



**Metodologia francesa para  
o dimensionamento  
de estruturas de pavimentos  
de concreto asfáltico**

**Breno Barra, Pierre Hornyh, Yves Brosseaud  
Leto Momm e Jorge Soares**

# 17ª

## REUNIÃO DE

# PAVIMENTAÇÃO URBANA



09 a 11 | agosto | 2011

Hotel Plaza São Rafael

Porto Alegre | RS





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

**CONSELHO EDITORIAL**  
Diretoria da ABPv

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO**

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

**COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO**

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

Tradução: Mariana Ricci  
Editoração: MURO Produções Gráficas  
Revisão: Ellis Pinheiro  
Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda  
Periodicidade: Trimestral – Tiragem: 5.000 exemplares



**Nossa capa:**

Rodovia Carvalho Pinto  
SP-070 Guarulhos-Taubaté.  
Foto: Georgina Libório Azevedo

# Sumário

- 2 Editorial
- 3 Desafios e perspectivas para uma pavimentação de desempenho superior  
Palavra do Diretor-Presidente
- 4 Seção de notas
- 7 Cartas dos leitores

**ESPAÇO JURÍDICO**

- 8 A política da vez: a nacional de resíduos sólidos  
Victor Athayde

**ARTIGOS TÉCNICOS**

- 10 Metodologia francesa para o dimensionamento de estruturas de pavimentos de concreto asfáltico  
Breno Barra, Pierre Hornych, Yves Brosseaud  
Leto Momm e Jorge Soares
- 27 Adaptação e reconstrução de pavimentos em aeroportos – Estudo de caso  
Silvio Rodrigues Filho e Regis Martins Rodrigues
- 39 Casos de obras – Pavimentação com qualidade – Uma visão de um experiente engenheiro rodoviário  
José Mário Cortes Chaves
- 49 Transporte de cargas perigosas na malha rodoviária da região metropolitana de Campinas  
Natália Magalhães Rosa Andrade e Maria Rachel Russo Seydell

**OPINIÃO**

- 59 Conceitos fundamentais para utilização de bases com predominância de solo fino laterítico  
Douglas Fadul Villibor e Job Shuji Nogami

# Editorial

---

A Revista PAVIMENTAÇÃO em sua edição de número 18 chega ao leitor com as boas vindas a todos os participantes da 40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Este ano, o maior encontro de pavimentação do País volta a ser realizado no Rio de Janeiro, cidade sede da Associação.

Historicamente, a capital fluminense sediou as seis primeiras edições da RAPv nos anos de 1960 a 1965. Somente 19 anos mais tarde a Reunião voltaria à cidade, no ano de 1984, num País à beira da redemocratização. A última RAPv realizada no Rio de Janeiro foi a 35ª edição, em 2004.

Nesta edição apresentamos quatro artigos inéditos. O primeiro deles é Metodologia Francesa para o Dimensionamento de Estruturas de Pavimentos de Concreto Asfáltico, dos autores Breno Barra, Pierre Hornych, Yves Brosseaud, todos do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC, França), Leto Momm, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Jorge Soares, da Universidade Federal do Ceará (UFC).

O segundo artigo, dos autores Silvio Rodrigues Filho e Regis Martins Rodrigues, versa sobre Adaptação e Reconstrução de Pavimentos em Aeroportos – Estudo de Caso. O terceiro trabalho, de autoria do engenheiro José Mário Cortes, aborda a Pavimentação com Qualidade, na visão crítica de um experiente engenheiro rodoviário. O quarto e último artigo menciona um tema que já mereceu matéria de capa desta Revista no ano de 2007, o transporte de cargas perigosas. Neste estudo, as autoras Natália Magalhães Rosa Andrade e Maria Rachel Russo Seydell discutem o Transporte de Cargas Perigosas na Malha Rodoviária da Região Metropolitana de Campinas, no Estado de São Paulo.

Na coluna *Espaço Jurídico*, Victor Athayde faz uma abordagem da Política Nacional de Resíduos Sólidos, no âmbito do conceito de *Política Nacional*, que é o nome dado às legislações federais que se destinam a traçar diretrizes e objetivos para que os Direitos Fundamentais de toda espécie, expressos na Constituição Federal, sejam assegurados.

O colunista Eng<sup>o</sup> Rone Antônio de Azevedo excepcionalmente, por motivos de saúde, não escreve nesta edição. Em *Opinião*, a Revista traz algo inédito. O Livro *Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos*, de autoria dos engenheiros Douglas Fadul Villibor e do saudoso Job Shuji Nogami, que trata sobre alternativas de pavimentos, apresenta tecnologia mais barata e adequada às condições tropicais. Em função disso, a Revista publica, a partir desta edição, com a permissão dos autores, os conceitos fundamentais para utilização de base com predominância de solo fino laterítico, onde serão abordados: Conceituação, Campo de Aplicação, Ocorrências de Jazidas, Técnica Construtiva e Controle Tecnológico, Comportamento Tecnológico, Conservação e Recuperação.

Na próxima edição, a Revista PAVIMENTAÇÃO trará, além de seu conteúdo habitual, a cobertura completa da 40ª RAPv, bem como as perspectivas no âmbito das pesquisas e investimentos para o setor da pavimentação no Brasil e no mundo.

*Conselho Editorial*

# Desafios e perspectivas para uma pavimentação de desempenho superior

## Palavra do Diretor-Presidente



Sejam todos muito bem-vindos à 40ª edição da Reunião Anual de Pavimentação.

É com muita honra e alegria que recebemos na cidade do Rio de Janeiro os profissionais, a comunidade acadêmica, as autoridades públicas e os empresários do setor de engenharia de pavimentação para este que se apresenta como o grande evento do ano promovido pela ABPv.

Uma das prerrogativas que sempre defendemos é a interação de toda a cadeia dos setores diretos, indiretos e agregados da área de pavimentação, a fim de promover o debate, a discussão em busca de perspectivas cada vez mais auspiciosas, a troca de experiência e, acima de tudo, a ampla difusão do conhecimento.

E para que isto ocorra é preciso que se crie momentos como este para consolidar aquilo que tanto planejamos, superando obstáculos que sempre se apresentam, mas, como sempre, deixando na história do ABPv o registro dos esforços e do sucesso que vimos colhendo aos longo de 39 edições da RAPv.

Nesta 40ª edição não será diferente. O Rio de Janeiro, cidade sede da ABPv, receberá de braços abertos,

como sempre faz em seu cartão-postal, pessoas de todo o Brasil e do exterior para que possam compartilhar de momentos importantes do saber profissional e de uma verdadeira interação social.

Para que este encontro pudesse se tornar realidade muitos esforços foram conjugados. Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Rio de Janeiro – DER-RJ, externamos o nosso agradecimento pelo empenho e apoio dispensados na realização do evento, que sem dúvida foi fundamental para que chegássemos até aqui. Ao Governo do Estado do Rio de Janeiro pela oportunidade do evento se realizar na capital fluminense. Em especial à COPPE/UFRRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, cuja parceria com a ABPv vem de longa data por meio de suporte acadêmico e apoio irrestrito aos eventos da Associação.

