE et al., 2008).

Conforme Prodesp (2010), a deterioração da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo-SP/Brasil (RMSP) é decorrente das emissões atmosféricas de cerca de 2000 indústrias de alto potencial poluidor e da frota registrada de aproximadamente 9,7 milhões de veículos. De acordo com as estimativas de 2009, essas fontes de poluição são responsáveis pela emissão para a atmosfera de 376,3 mil t/ano de NOx. Desse total, os veículos são responsáveis por 96% das emissões (CETESB, 2009).

Para Bergin et al. (1998), estudos têm mostrado que em muitas áreas do mundo o padrão do qualidade de ar com relação ao ozônio não pode ser alcançado sem uma significativa redução das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis (COVs).

Atualmente um dos métodos mais estudados para o combate da poluição do ar em grandes cidades (Omia, Bruxelas, Antwerpia, Paris, Bergamo, Hong Kong, entre outras) é a oxidação fotocatalítica avançada que utiliza semicondutores. Pode-se citar como semicondutores inorgânicos o dióxido de titânio (TiO₂), o óxido de zinco (ZnO), o sulfeto de cádmio (CdS), entre outros (CHEN e POON, 2009).

Estudos demonstram que a incorporação de dióxido de titânio (TiO₂) em argamassas e a aplicação dessa na superfície de peças pré-moldadas de concreto (PPC) para pavimentação é uma tecnologia promissora para

a fotodegradação dos óxidos de nitrogênio (NOx), contribuindo para redução da poluição ambiental (HÜSKEN et al., 2009; BEELDENS, 2008).

O princípio de funcionamento do processo de degradação dos NOx envolve a ativação de um semicondutor (por ex. TiO₂) por luz solar ou artificial. O semicondutor é caracterizado por banda de valência (BV) e banda de condução (BC) sendo a região entre elas chamada de "bandgap". Uma representação esquemática da partícula de um semicondutor é mostrada na Figura 1.

Pode-se observar na Figura 1, que a absorção de fótons (hv) com energia superior à energia de "bandgap" resulta na promoção de um elétron (e⁻) da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC) com geração concomitante de uma lacuna (h⁺) na banda de valência (equação 1). Esta lacuna mostra potenciais bastante positivos, na faixa de +2,0 a +3,5 Volts. Este potencial é suficientemente positivo para gerar radicais hidroxilas (•OH) a partir de moléculas de água adsorvidas na superfície do semicondutor (equações 2 e 3). Estes radicais podem, subseqüentemente, oxidar contaminantes (DAVAHASDIN et al., 2003).

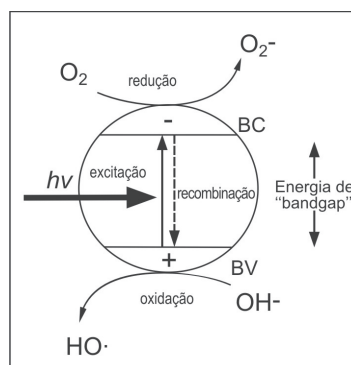
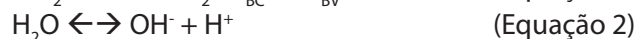
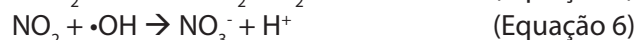
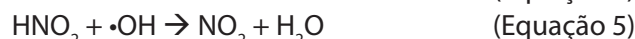


Figura 1 - Fotocatálise Heterogênea: Partícula do Semicondutor (LACEY e SCHIRMER, 2008).



A série de reações químicas para degradação dos NOx pelos radicais hidroxilas (•OH) produzidos, pode ser verificada pelas equações de 4 a 6:



O produto da reação de degradação dos óxidos de nitrogênio são íons de nitrato (NO_3^-) (equação 6). A remoção dos produtos da reação na superfície, sob condições práticas, é realizada pela chuva já que estes são solubilizados (neutralizados) em meio aquoso. Deste modo, todo o processo de remoção do poluente se dá por energia natural.

Este artigo apresenta os resultados de uma pesquisa sobre a eficiência da nano modificação com TiO_2 da superfície de peças pré-moldadas de concreto (PPC) para pavimentação, com o objetivo da purificação do ar em grandes cidades a partir da degradação dos NO_x através da fotocatalise heterogênea.

2 METODOLOGIA E MATERIAIS

2.1 Materiais Utilizados na Pesquisa

Para a produção das PPCs foi utilizado o cimento Portland Composto com Pozolana - CP II Z 32, com massa específica de $2,97 \text{ g/cm}^3$. Como catalisador utilizou-se dois tipos de dióxido de titânio (TiO_2) nanométrico: um na forma anatase esférica (diâmetro entre 10-30 nm com 99% de pureza) com uma superfície específica entre 200-220 m^2/g e densidade real de $3,9 \text{ g/cm}^3$; e outro, na forma rutilo em barra (diâmetro de 10 nm e comprimento de 40 nm com 98% de pureza) com superfície específica de 150 m^2/g e densidade real de $4,23 \text{ g/cm}^3$. A estrutura cristalina da anatase e do rutilo pode ser observada conforme as difrações de raios-x das Figuras 2 e 3.

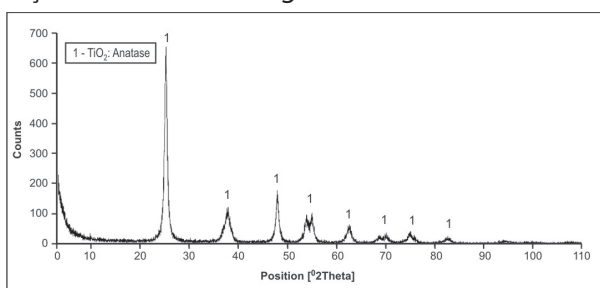


Figura 2 - Difração de Raios-x da Anatase (10-30 nm).

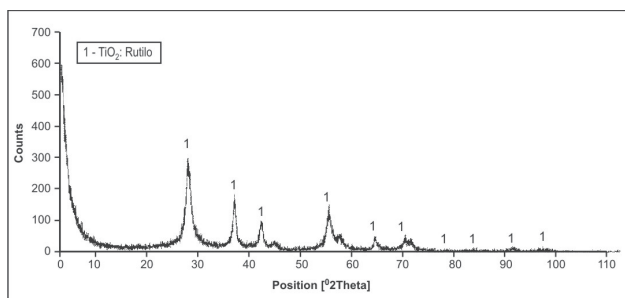


Figura 3 - Difração de Raios-x do Rutilo (10x40 nm).

Para a produção das peças pré-moldadas de concreto foi utilizado como agregado um pedrisco de origem granítica. A Figura 4 apresenta a granulometria do pedrisco e a curva teórica Fuller de máxima densificação ($n = 0,45$) para $D_{\text{máx}} = 9,5 \text{ mm}$. Em síntese, percebe-se que o pedrisco apresenta uma boa distribuição granulométrica, com grande proximidade da curva teórica de máxima densificação.

Ainda, na Figura 4, é apresentada a granulometria para a argamassa fotocatalítica (camada superficial das PPCs fotocatalíticas), sendo esta granulometria a do pedrisco passante na peneira nº 4 (4,8 mm). A parte mais graúda da granulometria foi retirada para possibilitar a aplicação de uma espessura de argamassa fotocatalítica de 3 mm sobre as PPCs.

O pedrisco apresenta as seguintes características físicas: material pulverulento de 7,79%; massa específica aparente do agregado saturado superfície seca de $2,64 \text{ kg/dm}^3$; massa unitária solta do agregado seco de $1,53 \text{ kg/dm}^3$; módulo de finura de 3,57 e diâmetro máximo de 9,5 mm.

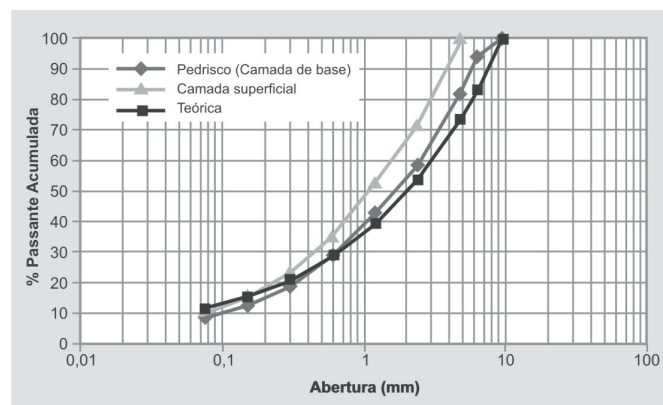


Figura 4 - Granulometria Teórica, do Pedrisco e da Argamassa Fotocatalítica (Camada Superficial).

2.2 Fotoreator Para Medição da Atividade Fotocatalítica

Para quantificar e obter valores confiáveis das peças fotocatalíticas na degradação dos NO_x , assim como estabelecer condições experimentais próximas aos parâmetros de campo, foi desenvolvido um fotoreator para verificação da atividade fotocatalítica conforme ilustrado na Figura 5. Detalhes do funcionamento do fotoreator podem ser obtidos em www.rodoviasverdes.ufsc.br

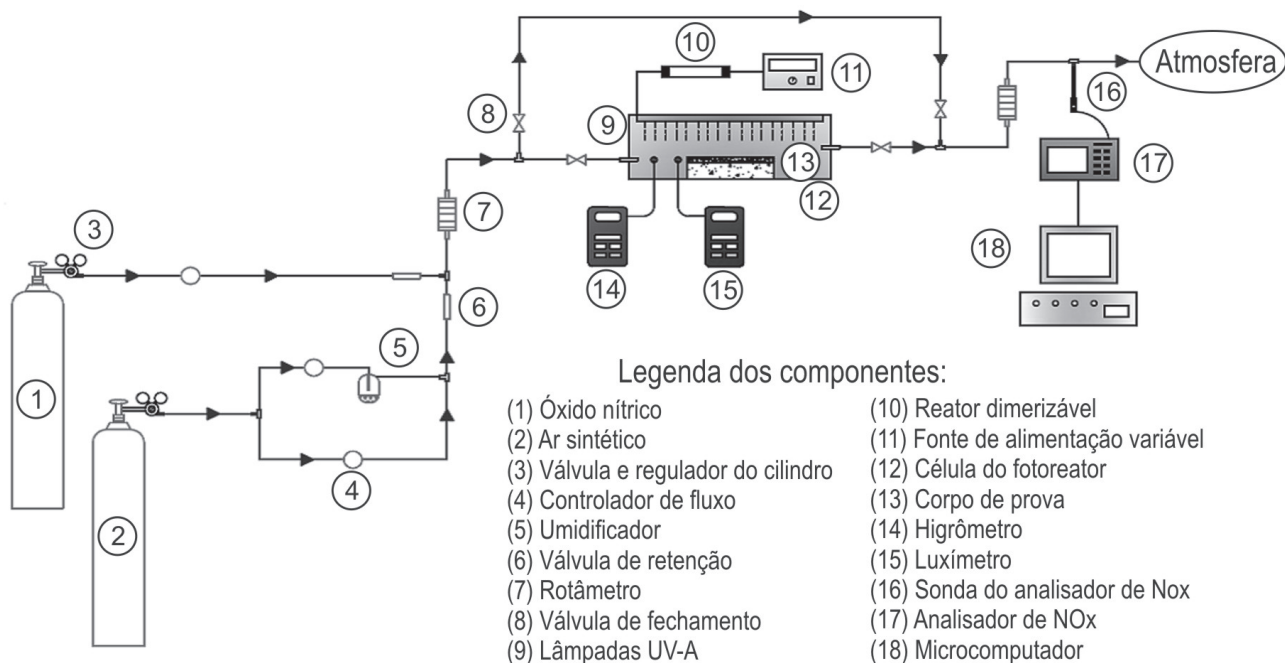


Figura 5 - Fotoreator Para Medição da Atividade Fotocatalítica.

O procedimento de ensaio para a avaliação fotocatalítica das PPCs na degradação de NOx foi conduzido da seguinte forma: Inicialmente foi realizada a calibração do sistema para as condições de ensaio desejadas, em termos de concentração inicial de poluente (ppmv), umidade relativa do ar (%), taxa de fluxo (l/min) e radiação UV-A (W/m^2).

As condições de teste definidas para este estudo foram: taxa de fluxo de 1 litro/min; radiação UV-A de $10 \pm 2 W/m^2$; umidade relativa do ar de $50 \pm 5\%$; concentração de poluente (NOx) de 20 ppmv e tempo de ensaio de 40 minutos.

Os valores de radiação UV-A, taxa de fluxo e umidade relativa do ar definidos para o ensaio, foram determinados em função de um tratamento estatístico dos dados climáticos do ano de 2008 no estado de São Paulo-SP/Brasil (CETESB, 2008). A radiação UV-A refere-se ao menor valor que pode ocorrer com 95% de confiança (levando em consideração todas as estações do ano e dias ensolarados, nebulosos e chuvosos). A umidade relativa do ar é a média das umidades diárias (às 15h00) desde maio a setembro de 2008 no município de São Paulo-SP/Brasil. A taxa de fluxo está relacionada à média da velocidade dos ventos na RMSP no ano de 2008.

Após os ajustes dos parâmetros que reproduzem um ambiente poluído, o ensaio é iniciado. Ele consiste na exposição das peças a um ambiente poluído no interior

do fotoreator por 40 min (vide Figura 8, sobre condução do ensaio).

2.3 Produção das Peças Pré-Moldadas de Concreto Fotocatalíticas

As PPCs foram moldadas em dupla camada, a camada superior em argamassa fotocatalítica e a inferior (base) em concreto convencional. No processo de moldagem, inicialmente compactava-se a camada de base e depois a camada superficial fotocatalítica. Em seguida, era realizada a compactação final em prensa hidráulica tornando as duas camadas solidárias e formando uma peça monolítica com massa específica controlada de $2,319 g/cm^3$. Os quantitativos foram proporcionados de maneira a se obter uma resistência à compressão simples de 35 MPa. Desta forma, definiu-se o traço em 1:3,5 (cimento:agregado); fator água/cimento de 0,405 e massa específica de $2,319 g/cm^3$. A argamassa fotocatalítica por ser produzida com uma granulometria mais fina e com incorporação de TiO_2 apresentou uma redução na resistência à compressão de 6% com 10% de adição de rutilo ($15 \times 40 nm$) e 15% com 10% de incorporação de anatase ($10-30 nm$).

A Figura 6 mostra uma das peças produzidas. A tabela 1 apresenta o fatorial das peças moldadas, onde para cada mistura foram produzidas três peças ($20 \times 10 \times 6 cm$). O teor de dióxido de titânio incorporado é em relação

ao peso de cimento Portland. Também foram moldadas três PPCs de referência, sem camada fotocatalítica.



Figura 6 - PPC Fotocatalítica (20x10x6 cm).

Tabela 1 - PPCs Fotocatalíticas Produzidas.

Tipo de TiO ₂	Espessura da Argamassa	Teor de TiO ₂	Mistura
Grupo 1: Rutilo	3 mm	3 %	RT3E3
		6 %	RT6E3
		10 %	RT10E3
	6 mm	3 %	RT3E6
		6 %	RT6E6
		10 %	RT10E6
	10 mm	3 %	RT3E10
		6 %	RT6E10
		10 %	RT10E10
Grupo 2: Anatase	3 mm	3 %	AT3E3
		6 %	AT6E3
		10 %	AT10E3
	10 mm	10 %	AT10E10

Para avaliar a textura da superfície das PPCs fotocatalíticas, foram realizadas medidas da altura da macrotextura através do ensaio de mancha de areia (HS) segundo a norma ASTM E-965 96 (2006).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Textura Superficial das PPCs Fotocatalíticas

A tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de mancha de areia das PPCs (média das três peças). Conforme as classes definidas pela ABPv (1999), as PPCs fotocatalíticas com 6 e 10 mm de espessura apresentam uma textura fechada. Já as PPCs com camada superficial de 3 mm de espessura se enquadraram em uma textura média. Pode-se observar, ainda, que a PPC de referência (camada de base) apresenta uma textura superficial aberta.

Durante o processo de moldagem das PPCs, observou-se que com os aumentos da espessura da argamassa fotocatalítica, a superfície das peças apresentavam uma textura superficial mais fechada. Como ilustrado na Figura 4, a granulometria definida para a camada de

base das PPCs era mais graúda que da camada superficial. Observou-se durante o processo de moldagem das peças com camada fotocatalítica de 3 mm, que esta espessura de argamassa não era suficiente para alterar totalmente a textura da camada de base da peça. Assim, ao final da compactação da PPC a textura final da peça herdava algumas características da textura da camada de base. Porém, para as peças com 6 e 10 mm, ao final da compactação, as peças apresentavam uma textura no domínio da granulometria da camada superficial, isto é, com uma textura muito mais fechada.

Tabela 2 - Resultados Médios do Ensaio de Mancha de Areia.

% Rutilo (TiO ₂)	Espessura (mm)	HS Média (mm)	Classificação ABPv (1999)
3	3	0,486	Média
	6	0,301	Fechada
	10	0,249	Fechada
6	3	0,453	Média
	6	0,301	Fechada
	10	0,263	Fechada
10	3	0,428	Média
	6	0,322	Fechada
	10	0,216	Fechada
PPC Referência Camada de Base	-	0,814	Aberta

3.2 Avaliação da Degradação dos NOx

O ensaio de degradação dos óxidos de Nitrogênio (NOx) foi executado com as três peças moldadas de cada série, simultaneamente, totalizando uma área efetiva de 600 cm² (3x200 cm²).

A incidência da radiação UV-A no interior do fotoreator é apresentada na Figura 7. Ainda, nesta figura, pode-se observar a locação das peças fotocatalíticas na região de maior uniformidade de radiação UV-A.

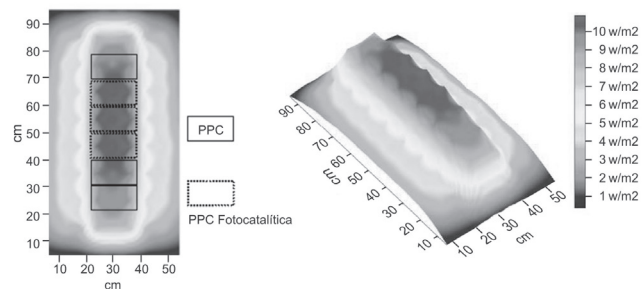


Figura 7 - Radiação UV-A no Interior da Célula do Fotoreator.

Conforme mostra a Figura 7 as três geometrias traçadas em planta representam a locação das três PPCs fotocatalíticas (600 cm²) no interior do fotoreator, região na qual a incidência da radiação UV-A é mais homogênea, entorno de 10 W/m².

A Figura 8 apresenta os resultados do ensaio de degradação dos NOx para as peças com incorporação de 3, 6 e 10% de rutilo com uma espessura de argamassa fotocatalítica de 3 mm (RT3E3, RT6E3 e RT10E3).

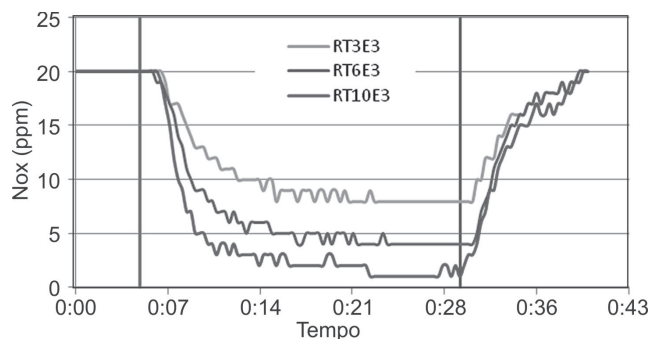


Figura 8 - Ensaio de Degradação de NOx para as PPCs RT3E3, RT6E3 e RT10E3.

De acordo com a Figura 8, ficam evidenciadas as características dos três estágios que compõem o procedimento de ensaio.

No 1º estágio, onde não há incidência de radiação UV-A, não ocorre a ativação dos sítios de TiO₂ na superfície das PPCs fotocatalíticas, não acontecendo a degradação de NOx. A concentração de NOx se mantém constante em 20 ppmv ao longo dos 5 min iniciais.

No 2º estágio, a radiação UV-A de 10 W/m² é ligada por 25 min. Inicialmente, percebe-se que o tempo necessário para ativação dos sítios de TiO₂ é de aproximadamente 2 min. Logo em seguida, começam as reações de fotocatalise heterogênea e a degradação do poluente se inicia. Verifica-se que após, aproximadamente, 20 min de radiação UV-A (aos 25 min de ensaio), chega-se a completa ativação de todos os sítios de TiO₂, sendo este o pico de máxima degradação de NOx, caracterizando-se por uma degradação constante do poluente.

No 3º estágio, correspondente aos últimos 10 min de ensaio, a radiação UV-A é desligada e começa a cessar as reações de fotocatalise e, conseqüentemente, ocorre o retorno da concentração inicial do poluente de 20 ppmv de NOx.

Pode-se verificar também na Figura 8 que há uma melhora da eficiência da degradação de NOx com maiores

teores de rutilo (TiO₂) adicionados na peça.

A tabela 3 apresenta, para todas as séries de PPCs fotocatalíticas produzidas, os resultados do consumo máximo de NOx atingido durante o ensaio de degradação, em ppmv e em mg/hr/m².

Tabela 3 - Total de NOx Degradado em ppmv e mg/hr/m² Para as PPCs Fotocatalíticas.

Tipo	% TiO ₂	Espessura da Argamassa (mm)		
		3	6	10
Degradação Máxima de NOx (ppmv) - (mg/hr/m ²)				
Rutilo (10x40 nm)	3	12 – 23,52	11 – 21,56	9 – 17,64
	6	16 – 31,36	12 – 23,52	11 – 21,56
	10	19 – 37,24	13 – 25,48	12 – 23,56
Anatase (10-30 nm)	3	14 – 27,44	-	-
	6	19 – 37,24	-	-
	10	*15 – 44,10	-	15 – 29,40

*Ensaio realizado com apenas duas peças (400 cm²), devido a grande eficiência da superfície em degradar o NOx.

A Figura 9 apresenta os resultados do ensaio de degradação de NOx para todas as PPCs fotocatalíticas produzidas com rutilo 10x40 nm.

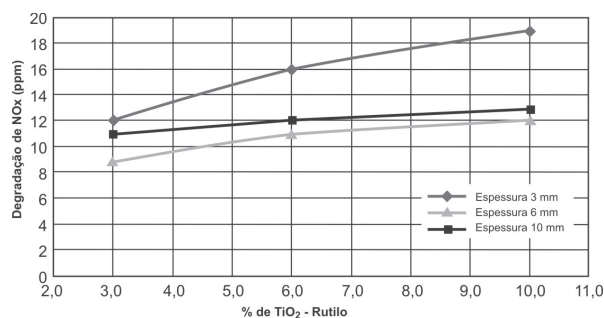


Figura 9 - Degradação de NOx x Porcentagem de Rutilo Incorporado na PPC.

De acordo com a Figura 9, para todas as espessuras da camada superficial de argamassa fotocatalítica, quanto maior a porcentagem de rutilo (TiO₂) incorporado na argamassa, maior é a degradação de NOx. Esse aumento se deve à maior quantidade de sítios de rutilo (TiO₂) na superfície das peças que são ativados. Contudo, percebe-se que essa melhora na degradação obtida pelos aumentos de TiO₂ (rutilo) incorporado, se manifesta de forma mais efetiva quando a espessura da argamassa é menor.

Fica evidenciado na Figura 9 que com maiores espes-

suras de argamassa fotocatalítica, menor é a degradação de NOx. Este comportamento está relacionado com a textura superficial das PCCs fotocatalíticas.

Desta forma, tratando-se de química superficial e no domínio nanométrico (10^{-9}), torna-se evidente que a eficiência das PPCs fotocatalíticas é regida, principalmente, pela área específica da textura superficial. Com grandes superfícies específicas, os resultados de degradação do poluente podem ser melhorados significativamente. Assim, para melhorar o desempenho das peças na fotocatalise não basta apenas aumentar a porcentagem de TiO_2 incorporado, pois a eficiência ficará comprometida se não houver uma preocupação com a textura superficial final da peça.