Aos patrocinadores, expositores, colaboradores, apoiadores, membros do comitê organizador, membros do comitê técnico-científico, autores de trabalho, participantes e visitantes; além dos agradecimentos, destacamos a confiança depositada na ABPv para a realização de um evento dessa magnitude, o qual objetiva proporcionar instrumentos que viabilizem enfrentar desafios e visualizar perspectivas para uma pavimentação de desempenho superior.

E finalmente rendemos nossos agradecimentos à Petrobras, patrocinador oficial, cuja relação de apoio e credibilidade já é um capítulo à parte na história dos 50 anos da Associação Brasileira de Pavimentação.

Sejam todos muito bem-vindos e aproveitem este momento de encontro profissional e social. Todos somos atores importantes desse evento.

EDUARDO ALBERTO RICCI  
Diretor-Presidente da ABPv

# Seção de notas da Revista PAVIMENTAÇÃO

## Transpoquip Latin America 2010



Com o tema voltado totalmente para a área de infraestrutura de transportes, entre os

dias 10 e 12 de novembro, na cidade de São Paulo, no Expo Center Norte, acontecerá a Transpoquip Latin America, edição 2010.

Trata-se de um evento que reúne vendedores e compradores de equipamentos e serviços para rodovias, ferrovias, estações, portos, vias fluviais e aeroportos da América Latina. Esta feira apresenta expositores com a oportunidade de realização de bons negócios de vendas para indústrias do setor de transporte. O evento tem como objetivo também apresentar as modernas tecnologias da área de infraestrutura de transportes em todos os seus modais.

## Pesquisa de ponta no Espírito Santo

Como decorrência da efetivação da Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Espírito Santo, o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo – IEMA formou o Subcomitê de Resíduos em Mineração, com intuito de desenvolver plano de ação que objetiva o aproveitamento do resíduo do processo de beneficiamento de mármore e granito na construção civil, notadamente na base asfáltica, meio-fio e até manilhas, o que dá destinação adequada a um resíduo, transformando-o em produto e diminuindo o uso de recursos naturais e custos.

Os interessados em obter informações e prestar apoio, contactar o engenheiro ambiental Eder Ferreira Framil (eframil@iema.es.gov.br) ou a tecnóloga Carolina

Francisco Tonani (ctonani@iema.es.gov.br), através do telefone (27) 3136-3468, na Subgerência de Licenciamento em Mineração do IEMA.

## Congresso Mundial de Rodovias

A Associação Mundial de Rodovias (World Road Association) promoverá, entre os dias 26 e 30 de setembro de 2011, o XXIV Congresso Mundial de Rodovias. O evento acontecerá na Cidade do México.

Com o lema “Caminhos para viver melhor”, o congresso vai premiar trabalhos, papers e projetos de pesquisa. Para tanto é preciso observar o prazo de entrega dos trabalhos para que possam ser submetidos ao comitê técnico do evento. As informações completas podem ser obtidas no site: [piarcmexico2011.org](http://piarcmexico2011.org)

## RODO 2010

A Universidade Anhembi-Morumbi promoverá, na cidade de São Paulo, nos dias 20 e 21 de outubro, o 3º Simpósio sobre Obras Rodoviárias, com a temática *Rodovias Sustentáveis*.

O tema debaterá desde a fase de planejamento e projetos até a fase de operação de rodovias, com ênfase na gestão ambiental para prevenção e controle de processos de degradação ambiental. Especialistas renomados, de diferentes regiões do Brasil e do exterior, apresentarão suas experiências sobre diversos e recentes projetos voltados à prevenção e ao controle geotécnico e ambiental.

As inscrições e a programação completa do evento podem ser obtidas pelo email: [abge@ipt.br](mailto:abge@ipt.br), ou através dos telefones: 11-3767-4361 – Fax: 11- 3719-0661

## **5ª Conferência Internacional de misturas betuminosas e pavimentos**

Para aqueles que têm interesse em grandes eventos do setor de pavimentação no exterior e querem se programar com bastante antecedência, a 5ª Conferência Internacional de Misturas Betuminosas e Pavimentos é uma oportunidade excepcional.

O evento ocorrerá nos dias 2 e 3 de junho de 2011 na cidade de Tessalônica, região da Macedônia Central, na Grécia.

O foco da conferência são as novas pesquisas e tecnologias que estão mudando os processos no mundo todo de utilização das misturas betuminosas e pavimentos. Também serão explorados o desenho, a construção, a manutenção, a administração, a produção e o uso dos materiais e misturas betuminosas. Mais informações no site de notícias do setor de pavimentação [www.trb.org](http://www.trb.org).

.....

## **Brazil Road Expo: São Paulo sedia evento internacional de Infraestrutura Viária e Rodoviária em 2011**

Com o objetivo de apresentar novas soluções em sistemas, métodos para construção e infraestrutura de vias e rodovias, o Brazil Road Expo surge como um grande ponto de encontro de especialistas, empresários e autoridades. Organizado pelo Quartier Feiras e Eventos, o evento acontecerá de 04 a 06 de abril de 2011, no Expo Center Norte, em São Paulo

A primeira edição do Brazil Road Expo terá 150 expositores nacionais e internacionais que ocuparão uma área de exposição de 11.000 m<sup>2</sup>, onde receberão cerca de 8.000 profissionais especializados que atuam diretamente no segmento de vias e rodovias – construtoras, concessionárias, locadoras de equipamentos, empreiteiros e órgãos públicos. Os visitantes encontrarão as principais novidades em asfalto, sinalização, equipamentos, iluminação pública, aditivos, bombas, caminhões, concreto, sistema de gestão e informação, ferramen-

tas e equipamentos de precisão, medição e de proteção individual, entre outros.

De acordo com o diretor da Quartier Feiras e Eventos, o engenheiro Guilherme Ramos, trata-se de um evento arrojado que abordará o tema desde a concepção (projeto) até a conservação e manutenção. “O segmento de pavimentação estava carente de um evento desse porte. O Brazil Road Expo reunirá toda a comunidade técnica e as mais avançadas tecnologias disponíveis no mundo”, ressalta o executivo.

Além da área de exposição, o Brazil Road Expo contará também com uma vasta programação de palestras, congresso e seminários onde serão discutidos os principais gargalos do segmento. “Seguindo uma tendência mundial de feiras, o programa de conferências é a principal forma de promover a transferência de tecnologia entre expositores, visitantes e congressistas”, explica Ramos.

.....

## **Curso Prático de Solos no IME**

Entre os dias 10 e 12 de agosto, a ABPv promoveu o Curso Prático de Solos. As aulas foram ministradas no Instituto Militar de Engenharia (IME), no Rio de Janeiro. No corpo



docente, estavam os professores Ben-Hur de Albuquerque e Silva, Antonio Carlos Rodrigues Guimarães e Álvaro Vieira. Entre os temas abordados, destacamos a preparação de amostras, teor de umidade (*speedy* e álcool), granulometria por peneiramento e sedimentação, densidade real, limites de liquidez, plasticidade e contração, classificação de solos (tradicionais e MCT), equivalente de areia e compactação e massa específica *in situ*, dentre outros.

## Falecimento

No dia 15 de agosto faleceu o engenheiro Armando Martins Pereira (1927-2010).

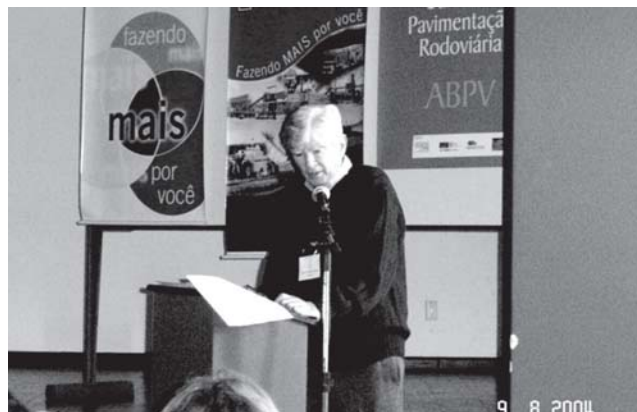
O ilustre engenheiro e renomado professor foi diretor da ABPv, representante regional no Estado do Paraná, membro de CTC da Revista PAVIMENTAÇÃO, e recebeu desta associação o Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom durante a 36ª RAPv realizada em Curitiba.

Desde criança Armando queria ser engenheiro, seu desejo se realizou em 1952, quando formou-se na Escola Nacional de Engenharia no Rio de Janeiro. Atuou no extinto DNER nos projetos de execução de pavimentação da BR-116, BR-376 e BR-277, onde publicou os métodos DNER PRO 10 e DNER PRO-08 (atual DNIT 006/2003-PRO).

Também atuou no magistério como professor emérito da UFPR e foi paraninfo de 18 das 30 turmas das

quais lecionou em reconhecimento que teve dos alunos por sua dedicação.

Aos familiares, a atual diretoria da ABPv em nome de todos os associados presta aqui sua homenagem a este amigo, colega, colaborador e profissional exemplar o qual tivemos a honra de conviver.



# REVISTA **ABPv** Associação Brasileira de Pavimentação **PAVIMENTAÇÃO**



### **Normas para submissão de artigos ao Comitê Técnico Científico da ABPv**

Para publicação de artigos técnicos é necessária prévia submissão ao Comitê Técnico Científico da ABPv. Os artigos deverão contemplar as normas que estão disponíveis no site [www.abpv.org.br](http://www.abpv.org.br), nos idiomas português, inglês e espanhol.

Endereço de envio: [abpv@abpv.org.br](mailto:abpv@abpv.org.br)

# Cartas dos leitores

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

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

## Gestão Ambiental em Rodovias

A respeito do excelente artigo sobre gestão ambiental aplicada a projetos de engenharia, da edição 16, no qual os autores usaram como referencial o caso da BR-101 Sul, algo no mesmo sentido ocorreu no Estado de São Paulo. Trata-se da construção da Nova Imigrantes, onde os especialistas por meio de uma metodologia científica resolveram uma equação complexa, envolvendo o aspecto ambiental *versus* o impacto ambiental, na busca de uma solução que produzisse um desenvolvimento sustentável. Há na internet um artigo de D. A. Fungaro, L. Martins e A. F. Margarido, que trata especificamente deste caso: *Gestão Ambiental no Projeto da Rodovia Nova Imigrantes na Serra do Mar: Estudo de Caso*.

O resumo do trabalho aponta que a implementação do Sistema de Gestão Ambiental no projeto trouxe o comprometimento em favor de dois pilares da gestão: a prevenção ao impacto ambiental e a melhoria contínua do projeto. Em suma, "o projeto cumpriu o objetivo de satisfazer os interesses socioeconômico da população de São Paulo, além de produzir vantagens, tais como: vantagem ambiental, por intermédio da produção de uma obra limpa ambientalmente, com a redução da intervenção na área florestal; vantagem técnica, ao adentrar no maciço rochoso, reduziu o percurso da rodovia com mais qualidade; vantagem institucional, ao proporcionar uma ótima imagem institucional junto ao público e aos órgãos governamentais". Portanto, o tema gestão ambiental em rodovias foi muito bem abordado pela edição 16 da Revista PAVIMENTAÇÃO, o sugiro ser tema recorrente nas próximas edições.

*Maria Clara D'ávila Motta Souza*  
Suzano, SP

Excelente o artigo Gestão Ambiental aplicada a Projetos de Engenharia, BR-101 Sul. A questão ambiental se espraia em todas as direções na construção de uma sociedade mais equilibrada consigo mesma, resultando de um equilíbrio e sustentabilidade do meio ambiente. Aliás, a temática de meio ambiente foi a tônica de grande parte da edição 16. Parabéns!

*Marconne Andrade Filho*  
Concórdia, SC

## Espaço Jurídico

A Revista PAVIMENTAÇÃO deu um passo importante na sua consolidação como uma publicação cada vez mais completa na sua área. Refiro-me à seção Espaço Jurídico, que, além de trazer a baila questões legais relativas ao setor, permite a nós profissionais, notadamente técnicos e engenheiros, nos inteirarmos dos pressupostos jurídicos de nossas atividades rotineiras, bem como projetos, etc.

*Vinicius Freitas Guedes*  
Taubaté, SP

Muito bem-vinda a coluna Espaço Jurídico. Gostaria de sugerir com pauta o tema Responsabilidade Civil dos Engenheiros, pois, quando da elaboração de projetos, a atenção que precisamos dispensar para as questões legais é de capital importância, e o assunto geralmente ganha maior vulto quando fatos configuraram negligência, imperícia ou imprudência do profissional.

*Solange do Rosário Nepomuceno*  
Uberlândia, MG

# A política da vez: a nacional de resíduos sólidos



Victor Athayde\*

A coletivização da tutela de Direitos Fundamentais é tema que tem sido frequentemente debatido nas academias. Nada mais natural, tratar direitos individuais de maneira coletiva beneficia um maior número de pessoas e traz a noção de cidadania mais próxima e palpável para o homem comum.

A Constituição Federal de 1988 concretizou os Direitos Sociais (do trabalho; saúde; educação; etc.) e os trouxe para o enfoque de obrigação exigível do Estado, coisa que não era (ou podia ser) feita em tempos não democráticos.

A partir do processo de democratização brasileira, as Políticas Nacionais passaram a ser, de meros programas para guiar o Administrador, fundamento de exigência social.

“Política Nacional” é o nome dado às legislações federais que se destinam a traçar diretrizes e objetivos para que os Direitos Fundamentais de toda espécie, expressos na Constituição Federal, sejam assegurados. Essa espécie legal traz definições abrangentes que vão

desde a estrutura administrativa para a concretização das políticas até a definição de princípios norteadores da conduta pública e privada.

Até aqui foi feito um breve esquema, uma resumida conceituação que, para o leitor não habituado ao Sistema Jurídico, serve para situá-lo na importância do tema título.

Pois bem, são exemplos da espécie normativa a Política Nacional Sobre Drogas; a Política Nacional de Educação Infantil; a Política Nacional de Meio Ambiente, entre outras.

Como se vê, os temas são os mais variados. Posso afirmar que as legislações respectivas são ricas em detalhes, por isso, na teoria, são grandes fontes de solução, ocorre que há um desafio: implementar com eficiência.