Para as peças produzidas, o aumento da espessura da camada superficial fotocatalítica não agrega nenhuma melhora na degradação dos NOx, uma vez que as reações ocorrem ao nível da superfície da peça. Contudo, quanto mais rugosa for a textura da peça (maior superfície específica) maior é a quantidade de partículas de TiO_2 expostas e mais eficiente será a peça.

3.3 Eficiência do Tipo de Dióxido de Titânio Incorporado

A Figura 10 apresenta um comparativo entre o TiO_2 na forma rutilo (10x40 nm) e o TiO_2 na forma anatase (10-30 nm) na eficiência da degradação dos NOx, para as peças com 3 mm de espessura de argamassa fotocatalítica.

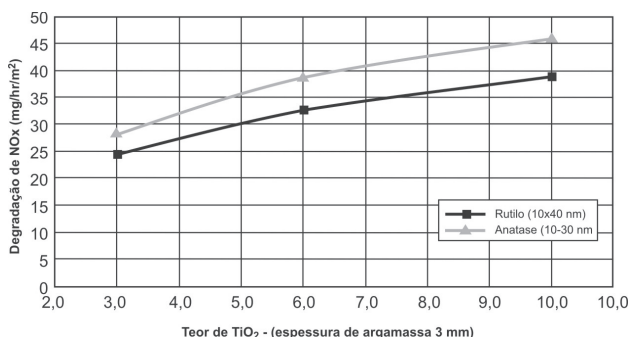


Figura 10 - Rutilo (10x40 nm) x Anatase (10-30 nm)..

Observa-se na Figura 10, que a degradação dos NOx é influenciada pelo tipo de dióxido de titânio incorporado. Desta forma, verificou-se que a anatase (10-30 nm) apresenta maior efetividade nas reações de fotocatalise heterogênea comparada com o rutilo (10x40 nm). Entre os fatores responsáveis por esse melhor desempenho da ana-

tase, destaca-se: a maior superfície específica que a anatase apresenta e a massa específica menor. Neste sentido, como a adição na peça foi realizada por peso, tem-se com a anatase um volume de TiO_2 maior incorporado e o formato esférico da partícula, que facilita a ativação do semiconductor.

3.4 Aplicação dos Resultados em uma Via Urbana

A Figura 11 apresenta a radiação UV-A monitorada no dia 11/11/2010 (final da primavera) das 7h00 (0,292) às 19h00 (0,792) na cidade de Florianópolis-SC/Brasil. Quanto às características do dia, das 7h00 às 14h00 apresentou-se ensolarado, sem nuvens, e, a partir das 15h00, nublado. A umidade relativa do ar média do dia foi de 73%.

Utilizando-se o modelo de degradação do NOx obtido (Figura 12) para uma taxa de fluxo de 1 l/min, umidade relativa do ar de 70%, pode-se estimar a degradação total de NOx por metro quadrado de pavimento fotocatalítico (RT3E3) com a radiação UV-A monitorada neste dia.

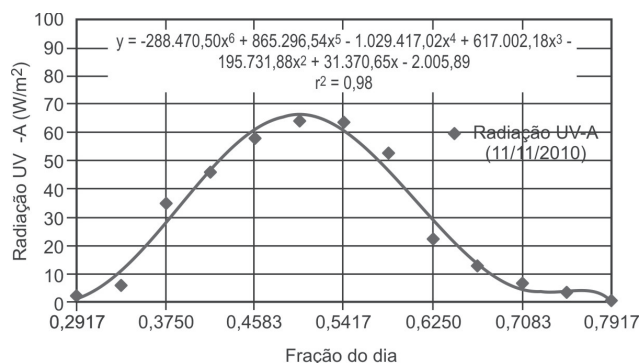


Figura 11 - Monitoramento da Radiação UV-A no Dia 11/11/2010 em Florianópolis-SC/Brasil.

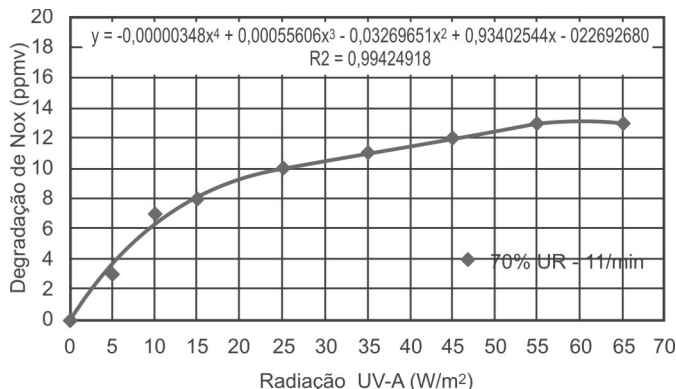


Figura 12 - Curva de Degradação de NOx (70% UR - 1 l/min).

A tabela 4 apresenta a estimativa de degradação total de NOx para este dia.

Tabela 4 - Degradação Total no Dia (70% UR - 1 l/min)

Intervalo de Tempo		Radiação Média do Intervalo (W/m ₂)	Degradação de NOx		Degradação de NOx Acumulada (mg/m ₂)
Horas	Número		ppmv	mg/m ₂	
7:00-8:00	0,292-0,334	5,37	3,93	7,70	7,70
8:00-9:00	0,334-0,375	19,39	9,15	17,93	25,63
9:00-10:00	0,375-0,417	37,59	11,27	22,09	47,72
10:00-11:00	0,417-0,458	54,73	12,89	25,26	72,98
11:00-12:00	0,458-0,500	64,97	12,93	25,34	98,32
12:00-13:00	0,500-0,542	64,93	12,93	25,34	123,66
13:00-14:00	0,542-0,583	54,70	12,89	25,26	148,92
14:00-15:00	0,583-0,625	37,87	11,30	22,15	171,07
15:00-16:00	0,625-0,667	20,08	9,28	18,19	189,26
16:00-17:00	0,667-0,708	7,84	5,34	10,47	199,73
17:00-18:00	0,708-0,750	3,89	2,94	5,76	205,49
18:00-19:00	0,750-0,792	3,88	2,94	5,76	211,25

De acordo com a tabela 4, para as condições ambientais apresentadas neste dia, um metro quadrado de pavimentação fotocatalítica (RT3E3) seria capaz de retirar do ar 211,25 mg de NOx.

A tabela 5 demonstra a eficiência da pavimentação fotocatalítica (RT3E3) considerando-se uma via de 1 quilômetro com 10 metros de largura, em um dia (11/11/2010) que trafegassem nesta via 10.000 veículos, das 7h00 às 19h00.

Tabela 5 - Degradação de NOx Para Uma Situação Hipotética

Ano de Fabricação do Veículo	Tráfego	***Emissão de NOx Por Veículo (g/km)	NOx Acumulado em 1 km de Via (kg)	Degradação de NOx Pela Pavimentação Fotocatalítica (RT3E3)	
				kg	%
2007-2009	10.000*	0,25	2,5	2,113	84,52
	10.000**	0,60	6,0	2,113	35,22
Após 2009	10.000*	0,12	1,2	2,113	100,00
	10.000**	0,25	2,5	2,113	84,52

*10.000 veículos leves de ciclo motor de Otto.

**10.000 veículos leves de ciclo motor de Diesel.

***Emissão de NOx por veículos de acordo com a Resolução Nº 315 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), através do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

A tabela 5, mostra a grande contribuição da pavimentação fotocatalítica para a despoluição do ar em termos

de NOx. Pode-se estimar que caso 10.000 veículos (fabricação 2007-2009) com ciclo de motor Otto trafegassem nesta via, a superfície fotocatalítica poderia degradar o equivalente a emissão de NOx de 8.452 destes veículos. Considerando-se somente veículos com ciclo motor Diesel, a degradação seria equivalente a emissão de 3.522 destes veículos.

Para veículos fabricados a partir de 2009, a eficiência seria maior. Com 10.000 carros do ciclo de motor Diesel, somente 1.548 veículos poluiriam a atmosfera. Considerando veículos com ciclo motor de Otto, poderia trafegar sem danos ao meio ambiente, em termos de NOx, 17.775 veículos.

Ressalta-se, todavia, que em uma via urbana tem-se uma condição de poluição menos intensa do que o valor simulado em laboratório, uma aleatoriedade da direção e intensidade dos ventos, variação das condições de radiação solar e da umidade relativa do ar que irá influenciar a degradação dos NOx.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho estudou, experimentalmente, a incorporação de dióxido de titânio (TiO₂) em peças pré-moldadas de concreto para a degradação de óxidos de nitrogênio (NOx) presentes na atmosfera. Foram produzidas peças com diferentes espessuras da camada superficial de argamassa fotocatalítica, porcentagens e tipos de TiO₂ incorporado.

Os resultados obtidos com as peças pré-moldadas

de concreto (PPC) fotocatalíticas produzidas, mostraram que se pode ter uma grande eficiência na degradação dos NOx, dependendo do tipo e porcentagem de dióxido de titânio incorporado e, principalmente, da textura superficial final da peça, ou seja, da superfície específica.

Em relação à influência dos tipos e porcentagens de TiO₂ incorporados, a anatase (10-30 nm), por ter partículas esféricas e maior superfície específica, apresentou maior degradação dos NOx que o rutilo (10x40 nm).

Com maiores teores de anatase e rutilo incorporados nas peças, maior é a eficiência da peça na degradação dos NOx. Contudo, esta melhoria é comprometida se não houver a preocupação com a textura final da peça, ocasionando, desta forma, somente um aumento no custo da PPC.

Na pesquisa fica ressaltado que a granulometria utilizada é o fator predominante para a formação da textura superficial (rugosidade) final da peça. Neste sentido, observou-se que quanto mais rugosa a superfície, maior é a eficiência das peças na degradação dos NOx.

Este aspecto é verificado com os aumentos da espessura da argamassa fotocatalítica nas peças. Com espessuras da camada superficial de 3 mm, predominou na

textura final das peças a granulometria mais aberta da camada de base, obtendo-se alta degradação do poluente. Para as espessuras maiores de 6 e 10 mm, prevaleceu na textura final das peças a granulometria mais fechada da camada superficial, reduzindo a degradação do poluente. De acordo com os resultados obtidos, a rugosidade ou a textura final da superfície das PPCs é um dos fatores mais importante para otimizar os resultados de degradação do poluente, ou seja, a química superficial no domínio nanométrico (10⁻⁹) é regida principalmente pela área específica superficial.

Do ponto de vista teórico, a eficiência da peça na degradação de NOx não teria um fim uma vez que não há consumo do TiO₂ no processo, pois ele atua como catalisador nas reações de degradação. Entretanto, o desgaste da superfície, a colmatagem, impermeabilização por óleos, impregnação de goma de mascar ou limpeza pouco eficiente pela ação da chuva podem levar a uma redução da eficiência fotocatalítica.

Atualmente uma série de peças foram colocadas em duas vias de Florianópolis-SC (Figura 13) para avaliar a eficiência da ação fotocatalítica ao longo do tempo.



Figura 13 – Aplicação das Peças Fotocatalíticas em Campo.

Quanto à produção das peças em escala industrial, atualmente existem vibro-prensas com sistema "**double-cap**". Estes equipamentos são dotados de duas cubas e gavetas, possibilitando a moldagem de peças de dupla camada. A execução da segunda camada é imediatamente após uma pequena pré-vibração da primeira camada, desta forma, é garantida a produção de uma peça monolítica sem problemas de aderência entre as camadas. Neste sentido, não foi objeto da pesquisa avaliar a aderência entre as camadas. No entanto, em

laboratório as peças foram moldadas sem componente de vibração como na indústria (vibro-compressão). A vibro-compressão irá influenciar a textura, devendo ser objeto de ajuste no campo.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, ao Programa de Apoio a Núcleos de Excelência PRONEX/FAPESC e a CAPES pelo apoio financeiro e bolsas para os alunos de mestrado e doutorado.

REFERÊNCIAS

- ABPv. Informativo Técnico Sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem Através de Aparelhagem Portátil. Associação Brasileira de Pavimentação. Boletim Técnico, Rio de Janeiro, n. 18, 1999.
- ASTM E965 - 96. Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique. 2006.
- BEELDENS, A. Air Purification by Pavement Blocks: Final Results of The Research at The BRRC. Transport Research Arena Europe, Ljubljana. Belgium, 2008.
- BERGIN, M. S. et al. Quantification of Individual VOC Reactivity Using a Chemically Detailed, Three-Dimensional Photochemical Model. Environmental Science e Technology 29, 3029-3037. USA, 1998.
- CETESB. Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, 2009.
- _____. Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, 2008.
- CONAMA. Resolução No 315. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasil. Outubro, 2002.
- CHEN, J.; Poon, C.-S. Photocatalytic Construction and Building Materials: From Fundamentals to Applications. Building and Environment 44, 1899-1906. Hong Kong, 2009.
- DEVAHASDIN, S. et al. TiO₂ Photocatalytic Oxidation of Nitric Oxide: Transient Behavior and Reaction Kinetics. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 156: 161-170. 2003.
- FREEDMAN, B. The Ecological Effects of Pollution, Disturbance and Other Stresses. Environmental Ecology. Academic Press Inc. San Diego. USA, 1995.
- HÜSKEN G. et al. Experimental Study of Photocatalytic Concrete Products for Air Purification. Building and Environment XXX, 1-12. The Netherlands, 2009.
- LACEY, M. E. Q.; SCHIRMER, W. N. O Uso da Fotocatálise para a Desinfecção e Desodorização do Ar Interno. Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais V. 4, No 2, Maio/Ago, 2008.
- LEITE, A. B. et al. Processo de Absorção de Gases na Minimização da Poluição Atmosférica. Departamento de Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau - FURB. 2008.
- PRODESP. Arquivo: Frota Circulante 2009. Companhia de Processamento de Dados do Estado de São Paulo. Detran - Departamento de Análises. São Paulo, 2010.

Comportamento resiliente de um solo típico de subleito de rodovias da região de Viçosa-MG

Tadeu Antonio Torquato de Souza Júnior

Mestre em Engenharia Civil, UFV, Viçosa - MG

Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho

Departamento de Engenharia Civil, UFV, Viçosa - MG

Prof. Claudio Henrique de Carvalho Silva

Departamento de Engenharia Civil, UFV, Viçosa - MG

Prof. Dario Cardoso de Lima

Departamento de Engenharia Civil, UFV, Viçosa - MG

Prof. Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Departamento de Engenharia Civil, UFJF, Juiz de Fora – MG

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo analisar o comportamento resiliente de um solo típico da região de Viçosa-MG, quando empregado no subleito e na camada de reforço de um pavimento flexível hipotético. No subleito, admitiu-se o referido solo compactado na energia do Proctor normal; na camada de reforço, o mesmo foi investigado na energia de compactação do Proctor intermediário. O carregamento empregado no pavimento foi o semi-eixo padrão simples de rodas duplas, com carga por roda de 2,05 t e pressão de enchimento dos pneus igual a 563 kPa. Para obtenção do módulo de resiliência do solo, empregaram-se as seguintes normas: AASHTO T 307-99 e DNER-ME 131/94. Através dos resultados encontrados, obtiveram-se várias equações para previsão do módulo

de resiliência para o solo em questão e algumas delas foram utilizadas para estudo da resposta estrutural do pavimento. Verificou-se nesta pesquisa que, na energia intermediária, para ambas as normas utilizadas, a faixa de variação dos valores dos módulos de resiliência foi muito semelhante. Com relação à energia normal, houve significativas diferenças. Tendo em vista às características do pavimento hipotético e do carregamento utilizado, as tensões normais verticais no topo do subleito foram inferiores a 40 kPa e os correspondentes deslocamentos verticais observados não ultrapassaram 0,8 mm.

PALAVRA-CHAVE: Solo fino, módulo de resiliência, resposta estrutural de pavimento flexível

1 Introdução

O transporte é uma atividade essencial ao cotidiano das pessoas para atender às suas necessidades sócio-econômicas. Sob uma visão sistêmica, o transporte compõe-se de vários componentes fundamentais

para sua operação, quais sejam: as cargas, as vias, os veículos, conjuntamente com a fonte de energia para movimentá-los, os terminais, os meios de comunicação, sinalização, manutenção e os inúmeros tipos de serviços indispensáveis ao funcionamento de cada um deles. Dentre os componentes acima citados, a via é um

dos mais importantes. Assim, se a sua serventia for de baixa qualidade, certamente serão severos os reflexos no conforto e segurança dos usuários, nos custos operacionais dos veículos e no custo final dos produtos para o consumidor.

De acordo com o CNT (2010), especificamente para o transporte rodoviário, esta modalidade detém 96,2% da matriz de transporte de passageiros e 61,1% da matriz de transporte de carga e o estado das condições das rodovias que atualmente vem sendo observado para atender esta demanda de carga é o que se encontra na Tabela 1.

Extensão Total		
Estado geral - rodovias brasileiras	km	%
Ótimo	13.378	14,7%
Bom	24.092	26,5%
Regular	30.326	33,4%
Ruim	15.858	17,4%
Péssimo	7.291	8,0%
Total	90.945	100%

Fonte: (CNT, 2010)

Tabela 1: Estado geral das condições das rodovias brasileiras

Tendo em vista a destacada importância do setor rodoviário para a economia brasileira, é fundamental que a malha rodoviária se encontre em boas condições de serventia. Valendo-se dessa ponderação, têm sido realizados diversos estudos dirigidos à mecânica dos pavimentos, no sentido de melhor compreender as respostas estruturais dos materiais empregados nas camadas do pavimento, quando solicitados pelo tráfego e sujeitos ainda às influências climáticas. Assim, conhecer o desempenho de cada camada estrutural do pavimento é um caminho para avaliar o seu comportamento como um todo.

Na engenharia rodoviária existem duas vertentes para dimensionamento de pavimentos flexíveis. Uma delas baseada nos métodos empíricos e a outra, fundamentada nos estudos mecanicistas. Os métodos empíricos baseiam-se na repetibilidade de experiências de campo relacionadas com resultados de ensaios de laboratório ao longo do tempo. Dentre eles, o mais difundido no Brasil refere-se ao desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano, em que se emprega o ensaio *California Bearing Ratio* (CBR) como indicador da capacidade de suporte das camadas de

solo (REZENDE, 2009). Já os métodos mecanicistas, fundamentam-se numa ou mais teorias (elástica, elastoplástica, visco-elástica, etc), necessitando de propriedades físico-mecânicas mais apuradas dos materiais empregados na estruturas do pavimento para subsidiarem a metodologia utilizada (SOUZA, 1980; MEDINA e MOTTA, 2005).

O principal objetivo deste trabalho configura-se na obtenção das propriedades resilientes de um solo típico da região de Viçosa-MG, com o intuito de verificar o seu comportamento resiliente, num pavimento flexível hipotético. Os objetivos específicos são os que seguem: (i) determinar o módulo de resiliência do solo acima citado nas energias de compactação do Proctor normal e intermediário, nas condições ótimas de compactação, empregando-se as normas AASHTO T 307-99 e DNER-ME 131/94; (ii) obter modelos de módulos de resiliência para análise das respostas estruturais desse solo em termos de tensão e deformação, quando supostamente empregados no subleito e na camada de reforço de um dado pavimento flexível.

2 Revisão de Literatura

A função primordial do pavimento rodoviário é permitir o trânsito de veículos com conforto e segurança. Para cumprir este papel, as suas camadas de espessuras finitas e sobrepostamente compactadas precisam ser adequadamente dimensionadas e constituídas de materiais que respondam satisfatoriamente às solicitações do tráfego, sob influências climáticas diversas (SENÇO, 1997; MEDINA e MOTTA, 2005; BALBO, 2007).

O módulo de resiliência (M_R) de um solo é um parâmetro que expressa a sua rigidez, no regime elástico. Em outras palavras, é o módulo de elasticidade do solo obtido através de cargas repetidas. Um mesmo solo, dependendo de sua natureza (constituição mineralógica, textura, plasticidade), umidade, sucção, peso específico e estado de tensões a que está submetido, pode apresentar valores diferenciados de M_R .

Em estudos mecanicistas de pavimentos, dependendo do tipo de material empregado na estrutura e subleito da rodovia, o M_R pode ser expresso como um valor constante ou através de equações que refletem o estado de tensão a que está solicitado. Essas equações podem vir ainda combinadas com variáveis independentes que expressam certas propriedades físico-mecânicas do material analisado.

O termo resiliência significa que a energia armazenada num corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora da deformação elástica (FERREIRA, 2004).

A determinação do módulo de resiliência, nas condições do ensaio triaxial cíclico, pode ser feita pela Equação 1.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_e} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

M_R = módulo de resiliência (kPa ou kgf/cm²);

σ_d = tensão desvio axial repetida (kPa ou kgf/cm²);

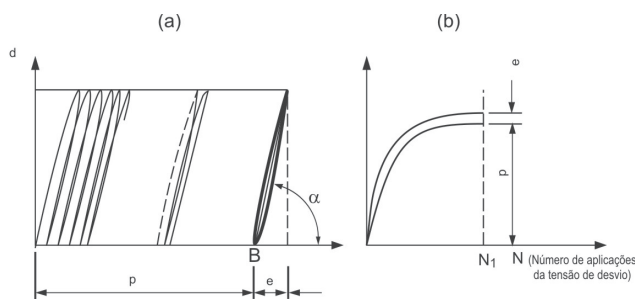
$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$;

σ_1 = tensão principal maior;

σ_3 = tensão principal menor;

ϵ_e = deformação específica axial elástica ou resiliente correspondente ao número de aplicações de σ_d .

A Figura 1 elucidada, graficamente, como se determina o módulo de resiliência pela aplicação da Equação 1. Em (a), para vários ciclos de carregamento, ocorreram deformações elásticas e plásticas. Entretanto, a partir do ponto B, o material começou a se comportar de forma reversível, tendendo a uma acomodação; em (b), o valor do número de aplicações da tensão desvio, onde se observou este tipo de comportamento correspondeu a N_1 . Pela aplicação da Equação 1, verifica-se na referida figura que o módulo de resiliência é igual a $\tan \alpha$.



ϵ_p : deformação permanente total acumulada, após certo número de aplicação de σ_d ;

ϵ_e : deformação resiliente praticamente estabilizada, após certo número de aplicação de σ_d .

Figura 1: Representação gráfica do módulo de resiliência “versus” número de aplicações da tensão desvio (CARVALHO, 1997)

Segundo Medina e Motta (2005), Francis Hveem (1955)¹ foi um dos pioneiros em estudar a resiliência dos materiais em pavimentos. A partir daí, vários pesquisadores se empenharam em estudar o comportamento resiliente dos materiais empregados nas estruturas de pavimentos rodoviários, como por exemplo: Duncan, Monismith e Wilson (1968), Dehlen e Monismith (1970), Allen e Thompson (1974), Yoder e Witczak (1975), Cardoso e Witczak (1991) e diversos outros. No Brasil, a partir da década de 70, na COPPE – UFRJ, iniciou-se um grande projeto de pesquisa destinado a investigar a resposta dos materiais empregados em pavimentos de rodovias, sujeitos à solicitações dinâmicas. Isto motivou vários pesquisadores de diversas instituições de pesquisa e organismos rodoviários brasileiros a desenvolverem estudos em solos e em misturas asfálticas sujeitos a carregamentos repetidos, sob diversas características de compactação, umidade e temperatura. Dentre os inúmeros trabalhos realizados no Brasil para a determinação de módulos de resiliência de solos, citam-se: Medina e Preussler (1980), Svenson (1980), Preussler (1983), Motta (1991), Bernucci (1995), Macedo (1996), Carmo (1998), Medina e Motta (2005), Takeda (2006), Rezende (2009), dentre outros.

Na Tabela 2, encontram-se alguns modelos que têm sido empregados para analisar o comportamento resiliente de solos granulares e de granulometria fina em pavimentos rodoviários flexíveis. Todos eles, à exceção do representado pela Equação 2, foram utilizados neste trabalho para analisar o comportamento resiliente de um solo extraído do horizonte B (latossolo vermelho amarelo) da região de Viçosa-MG.

Tabela 2: Modelos de comportamento resiliente de solos

$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$ Equação 2 - Duncan, Monismith e Wilson (1968)	$M_R = K \theta^{k_2}$ Equação 3 - Dehlen e Monismith (1970)
$M_R = K_1 \sigma_d^{k_2}$ Equação 4 - Svenson (1980)	$M_R = K_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3}$ Equação 5 - Macedo (1996)
<p>onde: k_1, k_2 e k_3: coeficientes obtidos experimentalmente e são apropriados para cada material que se investiga, σ_3: pressão confinante, σ_d: tensão desvio axial repetida, θ: soma das tensões principais (primeiro invariante de tensão).</p>	

3 Material e Método

A amostra do solo estudado foi coletada no talude à direita da Rodovia BR-120 (km 640), sentido Coimbra –

¹ HVEEM, Francis N. Pavement Deflection and Fatigue Failures, Bulletin n. 114, HRB (TRB) Washington, D.C. 1955. p. 43-87

Viçosa-MG, próximo ao trevo que dá acesso ao Campus da UFV. Este ponto de coleta dista, aproximadamente, 5 km do centro da cidade de Viçosa, assim georreferenciado 7.699.452 N e 725.081 E, em coordenada UTM (*Universal Transverso de Mercator*). A Figura 2 ilustra a aparência da amostra no momento da coleta.



Figura 2: Características visuais do solo amostrado

Após os procedimentos de extração, ensacamento, identificação e transporte do solo para o Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil (DEC), Universidade Federal de Viçosa (UFV), a referida amostra do solo foi seca ao ar, destorroada, peneirada e armazenada em recipientes plásticos para posterior utilização nos ensaios geotécnicos previstos nesta pesquisa, conforme consta na Tabela 3.

Tabela 3: Relação dos ensaios geotécnicos realizados na pesquisa

Ensaio		Normas		
		ABNT	DNER	AASHTO
Caracterização	granulometria	(ABNT, 1984 _a) NBR 7181/84	-	-
	Limite de liquidez	(ABNT, 1984 _b) NBR 6459/84	-	-
	Limite de plasticidade	(ABNT, 1984 _c) NBR 7180/84	-	-
	Massa específica dos sólidos	(ABNT, 1984 _d) NBR 6508/84	-	-
	Compactação	(ABNT, 1986) NBR 7182/86	-	-
	CBR	(ABNT, 1987) NBR 9895/87	-	-
	Módulo de resiliência	-	ME - 131/94*	AASHTO T 307/99

*Esta norma foi substituída pela norma DNIT 134/2010-ME

4 Resultados e Discussões

A caracterização geotécnica do solo foi realizada através

dos ensaios: granulometria conjunta, limites de consistência (limites de liquidez e de plasticidade) e peso específico dos sólidos. A Figura 3 ilustra a curva granulométrica do solo.

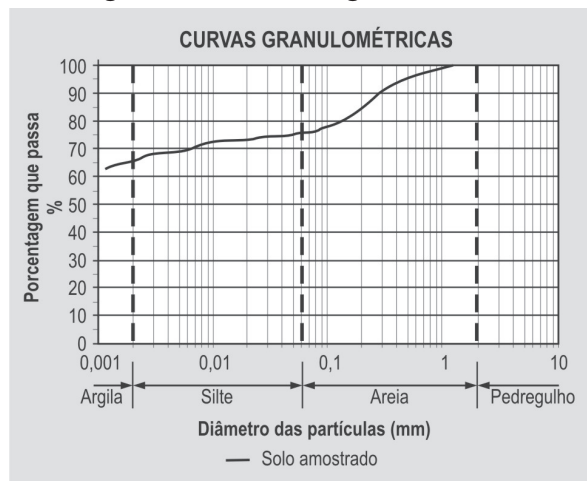


Figura 3: Curva Granulométrica do solo amostrado

Pela análise da Figura 3, verifica-se que o solo possui 66% de argila, 10% de silte e 24% de areia; portanto, uma granulometria argilo areno-siltosa. Os valores obtidos para os limites de consistência e peso específico dos sólidos foram os seguintes: $LL = 75\%$, $LP = 42$ ($IP = 32\%$) e $\gamma_s = 26,86 \text{ kN/m}^3$, respectivamente. Em função dos resultados de granulometria e limites de consistência, o índice de grupo encontrado para o solo foi igual a 20.

Após a caracterização geotécnica do referido solo, o mesmo foi identificado pelas metodologias do TRB (*Transportation Research Board*) e do USCS (*Unified Soil Classification System*), sendo assim classificado: A-7-5(20) e CH "com areia", respectivamente.

Através dos ensaios de compactação e CBR, encontraram-se os valores contidos na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR) e expansão CBR (%) do solo amostrado

Descrição	Energia de compactação	
	Proctor normal	Proctor intermediário
teor de umidade ótimo - w_{ot} (%)	30,5	29,0
peso específico aparente seco máximo γ_d (kN/m^3)	14,12	14,42
índice de suporte Califórnia - CBR (%)	3,9	10,0
expansão _{CBR} (%)	0,02	0,08

Antes de apresentar os resultados de módulo de resiliência do solo, serão descritas a seguir algumas diferenças observadas nas normas AASHTO T 307/99 e DNER-ME 131/94, em termos de níveis de tensão.

a) norma AASHTO T 307/99: os solos são classificados como pertencentes aos grupos I e II. Os solos do grupo I são aqueles que apresentam materiais passantes nas peneiras de aberturas nominais 2 mm e 0,075 mm menores do que 70% e 20%, respectivamente, bem como o índice de plasticidade (IP) igual ou inferior a 10. Os solos do grupo II são todos aqueles que não se enquadram no grupo I. Essa classificação é utilizada para definir os níveis de tensão a serem utilizados nos ensaios triaxiais de carregamentos repetidos. Para os solos do grupo II, objeto de estudo deste trabalho, a metodologia prevê as seguintes etapas de aplicação de cargas: **fase de condicionamento da amostra:** aplicar uma tensão confinante σ_3 de 41,4 (kPa) e uma tensão desvio de 27,6 kPa para um número de ciclos de carregamento variando de 500 a 1.000. **Fase de registro dos deslocamentos axiais:** aplicar uma tensão confinante (σ_3) de 41,4 kPa, combinada com as seguintes tensões desvios (σ_d): 13,8; 27,6; 41,4; 55,2 e 69 kPa. Para cada uma dessas combinações, o número de ciclos de carregamento é igual a 100. Em seguida, aplicar uma tensão confinante (σ_3) de 27,6 kPa, combinada com os mesmos níveis de tensão desvio (σ_d) anteriormente citados. Para cada combinação de tensões, o número de ciclos de carregamento é igual a 100. Finalmente, varia-se novamente a tensão confinante (σ_3) para 13,8 kPa, mantendo-se os mesmos níveis de tensão desvio (σ_d) já citados anteriormente. Para cada uma dessas combinações de tensões, o número de ciclos de carregamento é igual a 100.

b) norma DNER-ME 131/94: os solos são classificados em dois grupos, quais sejam: arenoso ou pedregulhoso e argiloso ou siltoso. Para cada grupo são definidos os níveis de carregamento. Como o solo objeto de investigação deste trabalho possui granulometria argilo areno-siltosa, os níveis de tensão recomendados para o ensaio de módulo de resiliência são os que seguem: **fase de condicionamento da amostra:** aplicar uma tensão confinante σ_3 de 21 kPa e 200 ciclos de uma tensão desvio igual a 70 kPa. **Fase de registro dos deslocamentos axiais:** manter a tensão confinante (σ_3) de 21 kPa, combinada com as seguintes tensões desvios (σ_d): 21; 35; 52,5; 70; 105; 140 e 210 kPa.

Depois de realizado o ensaio de módulo de resiliência (M_R) do solo amostrado, nas energias de compactação

do Proctor normal e intermediário, segundo as normas DNER 131/94 e ASSHTO T 307/99, foi possível expressar, graficamente, as faixas de variação dos valores obtidos de M_R . A Figura 4 ilustra essas faixas de variação.

Os modelos para a estimativa do módulo de resiliência foram obtidos através da linearização das equações potenciais pela aplicação do logaritmo nas variáveis dependente e independentes. Depois de linearizadas, foram feitas regressões lineares simples e múltipla, utilizando-se o método dos mínimos quadrados. A Tabela 5 contém os modelos do tipo potencial para a estimativa dos módulos de resiliência do solo amostrado, pelas normas da AASTHO e DNER, nas energias de compactação do Proctor normal e intermediário.

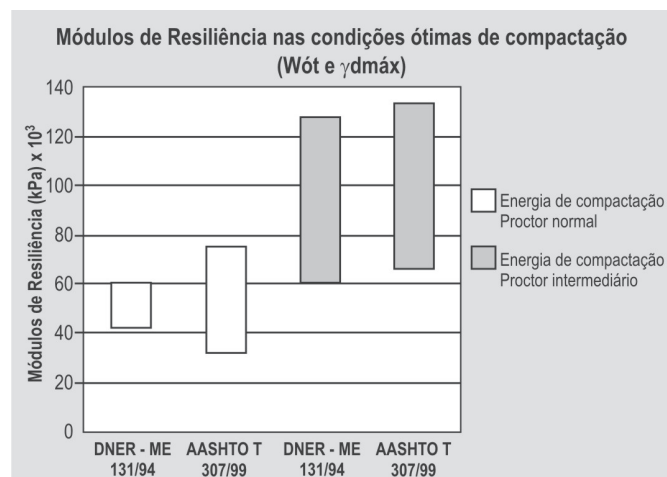


Figura 4: Faixa de variação dos valores encontrados dos módulos de resiliência, nas energias de compactação do Proctor normal e intermediário – normas DNER 131/94 e ASSHTO T 307/99

A tarefa de estimar as tensões e deformações nas camadas de um pavimento, considerando-se os inúmeros programas de computador já desenvolvidos para este fim (ILLI-PAVE, FEPAVE, MICH-PAVE, ELSYM5, EVERSTRESS, SISPAV, dentre outros), não é uma tarefa complexa. Mas, ao se tratar da definição dos elementos de entrada para a utilização desses programas, muitas dúvidas surgem. Algumas decorrentes da escolha do carregamento para representar as cargas do tráfego que solicitam o pavimento no decorrer da vida útil da obra; outras, oriundas da definição dos parâmetros de deformabilidade e de resistência dos materiais empregados no subleito e nas camadas do pavimento. Diante dessas considerações, apresenta-se a seguir um estudo comparativo de tensões e deslocamentos, utilizando

o programa Everstress, num pavimento flexível hipotético, conforme ilustrado na Figura 5. Este programa encontra-se disponível no seguinte endereço: <http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/pavement/epg/eversers/eversers.zip>.

Em função das equações dos módulos de resiliência apresentadas na Tabela 5, investigaram-se as respostas estruturais por elas produzidas, em termos de tensão e deslocamento, na estrutura do pavimento em questão até o topo do subleito. Na camada do reforço, empregaram-se os modelos contidos na Tabela 5 referentes à energia intermediária. No subleito, utilizaram-se as equações, também contidas na Tabela 5, correspondentes à energia normal. Os coeficientes de Poisson (μ) adotados neste estudo estão indicados em cada camada do pavimento ilustrado na Figura 5. Em todas as alternativas de análise, considerou-se a camada de base como sendo constituída de material granular na condição úmida, conforme informações contidas no guia da AASHTO (1993). Assim, escolheu-se a Equação 3 para representar o seu comportamento resiliente, adotando-se para k_1 o valor de 8.000 psi e k_2 o valor de 0,6. Com relação à camada do revestimento, adotou-se para o módulo de resiliência o valor de 500.000 psi. Este valor corresponde a 3.516.174,4 kPa.

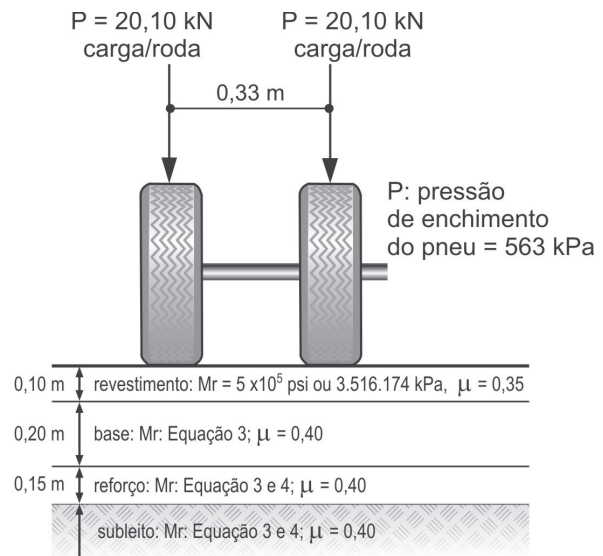


Figura 5: Pavimento flexível hipotético carregado com o semi-eixo padrão simples de rodas duplas

A Figura 6 ilustra os resultados das tensões normais bem como os deslocamentos verticais em várias profundidades do pavimento, em duas posições do carregamento, quais sejam: uma delas abaixo do centro de uma das rodas do semi-eixo padrão e a outra numa posição equidistante entre elas.

Tabela 5: Modelos para estimativa do módulo de resiliência do solo

Modelo em função da tensão desvio - Energia Proctor normal						Modelo em função da tensão desvio - Energia Proctor intermediária					
ASSTHO	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2}$					ASSTHO	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2}$				
	w	k_1	k_2	-	R^2		w	k_1	k_2	-	R^2
	Wót	30.734,00	0,154	-	0,386		Wót	$2,47 \times 10^{-5}$	0,0761	-	0,761
DNER	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2}$					DNER	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2}$				
	w	k_1	k_2	-	R^2		w	k_1	k_2	-	R^2
	Wót	35.945,00	0,0738	-	0,468		Wót	23.358,00	0,287	-	0,902
Modelo em função do 10 invariante de tensões Energia Proctor normal						Modelo em função do 10 invariante de tensões Energia Proctor intermediária					
ASSTHO	$M_R = k_1 \times I^{k_2}$					ASSTHO	$M_R = k_1 \times I^{k_2}$				
	w	k_1	k_2	-	R^2		w	k_1	k_2	-	R^2
	Wót	2.945,80	0,609	-	0,942		Wót	64.687,00	0,0761	-	0,130
DNER	$M_R = k_1 \times I^{k_2}$					DNER	$M_R = k_1 \times I^{k_2}$				
	w	k_1	k_2	-	R^2		w	k_1	k_2	-	R^2
	Wót	19.978,00	0,182	-	0,596		Wót	4.020,80	0,610	-	0,954
Modelo composto - Energia Proctor normal						Modelo composto - Energia Proctor intermediária					
ASSTHO	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \times \sigma_3^{k_3}$					ASSTHO	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \times \sigma_3^{k_3}$				
	w	k_1	k_2	-	R^2		w	k_1	k_2	-	R^2
	Wót	8.085,7	0,15	-	0,940		Wót	$1,046 \times 10^{-5}$	-0,275	0,268	0,979
DNER	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \times \sigma_3^{k_3}$					DNER	$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \times \sigma_3^{k_3}$				
	w	k_1	k_2	-	R^2		w	k_1	k_2	-	R^2
	Wót	$7,89 \times 10^{-5}$	0,12	6,52	0,548		Wót	0,39687	0,291	3,83	0,907

5 Conclusões

• Para a energia de compactação do Proctor intermediária, o comportamento resiliente do solo (Figura 4) foi similar para as normas DNER 131/94 e ASSHTO T 307/99. Para a referida energia de compactação, os valores de M_R foram significativamente superiores aos encontrados na energia do Proctor normal. Tomando-se por base a norma do DNER, para ambas energias de compactação, o valor máximo verificado na energia normal correspondeu ao mínimo da intermediária e o máximo da intermediária foi da ordem de 113% superior ao da normal. Agora, considerando-se apenas a energia do Proctor normal, houve diferenças significativas nos valores de M_R obtidos pelas normas do DNER e AASHTO. À da AASHTO abrangueu toda a faixa de valores da norma do DNER. Essa diferença pode estar associada ao grau de compactação da amostra e às condições diferentes de carregamento recomendadas nos dois procedimentos normativos. Assim, verificou-se que a energia de compactação exerceu grande influência nos valores de M_R .

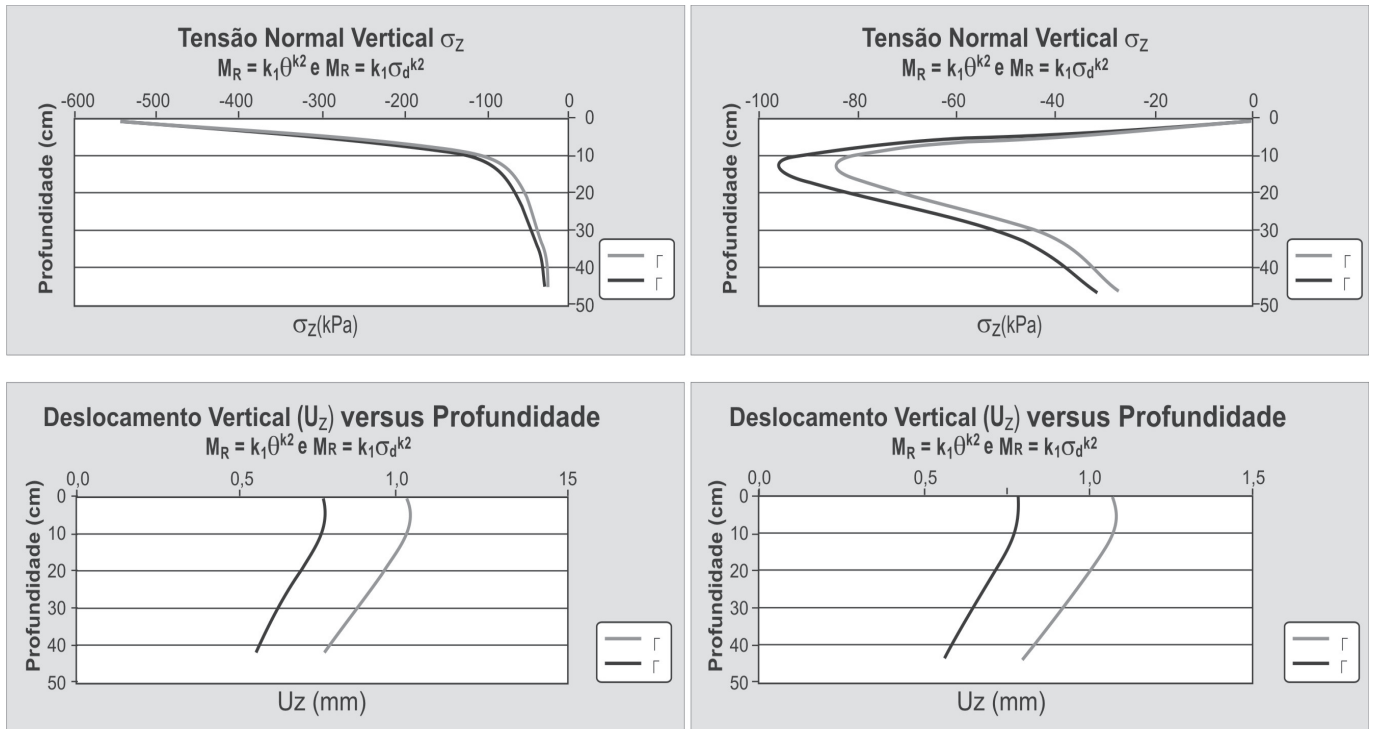


Figura 6: tensões normais verticais e correspondentes deslocamentos em várias profundidades do pavimento

- Na quase totalidade das simulações, o modelo de previsão do M_R que melhor ajustou os dados observados no laboratório foi o referente à Equação 5, modelo composto, que se encontra citado na Tabela 2. Em algumas combinações da norma empregada e energia de compactação (ver Tabela 5), os modelos representados pelas Equações 3 e 4 apresentaram baixos valores de R^2 (coeficiente de determinação linear). Em outras, ajustaram bem os resultados obtidos em laboratório. Portanto, nesta pesquisa, a escolha da norma e da energia de compactação exerceu significativa influência na resposta resiliente do solo amostrado.
- Nota-se que os valores de tensão normal vertical “versus” profundidade do pavimento (Figura 6), produzidos pelos modelos representados pelas Equações 3 e 4, foram muito semelhantes principalmente na posição referente a uma linha central que passa por uma das rodas do semi-eixo simples. No topo do subleito, para as duas posições de análise, as tensões normais verticais foram inferiores a 40 kPa. Entretanto, mesmo para pequenas amplitudes de tensão, a repetição delas produz deformações permanentes que vão se acumulando no decorrer do tempo. Este acúmulo de deformações permanentes dão origem às trilhas de roda. Já os deslocamentos verticais

(ver ainda Figura 6) produzidos pela Equação 3 superaram os gerados pela Equação 4. As diferenças entre eles, tanto na superfície do pavimento quanto no topo do subleito, nas duas posições de análise, foram da ordem 0,3 mm. No topo do subleito, os deslocamentos verticais observados não ultrapassaram 0,8 mm. Cabe aqui enfatizar o seguinte fato: em cada simulação feita, o carregamento ilustrado na Figura 5 foi aplicado somente uma vez. Assim, mesmo para pequenas diferenças entre valores de deslocamentos elásticos, a repetição delas ao longo da vida útil da estrada irá interferir na vida de fadiga do revestimento asfáltico.

- Com as considerações anteriormente apresentadas, conclui-se que a escolha do modelo de módulo de resiliência deve ser cuidadosa no sentido de expressar com confiabilidade as respostas estruturais de pavimentos flexíveis. Este é um dos cuidados que potencializam os métodos mecanicistas em relação aos empíricos. Entretanto, para alcançar este objetivo o equipamento a ser empregado para obtenção do módulo de resiliência deve estar rigorosamente aferido no sentido de reproduzir os níveis de tensão previstos no ensaio. Caso contrário, pouco ou nada irá adiantar empregar teorias mais avançadas para estudar estruturas de pavimentos.

6 - Referências Bibliográficas

- ALLEN, John J.; THOMPSON, Marshall R. (1974). Resilient Response of Granular Materials Subjected to Time-Dependent Lateral Stresses. *Transportation Research Record*, Washington, DC, n. 510, p. 1-13.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS-AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS- AASHTO (1999). *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. American Association of State Highways and Transportation Officials, Designation T. 307-99, pp. 1084-1109.
- ABNT (1984a). NBR 7181/84: Solo – Análise Granulométrica – Procedimento. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT (1984b). NBR 6459/84: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT (1984c). NBR 7180/84: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT (1984d). NBR 6508/84: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT (1986). NBR 7182/86: Solo – Ensaio de Compactação Procedimento. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, 10p.
- ABNT (1987). NBR 9895/87, Solo: Determinação do CBR – Procedimento. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 4p.
- BALBO, José T. (2007). *Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projeto e Restauração*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 558 p.
- BERNUCCI, Liedi L. B (1995). *Considerações sobre o Dimensionamento de Pavimentos Utilizando Solos Lateríticos para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. São Paulo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 237 p.
- CARDOSO, S. H.; WITCZAK, M, W. (1991). Permanent Deformation for Flexible Airfield Pavement Design. *Transportation Research Record*, Washington, DC, n, 1307, p. 111-121.
- CARMO, Cássio T. (1998). *A Avaliação do Módulo de Resiliência Através de Ensaio Dinâmico de Dois Solos Compactados e a sua Estimativa Através de Ensaio Rotineiros*. São Carlos, Dissertação de Mestrado, EESC-USP, Universidade de São Paulo, 130 p.
- CARVALHO, C. A. B. (1997). *Estudo da Contribuição das Deformações Permanentes das Camadas de Solo na Formação das Trilhas de Roda num Pavimento Flexível*. São Carlos, Tese de Doutorado, EESC-USP, Universidade de São Paulo, 206 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE-CNT (2010). *Pesquisa CNT de Rodovias 2010*. Brasília-DF.
- DEHLEN, G.L.; MONISMITH, C.L. (1970). Effect of non Linear Material Response on the Behavior of Pavement under Traffic. *Highway Research Record*, Washington, D.C, n.310, p. 1-16.
- DNER-ME 131/94. Solos - Determinação do Módulo de Resiliência. DNER -DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, Norma Rodoviária, , p.01-08.
- DUCAN, J.M.; MONISMITH C.L., WILSON, E.L. (1968). Finite Element Analyses of Pavements. *Highway Research Record*, Washington, D.C, n. 228, p. 18-33.
- FERREIRA, Aurélio B. H. (2004). *Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa*. 3. ed. rev. e atual. Curitiba: Positivo.
- MACEDO, J. A. G. (1996). *Interpretação de Ensaio Deflectométrico para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A Experiência com FWD no Brasil*. Tese de Doutorado. PEC. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.
- MEDINA, Jacques; PREUSSLER, Ernesto S. (1980). Características Resilientes de Solos em Estudos de Pavimentos. Rio de Janeiro, *Revista Solos e Rochas*, ABMS, v.3, p. 3-26.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*, Capa e Edição Eletrônica Imagemaker Interactive, 2ª Edição, Rio de Janeiro-RJ, 570 p.
- PREUSSLER, Ernesto S. (1983). *Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço*. Rio de Janeiro, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 257 p.
- REZENDE, D. S. V. (2009). *Comportamento Mecânico de Alguns Tipos de Solo Através de Ensaio Triaxiais de Cargas Repetidas para Projetos de Pavimentos Rodoviários*. Tese de Doutorado, DEF/UFV, Viçosa, MG, 144 p.
- SENÇO WLASTERMILLER (1997). *Manual de Técnicas de Pavimentação*. Ed. Pini. Vol I. São Paulo, 746 p.
- SOUZA, Murillo L. (1980). *Pavimentação Rodoviária*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., vol. 1. 361 p.
- SVENSON, M. (1980). *Ensaio Triaxiais Dinâmicos em Solos Argilosos*. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 135 p.
- TAKEDA, M, C. *A Influência da Variação de Umidade Pós-Compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista*. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos-SP, Tese de Doutorado, 2006. 254 p.
- YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. *Principles of Pavement Design*. New York, John Wiley & Sons, Inc. 711 p., 1975.