A Administração, por sua vez, tem vasto arsenal punitivo para assegurar a implementação dos objetivos legais expressos nas Políticas Públicas e, quando falha nessa, ou em outras atribuições, por omissão ou por culpa, há de se provocá-la judicialmente para cumprir seu dever<sup>1</sup>.

Como se vê, há no Brasil todo um sistema lógico para que se alcance a tutela dos Direitos Fundamentais.

Há a norma que impõe e o meio judicial de se exigir do governante, e do particular, determinada conduta, por eventualmente olvidada ou feita de forma ineficiente. Pois

\* Membro da Câmara Técnica para Assuntos Jurídicos do Conselho Estadual de Meio Ambiente do Espírito Santo – CONSEMA, ex-Assessor Jurídico do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo – IEMA, idealizador do blog [www.direitodomeioambiente.blogspot.com](http://www.direitodomeioambiente.blogspot.com) / email: [victorathayde@walmirbarroso.com.br](mailto:victorathayde@walmirbarroso.com.br)

<sup>1</sup> Essa é atribuição do Ministério Público e até de associações civis, que se destinem à tutela ao tema da omissão (Direito do Consumidor; Direito Ambiental; etc.), em seu Estatuto Social (vide Lei Federal nº 7.345/1985 – Lei da Ação Civil Pública)  
Outros entes também são titulares desse Direito, inclusive o simples cidadão que, por meio da Ação Popular, pode provocar o Poder Público em função de sua eventual omissão ou ato que se desvirtue da lei.

bem, recentemente, mais precisamente no dia 2 de agosto de 2010, foi sancionada mais uma dessas legislações.

Depois de 21 anos de tramitação no Congresso, entra em vigor a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010). Trata-se de uma lei moderna, aponto dois itens que me causaram maior impacto positivo, justamente por premiar a criatividade e trazer incentivo, não punição, algo raro nas legislações brasileiras.

Primeiramente o que prevê, dentre outras coisas, a logística inversa e a reciclagem (incisos XIV e XII do art. 3º)<sup>2</sup>.

Isso porque a previsão do reaproveitamento do resíduo se compatibiliza com a noção de sustentabilidade em escala superior à de uma destinação adequada do mesmo.

Essa previsão legal traz à recordação o Termo de Ajuste de Conduta que foi firmado entre o Ministério Público do Estado do Espírito Santo, em Cachoeiro de Itapemirim, com associações representativas das indústrias Beneficiadoras de Mármore e Granito, em 2008, no qual se exigiu a destinação adequada da lama abrasiva, resíduo proveniente do corte do bloco de granito e polimento das chapas respectivas.

Diante dessa ação do MP capixaba, surgiu a necessidade premente de se destinar adequadamente toda aquela lama armazenada por anos nos pátios das empresas, sob pena de se impor multas por descumprimento de prazos fixados.

O grande problema que surgiu foi o de que não havia aterros suficientes para abrigar todo aquele resíduo acumulado durante anos. Foi então que as idéias de reaproveitamento da lama abrasiva ganharam mais no-

toriedade. Ora, de resíduo do processo de beneficiamento, a lama abrasiva passaria a ser subproduto para construção civil, inclusive para pavimentação. De problema ambiental, passaria à fonte de renda e empregos.

O resíduo poderia “ser utilizado em pavimentação asfáltica em substituição aos agregados comumente utilizados. Dessa forma, reduz-se o custo do pavimento e contribui-se com as tecnologias limpas.”<sup>3</sup>

Nesse contexto, há grande quantidade de “matéria-prima disponível” no Estado do Espírito Santo, o maior produtor mundial de mármore e granito.

Não é a toa que nesse pequeno estado brasileiro já existe uma Política Estadual de Resíduos Sólidos (Lei Estadual nº 9.264/2009), e que nela está prevista a formação de subcomitês, que discutirão a realidade de cada setor, entre ele o de rochas ornamentais.

Voltando à Política Nacional de Resíduos Sólidos, é aí que entra o segundo ponto que chama atenção, há a possibilidade de que os Estados que tiverem Plano Estadual de Resíduos Sólidos confeccionado o direito de obterem recursos da União<sup>4</sup>.

Essa previsão serve para mensurar a dedicação dos governantes com o bem-estar da população, algo importante em ano eleitoral.

De todo o exposto, se vê que o povo brasileiro tem à sua disposição importante instrumento de gestão de resíduos, e que seus dispositivos devem ser de conhecimento geral, objeto, inclusive, de educação escolar.

Somente com cidadãos conscientes é que teremos a cidadania efetiva, a concretização de políticas públicas deve passar por sua ampla divulgação.

<sup>2</sup> Logística reversa: instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Reciclagem: processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa;

<sup>3</sup> Essa é a conclusão do trabalho “UTILIZAÇÃO DE REJEITOS MINERAIS EM MISTURAS ASFÁLTICAS”, de Roberto Carlos da Conceição Ribeiro; Julio Cesar Guedes Correia e Peter Rudolf Seidl, contribuição técnica publicada no XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, de 20 a 24 de Novembro de 2005, em Natal, Rio Grande do Norte, Volume 2, págs. 318-325.

<sup>4</sup> Art. 16. A elaboração de plano estadual de resíduos sólidos, nos termos previstos por esta Lei, é condição para os estados terem acesso a recursos da União, ou por ela controlados, destinados a empreendimentos e serviços relacionados à gestão de resíduos sólidos, ou para serem beneficiados por incentivos ou financiamentos de entidades federais de crédito ou fomento para tal finalidade.

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

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

# Metodologia francesa para o dimensionamento de estruturas de pavimentos de concreto asfáltico

**Breno BARRA**

Dr., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, França)

**Pierre HORNYCH**

H.D.R., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, França)

**Yves BROSSEAUD**

D.R., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, França)

**Leto MOMM**

Dr., Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

**Jorge SOARES**

PhD, Universidade Federal do Ceará (UFC)

**RESUMO**

O objetivo principal deste trabalho consiste em abordar os aspectos relativos à metodologia francesa para fins de dimensionamento de estruturas de pavimento de concreto asfáltico, considerando sobretudo o domínio de aplicação, princípios conceptivos, os fatores influentes na dinâmica do processo de cálculo e, ao final, um exemplo de aplicação. Esta motivação surge do reconhecimento da existência de uma metodologia obsoleta e empírica homologada em caráter oficial no Brasil atualmente, tornando necessário e urgente o estudo de alternativas ca-

pazes de forjarem uma metodologia de dimensionamento adequada à realidade heterogênea nacional quanto às condições de disponibilidade de recursos naturais, climáticas e das intensidades e configurações do tráfego, em consonância a uma política econômica que permita a alocação de maiores investimentos contínuos em pesquisas e execução de obras rodoviárias. A execução de pesquisas continuadas durante décadas conferiu à metodologia francesa o cunho racional que possibilita a sua utilização de forma cientificamente embasada. Considera-se em sua dinâmica de cálculo os resultados provenientes

tes de ensaios com estreita relação campo-laboratório, abrangendo os aspectos mais relevantes na interpretação do comportamento mecânico das estruturas de pavimento, sobretudo das camadas betuminosas, como temperatura e frequência de solicitação, que são determinantes no desempenho dos materiais viscoelásticos, com impactos diretos sobre a rigidez e a deformação, tendo-se que esta última é a variável que rege o fenômeno de fadiga no campo sob as solicitações dinâmicas de carre-

gamento. Acredita-se que a compreensão da metodologia apresentada neste trabalho contribuirá para a formulação dos parâmetros pertinentes à nova metodologia de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico no Brasil, ora em construção.