Princípios conceptivos sobre a modelização de estruturas de pavimento de concreto asfáltico sob carregamento cíclico

Breno Salgado Barra, Dr.

Leto Momm, Dr.

Yader Guerrero Pérez, M.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC

Jean Maurice Balay, D.R.

Yves Brosseaud, D.R.

Institut Français des Sciences et Technologie des Transports de l'Aménagement et des Réseaux, IFSTTAR, France

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar a modelização e a análise do comportamento mecânico de uma estrutura de pavimento flexível, submetida à ação de um carregamento cíclico. Para tanto, utilizou-se como estudo de caso uma estrutura de pavimento em escala real, construída na pista de testes do **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)**, de Nantes, destinada a comportar um volume baixo a médio de tráfego e, submetida à solicitação de um semi-eixo simples de roda dupla padrão francês de 65,0kN. Foram tomados como referência os dados pertinentes às medições de deflexão da camada de concreto asfáltico no campo, obtidos a partir da instrumentação da estrutura do pavimento com medidores de deslocamento total. A modelização da estrutura e a respectiva calagem dos resultados em laboratório foram executadas com o módulo CVCR (**Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante**) do Programa CESAR, desenvolvido no LCPC. O módulo CVCR possui relevantes caracteres de vanguarda técnico-científica no estudo da mecânica dos pavimentos, devido atualmente ser a única ferramenta computacional em âmbito mundial, capaz de realizar modelizações e análises de estruturas de pavimentos flexíveis sob solicitações de carregamento cíclico e, ainda, de comportamentos não lineares anisotrópicos de materiais granulares

não tratados. Neste trabalho foram utilizados os modelos de Huet-Sayegh, Boyce Modificado anisotrópico e de elasticidade linear isotrópica, para definir o comportamento mecânico das camadas de concreto asfáltico, brita graduada simples e do solo de fundação, respectivamente. A estrutura foi modelizada em três dimensões (3D), sendo as malhas das coordenadas nodais iteradas com a utilização do Método de Elementos Finitos. A forma da área de contato pneu-pavimento é convencionalizada como retangular e com distribuição igualitária da pressão ao longo da área de contato, bem como o carregamento cíclico é admitido como sendo aplicado a uma velocidade constante sob um regime denominado pseudo-permanente. Os resultados obtidos apresentam uma forte proximidade entre os valores das medições executadas em campo e os referentes aos cálculos gerados pelo módulo CVCR, demonstrando a validação e a eficácia desta ferramenta de cálculo para uso em simulações do comportamento mecânico de estruturas de pavimento flexível, levando em conta a maneira mais próxima possível das condições de solicitação observadas no campo.

PALAVRA-CHAVE:

pavimentos flexíveis, modelos de comportamento mecânico, método de elementos finitos, carregamento cíclico.

1 INTRODUÇÃO

As solicitações contínuas pelas cargas do tráfego, conduzem gradativamente à diminuição da resistência dos materiais presentes nas estruturas do pavimento, contribuindo para a potencialização dos danos observados ao longo da vida útil de serviço, podendo ser destacados os seguintes: majoração dos níveis deflectométricos, surgimento das deformações permanentes e o colapso por fadiga das camadas betuminosas (BARRA, 2009; EL ABD, 2006; HECK, 2001; MOMM, 1998).

Entretanto, o maior desafio na execução das modelizações pertinentes ao comportamento mecânico das estruturas de pavimento, é o de procedê-las na tentativa de reproduzir as aplicações das solicitações do tráfego da maneira mais próxima possível como ocorrem no campo, isto é, sob um carregamento cíclico, também conhecido como rolante e, de aplicar e iterar simultaneamente diferentes modelos matemáticos desenvolvidos especificamente para descrever o comportamento particular de cada material, como a viscoelasticidade linear dos materiais betuminosos e a elasticidade não linear anisotrópica dos materiais granulares não tratados, por exemplo (HORNYCH et al, 1998).

A formulação da modelização e, conseqüentemente, da análise correspondente aos limites associados ao cálculo de uma estrutura de pavimento solicitada sob carregamento cíclico, é baseada nos seguintes aspectos: geometria estrutural, propriedades dos materiais constituintes e, solicitação uniforme na direção da passagem do carregamento. A ausência de pontos singulares no pavimento (considerando uma estrutura estanque) e a velocidade constante da carga solicitante, geram um regime denominado de pseudo-permanente, que permite estudar o comportamento das estruturas de pavimento em relação às cargas rolantes. Neste contexto, a dependência temporal do comportamento viscoelástico desaparece, em função do desencadeamento de uma relação não local entre as tensões e deformações, sob a forma de convolução espacial, possibilitando levar em conta o comportamento reversível dos materiais constituintes da estrutura dos pavimentos ao longo do trajeto percorrido pela carga solicitante, sobretudo no estudo das deformações (HORNYCH et al, 2008).

Para tanto, neste trabalho foi utilizada a ferramenta computacional de cálculo denominada módulo CVCR (*Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante*) do Pro-

grama CESAR, desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), em função de ser a única ferramenta computacional em âmbito mundial atualmente, capaz de realizar modelizações e análises sobre o comportamento mecânico de estruturas de pavimento, compreendendo a possibilidade de aplicação das condições complexas de iteração matemática mencionadas nos parágrafos anteriores, a partir da utilização do Método de Elementos Finitos.

Há também a possibilidade de serem executadas análises numéricas, considerando o comportamento viscoelástico linear dos materiais betuminosos, a partir da ferramenta computacional semi-analítica VISCOROUTE (CHABOT et al, 2009; DUHAMEL et al, 2005). Contudo, a carga solicitante é considerada estática e o único modelo contido em sua interface destinado à simular o comportamento dos materiais granulares e dos solos é o elástico linear isotrópico, seguindo os princípios da Lei de Elasticidade Linear Clássica de Hooke. Logo, as condições de realização das simulações estarão mais distantes das situações reais de solicitação das estruturas de pavimento no campo, quando comparadas àquelas procedidas com o módulo CVCR.

A base de dados utilizada para estabelecer a calagem dos resultados obtidos nas iterações com o módulo CVCR neste trabalho, foi coletada durante uma campanha experimental realizada na pista de testes do LCPC, considerando parâmetros de escala real, tais como: estrutura do pavimento, propriedades dos materiais constituintes, carga solicitante (peso, pressão da área de contato, velocidade e frequência de aplicação), além da temperatura ambiente.

2. MODELOS DE COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

O módulo CVCR do Programa CESAR permite realizar simulações de estruturas de pavimentos, considerando as seguintes situações (HORNYCH et al, 2008):

- O comportamento termo-viscoelástico linear das camadas betuminosas, em conjunto eventualmente com o comportamento elástico não linear das camadas não tratadas;
- O cálculo em elasticidade não linear de toda a estrutura subjacente às camadas betuminosas

(qualquer que seja a geometria considerada), desde que sejam constituídas por materiais que atendam aos seguintes modelos de comportamento: elasticidade não linear isotrópica (BOYCE, 1980) ou anisotrópica (Boyce Modificado; HORNYCH et al, 1998), desenvolvidos particularmente para materiais granulares não tratados e, k - θ isotrópico (HICKS e MONISMITH, 1972).

Entretanto, neste trabalho serão abordados brevemente apenas os modelos de comportamento referentes aos materiais que constituem a estrutura de pavimento tomada como estudo de caso, quais sejam: HUET (1963)-SAYEGH (1965), Boyce Modificado (HORNYCH et al, 1998) e elástico linear isotrópico, referentes à descrição do comportamento viscoelástico da camada betuminosa, elástico não linear anisotrópico da camada de brita graduada simples (BGS) e, elástico linear baseado na Teoria da Elasticidade Linear Clássica de Hooke para a camada de solo de fundação, respectivamente. Cabe ressaltar que a razão pela qual foi utilizado o modelo elástico linear para a camada de solo, está em função de que a versão atual do módulo CVCR permite que apenas este tipo de modelo seja aplicado para simulação do comportamento mecânico reversível deste tipo de material.

2.1. Modelo Elástico Linear Isotrópico

O modelo elástico linear é formulado de acordo com a Teoria Clássica da Elasticidade Linear, correspondente à Lei de Hooke. Logo, se a curva de descarga (alívio) coincide com a curva de carregamento, o comportamento do material é dito elástico linear (podendo ser também não linear, porém, geralmente no âmbito da isotropia), em que a principal característica do comportamento elástico é o fato de ser independente da velocidade e do tempo de carregamento (DONGMO-ENGELAND, 2005). O caráter isotrópico indica a invariância das propriedades físicas do material em todas as direções. A representação tensorial do modelo analógico de mola simples é feita pela Equação 1 (LAMAITRE e CHABOCHE, 1996).

$$\underline{\underline{\sigma}} = 2\mu\underline{\underline{\varepsilon}} + \lambda\text{Tr}[\underline{\underline{\varepsilon}}]\underline{\underline{1}} \quad (1)$$

onde:

$\underline{\underline{\sigma}}$ = tensor da tensão aplicada sobre o material;
 $\underline{\underline{\varepsilon}}$ = tensor da deformação resultante da resposta do material;

$\text{Tr}[\underline{\underline{\varepsilon}}]$ = tensor correspondente à soma dos termos diagonais da matriz de deformação;

$\underline{\underline{1}}$ = tensor do coeficiente de identidade da matriz de deformação;

μ e λ = coeficientes de Lamé, definidos pelas Equações 2 e 3 (LAMAITRE e CHABOCHE, 1996):

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-\nu)} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

onde:

E = módulo elástico de Young;

ν = coeficiente de Poisson;

$(\cdot)_{(1-n)}$ = derivada espacial de \cdot .

2.2. Modelo de Boyce Modificado

O modelo de BOYCE (1980) foi desenvolvido para descrever o comportamento mecânico não linear dos materiais granulares não tratados, como a brita graduada simples (BSG), por exemplo, assumindo que estes materiais possuem caráter isotrópico, conhecido a partir dos resultados dos ensaios triaxiais executados sob carregamento repetido.

Contudo, HORNYCH et al (1998) a fim de levar em conta o caráter anisotrópico dos materiais não tratados, modificaram a versão original do modelo de BOYCE (1980), ponderando a tensão vertical σ_1 por um parâmetro de anisotropia denominado γ . Todavia, considerando o modelo ainda dependente do invariante de tensões (p) e da tensão-desvio (q). Desta forma, mesmo com a inclusão do parâmetro γ , as deformações volumétricas (ε_v) e desviatórias (ε_q) são escritas como funções de p e em função das relação de tensões q/p (Equações 4 a 7; EL ABD, 2006).

$$\varepsilon_v^* = \frac{1}{K_a} \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} \left[1 + \frac{(n-1)K_a}{6G_a} \left(\frac{q^*}{p^*} \right)^2 \right]; \text{ com } \varepsilon_v^* = \frac{\varepsilon_1}{\gamma} + 2\varepsilon_3 \quad (4)$$

$$\varepsilon_q^* = \frac{1}{3G_a} \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} \left(\frac{q^*}{p^*} \right); \text{ com } \varepsilon_q^* = \frac{2}{3} \left(\frac{\varepsilon_1}{\gamma} - \varepsilon_3 \right) \quad (5)$$

$$p^* = \frac{\gamma\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (6)$$

$$q^* = \gamma\sigma_1 - \sigma_3 \quad (7)$$

onde:

ε_v^* = deformação vertical, relacionada ao invariante de tensões p^* ;

ε_q^* = deformação relacionada à tensão-desvio q^* ;

ε_1 = deformação relacionada à tensão σ_1 ;

ε_3 = deformação relacionada à tensão σ_3 ;

n = expoente de não linearidade, entre $0 < n < 1$;

p^* = invariante de tensões;

q^* = tensão-desvio;

σ_1 = tensão vertical;

σ_3 = tensão de confinamento;

γ = parâmetro de anisotropia ($0 < \gamma < 1$), em que $\gamma = 1$ (isotropia);

K_a = módulo de compressibilidade volumétrica (> 0);

G_a = módulo de cisalhamento (> 0);

P_a = pressão atmosférica.

Nota: a notação * caracteriza que as variáveis tangem à modificação do modelo original de BOYCE (1980), estando em função do parâmetro de anisotropia γ .

2.3. Modelo de Huet-Sayegh

Este modelo é constituído de dois ramos paralelos, em que o de número I possui uma mola e dois amortecedores parabólicos. E, sendo um conjunto de elementos em série, tem-se que a deformação sofrida por este ramo quando Ihe é aplicada uma tensão, constitui a soma das deformações dos elementos que o compõe. Logo, a função de fluência que resulta deste ramo é a soma das funções de fluência destes elementos. Esta constatação verifica a pertinência do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965) ao Princípio da Superposição de Boltzmann (DONGMO-ENGELAND, 2005) no domínio das pequenas deformações. O ramo II é composto por uma mola correspondente ao comportamento estático ou de longa duração de um material betuminoso (Figura 1).

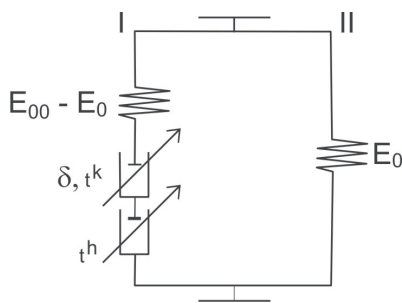


Figura 1 - Modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965).

Logo, considerando um material isotrópico, com coeficiente de Poisson ν real constante, verifica-se que o comportamento termo-viscoelástico linear pode ser definido sob a forma tensorial de acordo com a Equação 6.

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta) = \int_{-\infty}^t F(t-t', \theta) [(1+\nu)\underline{\underline{\sigma}}(t') - \nu \text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}(t')) \underline{\underline{1}}] \underline{\underline{1}}_t dt' \quad (6)$$

onde:

$\underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta)$ = tensor da deformação sofrida pelo material, em função de t e θ ;

$\underline{\underline{\sigma}}(t')$ = tensor da tensão aplicada ao material, em função de t' ;

$\text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}(t'))$ = tensor correspondente à soma dos termos diagonais da matriz da tensão aplicada ao material, em relação ao tempo correspondente ao instante inicial da aplicação da solitação;

t = tempo de observação da resposta do material;

t' = tempo correspondente ao instante inicial da aplicação da solitação ao material;

θ = temperatura;

$F(t)$ = função de fluência do material viscoelástico à temperatura θ ;

ν = coeficiente de Poisson;

$\underline{\underline{1}}$ = tensor do coeficiente de identidade da matriz de deformação.

Cabe ressaltar que da forma como é constituído o modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965), não é possível que seja definida uma Equação analítica de forma simples para a função de fluência, devido à interdependência entre os dois ramos do modelo. Assim, na ausência desta, é utilizada a Equação 6 que descreve a função de fluência do ramo I do modelo, sendo feita uma adaptação da seguinte forma (Equações 7 e 8) (HECK, 2001):

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta) = \int_{-\infty}^t F^I(t-t', \theta) [(1+\nu)\underline{\underline{\sigma}}^I(t') - \nu \text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}^I(t')) \underline{\underline{1}}] \underline{\underline{1}}_t dt' \quad (7)$$

$$\underline{\underline{\sigma}}(t, \theta) = \underline{\underline{\sigma}}^I(t, \theta) + 2\mu_0 \underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta) + \lambda_0 \text{Tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta)) \underline{\underline{1}} \quad (8)$$

onde:

$\underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta)$ = tensor da deformação sofrida pelo material, em função de t e θ ;

$\underline{\underline{\sigma}}(t, \theta)$ = tensor da tensão aplicada ao material, em função de t e θ ;

$\underline{\underline{\sigma}}^I(t')$ = tensor da tensão aplicada ao material, em função de t' , correspondente ao ramo I do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965);

$\text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}(t'))$ = tensor correspondente à soma dos termos diagonais da matriz da tensão aplicada ao material, em relação ao tempo correspondente ao instante inicial da aplicação da solitação;

$\text{Tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta))$ = tensor correspondente à soma dos termos diagonais da matriz da deformação sofrida pelo material, em função de t e θ ;

$(\underline{\underline{\sigma}}^I(t'))$ = tensor correspondente à soma dos termos diagonais da matriz da tensão aplicada ao material, em função de t' , no ramo I do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965);

t = tempo de observação da resposta do material;

t' = tempo correspondente ao instante inicial da aplicação da solitação ao material;

θ = temperatura;

$F^I(t)$ = função de fluência do material viscoelástico à temperatura θ , correspondente ao ramo I do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965);

ν = coeficiente de Poisson;

$\underline{\underline{1}}$ = tensor do coeficiente de identidade da matriz de deformação;

μ_0 e λ_0 = coeficientes de Lamé, definidos pelas Equações 2 e 3.

Nota: na Equação 8, a parcela $2\mu_0 \underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta) + \lambda_0 \text{Tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}(t, \theta)) \underline{\underline{1}}$

, corresponde à deformação da mola E_0 do ramo I do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965).

Para $t > 0$, tem-se a seguinte definição (Equação 9):

$$F^I(t, \theta) = \frac{1}{E_\infty - E_0} \left(1 + \delta \frac{(t/\tau(\theta))^k}{\Gamma(k+1)} + \frac{(t/\tau(\theta))^h}{\Gamma(h+1)} \right) \quad (9)$$

onde:

$F^I(t, \theta)$ = função de fluência do material viscoelástico, correspondente ao ramo I do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965), em função de t e θ ;

t = tempo de observação da resposta do material;

θ = temperatura;

E_∞ = módulo elástico instatâneo, correspondente ao módulo complexo quando a frequência tende ao infinito;

E_0 = módulo elástico estático, correspondente ao módulo complexo quando a frequência tende a zero;

k, h = expoentes dos amortecedores parabólicos, tal

que $1 > h > k > 0$;

δ = coeficiente adimensional, em função da natureza do betume e da curva granulométrica, tal que seja > 0 ;

Γ = função periódica de Euler, relacionada à descrição de solitações periódicas, como as de sinal senoidal;

τ = é o tempo de relaxação dos amortecedores, portanto, um parâmetro em função do tempo e que se assemelha a um tempo de retardo, em que o valor varia com a temperatura, tal como

$\tau(\theta) = \exp(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)$, sendo A_0, A_1 e A_2 parâmetros obtidos por regressão linear sobre dados laboratoriais.

3. PRINCÍPIO DA MODELIZAÇÃO E DA ANÁLISE DE PAVIMENTOS SOB CARREGAMENTO CÍCLICO

A formulação da modelização, bem como o procedimento de cálculo do comportamento mecânico de uma estrutura de pavimento flexível, inicia a partir de uma seção típica, constituída por materiais que possuem um comportamento elástico linear ou não (solos, materiais granulares tratados ou não, etc...) e de materiais betuminosos com comportamento viscoelástico linear.

No que diz respeito ao módulo CVCR, o foco dos procedimentos de cálculo consiste em simular o comportamento mecânico reversível das estruturas de pavimento no domínio das pequenas deformações, sob o efeito da passagem de um carregamento cíclico se deslocando a uma velocidade constante V , paralelamente ao eixo Ox e, em sentido contrário a este (estando este eixo Ox eventualmente inclinado, no caso da análise de um trecho em rampa) (HECK, 2001) (Figura 2).

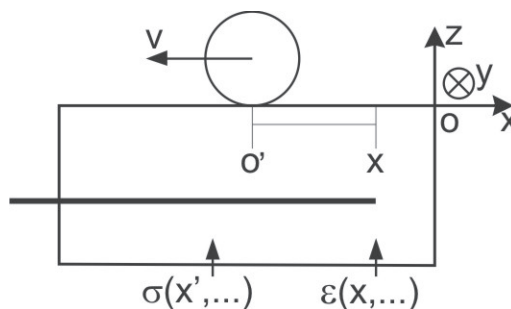


Figura 2 - Princípio da modelização de uma estrutura de pavimento flexível sob carregamento cíclico (HECK, 2001).

Observando a Figura 2, tem-se que partindo da referência de um eixo fixo ligado à estrutura de um pavi-

mento (no caso de um observador em uma rodovia, por exemplo), os campos mecânicos formados pelos deslocamentos, deformações e tensões, dependem das variáveis espaciais x, y e z , e do tempo t . Entretanto, quando uma carga solicitante permanece sendo aplicada por um longo período à velocidade constante, instaura-se um regime denominado pseudo-permanente, em que é dependente não mais do que das variáveis $X = x + Vt$, y e z . Desta forma, a solução do problema é baseada em uma situação mecânica estacionária, porém, com relação a um carregamento cíclico $R' = (O', X, y, z)$, para o qual as equações de equilíbrio e cinemáticas usuais (relações entre os deslocamentos e o tensor de pequena deformação) permanecem válidas (EL ABD, 2006; HECK, 2001).

Quanto ao comportamento dos materiais, este método de resolução descrito no parágrafo anterior, deixa imutáveis os modelos independentes do tempo, particularmente neste caso, os elásticos lineares ou não. Todavia, o modelo (termo-)viscoelástico linear sofre uma mudança de parametrização, pois conforme mencionado no tópico introdutório deste trabalho, em um regime de solicitação considerado pseudo-permanente, a dependência temporal do comportamento viscoelástico desaparece, em função do desencadeamento de uma relação não local entre as tensões e deformações. Logo, a convolução temporal (Equações 7 e 8) é substituída pela convolução espacial da variável X (à temperatura constante e a uma dada profundidade z) (HORNYCH et al, 2008; HECK, 2001) (Equações 10 e 11).

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(X, y, z, \theta(z)) = \int_{-\infty}^X F^I \left(\frac{X - X'}{V}, \theta(z) \right) [(1 + \nu)\underline{\underline{\sigma}}^I - \nu \text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}^I)]_{,X} (X', y, z, \theta(z)) dX' \quad (10)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(X, y, z, \theta(z)) = \int_{-\infty}^X F^I \left(\frac{X - X'}{V}, \theta(z) \right) [(1 + \nu)\underline{\underline{\sigma}}^I - \nu \text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}^I)]_{,X} (X', y, z, \theta(z)) dX' \quad (11)$$

onde:

$\underline{\underline{\varepsilon}}(X, y, z, \theta(z))$ = tensor da deformação sofrida pelo material, em função de X, y, z e $\theta(z)$;

X, X' = variáveis correspondente à convolução espacial no eixo da passagem do carregamento cíclico, nos pontos "inicial" e "final" (O' ; Figura 2) de solicitação, respectivamente;

y, z = eixos transversal e vertical de análise dos campos mecânicos, respectivamente;

$\underline{\underline{\sigma}}^I$ = tensor da tensão aplicada ao material, correspondente ao ramo I do modelo de HUET (1963)- SAYEGH (1965);

$\text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}^I)$ = tensor correspondente à soma dos termos diagonais da matriz da tensão aplicada ao material, correspondente ao ramo I do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965);

$\text{Tr}(\underline{\underline{\varepsilon}})$ = tensor correspondente à soma dos termos diagonais da matriz da deformação sofrida pelo material;

$\theta(z)$ = temperatura, em função da profundidade z ;

$F^I(X)$ = função de fluência do material viscoelástico à temperatura $\theta(z)$, correspondente ao ramo I do modelo de HUET (1963)-SAYEGH (1965);

ν = coeficiente de Poisson;

$\underline{\underline{1}}$ = tensor do coeficiente de identidade da matriz de deformação;

μ_0 e λ_0 = coeficientes de Lamé, definidos pelas Equações 2 e 3.

Entretanto, o módulo CVCR também permite levar em conta os perfis de temperatura variáveis com a profundidade, pois o comportamento mecânico de cada subcamada pode ser afetado pelo valor particular da temperatura média.

As Equações 10 e 11 descrevem, portanto, um comportamento linear não local, em que a medida da deformação no ponto (X, y, z) depende não somente da tensão aplicada neste ponto, mas igualmente das tensões em todos os pontos (X', y, z) do semi-eixo $-\infty < X' < X$, ao longo do qual é possível verificar a trajetória do carregamento cíclico, ou seja, do ponto X (HECK, 2001).

O problema mecânico é completamente definido então, associando o modelo de comportamento (termo-) viscoelástico linear entre os tensores das tensões e das deformações nos materiais betuminosos (Equações 10 e 11), e a Lei da Elasticidade Linear Clássica de Hooke, contudo, sem considerar o estado de tensões iniciais devido às forças de inércia (HORNYCH et al, 2008; HECK, 2001) (Equações 12 a 14):

$$\text{div}(\underline{\underline{\sigma}}) = \underline{\underline{0}} \quad (12)$$

$$\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{n}} = \underline{\underline{p}} \quad (13)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(M) = \frac{\text{grad} \underline{\underline{U}}(M) + {}^t \text{grad} \underline{\underline{U}}(M)}{2} \quad (14)$$

onde:

$\text{div}(\underline{\underline{\sigma}})$ = vetor indicador de divergência, ou seja, da decomposição da matriz de tensões em derivadas parciais, em relação ao vetor escalar correspondente a cada linha do elemento (Equação 12 de equilíbrio volumétrico);

$\underline{0}$ = vetor indicador de que as forças de inércia (geradas pelo peso próprio da estrutura), são desprezadas;
 $\underline{\sigma}$ = tensor da tensão aplicada ao material;
 \underline{n} = vetor da tensão normal à superfície do pavimento (correspondente à área de contato pneu-pavimento), na Equação 13 de equilíbrio superficial;
 \underline{p} = vetor do carregamento solicitante;
 $\underline{\varepsilon}(M)$ = tensor da deformação sofrida pelo material, em um ponto M da malha correspondente à estrutura do pavimento;
 $\underline{\text{grad}}\underline{U}(M)$ = tensor do operador gradiente, em relação ao vetor de deslocamento, na direção de aplicação do carregamento em um ponto M da malha correspondente à estrutura do pavimento;
 ${}^t\underline{\text{grad}}\underline{U}(M)$ = tensor da matriz transposta do operador gradiente, em relação ao vetor de deslocamento, na direção de aplicação do carregamento em um ponto M da malha correspondente à estrutura do pavimento.

4. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

A metodologia de resolução dos problemas mecânicos referentes à solicitação das estruturas de pavimentos flexíveis sob carregamento cíclico, é feita pelo módulo CVCR a partir do Método de Elementos Finitos, utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais ou Potências Virtuais (HORNYCH et al, 2008; EL ABD, 2006).

O Princípio dos Trabalhos Virtuais é definido por GERMAIN (1973) em relação a um meio material, em que estando isolado, pode-se distinguir as ações exteriores que atuam sobre este meio, bem como as ações interiores, que representam as ligações existentes entre todas as partes possíveis deste meio. HECK (2001) aprimorou a definição descrita anteriormente, sob o ponto de vista que consiste em um tratamento numérico por elementos finitos, a fim de decompor um determinado volume de uma dada estrutura, em elementos de formas simples sobre cada um dos deslocamentos (reais ou virtuais), supondo-se haver uma regularidade suficiente para serem identificados por intermédio de uma interpolação dos valores discretos dos deslocamentos em determinados pontos pré-definidos, também conhecidos como os nós dos elementos.

Portanto, nesta pesquisa, o trabalho virtual dos esforços exteriores compreenderá não mais do que a

aplicação de um carregamento superficial oriundo do tráfego, pois não é levado em conta o peso próprio da estrutura do pavimento e, conseqüentemente, as tensões iniciais correspondentes. Assim, a combinação peso próprio e tensões iniciais não tem efeito sobre a resposta dos materiais com comportamento linear.

A estrutura do pavimento é então decomposta em elementos isoparamétricos paralelepípedicos, sobre os quais se considera que as coordenadas e os deslocamentos são funções quadráticas dos valores das coordenadas e dos deslocamentos gerados nas extremidades e nas metades das arestas destes elementos, em um total de 20 nós (Figura 3).

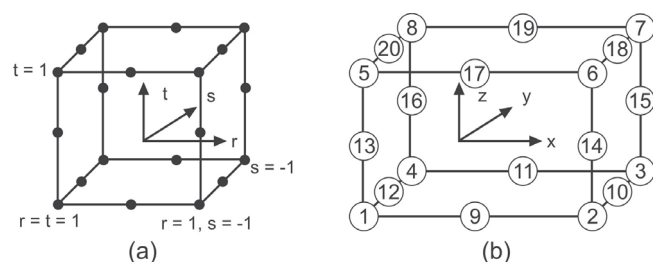


Figura 3 - Elementos isoparamétricos paralelepípedicos retangulares tridimensionais a 20 nós:

- (a) elemento de referência e
- (b) elemento real (HECK, 2001).

As coordenadas x, y, z e os deslocamentos u, v, w , em um ponto corrente do elemento real, são então descritos em função destas mesmas quantidades de nós indicados por α (HECK, 2001) (Equação 15).

$$\begin{Bmatrix} x(r, s, t) \\ y(r, s, t) \\ z(r, s, t) \\ u(r, s, t) \\ v(r, s, t) \\ w(r, s, t) \end{Bmatrix} = \sum_{\alpha=1,20} N_{\alpha}(r, s, t) \begin{Bmatrix} x_{\alpha} \\ y_{\alpha} \\ z_{\alpha} \\ u_{\alpha} \\ v_{\alpha} \\ w_{\alpha} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

onde:

$r, s, t (x, y, z)$ = coordenadas referentes aos nós dos elementos de referência e real;

$r, s, t (u, v, w)$ = deslocamentos referentes aos nós dos elementos de referência e real, em que $u = x, v = y, z = z$, assim como $r = x, s = y, t = z$;

α = nó correspondente a cada coordenada dos elementos;

$N_{\alpha}(r, s, t)$ = funções de interpolação, que são funções triquadráticas das coordenadas curvilíneas r, s, t dos elementos.

Na montagem das matrizes correspondentes às funções de interpolação $N_{\alpha}(r, s, t)$, é atribuído o valor 1 ao nó α das funções triquadráticas r, s, t , e 0 a todos os demais nós. De maneira clássica, as coordenadas curvilíneas variam entre os valores -1 e +1. Esta escolha condiciona a expressão das funções de interpolação e faz com que seu domínio de definição seja um cubo de cota bi-unitária denominado de elemento de referência, conforme ilustrado na Figura 3.

Portanto, a exploração do Princípio dos Trabalhos Virtuais sob a forma matricial, necessita da definição de algumas representações, tais como constam nas matrizes linha a seguir (Equações 16 a 18).

$$\langle U_{\alpha} \rangle = \langle u_1, v_1, w_1, \dots, u_{\alpha}, v_{\alpha}, w_{\alpha}, \dots, u_{20}, v_{20}, w_{20} \rangle \quad (16)$$

$$\langle \sigma \rangle = \langle \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx} \rangle \quad (17)$$

$$\langle \gamma \rangle = \langle \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, 2\varepsilon_{xy}, 2\varepsilon_{yz}, 2\varepsilon_{zx} \rangle \quad (18)$$

onde:

$\langle U_{\alpha} \rangle$ = matriz linha dos deslocamentos nodais;

$\langle u_1 \dots u_{\alpha} \dots u_{20}, v_1 \dots v_{\alpha} \dots v_{20}, w_1 \dots w_{\alpha} \dots w_{20} \rangle$ = nós da matriz linha dos deslocamentos nodais;

$\langle \sigma \rangle$ = matriz linha das tensões, correspondentes às coordenadas nodais;

$\langle \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx} \rangle$ = coordenadas nodais das tensões nos elementos;

$\langle \gamma \rangle$ = matriz linha das deformações, correspondentes às coordenadas nodais;

$\langle \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx} \rangle$ = coordenadas nodais das deformações nos elementos.

A representação das tensões e deformações, conforme descrito nas Equações 17 e 18, se torna possível devido à simetria dos tensores correspondentes (em que as componentes de cisalhamento são dobradas, para conservar a forma do produto tensionado sobre dois índices ou sentidos, resultando no trabalho virtual interior mostrado definido na Equação 18). Logo, estando a Equação 18 das deformações relacionada à Equação 16 dos deslocamentos, em função do operador gradiente e da relação de compatibilidade cinemática entre as deformações e os deslocamentos (Equação 14), tem-se igualmente a necessidade da definição das matrizes

linha definidas nas Equações 19 a 21.

$$\langle N_{u,i} \rangle = \langle N_{1,i}, 0, 0, \dots, N_{\alpha,i}, 0, 0, \dots, N_{20,i}, 0, 0 \rangle \quad (19)$$

$$\langle N_{v,i} \rangle = \langle 0, N_{1,i}, 0, \dots, 0, N_{\alpha,i}, 0, \dots, 0, N_{20,i}, 0 \rangle \quad (20)$$

$$\langle N_{w,i} \rangle = \langle 0, 0, N_{1,i}, \dots, 0, 0, N_{\alpha,i}, \dots, 0, 0, N_{20,i} \rangle \quad (21)$$

onde :

$\langle N_{u,i} \dots N_{v,i} \dots N_{w,i} \rangle$ = matriz linha das funções de interpolação, referentes aos nós dos elementos de referência (coordenadas u, v, w) e real (coordenadas $i = x, y, z$);

$\langle N_{1,i} \dots N_{\alpha,i} \dots N_{20,i} \rangle$ = nós da matriz linha dos deslocamentos nodais;

i = coordenadas nodais do elemento real (x, y, z).

Definidas e apresentadas as Equações constitutivas da modelização dos elementos e de suas respectivas coordenadas nodais, referentes aos campos mecânicos de deslocamento, tensão e deformação, a resolução do problema em relação ao Princípio dos Trabalhos Virtuais correspondente ao trabalho dos esforços interiores é então desenvolvida em função dos campos de deslocamento virtual e real.

O tensor de deformação virtual é definido com relação ao campo de deslocamento virtual considerado (Equação 14), enquanto o tensor de tensão é definido utilizando uma parte da Equação 14, aplicada aos campos de deslocamento e de deformações reais, e outra parte das Equações que descrevem os comportamentos elásticos (lineares ou não; Equações 1 a 7) ou viscoelásticos (Equações 10 e 11), dependendo do tipo de material que está sendo analisado.

Portanto, definidos os tensores de deformação e de tensão dos campos de deslocamento virtual e real, com base nas explanações do parágrafo anterior, é iniciado um processo clássico de discretização de acordo com o Método dos Elementos Finitos em deslocamento, a fim de obter um sistema matricial da forma (HECK, 2001) (Equação 22):

$$F_i(\mathbf{U}) = \mathbf{F} \quad (22)$$

onde:

\mathbf{U} = vetor de deslocamentos nodais;

F_i = vetor das forças nodais, associado aos esforços interiores;

F = vetor das forças nodais, associado aos esforços exteriores.

No caso da presença de materiais com comportamento elástico (linear ou não) ou viscoelástico linear, quando analisados isoladamente, o vetor F_i pode ser escrito teoricamente sob a forma do produto de uma matriz de rigidez K^* e do vetor de deslocamento U (HECK, 2001) (Equação 23).

$$F_i = K^*U \quad (23)$$

onde:

U = vetor de deslocamentos nodais;

F_i = vetor das forças nodais, associado aos esforços interiores;

K^* = matriz de rigidez, associada aos materiais elásticos ou viscoelástico linear.

Entretanto, o fato do caráter não local do comportamento viscoelástico (Equação 10), bem como a variabilidade pontual do comportamento elástico não linear com o deslocamento, torna a estrutura de K^* muito maior quando comparada às estruturas das matrizes de rigidez usuais associadas ao modelo de comportamento elástico linear. Desta forma, a resolução do sistema linear sob a forma $F = K^* U$, se comporta mal aos procedimentos de resolução direta, em que são baseados notadamente sobre a fatoração das matrizes de rigidez, podendo levar tempos exorbitantes durante o processamento das iterações. Nestes casos, o módulo CVCR adota uma resolução iterativa relacionada à utilização de uma matriz de rigidez elástica "fixa" de estrutura clássica, a partir de um algoritmo de ponto fixo ou de Newton-Raphson (HORNYCH et al, 2008).

O algoritmo de ponto fixo à matriz "elástica constante fixa", evita calcular explicitamente a matriz dos modelos de comportamento dos materiais, nos casos em que as matrizes de rigidez K^* se enquadram na descrição do parágrafo anterior, visando minimizar o tempo das iterações durante a resolução dos problemas. As Equações 24 e 25 definem a metodologia adotada (HECK, 2001).

$$K^{\text{elástica fixa}} \Delta U_n = F - F_i(U_{n-1}) \quad (24)$$

$$U_n = U_{n-1} + \Delta U_n \quad (25)$$

onde:

$K^{\text{elástica fixa}}$ = matriz "elástica constante fixa" de estrutura clássica;

ΔU_n = variação vetor de deslocamento a n pontos;

U_n = vetor de deslocamento em determinado ponto n ;

U_{n-1} = vetor de deslocamento em um ponto anterior ao ponto n atual de passagem do carregamento;

F = vetor das forças nodais, associado aos esforços exteriores ;

F_i = vetor das forças nodais, associado aos esforços interiores.

Interpretando a Equação 24, tem-se que na fase inicial do processamento das iterações, o algoritmo de ponto fixo agrupa e realiza a fatoração da matriz de elasticidade linear associada aos módulos "fixos" fornecidos nos dados de entrada, em que no âmbito de cada iteração procede com o cálculo dos resíduos, que significa estabelecer a diferença entre o trabalho (potência) dos esforços exteriores e interiores. Cabe ressaltar que o cálculo correspondente aos esforços interiores é executado com base nas tensões resultantes dos modelos de comportamento considerados para cada material da estrutura em análise e, das deformações obtidas da iteração precedente àquela que se encontra em curso.

O sistema formado pelas Equações 24 e 25 corresponde bem a um algoritmo de ponto fixo, quando reescrito da seguinte forma (HECK, 2001) (Equação 26):

$$K^{\text{elástica fixa}} U_n = F - F_i(U_{n-1}) + K^{\text{elástica fixa}} U_{n-1} \quad (26)$$

Nota: a Equação 26 possui as mesmas notações já definidas nas Equações 24 e 25.

Nos casos em que o algoritmo de ponto fixo converge em direção a um vetor U_∞ , tem-se que $\Delta U_n = 0$, logo, $U_n \rightarrow \infty$. Desta forma, verifica-se que foi encontrada a solução desejada, podendo ser esta situação representada pela Equação 27 (HECK 2001).

$$F_i(U_\infty) = F \quad (27)$$

onde:

U_∞ = vetor de deslocamento em direção a um espaço infinito, na direção da passagem do carregamento cíclico;

F = vetor das forças nodais, associado aos esforços exteriores;

F_i = vetor das forças nodais, associado aos esforços interiores.

Esta resolução iterativa utilizando o algoritmo de ponto fixo necessita, para constituir a matriz “elástica constante fixa”, que seja fornecido um módulo elástico de Young e um coeficiente de Poisson fixos a cada grupo de elementos, ou seja, para cada material da estrutura do pavimento. Entretanto, devem ser observadas as seguintes condições para que se tenha êxito na solução dos problemas (HORNYCH et al, 2008):

- Para as camadas constituídas por materiais com comportamento elástico linear, podem ser utilizados normalmente os valores “verdadeiros”, relacionados tanto ao módulo elástico de Young quanto ao coeficiente de Poisson;
- Para as camadas constituídas por materiais com comportamento viscoelástico, os coeficientes de Poisson podem igualmente serem fixados aos valores “verdadeiros” dos materiais;
- Em contrapartida, a escolha dos módulos elásticos de Young fixos, associados às camadas constituídas por materiais com comportamento elástico não linear ou viscoelástico linear, necessitam de um certo cuidado, a ser esclarecido nos parágrafos subseqüentes deste tópico.

Desta forma, conforme ilustra a Figura 4 (exemplificando o cálculo iterativo sobre um material granular não tratado, com comportamento elástico não linear), o método de resolução iterativo utilizando o algoritmo de ponto fixo depende da escala dos valores fixos fornecidos, a fim de que possa ser alcançada a convergência do cálculo à solução desejada, conforme a representação da Equação 27.

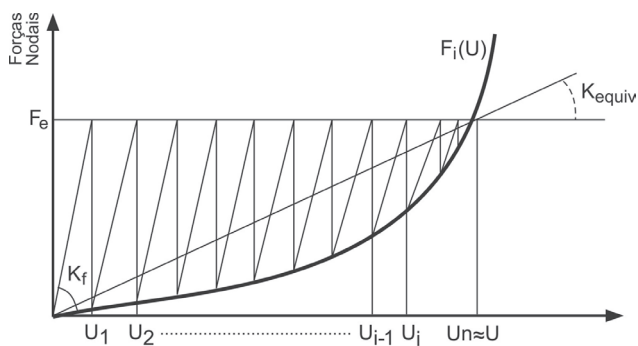


Figura 4 - Processo iterativo de resolução, utilizando o algoritmo de ponto fixo (EL ABD, 2006).

A interpretação que pode ser feita da Figura 4 é que,

caso a inclinação da reta que corresponde à matriz “elástica constante fixa” K_f esteja muito acentuada, tem-se que o cálculo convergirá muito lentamente ao ponto da solução desejada, ou seja, onde se encontra a matriz equivalente K_{equiv} . Caso contrário, se a inclinação de K_f se apresenta menor que a de K_{equiv} , o cálculo divergirá, não havendo solução (EL ABD, 2006). Portanto, a situação otimizada se dá quando são encontrados valores fixos que propiciam a convergência mais rápida possível da matriz fixa em relação à matriz equivalente durante o processo iterativo, sob a condição de inclinação $K_f > K_{equiv}$.

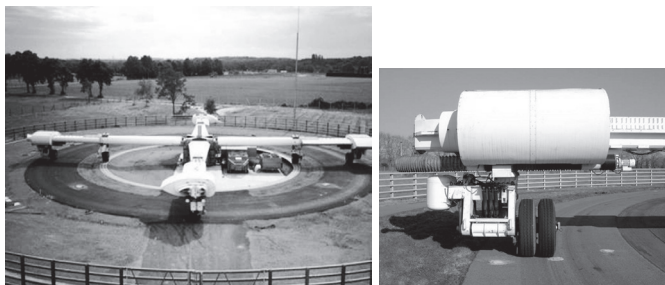
No caso de um cálculo tridimensional des grandes proporções, convém se assegurar de que as grandezas dos valores fixos escolhidos permitem uma boa convergência do algoritmo à solução desejada, considerando uma numerosa quantidade de iterações. Recomenda-se, nestas situações, estabelecer um ajuste prévio do valor dos parâmetros fixados (módulo elástico de Young, principalmente, e coeficiente de Poisson), a partir do processamento de cálculos relativamente rápidos em duas dimensões (2D) efetuados sobre um par ordenado (x, z), por exemplo, em relação à malha definida previamente em 3D, situado na direção da passagem do carregamento cíclico (HORNYCH et al, 2008).

Portanto, tem-se que os valores fixos atribuídos às matrizes “elásticas constantes fixas” K_f dos materiais elásticos não lineares e viscoelásticos lineares, particularmente os módulos, não correspondem aos parâmetros “verdadeiros” dos materiais, mas um artifício numérico de calagem para se atingir o ponto de solução K_{equiv} (convergência) de problemas com elevada complexidade (elásticos não lineares e viscoelásticos lineares, por exemplo), a partir de iterações utilizando a forma simples de resolução do modelo elástico linear. Por isso, a importância da escolha criteriosa dos valores modulares dos materiais para estes casos, conforme mencionado anteriormente.

5. ESTUDO DE CASO

O pavimento flexível em análise neste trabalho compreende uma estrutura construída em escala real, na pista de testes do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), em Nantes (França) (Figura 5), com o objetivo de simular o processo de degradação dos materiais submetidos à ação do tráfego da maneira mais próxima como ocorre no campo, ou seja, a partir da solicitação por carregamento cíclico, em consonância aos fatores

ambientais (variação sazonal climática e, ocorrência de precipitações pluviométricas intercaladas com períodos de sol intenso, por exemplo), tornando possível assim estabelecer uma calagem entre os resultados de campo e experimentais de laboratório.



(a)

(b)

Figura 5 - Pista de testes do LCPC de Nantes: (a) vista geral e (b) detalhe do semi-eixo da carga solicitante.

A instrumentação das seções do pavimento é feita ainda nos períodos de execução da estrutura, sendo prevista normalmente uma planificação do posicionamento dos captores de deformação (longitudinal, transversal e vertical), temperatura e, de deslocamento total (para fins de medição das deflexões). Podem ser ainda controlados os níveis d'água nas diversas seções do pavimento, por intermédio de um sistema hidráulico interligado às cotas das camadas inferiores. No caso particular deste trabalho, os resultados foram obtidos a partir da utilização de um captor de deslocamento total (Figura 6), em função da variável estudada ter sido a deflexão.



Figura 6 - Captor de deslocamento total utilizado na medição dos dados de deflexão.

A razão por ter sido monitorado o sinal de deflexão no estudo de caso apresentado neste trabalho diz respeito ao fato de que o módulo CVCR utiliza a amplitude dos sinais pertinentes a esta variável, em função de uma dada velocidade e temperatura de aplicação do carregamento, para que a partir da aplicação da Transformada Rápida de Fourier seja possível definir a zona de abrangência do campo de deslocamento virtual do carregamento cíclico necessário à realização das iterações das leis de comportamento dos materiais com a utilização do algoritmo de ponto fixo.

A estrutura analisada é a de um pavimento flexível clássico (denominado na França de *chaussée souple*) (Figura 7), destinado à comportar volumes baixos a médios de tráfego (em geral, correspondentes a um $N \leq 8,0 \times 10^5$), sendo constituídos por uma camada de revestimento em torno de 8,0cm a 12,0cm, às vezes, reduzida a espessuras muito delgadas (entre 4,0cm a 5,0cm, situação deste trabalho) nos casos de baixos níveis de tráfego, estando assentes sobre uma ou mais camadas de materiais granulares não tratados. A espessura global deste tipo de pavimento é geralmente compreendida entre 30,0cm e 60,0cm (GUIDE TECHNIQUE, 1997).