#### PALAVRAS-CHAVE

Pavimento, concreto asfáltico, dimensionamento, metodologia francesa.

## 1. INTRODUÇÃO

A metodologia de dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico adotada no Brasil atualmente (DNIT, 2006) possui cunho empírico e foi desenvolvida com base em parâmetros que são limitados para reproduzirem o comportamento mecânico destas estruturas em campo. As propriedades dos materiais determinadas em laboratório pelos ensaios Marshall e CBR, por exemplo, acarretam um processo de dimensionamento falho, que não fornece as informações essenciais ao dimensionamento mecanicista, como o módulo de rigidez e a deformação admissível relacionada ao fenômeno de fadiga, por exemplo, sendo este último o principal dano associado ao colapso dos concretos asfálticos (HUET, 1963). Ressalte-se ainda o eixo padrão considerado de 82kN, que não condiz com o carregamento atual de campo.

Neste contexto, verifica-se uma motivação crescente da comunidade técnico-científica em unir esforços para que uma nova metodologia padronizada de dimensionamento seja desenvolvida para as estruturas de concreto asfáltico, em âmbito nacional, com base em parâmetros mais avançados, para que a malha rodoviária seja construída, interpretando e aplicando adequadamente os princípios físicos e mecânicos que determinam o desempenho destes tipos de pavimento.

Este intuito de encontrar uma nova metodologia de dimensionamento é apresentado de maneira muito evidente por SOARES et al. (2009), quando abordaram, de forma resumida, a metodologia de alguns países, inclu-

sive a da França, a qual é o objeto deste trabalho, a fim de elucidar quais de seus aspectos intrínsecos poderiam indicar um ponto de partida para o propósito.

Ressalta-se que este trabalho alinha-se ao projeto em andamento no Brasil, que reúne universidades, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Petrobras, que visa formar um banco de dados com as características dos materiais utilizados em obras de pavimentação, oriundos de diversos estados, assim como informações resultantes de trechos e pistas experimentais.

O presente trabalho, particularmente, aborda a metodologia francesa para o dimensionamento de estruturas de pavimento de concreto asfáltico, de forma mais aprofundada, porém, não definitiva, enfatizando os aspectos que regem os princípios de concepção, o domínio de aplicação e os fatores influentes na dinâmica do processo de cálculo e, ao final, um exemplo da aplicação da metodologia.

É importante lembrar que, no meio acadêmico nacional, as metodologias francesas, tanto de formulação dos concretos asfálticos como de dimensionamento, vêm sendo estudadas e aplicadas há mais de uma década (MOMM, 1998), havendo já estudos de doutoramento integralmente realizados no Brasil, como os executados por BARRA (2009). RAMOS (2003) apresenta também aspectos do método, e NUNES (2006) desenvolveu um estudo sobre as misturas de concreto asfáltico do tipo *Béton Bitumineux Très Mince* (BBTM – concreto betuminoso muito delgado) para utilização no Brasil, em cooperação com o *Laboratoire Central des Ponts et*

*Chaussées* (LCPC – Laboratório Central de Pontes e Pavimentos). Mais recentemente, BARRA et al. (2010) desenvolveram um paralelo entre a metodologia de formulação dos concretos asfálticos e a respectiva aplicação dos resultados obtidos em laboratório na metodologia de dimensionamento.

Uma vez que o presente artigo se propõe a apresentar uma metodologia ainda pouco difundida no Brasil, optou-se por desenvolvê-lo da forma mais contextualizada possível ao que se tem publicado na França. Desta forma, foram priorizadas as produções científicas diretamente relacionadas ao método francês. Contudo, ressalta-se o conhecimento dos autores quanto à existência de outras publicações referentes ao dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico, oriundas de diversas linhas de pesquisa (YODER e WITCZAK, 1975; HUANG, 2004; NCHRP, 2004; MEDINA e MOTTA, 2005; CEDEX, 2006).

Assim, este trabalho não tem como objetivo relacionar a metodologia francesa a outras existentes, tampouco esgota a gama de contextos e de aplicabilidades que a concerne. Logo, espera-se contribuir com o balizamento do novo método de dimensionamento dos pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil, ora em desenvolvimento.

## 2. DOMÍNIO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FRANCESA

As duas principais e fundamentais referências bibliográficas francesas atuais são: *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée: Guide Technique* (LCPC/SETRA, 1994 – Concepção e Dimensionamento das Estruturas de Pavimento: Guia Técnico) e *Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves: Réseau Routière National* (LCPC/SETRA, 1998a – Catálogo das Estruturas Tipo de Pavimentos Novos: Rede Rodoviária Nacional). Ambas atuam de forma complementar, estando o cerne metodológico encontrado na primeira, com o fornecimento de diretrizes para os projetistas quanto aos critérios a serem adotados na definição da estrutura final a ser aplicada no campo.

Esta metodologia aplica-se às diferentes categorias de rodovias, que abrangem desde as classes de trá-

fego leve (baixo) até pesado (intenso), tanto para fins de construção de estruturas novas (âmbito de abordagem deste trabalho) quanto de manutenção.

As rodovias estão divididas em dois grandes grupos de categorias de rede: (i) a estruturante (VRS), dimensionada para um período de projeto de 30 anos, que compreende as vias rápidas urbanas (VRU), as rodovias não concedidas (ARNC), as ligações que asseguram a continuidade da rede rodoviária (LACRA) e algumas grandes ligações de ordenamento do território (GLAT) que se incluem na representação de rodovias e; (ii) a não estruturante (VRNS), dimensionada para um período de projeto de 20 anos, que se constitui das demais rodovias de ligações de ordenamento do território (GLAT), bem como das vias nacionais (no sentido amplo) que não fazem parte das categorias mencionadas anteriormente.

Da forma como é concebida atualmente, a metodologia francesa é definida como de caráter racional, baseada em equações analíticas, com as aproximações necessárias devido ainda não ter sido possível defini-las de forma puramente analítica. As equações constitutivas necessárias para a descrição da totalidade dos fenômenos inerentes ao comportamento mecânico dos materiais que constituem as estruturas de pavimento estão em pleno processo de refinamento, sendo este um contexto mundial.

Há, por exemplo, dificuldade de se definir analiticamente em alguns casos a determinação da distribuição de tensões em cada ramo de um sistema viscoelástico em paralelo, composto por elementos elásticos e parabólicos, na determinação das deformações resultantes (HORNYCH et al., 2008).

Desta forma, a Teoria da Elasticidade Linear é, geralmente, utilizada nos métodos para todos os tipos de materiais, embasada no modelo multicamadas de BURMISTER (1943), que considera os materiais como homogêneos e isotrópicos. Contudo, ainda que se utilize a elasticidade linear como forma de calcular as tensões e deformações nas camadas do pavimento, a metodologia francesa apresenta particularidades importantes a serem compreendidas.

O ponto de partida é verificar o fato de que as deformações sofridas pelos concretos asfálticos nas estru-

ras de pavimento no campo se desenvolvem no domínio da linearidade, a pequenas deformações, sob a passagem de carregamentos dinâmicos, a uma dada frequência e temperatura de sollicitação. O comportamento mecânico dos materiais viscoelásticos dependem destes dois últimos parâmetros (De La ROCHE, 1996; RIVIÈRE, 1996; PERRET, 2003; DI BENEDETTO et al., 2003).

## 2.1. Quanto ao módulo de rigidez

Ainda que se utilize o módulo elástico para se determinar as tensões e as deformações, sobretudo nas camadas betuminosas, durante as simulações de dimensionamento, esta condição é válida apenas quando este módulo elástico corresponde à temperatura e à frequência de aplicação do carregamento na situação em que será sollicitada a estrutura na prática. Do contrário, está se trabalhando sob o campo da hipótese ou de forma irrealista.

É importante deixar claro, também, que as análises comparativas entre as ferramentas de cálculo que comportam modelos viscoelásticos lineares com as de modelo elástico linear não admitem a atribuição de uma relação simplista entre os entes físicos velocidade e frequência, pois estas transformações não são evidentes, ou seja, não se dão de forma direta (DOMEC, 2005).

Em cada caso, há de se estudar as amplitudes dos sinais de deformação na estrutura, para que se possa calcular qual frequência, de fato, corresponde à velocidade de sollicitação utilizada na simulação. Então, a partir do conhecimento da frequência, juntamente com a temperatura de sollicitação e de um modelo que descreva adequadamente o comportamento dos materiais, é que se pode verificar qual o módulo elástico correspondente a ser utilizado nas simulações elásticas lineares, em função da viscoelasticidade linear (DUHAMEL, 2005; CHABOT, 2009).

Por isso, a metodologia francesa determina a rigidez dos concretos asfálticos com base na execução do ensaio de módulo complexo (AFNOR NF EN 12697-26, 2004), a níveis de deformação nos limites da linearidade, sob um espectro de temperatura e de frequência de sollicitação, com o controle do deslocamento e ge-

ometria trapezoidal dos corpos de prova, utilizando o modelo viscoelástico de HUET (1963) e de HUET-SAYEGH (1965). Isto permite estabelecer curvas de equivalência frequência-temperatura que viabilizam a obtenção do módulo elástico correspondente a cada situação de sollicitação do binário citado.

## 2.2. Quanto ao fenômeno da fadiga

Como a deformação oriunda dos repetidos esforços de flexão alternada é o parâmetro que rege a fadiga no campo e se constitui no principal fenômeno que conduz os concretos asfálticos ao colapso (HUET, 1963; RUDENSKY, 1997; MOMM, 1998; DOMEC, 2005; BARRA, 2009), deve-se compreender corretamente a sua dinâmica, a fim de que se possa reproduzi-lo em laboratório e interpretá-lo corretamente. Para tanto, faz-se necessário estudar a forma do sinal de deformação resultante na base da camada betuminosa gerado no instante da sollicitação imposta pelo carregamento dinâmico, no sentido e direção de sua aplicação, ou seja, longitudinalmente.

Isto já se encontra bem definido em diversos estudos de monitoramento de estruturas de pavimento, seja de forma experimental (HUET, 1963; SAYEGH, 1965; DOAN, 1977; De La ROCHE, 1996; RIVIÈRE, 1996; DOMEC, 2005), seja de forma prática (HECK, 2001; PERRET, 2003), em que a sequência se dá na ordem dos esforços de contração-distensão-contração, conforme discorrido em BARRA et al. (2010). Portanto, verifica-se a ocorrência de flexão alternada, ocasionada pela inversão de sinais de deformação.

Contudo, há dificuldade de reprodução exata, em laboratório, do sinal de deformação observado no campo. Por esta razão, atualmente, utiliza-se a sollicitação à flexão alternada com geração de sinal senoidal, por se aproximar do fenômeno que ocorre na prática.

Por isso, a metodologia francesa utiliza os ensaios com o controle do deslocamento, à flexão alternada, com geração de sinal senoidal, para determinar as deformações que conduzem os concretos asfálticos à ruptura por fadiga (AFNOR NF P 98-261-1, 1993). Tem-se como base uma faixa de níveis de deformação preestabelecida, em

função das características geométricas e físicas de cada material, tomando como critério para o dimensionamento a deformação correspondente a  $10^6$  ciclos ( $\epsilon_6$ ), calculada a partir de um tratamento estatístico dos resultados, que abrange tanto a seleção das amostras quanto a determinação dos parâmetros.

O ensaio de fadiga é realizado no modo contínuo (sem períodos de repouso), à frequência de 25Hz e na temperatura de  $10^\circ\text{C}$ , tendo em conta que os dois primeiros correspondem a critérios para acelerar a dinâmica do processo, em razão de que, se fossem executados com tempos de repouso e a frequências muito baixas, demorariam demasiadamente para fornecer os resultados de ruptura dos materiais.

No que diz respeito à temperatura de  $10^\circ\text{C}$ , estudos como o de DOMEK (2005), MOUTIER (1991), FRANCKEN e VERSTRAETEN (1994), por exemplo, demonstram que para o modo de solicitação contínuo, com o controle do deslocamento à flexão alternada, é a condição mais desfavorável ao comportamento mecânico dos concretos asfálticos, conforme ilustra a Figura 1.

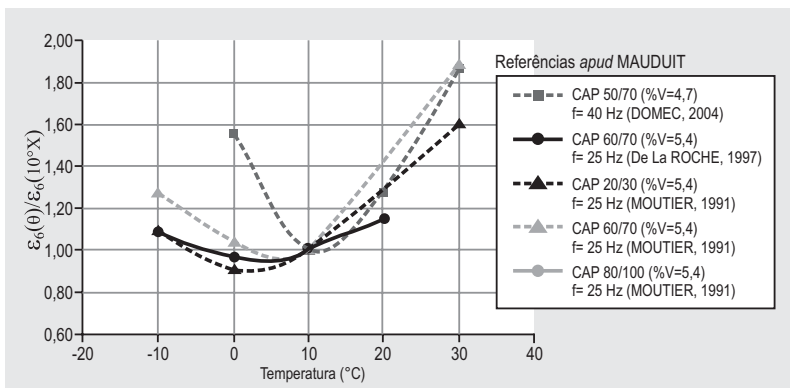


Figura 1 – Evolução da deformação para  $10^6$  ciclos de solicitação ( $\epsilon_6$ ) em função da temperatura (MAUDUIT et al., 2010).

### 2.3. Quanto à deformação permanente das camadas subjacentes

A constituição das estruturas de pavimento em sistemas de camadas superpostas visa estabelecer uma proteção do terreno natural de fundação, denominada de subleito, ou do conjunto denominado na metodologia francesa de plataforma de suporte (PF), quando eventualmente for prevista uma camada de transição

entre o subleito e a sub-base, como medida para aumentar a resistência aos esforços gerados pela aplicação das cargas solicitantes. Logo, quanto maiores forem as grandezas das tensões aplicadas ao subleito ou à PF, maior será a deformabilidade do material. Caso este esforço seja aplicado acima de determinados níveis sob solicitações dinâmicas repetidas e contínuas, ocorrerá o acúmulo de pequenas deformações irreversíveis ao longo do tempo, que constituirão as deformações permanentes (LCPC/SETRA, 1994).