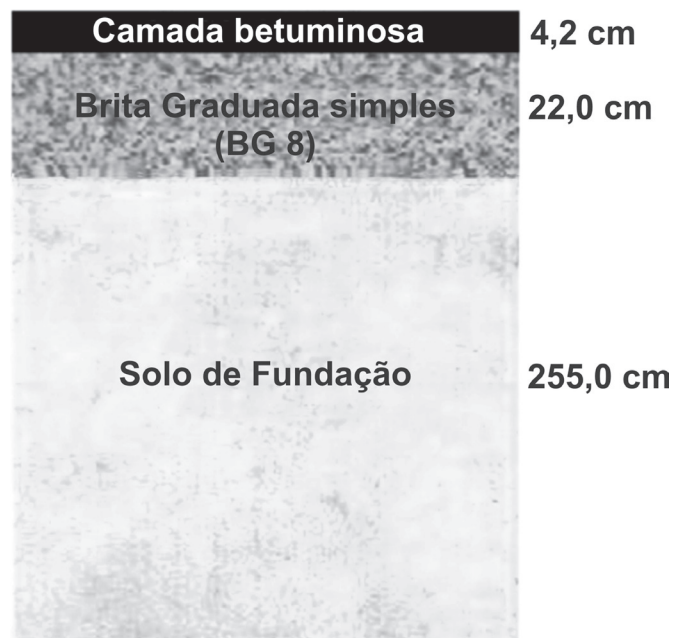


Figura 7 - Estrutura do pavimento flexível analisada.

Os modelos utilizados para descrever os comportamentos viscoelástico linear, elástico não linear e elástico linear, correspondentes às camadas betuminosa, de brita gradua-

da simples (BGS) e de solo, foram o de HUET (1963)-SAYEGH (1965), Boyce Modificado (HORNYCH et al, 1998) e elástico linear baseado na Teoria da Elasticidade Linear Clássica de Hooke, respectivamente. Os valores correspondentes às matrizes “elásticas constantes fixas” Kf foram selecionados

de maneira a possibilitar uma convergência otimizada do algoritmo de ponto fixo às matrizes equivalentes (Kequiv), ou seja, no menor tempo possível de execução das iterações. A Tabela 1 exhibe os valores referentes à cada um dos materiais que compõem a estrutura do pavimento analisado.

TABELA 1 - PARÂMETROS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO.

Material	Valores Matriz Fixa		Modelo de HUET-SAYEGH									
	Módulo de Young (MPa)		MVR* (kg/cm3)	E_{∞} (MPa)	E_0 (MPa)	k (MPa)	h (MPa)	δ	A_0	A_1	A_2	
Mistura Asfáltica	Módulo de Young (MPa)	8000	MVR* (kg/cm3)	E_{∞} (MPa)	E_0 (MPa)	k (MPa)	h (MPa)	δ	A_0	A_1	A_2	
	Coef. de Poisson (v)	0,35	0,024	29200	35	0,254	0,77	2,75	2,348	-0,387	0,003	
BGS	Valores Matriz Fixa		Modelo de Boyce Modificado									
	Módulo de Young (MPa)	1000	MVR* (kg/cm3)	K_a (MPa)	G_a (MPa)	n	γ	P_c^*	P_a (MPa)	-		
	Coef. de Poisson (v)	0,35	0,02	20,1	39	0,351	0,521	0	0,1	-		
Solo	Valores Matriz Fixa (condição necessária para gerar o Modelo Elástico Linear de Hooke)											
	Módulo de Young (MPa)	85	MVR* (kg/cm3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Coef. de Poisson (v)	0,35	0,018	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*MRV = massa volumétrica real; P_c = pressão de coesão (≥ 0) relativa ao peso próprio da estrutura ou à existência de póro-pressão no material. O restante das notações podem ser verificados na descrição dos respectivos modelos de comportamento no tópico 2.

A modelização da estrutura do pavimento foi concebida a partir de uma malha pertinente a um elemento isoparamétrico paralelepípedo retangular tridimensional de 26 (eixo x) x 18 (eixo y) x 18 (eixo z) elementos (constituindo um total de 37601 nós e 8424 elementos em toda a malha) (Figura 8), com as seguintes dimensões: 8,00m (comprimento; eixo x de solicitação do carregamento) 4,00m (largura; eixo y) e, 2,812m (profundidade; eixo z).

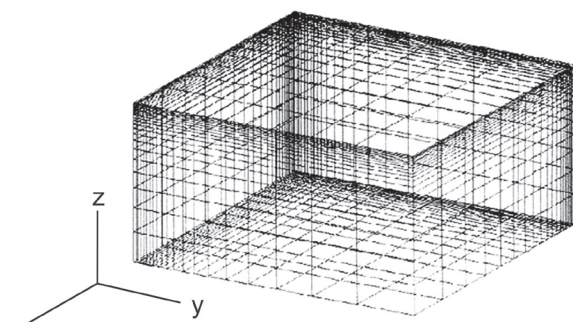


Figura 8 - Malha da estrutura do pavimento.

Quanto aos valores das dimensões da malha citados no parágrafo anterior, cabe esclarecer que para os cálcu-

los envolvendo estruturas de pavimento com o módulo CVCR, é preconizada a utilização da condição limite de deslocamento $u, v, w = 0$ sobre todas as faces verticais e horizontais correspondentes às extremidades dos eixos x, y e, à face horizontal do eixo z da malha, respectivamente (Figura 9). Isto implica no fato de que deverá ser considerada uma extensão suficiente para o eixo x, a fim de aproximar corretamente as outras condições ao infinito. Por esta razão, foi atribuída a dimensão de 8,00m na direção de aplicação do carregamento. A largura de 4,00m é relativa à metade da estrutura no eixo y, na forma de uma meia-pista, pois se trata de uma resolução axi-simétrica. A profundidade de 2,812m, naturalmente é a soma das espessuras de todas as camadas constituintes da estrutura.

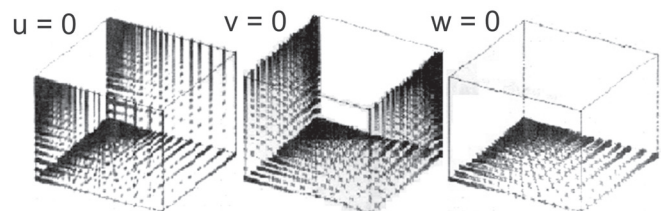


Figura 9 - Condições do limite de deslocamento.

O carregamento cíclico é considerado como sendo aplicado a uma velocidade constante de 12m/s (equivalente a uma frequência de 20Hz), no bordo da malha, de maneira axi-simétrica, ou seja, na forma de um semi-eixo simples de rodas duplas (ESRD) com 65,0kN, abrangendo uma área de contato retangular de dimensões 30,0cm (comprimento), 18,0cm (largura) e, 37,5cm (entre eixos) (Figura 10), com uma pressão distribuída uniformemente de 0,602MPa. A temperatura da estrutura do pavimento foi tomada como constante a 27,5°C. Ainda, no que diz respeito ao número de elementos da malha mencionados anteriormente, tangem à quantidade de divisões estabelecidas na composição da malha estrutural para cada face de eixo analisado, podendo-se perceber que na metade e no topo do paralelepípedo tridimensional há uma concentração maior de elementos, conforme representado

na Figura 10, a fim de que se obtenha uma análise mais refinada no ponto de aplicação do carregamento e das deflexões na camada betuminosa de rolamento, respectivamente, que constitui o objetivo deste trabalho.

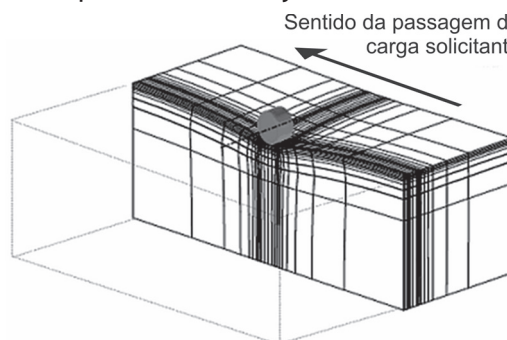


Figura 10 - Desenho esquemático da aplicação do carregamento na malha da estrutura do pavimento (HECK, 2001).

7. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos nas medições de deflexão da camada betuminosa na pista de testes do LCPC, bem como na simulação executada com o módulo CVCR do Programa CESAR, de acordo com os critérios e parâmetros descritos nos tópicos anteriores deste trabalho, são apresentados na Tabela 2 e ilustrados na Figura 11.

TABELA 2 - DADOS DA MEDIÇÃO FEITA NA PISTA DE TESTES DO LCPC E DA SIMULAÇÃO EXECUTADA NO MÓDULO CVCR.

Sinal Medido na Pista de Testes do LCPC		Sinal Simulado no Módulo CVCR	
Distância Percorrida (m) Eixo x - Longitudinal	Deflexão (x 10 ⁻² mm)	Distância Percorrida (m) Eixo x - Longitudinal	Deflexão (x 10 ⁻² mm)
-0,96	3,2	-2,0	0
-0,864	3,5	-1,7	1,1
-0,768	4,1	-1,4	3,2
-0,672	4,5	-1,15	5,2
-0,576	5,3	-0,95	8,3
-0,48	7,9	-0,74	16,4
-0,384	16,6	-0,5	29,9
-0,288	37,9	-0,35	48,1
-0,192	73,0	-0,15	87,3
-0,096	104,9	-0,075	99,9
0	114,5	0	104,8
0,192	61,3	0,075	100,1
0,288	42,6	0,15	87,0
0,461	31,6	0,35	42,0
0,557	24,4	0,5	21,7
0,653	26,0	0,74	9,9
0,70	30,3	0,82	9,2
0,845	22,2	0,92	8,4
0,90	20,4	1,02	7,5
1,15	10,1	1,12	6,1
1,30	15,2	1,40	5,0
1,60	14,4	1,68	2,2
1,90	13,3	1,8	1,56
1,997	8,2	2,0	1,01

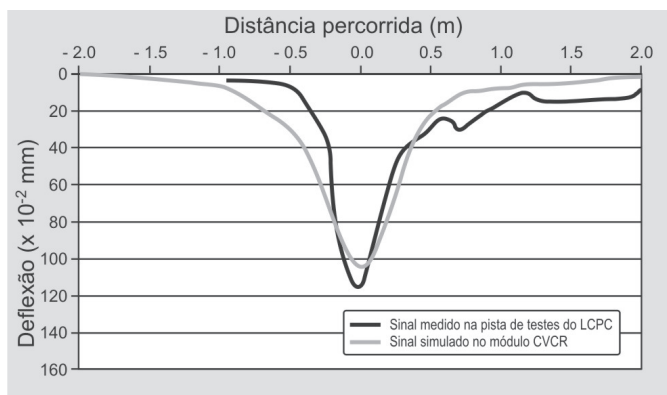


Figura 11 - Sinal medido na pista de testes do LCPC e simulado no módulo CVCR.

Observando a Figura 11, verifica-se que os resultados pertinentes à simulação executada com o módulo CVCR, são próximos aos obtidos nas medições realizadas em campo, a partir do captor de deslocamento total instalado na estrutura do pavimento (Figura 6), notadamente na camada betuminosa.

É importante ressaltar que apesar da forte proximidade apresentada entre os sinais obtidos no campo e na simulação numérica com o módulo CVCR na Figura 11, tem-se a não superposição destes diz respeito ao fato de que o sinal de campo foi obtido a partir de um captor de deslocamento colocado diretamente no interior da estrutura do pavimento (Figura 6) e, por esta razão acompanha a evolução da deformabilidade dos materiais constituintes. Logo, o princípio de medição do sinal é distinto daquele procedido com equipamentos de auscultação do *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Neste contexto, deve-se levar em conta que os materiais viscoelásticos (mesmo no domínio da linearidade a pequenas deformações) e os elásticos não lineares (no domínio anisotrópico), possuem um comportamento disperso intrínseco, fazendo com que seja de extrema dificuldade obter resultados simulados de maneira idêntica aos observados no campo, em função desta dispersão ser inerente a cada formulação. Portanto, trata-se de uma variável de difícil previsão nos modelos matemáticos de comportamento dos materiais.

Assim, é possível considerar que o módulo CVCR fornece uma boa resposta do comportamento mecânico das estruturas de pavimentos flexíveis, quando submetidas à aplicação de carregamento cíclico, principalmente levando-se em conta a condição complexa de iterações simultâneas, compreendendo diferentes modelos de comportamento dos materiais, sobretudo o de HUET (1963)-SAYEGH (1965)

e o de Boyce Modificado (HORNYCH et al, 1998), que se caracterizam pela descrição da viscoelasticidade linear das misturas asfálticas no domínio das pequenas deformações no plano complexo e, elástico não linear anisotrópico dos materiais granulares não tratados, como a Brita Graduada Simples (BGS), respectivamente.

Estudos conduzidos por HECK (2001) e EL ABD (2006), que utilizaram o mesmo módulo CVCR para a modelização das deformações reversíveis e permanentes de misturas betuminosas e, no desenvolvimento de um método de previsão das deformações superficiais de pavimentos flexíveis constituídos por camadas subjacentes não tratadas, nesta ordem, corroboram com as avaliações deste trabalho sobre a eficiência desta ferramenta computacional de cálculo tanto para o estudo do comportamento mecânico dos materiais quanto das estruturas de pavimento flexível, no domínio dos modelos previstos de aplicação.

8. CONCLUSÕES

A maneira como o módulo CVCR do Programa CESAR foi utilizado neste trabalho, a partir do cálculo das deflexões resultantes na camada betuminosa de uma estrutura de pavimento flexível, tangiu sobre a resolução do equilíbrio dos esforços internos dos materiais constituintes das camadas, em relação aos esforços externos aplicados à estrutura mencionada, oriundos da solicitação por um carregamento cíclico à velocidade constante, considerando a nulidade das forças de inércia e de volume.

A utilização do Método dos Elementos Finitos permitiu tornar mais refinada e precisa a abordagem da solução do problema, em função de possibilitar um tratamento minucioso dos pontos de solicitação da estrutura do pavimento, a partir da discretização espacial dos elementos estruturais solicitados durante a trajetória do carregamento cíclico, abrangendo aspectos complexos de iteração matemática, como a convolução espacial e o da compatibilidade cinemática entre os campos de deformação dos materiais e de deslocamento da carga solicitante, utilizando o operador gradiente.

A utilização do algoritmo de ponto fixo mostrou ser uma solução eficiente na diminuição dos tempos das iterações, no que diz respeito à convergência entre as matrizes “elásticas constantes fixas” (K_f) e as matrizes equivalentes (K_{equiv}) de solução do problema, quando bem selecionados os valores correspondentes aos módulos elásticos “fixos” dos materiais com comportamento elástico não linear e viscoelástico linear.

Com base nos resultados apresentados na Figura 11, considerando a dificuldade de prever matematicamente o caráter disperso do comportamento dos materiais visco-elásticos, como as misturas asfálticas e, da complexidade das iterações simultâneas de diferentes modelos de comportamento dos materiais, notadamente entre o de HUET (1963)-SAYEGH (1965) e o de Boyce Modificado (HORNYCH et al, 1998), pode-se inferir que o módulo CVCR atende aos propósitos de descrição do comportamento mecânico das estruturas de pavimento flexível, devido apresentar boas respostas em relação aos resultados medidos em campo, conforme apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRA, B.S. (2009), Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, Brasil.
- BOYCE, H. R. (1980), A Non-Linear Model for the Elastic Behaviour of Granular Layers Using Non-Linear Elastic Theory, in Proceedings of the International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading. Swansea, UK; pp. 7-11.
- CHABOT, A.; CHUPIN, O.; DELOFFRE, L.; DUHAMEL, D. (2009), Viscouroute 2.0: A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement. International Journal Road Materials and Pavement Design, Special Issue on Recent Advances in Numerical Simulation of Pavements.
- DONGMO-ENGLAND, B-J. (2005), Caracterisation des Déformations d'Orniérage des Chaussées Bitumineuses. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État.
- DUHAMEL, D.; CHABOT, A.; TAMAGNY, P.; HARFOUCHE, L. (2005), Viscouroute: Modélisation des Chaussées Bitumineuses. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 258-259; pp. 89-103.
- EL ABD, A. (2006), Développement d'une Méthode de Prédiction des Déformations de Surface des Chaussées à Assises Non Traitées. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux I.
- GERMAIN (1973), Cours de Mécanique des Milieux Continus. Ed. Masson. Paris, France.
- GUIDE TECHNIQUE (1997), French Design Manual for Pavement Structures - Guide Technique (English Version). Published by Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) and Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 248 p.
- HECK, J-V (2001), Modélisation des Déformations Réversibles et Permanentes des Enrobés Bitumineux - Application a l'Orniérage des Chaussées. Thèse de Doctorat. Université de Nantes.
- HICKS, R. G. e MONISMITH, C. L. (1972), Prediction of the Resilient Response of Pavements Containing Granular Layers Using Non-Linear Elastic Theory, in Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements. Vol. 1, pp. 410-429.
- HORNYCH, P.; PIAU, J-M, BODIN, D.; SAINT-LAURENT, D.; NGUYEN, V. T. (2008), CESAR-LCPC: Version de Recherche - Le Module CVCR. Cahier de Développement Réalisé dans le Cadre de l'Opération de Recherche 11P063. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Nantes, France; 82 p.
- HORNYCH, P.; KAZAI, A.; PIAU, J-M (1998), Study of the Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials, in Proceedings of the 5th Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norvège.
- HUET, C. (1963), Étude par une Méthode d'Impédance du Comportement Viscoélastique des Matériaux Hydrocarbonés. Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences de l'Université de Paris.
- LAMAITRE, J. e CHABOCHE, J-L (1996), Mécanique des Matériaux Solides. Ed. Dunod, 2ème Édition. Paris, France; 544 p.
- MOMM, L. (1998), Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrot textura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP).
- SAYEGH, G. (1965), Contribution à l'Étude des Propriétés Viscoélastiques des Bitumes Purs et des Bétons Bitumineux. Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences de Paris.

Avaliação e restauração de pavimentos

Uma proposta de adequação ao dimensionamento do reforço

Antoine Hennadipgil Junior

Aluno de pós-graduação do ITA (disciplina Isolada)

Edwin Fernando Ruiz Blanco

Felipe Santana Lopes

Honório de Resende Morais

Alunos de pós-graduação do ITA (Mestrado)

Regis Martins Rodrigues

Professor do ITA

Silvio Rodrigues Filho

Aluno de pós-graduação do ITA (doutorado)

RESUMO

Para o desenvolvimento de avaliação e restauração de rodovias há hoje um consenso globalizado no meio técnico em se considerar a sinergia que existe entre **condições estruturais** (capacidade de suportar deformações plásticas definidas como mudança de forma a volume constante, integridade das camadas – fadiga), as **condições funcionais** (conforto ao rolamento, controle direcional – capacidade do motorista em manter a direção sem ser afetado pelas bacias de acumulação de água e pelo coeficiente de atrito lateral, distância de frenagem – coeficiente de atrito) e o **estado da superfície** (natureza, severidade e extensão de defeitos) do um pavimento. Tais considerações têm permitido definir, de forma adequada, o reforço em pavimentos flexíveis, para atender as necessidades de capacidade de suporte caracterizadas com base no desempenho condicionado das características estruturais “*in situ*”. Contudo, no Brasil, na avaliação e restauração de pavimentos flexíveis, que resulta em uma espessura de reforço, tem sido empregado, até hoje, as normas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), especificamente as normas PRO - 010/79, PRO - 11/79, PRO - 159/85 e PRO - 269/94 que têm suas limitações, até por falta de experiência à

época que estas foram desenvolvidas. Espessuras de reforço têm sido definidas considerando o “**peso**” das deflexões, como primeiro parâmetro a ser observado, em face da experiência de campo ter demonstrado que “**deflexões altas com tráfego pesado, não combinam**”. As condições funcionais de um pavimento flexível, expresso pela irregularidade, também têm seu “**peso**”, na medida em que esta, devidamente considerada, pode permitir uma redução na espessura de reforço considerando apenas o “**peso**” das deflexões de campo. O Artigo, então, apresenta uma sugestão de encadeamento de idéias, de forma global, que representa os aspectos mais importantes, que devem ser levados em consideração, em um projeto de restauração de pavimentos flexíveis. Contudo, o projetista como responsável técnico, deve pautar sua decisão, sempre em suas experiências e outras ferramentas e não, se ater unicamente às normas, haja vista o termo “*guia*” utilizado pela AASHTO, considerado uma das maiores ferramentas de decisão em dimensionamento e restauração de pavimentos de rodovias.

PALAVRA-CHAVE:

rodovia, pavimento, flexível, avaliação.

1 - INTRODUÇÃO

Na avaliação e restauração de pavimentos flexíveis brasileiros, tem sido empregado, até hoje, as normas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), especificamente as normas PRO - 010/79, PRO - 011/79, PRO - 159/85 e PRO - 269/94 que têm suas limitações, até por falta de experiência à época que estas foram desenvolvidas.

Nos Estados Unidos da América, grandes avanços foram obtidos em decorrência da experiência adquirida ao longo dos anos, em função dos resultados da **AASHTO Road test**, realizados perto de Ottawa, Illinois no final dos anos 50, início da década de 1960, que evoluíram para o Guia da **AASHTO Road test** de 1993 e posteriormente de 2002, que passou então a envolver a abordagem empírico-mecânica.

Esses e outros acúmulos de experiências em restauração de rodovias abriram ensejo a se observar a existência de sinergia entre **condições estruturais** (capacidade de suporte – deformações plásticas definidas como mudança de forma a volume constante, integridade das camadas-fadiga), as **condições funcionais** (conforto ao rolamento, controle direcional – capacidade do motorista em manter a direção sem ser afetada pelas bacias de acumulação de água e pelo coeficiente de atrito lateral, distância de frenagem – coeficiente de atrito) e o **estado da superfície** (natureza, severidade e extensão dos defeitos) de um pavimento flexível.

Considerando tais experiências adquiridas ao longo dos anos e as referências bibliográficas, o que se propõe então, é apresentar uma sugestão de encadeamento de idéias, de forma global, que represente os aspectos mais importantes, que devem ser levados em consideração, em um projeto de restauração de pavimentos flexíveis.

Não se trata de uma sugestão de norma e sim, um ferramental útil a ser usado na avaliação e restauração de pavimentos que envolvem diversos modelos e teorias. Contudo, o projetista como responsável técnico, deve pautar sua decisão, sempre em suas experiências e outras ferramentas e não, se atendo unicamente às normas, haja vista o termo “guia” utilizado pela AASHTO, considerado uma das maiores ferramentas de decisão em dimensionamento e restauração de pavimentos de rodovias.

2- ANÁLISE DOS MÉTODOS EXISTENTES

2.1 - DNER-PRO 010/79

Trata-se de um método bastante elaborado e que

envolve considerações complexas sobre diversos mecanismos que podem afetar o desempenho do pavimento restaurado. Sua origem é a experiência do Departamento de Transporte da Califórnia (CALTRANS) durante as décadas de 50 e 60.

Tem por objetivo estabelecer procedimentos para a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis existentes e fornecer elementos para o cálculo da vida restante ou do reforço necessário para um determinado tráfego de projeto, considerando que a inserção de uma camada de reforço será capaz de reduzir as deflexões características do pavimento a um valor admissível.

Entretanto, critérios de deformabilidade são considerados válidos quando a estrutura do pavimento está se comportando como se estivesse em regime elástico. Quando não se verifica tal comportamento, são aceitos critérios de resistência para o cálculo do reforço, onde se verifica a possibilidade de ocorrência ou não de deformações significativas, decorrentes da evolução dos processos de ruptura, por cisalhamento ou consolidação.

A figura 1 da PRO-010/79, exposta na primeira página, todavia, apresenta algumas considerações como sendo estas válidas baseadas em critérios de deformabilidade que devem ser reavaliadas. Tal figura induz ao leitor menos atento, por exemplo, a erro de percepção, haja vista que a fase de consolidação não é tão retilínea. Os efeitos da oxidação ou dixotropia podem levar as deflexões a se reduzirem. Já na fase elástica, o comportamento, que também não é retilíneo, pode aumentar ou reduzir em função do tempo, devido à rigidez do revestimento e variação da temperatura.