Esta condição, quando consolidada na prática, gera uma perda da capacidade de suporte das camadas subjacentes, acarretando em defeitos de diversas naturezas que se propagam nos demais segmentos das estruturas, que, superficialmente, resultam desde os afundamentos nas trilhas de roda e depressões até a evolução para o quadro de ruptura por fadiga dos concretos asfálticos. Por isso, a deformação vertical no topo da camada de subleito ( $\epsilon_{z,ad}$ ) é um critério considerado no dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico na metodologia francesa.

### 3. PARÂMETROS INFLUENTES NA DINÂMICA DE CÁLCULO

Em LCPC/SETRA (1998a) informa-se que as soluções pesquisadas e adotadas foram conduzidas em consonância com as políticas econômicas vigentes na França, ou seja, considerando o volume de recursos financeiros disponíveis para investimentos em infraestrutura de transportes, bem como na avaliação da natureza e da qualidade dos materiais disponíveis, aconselhando o projetista a levar em conta todos estes aspectos no momento de fazer as escolhas finais. Ainda, destaca-se que em qualquer situação, é necessário que os parâmetros de cálculo utilizados estejam vinculados às propriedades físicas e mecânicas dos materiais, para as diferentes técnicas de construção de pavimentos (LCPC/SETRA, 1994).

Assim, alguns tópicos e parâmetros influentes na dinâmica de cálculo da metodologia francesa mere-

cem ser abordados, como: tráfego; coeficientes de risco, heterogeneidade e calagem; definição da estrutura do pavimento e; critérios de avaliação do desempenho mecânico.

### 3.1. Tráfego

O conhecimento das características do tráfego que solicitará a estrutura do pavimento no campo possui influência direta na escolha das qualidades de alguns constituintes que fazem parte da formulação dos materiais que a comporá, como a dureza dos granulares, por exemplo. Além disso, é um parâmetro diretamente relacionado à análise mecânica do comportamento à fadiga.

Quanto à definição da classe do tráfego, esta se dá sobre a contagem do volume médio diário de caminhões pesados na faixa mais lenta da via mais solicitada (MJA). Atualmente na França, caminhões pesados são definidos como aqueles que comportam um peso total autorizado em carga de mais de 35kN, ao contrário do que era definido anteriormente pela versão catalográfica de 1977 e mesmo em LCPC/SETRA (1994), quando consideravam aqueles com carga útil igual ou superior a 50kN (LCPC/SETRA, 1998a).

A justificativa para esta modificação reside em adequar a definição do peso correspondente à configuração dos veículos com mais de dois eixos, ou a dois eixos, em que o eixo traseiro comporta rodas duplas (AFNOR NF P 98-082, 1994), que de acordo com o parque industrial francês se configura nova pesagem. E justamente considerando estes tipos de configurações é que foram executadas as contagens de tráfego difundidas pelo *Sérvice d'Études Techniques des Routes et*

*Autoroutes* (SETRA – Serviço de Estudos Técnicos de Estradas e Autoestradas) desde 1990. Portanto, este é o parâmetro para a definição das classes do tráfego adotadas na França, que são apresentadas na Tabela 1.

No caso do dimensionamento de pavimentos, o tráfego acumulado sobre o período de projeto inicial da estrutura é o fator levado em consideração, a partir da noção de tráfego equivalente. Deste modo, quatro parâmetros são utilizados neste cálculo: o MJA (Tabela 1), o período p de projeto inicial do pavimento (20 ou 30 anos), a projeção do crescimento geométrico do tráfego durante o período de projeto (C) e o coeficiente de agressividade média do tráfego (CAM) (Equações 1 a 3).

$$NE = N.CAM \quad (1)$$

$$N = 365.MJA.C \quad (2)$$

$$C = \frac{(1+\tau)^P - 1}{\tau} \quad (3)$$

onde:

N = número acumulado de caminhões pesados para o período p de projeto;

CAM = coeficiente de agressividade média dos caminhões pesados, em relação ao eixo de referência (no caso, simples de rodas duplas com 130kN);

MJA = volume médio diário de caminhões pesados na faixa mais lenta da via mais solicitada;

C = fator de acumulação do tráfego sobre o período p de projeto;

$\tau$  = taxa de crescimento geométrico do tráfego no período p de projeto.

Quanto à determinação do coeficiente de agressividade (CAM), este parâmetro está diretamente relacionado

Tabela 1 - Classes de tráfego adotadas na França.

Classe	T5	T4 (TC2)	T3* (TC3)**	T2 (TC4)	T1 (TC5)	T0 (TC6)	TS (TC7)	TEX (TC8)						
			T3-   T3+	T2-   T2+	T1-   T1+	T0-   T0+	TS-   TS+							
MJA	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	>5000

\* Terminologia utilizada pelo LCPC/SETRA (1994)

\*\* Terminologia utilizada pelo LCPC/SETRA (1998a)

NOTA: quando as terminologias TC estiverem acompanhadas dos números 20 ou 30, significa que pertencem às classes de tráfego das redes não estruturante VRNS (20 anos) e estruturante VRS (30 anos), respectivamente.

à configuração dos eixos, das rodas e das cargas inerentes aos dois primeiros, sendo analisados de maneira isolada, considerando a contribuição individual de dano e ainda a natureza do material e a composição da estrutura do pavimento.

Logo, as situações de cálculo são variáveis a cada caso, e, portanto, neste trabalho serão mencionados apenas os coeficientes considerados para os pavimentos de concreto asfáltico, no caso da não disponibilidade pelo projetista de dados precisos do tráfego, em função de sua classe e do tipo de composição estrutural (Tabela 2).

**Tabela 2 – Coeficientes de agressividade média segundo o tráfego e o tipo de estrutura de pavimento de concreto asfáltico (LCPC/SETRA, 1994).**

Tráfego	CAM	0,4	0,5	0,7	0,8
≤ TC3 (T3)	Classe	T5	T4 (TC2)	T3 (TC3)	T3+ (TC3)
> TC3 (T3)	CAM				
		0,8 HT <sub>CB</sub> * ≤ 20cm		1,0 HT <sub>CB</sub> * > 20cm	

\*HT<sub>CB</sub> = espessura total de concreto asfáltico no pavimento

### 3.2. Coeficientes de risco, calagem e heterogeneidade

Definir o risco de ruptura de uma estrutura de pavimento durante o período de projeto não é algo que pode ser feito de maneira prática e direta, devido ao processo de deterioração das estruturas de pavimento no campo ocorrer de forma aleatória (CORTÉ e GOUX, 1996). Desta forma, o critério probabilístico para se estimar estas ocorrências é uma forma de se projetar estruturas de pavimentos, com base nos seguintes parâmetros das Equações 4 e 5.