Embora com o uso dos critérios deflectométricos se observe uma tendência global, que maiores deflexões levam a trincamento mais acentuado, a dispersão do desempenho é tal que sugere serem tais critérios bastante grosseiros para uma confiabilidade adequada em termos de dimensionamento estrutural do pavimento restaurado.

Tal fato fica claro no exemplo a seguir apresentado na Figura 1, onde um pavimento flexível com revestimento de CAUQ (6 cm), submetido a um dado tráfego N_f (AASHTO) = $2,4 \times 10^5$ /ano, embora apresente uma tendência nítida que pavimentos com maiores deflexões tendem a apresentar trincamentos classes FC2 e FC3, após 4 anos em serviço, a dispersão do desempenho apresentado é elevada, indicando que a deflexão não é

um parâmetro univocamente relacionado ao trincamento por fadiga, embora tenha relação com o fenômeno.

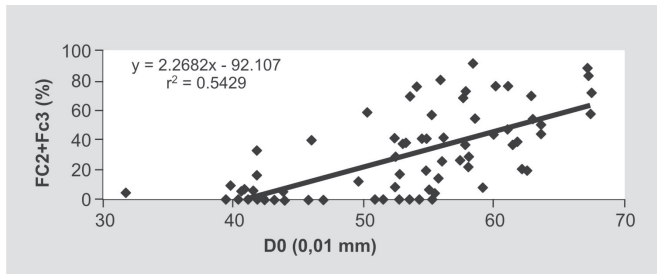


Figura 1 – Análise de critério defletoométrico

De fato, um modelo como o desenvolvido na *University of California, Berkeley* (UCB), a partir de ensaios com o *Heavy Vehicle Simulator* (HVS), mostram que o fator de calibração experimental (*shift factor*) cresce com o aumento da espessura da camada asfáltica de revestimento, revelando que o puro e simples aumento dessa espessura já tende a levar o pavimento a maiores vidas de fadiga. Assim, no caso de duas estruturas que tenham diferentes espessuras de revestimento asfáltico, estejam submetidas ao mesmo tráfego e com o mesmo nível de deflexões, a vida de fadiga será maior na seção mais espessa, ao contrário do que resultaria da aplicação do critério de deflexões admissíveis do método PRO 010/79.

Este critério é o que traz mais dificuldades para a aplicação do método, pois pode facilmente levar a indicações de espessuras de recapeamento bastante elevadas, mesmo em situações onde isto não seria necessário, tal como indicado por outros modelos, também baseados no desempenho de rodovias em serviço.

Em síntese, embora a facilidade de se medir deflexões em um pavimento crie uma demanda para seu uso como parâmetro para projeto e controle de obras, é preciso um estudo consistente para a determinação das deflexões que devem ser consideradas admissíveis para uma determinada estrutura de pavimento, sendo impossível a definição de deflexões admissíveis genéricas, apenas em função do tráfego de projeto.

2.2 - DNER-PRO 011/79

O método PRO-011/79 mantém o critério de deformabilidade do método DNER-PRO 010/79, que envolve deflexões recuperáveis. A modificação, contudo, está na inserção da correlação entre a magnitude das deflexões e o raio de curvatura.

Na avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis, relaciona-se o aparecimento de falhas no pavimento como uma decorrência da correlação entre as deflexões e o raio de curvatura correspondente.

A ação de uma carga de roda (P), aplicada sobre a superfície da estrutura, provocará uma tensão de tração na fibra inferior do revestimento, e uma compressão vertical na superfície do subleito. Admite-se que o pavimento resista às tensões de cisalhamento, às deformações ou rupturas plásticas no subleito. O pavimento deve ter uma espessura igual ou superior à indicada, por exemplo, considerando o método de dimensionamento com base na capacidade do subleito traduzida pelo ISC (Índice de Suporte Califórnia, ou CBR em inglês).

Para que não surjam trincas no revestimento, deve-se manter a deflexão abaixo da admissível e o raio de curvatura acima do valor mínimo. Isso garante que a tensão de tração na fibra inferior do revestimento, não ultrapasse um valor acima do qual o revestimento irá se romper por fadiga.

O método estabelece um determinado procedimento para determinação do diagnóstico preliminar do pavimento através de subtrechos homogêneos, estado de deterioração, deflexões recuperáveis, raio de curvatura, constituição do pavimento existente, características do subleito e frequência dos defeitos.

Soluções para restauração são apresentadas considerando o cálculo estatístico da deflexão característica, correção sazonal, cálculo da deflexão admissível em função de N, estimativa da vida restante, avaliação estrutural (dimensionamento de reforço do pavimento em função do levantamento da deflexão e da deflexão admissível).

Uma contribuição do método está na proposta de se ter a priori, o levantamento do histórico do pavimento existente, tendo como uma das premissas na avaliação de recuperação do pavimento, o aspecto estrutural de dimensionamento, baseado na deflexão admissível.

Contudo, o cálculo da espessura de recapeamento, de caráter estrutural e não funcional, é função apenas das deflexões admissíveis e características obtidas do campo, sem considerar a deterioração da estrutura do pavimento existente ao longo do tempo em que este esteve sob ação de tráfego.

Sugere o uso da Viga Benkelman na coleta de dados de deflexões, considerada hoje ultrapassado para projetos de restauração de pavimentos, em face às dificuldades na montagem dos elementos necessários para a

obtenção das informações (aferição da Viga em prensa CBR, aferição do caminhão padrão de 8,2 tf, ambos, antes de se iniciar o levantamento) e, sua deficiência na repetibilidade dos dados e pouca acurácia, contribuem para a perda da eficácia do método. Por outro lado, não se especifica ou dimensiona o que deve ser feito com o levantamento do estado de superfície e sobre o que deva ser feito nos locais onde as superfícies do pavimento estão mais deterioradas.

Apesar de permitir um diagnóstico do pavimento através dos levantamentos históricos, prospecções preliminares e sondagens complementares, só dimensiona a restauração pelas informações decorrentes do levantamento das deflexões de campo.

2.3 - DNER-PRO 269/94

Trata do dimensionamento de pavimento em função das características do subleito em termos de CBR e porcentagem de silte, espessura da camada granular e da deflexão.

O método estabelece o procedimento para determinação do diagnóstico preliminar do pavimento visando à determinação dos parâmetros de projeto, análise da condição do pavimento existente e dimensionamento do reforço do pavimento pelo critério de fadiga, limitando os solos de subleito a somente três grupos de solo em função do CBR e da porcentagem de silte.

2.4 - DNER-PRO 159/85

Desenvolvido pelo IPR para ser aplicada a pavimentos flexíveis e semi rígidos, visando normalizar os Projetos de Restauração. Apresenta soluções e alternativas para restauração dos pavimentos em concreto asfáltico, em tratamento superficial e em lama asfáltica. Envolve conceitos de QI (coeficiente de irregularidade), TR (trincamento), D (desgaste), Número Estrutural Corrigido (SNC), N (tráfego atuante) e subtrechos homogêneos. O método analisa várias alternativas de restauração, em função da avaliação do pavimento a nível estrutural e funcional. Define restrições de desempenho baseado em valores limites de QI, TR, D. Portanto, é um método baseado em modelos de previsões, onde se busca soluções que satisfaçam as condições de contorno propostas.

Mantém a obtenção das deflexões recuperáveis utilizando a Viga Benkelman e estabelece o levantamento da condição do pavimento, no critério de trincas, buracos, remendos e desgaste, seguindo a Especificação DNER-ES

128/83. Medição de irregularidade deve ser feita através de equipamentos do tipo resposta.

A análise se dá, basicamente, por critérios de irregularidade, trincamento, desgastes e deflexões, que caracterizam o desempenho do pavimento, considerando cada tipo de revestimento (Concreto Asfáltico, Tratamento Superficial e Lama asfáltico).

Ao término da avaliação do pavimento, é proposta uma análise econômica das alternativas onde se escolhe a melhor alternativa técnica e ao menor custo, optando-se pela mais conveniente, no momento da intervenção de restauração, em face às restrições orçamentárias.

É uma norma que apresenta como soluções finais muitas alternativas, que irão provocar resultados muito semelhantes no trecho após a execução, além de considerar o desempenho funcional como pilar nas tomadas de decisões de alternativas.

2.5 - GUIA DA AASHTO 2002

O Guia da AASHTO de 2002 teve origem nos estudos desenvolvidos pelo "*National Cooperative Highway Research Program*" (NCHRP Projeto 1-37A), com o objetivo de disponibilizar a comunidade que atua na área de rodovias o estado-da-arte de uma ferramenta para o dimensionamento e restauração de pavimentos, baseado em princípio empíricos-mecanísticos

Tal abordagem para o dimensionamento de pavimentos flexíveis teve origem no fato da AASHTO dispor de uma ferramenta de dimensionamento baseada, somente, em experiências de campo decorrente de resultados empíricos obtidos na pista experimental da AASHTO Road Test. Seu objetivo principal foi o de estabelecer um número estrutural (SN) adequado para proteção do subleito, contra deformações plásticas excessivas, sob um determinado tráfego.

De fato, versões anteriores a 2002 do manual incorporavam procedimentos fortemente dependentes de resultados dos testes da AASHTO, realizados perto de Ottawa, Illinois no final dos anos 50, início da década de 1960. Tratava-se de procedimentos de projeto provenientes de extrapolações dos testes na AASHTO que, até certo ponto, deram significativas contribuições em termos das propriedades de camadas e subleito de pavimentos. Contudo, bastante limitadas em decorrência das características específicas do local.

Ciente desse fato, em 1986 foi incorporado ao método da AASHTO a caracterização do solo de subleito,

baseado no módulo resiliente obtido através do método T274 da AASHTO, representando assim, a primeira tentativa de se considerar propriedades mecânicas em projetos de pavimentos. Esse método de obtenção do módulo resiliente mais tarde foi modificado pelo atual método AASHTO T294-92.

Em linhas gerais, o método da AASHTO 2002 é desenvolvido através de seções experimentais usando um modelo de estrutura do pavimento pré-definida. Cada seção experimental é submetida ao tráfego e condições ambientais e, analisada através da carga acumulada e danos ambientais, incrementalmente ao longo do tempo, usando os modelos de desempenho e resposta estrutural do pavimento. Os modelos de projeto simulam as condições de campo e o risco ou a probabilidade de exceder um nível crítico - capacidade de absorção de efeitos, que geram os “defeitos”. Os montantes de danos esperados ao longo do tempo e tráfego, em seguida, podem ser estimados através de modelos de calibração de defeitos.

Esta relação entre as propriedades mecânicas da estrutura do pavimento e os modelos de absorção de seus efeitos observado ao longo do tempo, é a parte empírica do processo de concepção empírico-mecanístico. O delineamento experimental pode ser modificado e

mais iterações são pré-formadas até a obtenção de um projeto considerado satisfatório para a confiabilidade selecionada. O processo de “tentativas de projeto”, então, desenvolvido através do manual da AASHTO de 2002 inclui:

- **desempenho de pavimento: estrutural, funcional e estado de superfície (segurança);**
- **caracterização de tráfego: considera espectros de carga por eixo, em vez do conceito de fatores de eixos equivalentes (ESALs), usado por versões anteriores do guia;**
- **caracterização de materiais: compreendendo, modelos de resposta do material do pavimento (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), critérios de acúmulo de esforços no pavimento (resistência ao cisalhamento, resistência à compressão, etc.) e outras propriedades dos materiais (propriedades especiais como: coeficientes de expansão e contração térmicas do Pavimento de Concreto Cimento - PCC e Concreto Asfáltico - CA);**
- **modelagem estrutural: inclui modelos de resposta e de acumulação de dano incremental.**

A Figura 2, a seguir, apresenta o processo de tentativas proposto pelo método da AASHTO 2002, para obtenção de um “projeto piloto”.

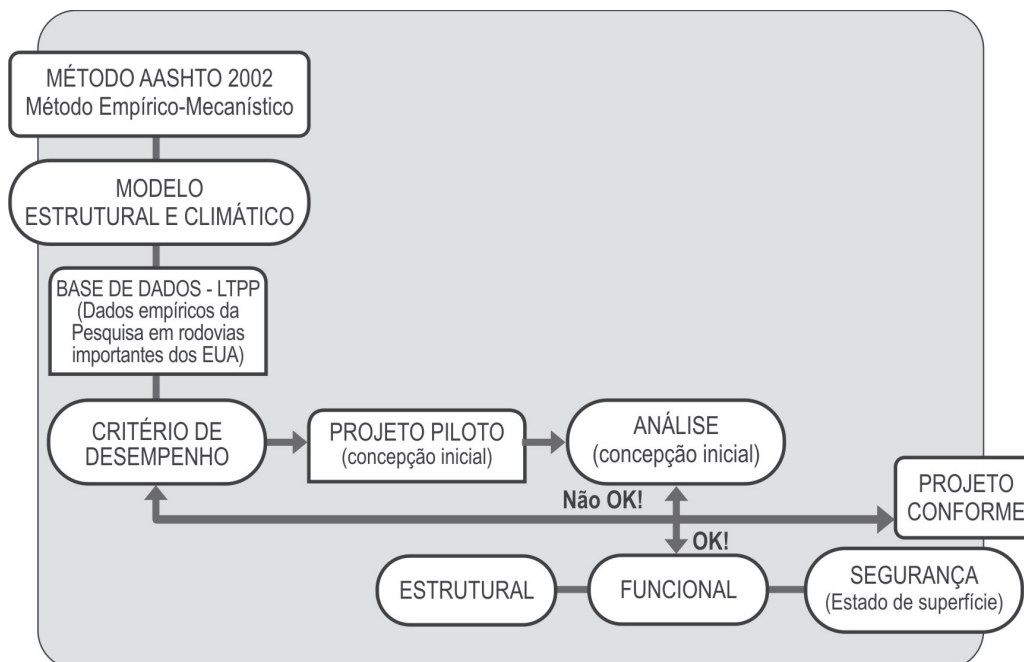


Figura 2 - Processo de tentativas proposto pelo método da AASHTO 2002 para obtenção de um “projeto piloto”.

piloto" conforme

O projeto a ser adotado no novo guia da AASHTO 2002, é um processo iterativo onde software e o conjunto de dados pode ser aplicado considerando três níveis de projeto em função: de sua importância ou nível crítico, da sensibilidade que se possa obter em decorrência dos dados disponíveis de entrada, dos recursos disponíveis ao projetista e a disponibilidade dos dados de entrada no momento de realização do projeto, ou seja:

- **nível 1: informações do material disponível no local ou obtido através de ensaios diretos ou medidos. Uso de técnicas que envolvam o estado-da-arte na caracterização dos materiais, tais como o módulo dinâmico do Concreto Asfáltico, bem como a caracterização do tráfego através da coleta de dados através de estações WIM (Weigh-In-Motion);**
- **nível 2: utiliza-se de correlações para obtenção dos dados de entrada. Por exemplo, o módulo dinâmico pode ser estimado baseando-se nos resultados dos testes desenvolvidos com Binders, graduação de agregados e propriedades da mistura. O nível de acurácia dessa categoria é considerado intermediário;**
- **nível 3: baixa acurácia. Os dados de entrada são selecionados pelo usuário levando em consideração valores típicos nacionais ou da região, tais como a caracterização do Concreto Asfáltico, usando as propriedades físicas (graduação) e tipo de Binder utilizado.**

A grande desvantagem do método está em 2 (duas) considerações:

- **utilização do conceito de PSI (Presente Serviceability Index) que é função do tipo de rodovia;**
- **conceito da EALF (Equivalent Axle Load Factor) que é decorrente de tabelas de equivalência de carga função dos tipos de eixo que estão estabelecidos considerando o Número Estrutural (SN) e do conceito de PSI.**

3 - ESTRUTURA DE UM MÉTODO COMPLETO E CONSISTENTE

Um projeto de restauração consiste basicamente, na determinação das espessuras de reforço a ser aplicado, se necessário, para garantir as condições admissíveis de funcionalidade e integridade estrutural do pavimento durante o período de operação previsto. Os procedimentos de fresagem, selagem de juntas ou trincas, inclusão de

camadas intermediárias de alívio de tensões, e os reparos e/ou reconstruções localizadas, fazem parte do conjunto de ações que podem ser igualmente adotadas para tal fim.

Portanto, nessa proposta de estruturação, a seguir apresentada, reuniu-se práticas e modelos teóricos conceituados e largamente testados, aproveitando as vantagens e desvantagens observadas nos métodos abordados no item 2 deste artigo, considerando, entretanto, que o projetista como responsável técnico, deve pautar sua decisão, sempre em suas experiências e também em outras ferramentas e não, se atendo unicamente a utilizar normas.

3.1 - DIAGNÓSTICO BÁSICO

Uma etapa importante que o projetista deve observar é produzir um diagnóstico em estágio preliminar, baseado fortemente na visita a campo.

Tentar perceber os aspectos funcionais do pavimento, a funcionalidade dos sistemas de drenagem e mudanças significativas do tráfego (número de solicitações e carga) ao longo da utilização do pavimento.

Nesse estágio, procura-se saber, por exemplo, o grau de importância ao detalhamento e fatores de segurança que o projeto deva ter, e dificuldades operacionais que possam delimitar o projeto.

3.2 - CONTEXTO DO PROJETO

Outras informações que devem ser estabelecidas para a realização do projeto incluem: prazos, restrições de materiais, de tecnologias construtivas, de orçamento, possibilidade de janelas de intervenção nas faixas, ou mesmo interrupção do tráfego. Muitas vezes, os prazos impedem que sejam feitos ensaios em diferentes cenários climáticos.

3.3 - AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO PAVIMENTO

3.3.1 - Dados cadastrais

Verificar a existência e disponibilidade de dados cadastrais sobre a estrutura original de pavimento, e o histórico de restaurações realizadas. Com base na confiança que as informações podem fornecer sobre a homogeneidade do trecho a ser analisado, pode-se demandar mais ou menos ensaios de sondagem. Ainda, em alguns casos pode ser que, tais ensaios, nem sejam necessários.

3.3.2 - Avaliação funcional

Antes de exigir uma lista completa de ensaios, com uma malha (posições e intervalos), sem uma lógica que considere a possibilidade de fazer isso com uma adequação tráfego-estrutura, e também, com a importância do projeto, pode-se assumir como uma etapa essencial a ser feita, a avaliação funcional do pavimento considerando certos aspectos fundamentais a seguir apresentados.

3.3.2.1 - Levantamento da irregularidade

Para avaliação da condição funcional dos pavimentos seria de boa norma considerar no levantamento de campo, o uso do perfilógrafo a laser (preferencialmente o de cinco sensores), com o objetivo de se obter um registro contínuo da irregularidade longitudinal e do perfil de afundamento de trilha de roda (ATR), que é um aspecto primordialmente superficial e secundariamente estrutural.

3.3.2.2 - Estado de superfície

O levantamento do estado de superfície, através do procedimento LVC (Levantamento Visual Contínuo), a ser adotado para registro dos defeitos de superfície, deve ser capaz de retratar o estado da superfície, baseado na observação das ocorrências de defeitos aparentes, principalmente as que se referem à trincamento ou fissuração, e na realização de medidas de deformações permanentes (Afundamentos nas Trilhas de Rodas - ATR).

Trata-se, portanto, de um levantamento que pode fornecer um conjunto de informação sobre o estado de superfície do pavimento e tem um papel extremamente importante dentro do contexto dessa proposta. Visa permitir ao avaliador, ter uma idéia do desempenho do pavimento em função de suas características locais, com base em um procedimento de fácil aplicação e baixo custo que, inclusive pode ser feito rapidamente, através de levantamento fotográfico contínuo, no caso de se dispor de pouco tempo ou por problemas operacionais em tratando de vias de tráfego intenso.

3.4 - AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Uma abordagem que pode ser adotada, é atentar o fato de que a avaliação estrutural ser uma etapa mais onerosa que a avaliação funcional. Dessa forma, pode ser elaborado um programa de ensaios coerente e em função da adequação tráfego-estrutura, lembrando, contudo, conforme figura 1, anteriormente apresentada no item 2, que a deflexão não é um parâmetro univoca-

mente relacionado ao trincamento por fadiga, embora tenha relação com o fenômeno.

3.4.1 - Diferenças entre faixa simples, duplas ou mais

Normalmente pistas de faixa simples possuem as mesmas estruturas nos dois sentidos e com o mesmo tráfego unilateral. Nesse cenário e considerando o proposto, pode-se programar uma campanha de ensaios de maneira a usar o espaçamento (malha) continua só que, alternando os sentidos. Isto porque, normalmente a solução de restauração será assumida igual nos dois sentidos.

Para pistas de faixas duplas, normalmente a faixa 2 concentra de 80% a 90% do volume médio diário comercial. Assim, a malha de ensaio da faixa 2 deve ter menor intervalo do que a faixa 1. É importante avaliar a faixa 1 porque, em um intervalo de tempo menor, a faixa 2 passa por uma intervenção estrutural. Assim, pode-se ter uma idéia e comparar a deterioração das faixas.

Havendo mais faixas, a partir da terceira, o volume médio diário de tráfego comercial se distribui entre as faixas. Portanto, uma lógica a ser utilizada é: da faixa com menor volume comercial (mais a esquerda) para a com maior (mais a direita), a malha de ensaio também deve aumentar a exigência de informações (menor intervalo).

3.4.2 - Interação tráfego e estrutura

Quanto maior a preocupação com a interação tráfego - estrutura, maior a importância de investigar os dados.

3.4.2.1 - Estudo de tráfego

Envolve o tráfego que passará pela via, e que deverá solicitar a estrutura de pavimento durante o período de projeto previsto. Dependendo das metodologias de cálculo usadas no projeto, podem ser considerados para a correspondente avaliação, os fatores de veículo baseados nos procedimentos descritos pela AASHTO ou pela USACE, vinculado se possível, ao espectro de cargas obtido de medições efetuadas na rodovia (balanças de pesagem).

De igual forma, as possíveis variações do volume do tráfego produzidas pela presença de povoações, praças de pedágio ou qualquer outro elemento modificador, deverão ser estimadas, considerando a experiência adquirida. Deve-se lembrar, também, que o dimensionamento de restauração do pavimento que se esta

analisando, decorre de um tráfego estimado com base em critérios pré-estabelecidos. Portanto, o dimensionamento da restauração deve dispor de ferramentas que possam ser objeto de avaliação, se comparada aos métodos atuais ou futuros, até para efeito de calibração do modelo que se pretenda usar na explicação de seu comportamento ao longo da vida de serviço.

Dessa forma, considerando as ferramentas de dimensionamento disponíveis, para o tráfego seria de boa norma desenvolver a avaliação preliminar baseado nos seguintes modelos:

- N_{ano} USACE = número anual de repetições equivalentes do eixo padrão de 8,2 tf, no Ano zero, calculado com os fatores de equivalência de cargas do Método do DNER;
- N_{ano} AASHTO = número anual de repetições equivalentes do eixo padrão de 8,2 tf, no Ano zero, calculado com os fatores de equivalência de cargas do Guia da AASHTO.

Ressalta-se que, quanto maior a confiabilidade no estudo do tráfego (volume e carga), maior a confiança na solução gerada. Portanto, para o estudo de tráfego pode-se adotar, por exemplo, três níveis de confiabilidade.

3.4.2.2 - Nível I - Detalhado

Para o estudo de tráfego, seria de boa norma adotar contagens classificatórias e volumétricas em diferentes momentos do ano, e pesagem na própria rodovia ou nas vias alimentadoras.

Em relação à análise estrutural, sugere-se que seja utilizado resultados do ensaio de FWD com espaçamento a cada 20 metros.

3.4.2.3 - Nível II - Normal

Contagens classificatórias e volumétricas em uma única semana do ano, e definição de fatores de expansão típicos (ou de rodovias próximas). Quanto à carga, usar fator de carga de outras rodovias ou hipóteses como por exemplo: 80% do volume médio comercial com carga máxima de eixo legal e 20% sem carga (vazios).

Para a análise estrutural, sugere-se que seja utilizado resultados do ensaio de FWD com espaçamento a cada 50 metros.

3.4.2.4 - Nível III – Menor importância

Para o estudo de tráfego, seria de boa norma adotar o volume médio diário comercial extrapolado para o

ano. Quanto às cargas, usar fator de veículo (USACE) em função do volume de tráfego: 3,0 para leve; 4,0 para médio e 5,0 para pesado.

Para a análise estrutural, sugere-se que seja utilizado ensaio de Viga Benkelman VB a cada 50 m, incluindo a coleta da deflexão a 25 cm de distância do ponto onde foi feita a coleta da deflexão máxima, visando definir, no ponto, o raio de curvatura pelo método de Ruiz ou FWD com espaçamento a cada 150 metros.

3.5 - SUBTRECHOS HOMOGÊNEOS

Sabe-se que as soluções de restauração podem e normalmente são diferenciadas por cada subtrecho, de cada faixa, com características que possam ser consideradas homogêneas. Primeiramente o trecho em estudo do projeto deve ser dividido considerando o tráfego atuante. Em seguida, separa-se pelo tipo de estruturas.

De posse das informações da avaliação de estado de superfície, condição funcional (irregularidade longitudinal e afundamento de trilha de roda) e avaliação estrutural, podem-se produzir os gráficos dos parâmetros ao longo da extensão de cada faixa de projeto.

Quando se utilizar FWD, usar a deflexão zero (D_0) e outro gráfico com a deflexão afastada a 1,5 vezes a espessura total acima do subleito (da qual pode se inferir a correlação com o CBR). Se adotar VB, fazer o gráfico com a deflexão a 25 cm do ponto de carga, visando o raio de curvatura.

Através da avaliação das intersecções das fronteiras dos segmentos homogêneos, definidos por cada parâmetro, determina-se a divisão final dos subtrechos homogêneos a serem utilizados para a descrição da condição atual do pavimento ao longo da rodovia. Cada subtrecho homogêneo implicará em uma solução de restauração. O resultado final deste procedimento é a estimativa dos seguintes parâmetros para cada um dos subtrechos definidos:

FC2 = frequência de trincas Classe 2 (%);

FC3 = frequência de trincas Classe 3 (%);

ATR = afundamento médio em trilha de roda (mm);

IRI = irregularidade longitudinal;

QI = Coeficiente de irregularidade (por correlação com o IRI)

$D_{0,med}$ = deflexão média do pavimento, estando o revestimento asfáltico à temperatura de 21°C (10^{-2} mm);

DC = deflexão característica (média + desvio padrão) em 10^{-2} mm;

SN = Número Estrutural (AASHTO) do pavimento;
 E = módulo de elasticidade do solo de subleito, em kgf/cm²;

N_{ano} USACE = número anual de repetições equivalentes do eixo padrão de 8,2 tf, no Ano zero, calculado com os fatores de equivalência de cargas do Método do DNER;

N_{ano} AASHTO = número anual de repetições equivalentes do eixo padrão de 8,2 tf, no Ano zero, calculado com os fatores de equivalência de cargas do Guia da AASHTO.

Lembra-se que, por questões operacionais e construtivas, subtrechos homogêneos menores que 300 m e maiores que 3 000 m longitudinais podem ser irrealis. Nos trechos curtos, porque se aumenta a dificuldade operacional da obra. Nos mais longos, pela dificuldade dos vários parâmetros envolvidos serem homogêneos em uma longa distância.

3.6 - DIAGNÓSTICO DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO EXISTENTE

Baseado nos resultados dos dados cadastrais, da avaliação funcional (Irregularidade/trilha de roda e estado de superfície), da avaliação estrutural (diferenças entre faixas e iteração tráfego-estrutura) e da definição dos trechos homogêneos, deve-se pensar em qual seria a melhor hipótese de trabalho que poderia explicar a história do pavimento e quais os mecanismos de deterioração que estiveram atuando até o presente momento.

Por exemplo, afundamentos plásticos decorrentes de problemas de drenagem profunda, não vão ser corrigidos com uma camada de recapeamento. Assim, pode-se ter uma idéia inicial de quais variáveis estariam contribuindo, predominantemente, para o desgaste do pavimento.

3.7 - EXEMPLO DE SOLUÇÃO PARA RESTAURAÇÃO

Para cada projeto de restauração, há sempre uma série de alternativas de solução. Portanto, depois de realizado o diagnóstico mais provável, o engenheiro responsável pelo projeto deve elaborar e explicitar uma árvore de decisão a ser adotada, justificando como chegou até a solução final recomendada para cada subtrecho.

Explicar a linha de raciocínio, delimitações e premissas adotadas no projeto, demanda do projetista, capacidade e qualidade na solução proposta.

Os modelos apresentados e criticados no item 2, se

aplicados individualmente são incompletos, por não enxergarem o **estado de superfície**, a **condição funcional** (irregularidade longitudinal e afundamento de trilha de roda) e a **avaliação estrutural**, conforme apresentado nos parágrafos anteriores. Dessa forma, gerou-se, a título de exemplo e orientação global, uma árvore de decisão, apresentada na Figura 3, e explicada na seqüência.

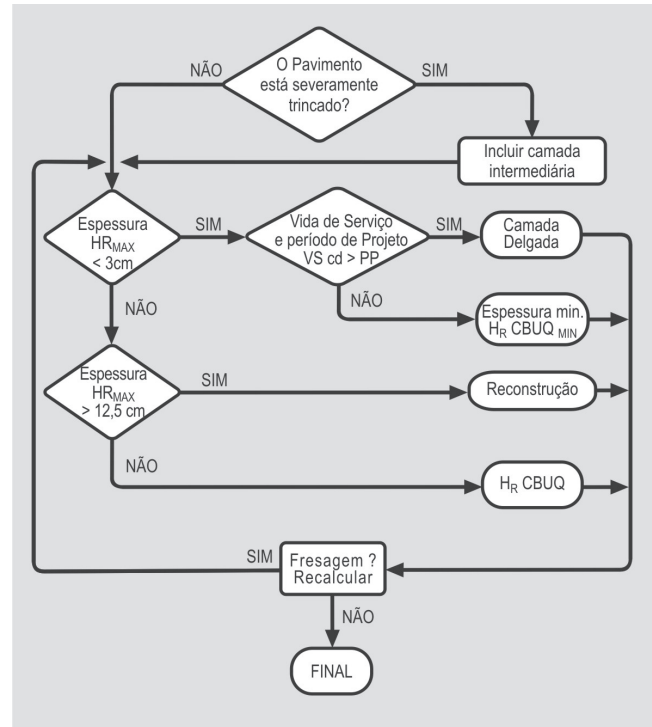


Figura 3 - Árvore de decisão sugerida para o projeto de restauração

3.7.1 - Condição de severidade do trincamento

Com base na resposta do LVC, se pavimento apresentar um percentual de trincas de severidade intolerável (FC-2 / FC-3) em percentual de área, da ordem de 20% ou maior, pode-se dizer que está severamente trincado.

Ressalta-se, contudo, que o critério se pauta no aspecto econômico de decisão, entre fazer reparos localizados ou de forma generalizada. A ordem de 20% é tal que seria mais barato fazer uma camada generalizada de massa fria, do que uma campanha de reparos localizados.

Assim, esta decisão está interligada com a necessidade de adotar o uso de camada intermediária para minimizar e retardar o processo de reflexão de trincas existente.

No caso de estar severamente trincado, deve-se prosseguir na árvore de decisão, lembrando que a solução final conterá as respostas de cada etapa incluindo o uso de camada intermediária.

3.7.2 - Camada intermediária

Algumas soluções de camadas que podem ser inseridas para minimizar e retardar o processo de reflexão de trincas são:

- **brita graduada (BG) com pelo menos 10 cm compactada na energia do Proctor Modificado;**
- **massa fina de pré-misturado a quente (MF de PMQ) aditivada com polímero, como por exemplo, a especificada na DNER ES-388/99;**
- **tratamento superficial duplo com asfalto aditivo com polímero; e**
- **geotêxtil com asfalto (preferencialmente em pavimentos flexíveis) ou geogrelhas (preferencialmente em pavimentos semi-rígidos e rígido).**

3.7.3 - Cálculo da espessura de recapeamento

A espessura de recapeamento dos trechos homogêneos deve ser avaliada de maneira a contemplar os aspectos estruturais e os aspectos funcionais.

Alguns procedimentos podem ser adotados de forma a se definir a espessura do recapeamento. Dentre estes, podem-se citar, por exemplo, um processo simplificado de avaliação contemplando os aspectos estruturais e funcionais.

3.7.3.1 - Aspectos estruturais

3.7.3.1.1 - O número estrutural do pavimento

A determinação do número estrutural do pavimento proposto por Rhode (1994), (número que define a capacidade do pavimento em absorver os esforços aplicados pelo tráfego, traduzido pela espessura total do pavimento) em decorrência das informações obtidas com o FWD, seria um primeiro parâmetro a ser observado em uma avaliação estrutural.

O método se baseia na "regra 2/3" de Irwin (1983) para explicar a distribuição de tensões e, assim, a origem das deflexões encontradas sob um FWD. Esta regra está fundamentada no fato de que aproximadamente 95% da deflexão medida na superfície de um pavimento tem origem abaixo de uma linha a 340 com a horizontal. Com base nesta simplificação, pode-se admitir que a deflexão de superfície medida a uma distância de 1,5 vezes a espessura do pavimento tem origem inteiramente no subleito. Rhode definiu, assim, um índice da estrutura do pavimento da pela equação, a seguir apresentada, que seria incorporado ao número estrutural do pavimento:

$$SIP = D_0 - D_{1,5} H_p \quad (\text{eq.01})$$

onde:

SIP = 'structural index of the pavement',

Do = deflexão sob uma carga de semi-eixo de 40 kN e a 70°F (21,1°C);

H_p = espessura total do pavimento acima do subleito.

A deflexão em 1,5 vezes a espessura total (H_p) pode ser obtida por interpolação.

Segundo RHODE (1994), o número estrutural do pavimento pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$SN = K_1 SIP^{k_2} H_p^{k_3} \quad (\text{eq.02})$$

com SIP dado em μm, H_p em mm e K_i dado pela tabela 1, a seguir apresentada.

Tabela 1 - Coeficientes da fórmula de RHODE

Tipo de Revestimento	K1	K2	K3
Tratamentos Superficiais	0,1165	-0,3248	0,8241
Concreto Asfáltico	0,4728	-0,4810	0,7581

3.7.3.1.2 - As deflexões e os fatores de correção para a temperatura de referência

Os ensaios com o FWD são realizados sob condições específicas de temperatura do momento em que os dados são coletados. Contudo, o asfalto tem comportamento termoplástico e, portanto, todas as suas propriedades sofrem alterações significativas com a temperatura.

Dessa forma, a lei de fadiga do concreto asfáltico muda com a temperatura, assim como sua deformabilidade elástica sob as cargas transientes do tráfego, tornando-se necessário efetuar o ajuste das deflexões de campo para uma temperatura de referência, considerando a sazonalidade local. O trincamento por fadiga é crítico, portanto, sob temperaturas intermediárias (10 a 30° C). Para efeito de temperatura de referência tem-se utilizado 21° C.

Pode-se utilizar a correção proposta pelo Instituto do Asfalto, pelo guia da AASHTO ou outro qualquer que tem se mostrado confiável para o local onde os dados foram obtidos.

Para efeito de exemplo é inserido a seguir, Figura 4 A

e B, os fatores de ajuste para se ter uma idéia de como seria feita essa correção de temperatura em revestimento sobre bases cimentadas e bases granulares, adaptadas da AASHTO/93 por (FRANCO, 2009).

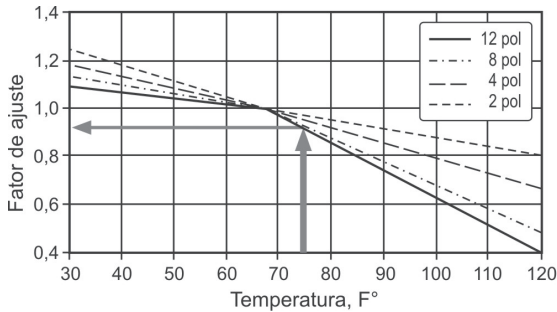
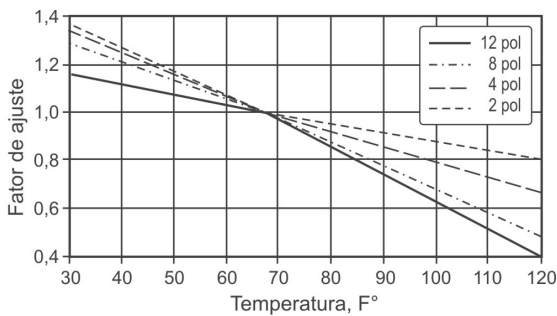


Figura 4 – A) Bases cimentadas



B) Bases granulares.

3.7.3.1.3 -Cálculo do módulo de elasticidade do subleito

Para os sensores de deflexões afastados mais que $1,5.H_p + A$, onde H_p é a espessura total de pavimento acima do solo de subleito e A é o raio da área carregada, o módulo de elasticidade do subleito pode ser calculado pela equação 3, a seguir apresentada.

$$E_{SL} = \frac{0,904 \text{ pa}^2 (1-\nu^2)}{(rd_r)} \quad (\text{eq.03})$$

onde:

- p = pressão de contato sob a placa;
- a = raio da placa;
- ν = coeficiente de Poisson;
- dr = deflexão na distância $1,5.H_p$; e
- $r = 1,5.H_p$

3.7.3.2 - Estimativa do CBR

O CBR pode ser estimado com base na pela equação 4, a seguir apresentada.

$$CBR = \frac{E_i}{K_i} \quad (\text{eq.4})$$

onde:

K_i = e uma constante que varia com o material do subleito.

Alguns valores empíricos usuais em kgf/cm^2 são:

- Brita Graduada: $MR / CBR = 17$
- Solo Granular Estabilizado: $MR / CBR = 23$ a 35
- Solos Finos Coesivos: $MR / CBR = 70$ a 200 (média = 100)

Uma relação que pode ser utilizada para prever a espessura de recapeamento em concreto asfalto usinado a quente, que evitará ao fim do período de projeto que as deflexões plásticas estejam acima daquela admissível, é a pela equação 5, a seguir apresentada.

$$H_R^{estr} = 40 \log (\delta_c / \delta_p) \quad (\text{eq.5})$$

Onde:

H_r em cm

δ_c = deflexão característica em 10^{-2} mm;

δ_p = deflexão admissível de projeto estimada por:

$$\log(\delta_p) = 3,01 - 0,176 \log(N_p) \quad (\text{eq.6})$$

Onde

N_p = tráfego de projeto (USACE);

δ_p = deflexão admissível em 10^{-2} mm:

3.7.3.3 - Aspectos funcionais

3.7.3.3.1. Irregularidade admissível

A Irregularidade Longitudinal é medida por meio de equipamento tipo resposta (como o Maysmeter), obtendo-se o parâmetro “Quarter-car Index” (QI, em contagens/km), com o qual se pode calcular o IRI (“International Roughness Index”) pela seguinte correlação da eq.(7):

$$QI = 13 \times IRI \quad (\text{eq.7})$$

A Tabela 2, a seguir apresentada, mostra uma classificação que foi padronizada dentro da OCDE (*Organisation de Coopération et de Développement Économiques*, que reúne Alemanha, Áustria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Espanha, EUA, França, Grécia, Irlanda, Islândia, Itália, Luxemburgo, Noruega, Países Baixos, Portugal, Reino Unido, Suécia, Suíça, Turquia, Japão, Finlândia, Austrália e Nova Zelândia) e que pode ser tomada como referência para a definição de padrões aceitáveis de irregularidade, no que diz respeito ao conforto ao rolamento.

Por este critério, uma irregularidade admissível QI = 35 cont/km, por exemplo, implica em manter as rodovias dentro de uma condição funcional excelente, de modo a serem adequadas para tráfego a velocidades acima de 120 km/h.

Tabela 2 - Referência para a definição de padrões aceitáveis de irregularidade

IRI(m/km)	QI(cont/km)	v*(km/h)	Condição Funcional	Categoria OCDE
≤ 3	≤ 39	> 120	Excelente	1
> 3 e ≤ 6,5	> 39 e ≤ 84,5	100 - 120	Aceitável	2
> 6,5 e ≤ 8,5	> 84,5 e ≤ 110,5	70 - 90	Tolerável	3
> 8,5 e ≤ 10,5	> 110,5 e ≤ 136,5	50 - 60	Intolerável	4
> 10,5	> 136,5	< 50	Péssima	5

v* = velocidade de tráfego "confortável".

Tendo em vista que o principal componente do Índice de Serventia de um pavimento é a irregularidade longitudinal, utilizou-se como referência para o cálculo da vida restante o seguinte modelo do HDM-III (PATERSON, 1987):

$$IRI(t) = [IRI_0 + 725(1 + SNC)^{-4,99} NE_4(t)] e^{0,0153t} \quad (\text{eq.8})$$

onde:

NE₄ = tráfego acumulado do eixo padrão 8,2 tf, em milhões por faixa (AASHTO);

t = idade do pavimento desde a construção ou restauração, em anos;

SNC = número estrutural corrigido do pavimento, dado por:

$$SNC = SN + 3,51_{\log_{10} CBR} - 0,85(\log_{10} CBR)^2 - 1,43 \quad (\text{eq.9})$$

onde :

SN = número estrutural do pavimento (AASHTO) = a₁h₁ + a₂h₂m₂ + a₃h₃m₃;

a_i = coeficiente de equivalência estrutural da camada i;

h_i = espessura da camada i, em polegadas;

m_i = coeficiente de drenagem da camada i;

CBR = CBR do solo de subleito.

3.7.3.3.2. Espessura de recapeamento em termos funcionais

Pode-se estimar espessura necessária para que ao fim do período de projeto a irregularidade seja a admissível por meio da eq 10:

$$QI_d = \frac{19 + (QI_a - 19)}{(0,602H_R + 1)} \quad (\text{eq.10})$$

3.7.3.4 - Espessura a ser considerada

Após calcular as espessuras de caráter funcional e estrutural, em principio, a maior das duas será aquela que deve ser considerada a mínima para garantir o período de projeto.

$$H_R = \max(H_R^{estr}, H_R^{func}) \quad (\text{eq.11})$$

Contudo, há de se observar os valores obtidos no procedimento de obtenção da espessura de recapeamento considerando:

3.7.3.4.1 - Opções para espessuras de recapeamento menores que 3 cm

Nos casos em que a espessura de recapeamento em CAUQ convencional calculada for da ordem de 3 cm ou menor, pode-se testar a possibilidade de utilizar outros tipos de materiais para a camada de recape, como por exemplo, adotar camadas delgadas de micro-concreto asfáltico.

3.7.3.4.2 - A vida de serviço de camadas delgadas é menor que o período de projeto

Ao fazer a análise da possibilidade de utilizar camadas delgadas, deve-se calcular a vida de serviço que estas apresentarão. Pois, se o período de tempo da vida de serviço for menor que o período de projeto, não será uma solução satisfatória. Assim, pode-se adotar a espessura mínima construtiva de concreto asfáltico convencional, aproximadamente 3 cm.

3.7.3.4.3 - Quando a espessura de recape é maior que 12,5 cm

Muitas das vezes, os valores de espessura de recapeamento, obtidos pela equação 17, é acima de 12,5 cm. O que pode ser considerada uma espessura elevada. Em cenários deste caso, pode-se pensar em partir para a reconstrução do pavimento.

Ainda, um subcaso que pode ocorrer é que a origem da elevada espessura, baseia-se na demanda funcional. Quando ocorre isto, pode-se estimar uma espessura de

fresagem e recalcular (pois a irregularidade diminui) obtendo-se uma espessura menor. Esse processo pode ser feito até “equilibrar” com a solicitação da espessura estrutural.

3.8 - SOLUÇÃO DE ALTERNATIVAS

Assim como no exemplo de árvore de decisão apresentado, o projetista poderá obter várias soluções de restauração ou reconstrução para cada subtrecho homogêneo, ou locais específicos. Isso decorre das possibilidades de usar materiais diferentes, fresar ou não, “equilibrar” os aspectos estruturais e funcionais requeridos, entre outras variáveis.

Uma vez atingido esse ponto, as alternativas podem ser comparadas, considerando o custo inicial, restrição orçamentária, custo de manutenção no novo período de projeto e vida de serviço estimada.

O custo inicial precisa ser menor que as restrições orçamentárias e a vida de serviço maior que o período de projeto. Contudo, podem ser obtidas soluções que não satisfaçam as duas coisas ao mesmo tempo.

3.9 - ANÁLISE ECONOMICA

A solução de restauração adotada deverá corresponder a mais eficaz em termos econômicos, e não aquela que é a de menor custo de implantação. Desta forma, a rigor, um projeto efetivamente otimizado, pode ser definido por meio do parâmetro: Custo Anual Uniforme Equivalente de Manutenção (CAUEM) eq. 12.

$$CAUEM = V_s / C_i \quad (\text{eq.12})$$

Onde:

V_s = vida de serviço; e

C_i = custo inicial.

A solução que apresentar o menor CAUEM é aquela mais indica.

4 - COMENTÁRIOS FINAIS

Procurou-se apresentar um encadeamento de idéias

que representasse os aspectos mais importantes que devem ser levados em consideração, em um projeto de restauração de pavimento flexível.

Baseado em uma avaliação crítica de normas e guias, mais disseminados no mercado, nacional e internacional (DNIT, AASHTO, HDM), o presente trabalho procurou reunir práticas e modelos teóricos conceituados e largamente testados, aproveitando as suas vantagens e desvantagens.

Uma contribuição significativa repousa no apelo dado a não considerar somente os critérios defleto-métricos no cálculo da espessura de restauração. A avaliação funcional em sinergia com a estrutural conduz a resultados mais apropriados dos projetos de restauração.

A interação tráfego-estrutura é outro quesito a ser destacado. Essa interação, se bem compreendida pelo projetista, permite que sejam especificados métodos de ensaios e coleta de informações de maneira mais racional e eficiente ao longo do trecho a ser objeto da restauração.

O que se pretende finalmente chamar a atenção do projetista como responsável técnico, esta no fato deste passar a pautar sua decisão, em suas experiências e outras ferramentas que não só a normas e guias se considerarmos, por exemplo, que a AASHTO usou o termo “guia” em seu procedimento metodológico e que esse procedimento é considerado, no meio técnico, uma das maiores ferramentas de decisão em dimensionamento e restauração de pavimentos de rodovias.

Para cada projeto de restauração, há sempre uma série de alternativas de solução. Portanto, depois de realizado o diagnóstico mais provável, o engenheiro responsável pelo projeto deve elaborar e explicitar uma árvore de decisão a ser adotada, justificando sua solução final recomendada para cada subtrecho homogêneo. Ainda que essa deva ser uma prática recomendável, esta é pouco encontrada no mercado nacional.

Explicar a linha de raciocínio, delimitações e premissas adotadas no projeto, demanda do projetista, capacidade e qualidade na solução proposta.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. The AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. 1986.
- _____. The AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. 2002.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos, Procedimento. PRO - 08/78a. 11 p.
- _____. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis, Procedimento A PRO-10/79a. 31 p.
- _____. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis, Procedimento B PRO-11/79b. 16 p.
- _____. Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos. Procedimento PRO-159/85. 25 p.
- _____. Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAC. Procedimento PRO-269/94. 17p.
- IRWIN, L.H., User's Guide to Modcomp2, Version 2.1., Local Roads Program, Cornell University, Ithaca, NY, 1983.
- PATERSON, W.D.O. (1987) - Road Deterioration and Maintenance Effects - models for planning and management. The World Bank, Washington, D.C., 1987.
- RODRIGUES, R.M. 2001. "Aperfeiçoamento e Consolidação de Modelos de Previsão de Desempenho para Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários com base na Pesquisa LTPP-FHWA". Relatório Final da Pesquisa CNPq No 301314/96-9. Stephens, Ralph I.; Fuchs,
- ROHDE, G.T., "Determining Pavement Structural Number from FWD Testing," Transportation Research Record 1448, Washington, DC, 1994.
- ROHDE, G T and VAN WIJK, A J 1996. A mechanistic procedure to determine basin parameter criteria. Southern African Transportation Conference, Pretoria.