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (4)$$

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2)Sh^2]^{0,5} \quad (5)$$

onde:

$k_r$  = coeficiente de risco;

$\delta$  = desvio-padrão associado à SN, b, Sh e c;

SN = desvio-padrão dos ciclos suportados pelos concretos asfálticos no momento da ruptura, log(N);

u = fator estatístico da série normal associada ao risco ( $\log N/N_{50\%}$ );

b = inclinação da reta de fadiga que abrange os ciclos à ruptura dos materiais testados (regressão linear);

Sh = desvio-padrão da distribuição das espessuras das camadas na estrutura do pavimento;

c = coeficiente que correlaciona a variação da deformação (ou tensão) no pavimento à variação aleatória da espessura  $\Delta h$  ( $\log \epsilon = \log \epsilon_0 - c \cdot \Delta h$ ), que para estruturas convencionais é da ordem de  $0,02\text{cm}^{-1}$ .

Como também esta determinação deve ser realizada de maneira particular, em cada caso, serão informados apenas os valores adotados pela metodologia francesa para os pavimentos de concreto asfáltico, tanto para o nível de risco (Tabela 3) quanto para Sh (Tabela 4), nas situações em que não se dispõe de dados precisos sobre as condições da estrutura que vai ser aplicada no campo.

**Tabela 3 – Valores de risco adotados para pavimentos de concreto asfáltico, em função do fator u (LCPC/SETRA, 1994).**

Fator (u)	-0,84	-1,04	-1,28	-1,65	-2,05
Risco (%)	20	15	10	5	2

**Tabela 4 – Valores de Sh adotados para pavimentos de concreto asfáltico, em função da espessura total das camadas betuminosas na estrutura (LCPC/SETRA, 1994).**

Espessura (cm)	$e \leq 10$	$10 < e < 15$	$15 \leq e$
Sh (cm)	1	$1 + 0,3(e-10)$	2,5

O coeficiente de calagem ( $k_c$ ) é destinado a ajustar os resultados do modelo de cálculo ao comportamento observado no campo das estruturas de pavimento de mesmo tipo, em que para pavimentos de concreto asfáltico os valores adotados, de acordo com a natureza dos materiais, são os seguintes: 1,3 (material granular tratado com betume para camada de ligação, base ou sub-base), 1,1 (mistura asfáltica usual, normalmente prevista na camada de rolamento), e 1,0 (mistura asfáltica de módulo elevado).

$K_s$  é o coeficiente minorador do efeito das heterogeneidades locais de suporte de uma camada de pouca rigidez no apoio das camadas tratadas, em que as suas relações são definidas em função do valor modular correspondente à plataforma de suporte da estrutura do

pavimento, denominadas de PF e que serão abordadas em maior detalhe adiante. As relações utilizadas são: 1,0/1,2 para módulo da plataforma entre  $20\text{MPa} \leq E$  PF1 < 50MPa; 1,0/1,1 para módulo da plataforma entre  $50\text{MPa} \leq E$  PF2 < 120MPa e; 1,0 para plataforma com módulo  $E \geq 120\text{MPa}$  (que abrange as situações de plataforma com módulo  $120\text{MPa} \leq E$  PF3 < 200MPa e,  $E$  PF4  $\geq 200\text{MPa}$ ).

Maiores explicações a respeito destes coeficientes são encontradas em BARRA et al. (2010). Contudo, adianta-se que cada país necessita forjar os seus próprios valores limites, baseado nas suas condições particulares quanto à disponibilidade de materiais e de calagens adequadas entre testes laboratoriais e experimentações práticas de campo.

### 3.3. Definição da Estrutura de Pavimento na França

As estruturas de pavimento na França se apresentam como estruturas multicamadas, aplicadas sobre um solo natural terraplenado (subleito), em seu último metro – este chamado de parte superior de terraplenagem (PST), e o seu produto final acabado de arado de terraplenagem (AR) –, ou pelo conjunto PST/AR sobreposto por uma camada eventual de transição denominada *couche de forme*, nestes casos constituindo a chamada plataforma de suporte do pavimento (PF).

As partes superiores de terraplenagem (PST) são classificadas na França de acordo com a natureza e o estado hídrico dos materiais que as constituem, sendo levado em conta o contexto geral da estrutura de pavimento em serviço (possibilidades de contato direto com a água, drenagem, etc.).

A cada PST são associados um ou mais AR, que possuem os seus módulos de rigidez determinados normalmente em ensaios de Dynaplaque ou de placa vibratória, quais sejam (LCPC/SETRA, 1994): PST0 (AR0), PST1 (AR1), PST2 (AR1), PST3 (AR1, AR2), PST4 (AR2), PST5 (AR2, AR3) e PST6 (AR3, AR4). As faixas de módulo de rigidez que compreendem os AR são as seguintes: AR0 (< 20MPa), AR1 ( $20 \leq \text{MPa} < 50$ ), AR2 ( $50 \leq \text{MPa} < 120$ ), AR3 ( $120 \leq \text{MPa} < 200$ ), AR4 ( $> 200\text{MPa}$ ).

A camada de transição (*couche de forme*) entre o subleito e as camadas superiores é utilizada em situações eventuais, para adequar a capacidade de suporte da estrutura à demanda do tráfego que irá solicitá-la, seja durante o período de construção ou de abertura definitiva ao tráfego. Para a seleção dos materiais são considerados os critérios como: a sensibilidade à água e ao frio, a dimensão máxima do granular e a resistência ao tráfego de obra com equipamentos pesados.

A relação modular das plataformas (PF) também é determinada normalmente a partir de ensaios de Dynaplaque ou de placa vibratória e segue a mesma faixa descrita para AR, apenas exclui-se o fato de não haver PF0 e de PF1 não ser mais autorizada para uso na rede nacional francesa.

Em correlação às classes de tráfego, LCPC/SETRA (1998a) indica o uso das seguintes plataformas de suporte (PF):  $\geq \text{PF2}$  para  $\leq \text{TC5}_{20/30}$  (T1);  $\geq \text{PF3}$  para  $\text{TC6}_{30}$  (T0);  $\geq \text{PF2}$  para  $\text{TC6}_{20}$  (T0);  $\geq \text{PF3}$  para  $\text{TC7}_{20/30}$  (TS) e  $\text{TC8}_{20/30}$  (TEX). Analogamente, pode-se utilizar a mesma relação para os casos em que apenas o AR estiver presente na estrutura.

Em situações em que os materiais do AR ou da PF ultrapassem valores modulares que estejam dentro da capacidade de medição do equipamento Dynaplaque ou de placa vibratória, são determinados a partir do uso de viga Benkelmann ou do deflectógrafo Lacroix.

As camadas de sub-base (*fondation*) e de base completam a estrutura e, juntas formam o conjunto definido como camadas de assentamento ou de apoio (*couches d'assise*), que dependendo da classe do tráfego e do tipo de rede (estruturante ou não), podem ser projetadas com camadas betuminosas assentes diretamente sobre o AR ou a PF, além das camadas de ligação (*liaison*), também eventuais, e de rolamento (*roulement*), que constituem o conjunto da camada superficial (*couche de surface*).

Os concretos asfálticos são caracterizados em três classes, em função dos cenários gerais de tráfego e clima de uma determinada região (BARRA et al., 2010), devendo em cada caso atender aos limites dos critérios de formulação (LCPC, 2007), apresentando a seguinte ordem quanto à resistência e, conseqüentemente, à

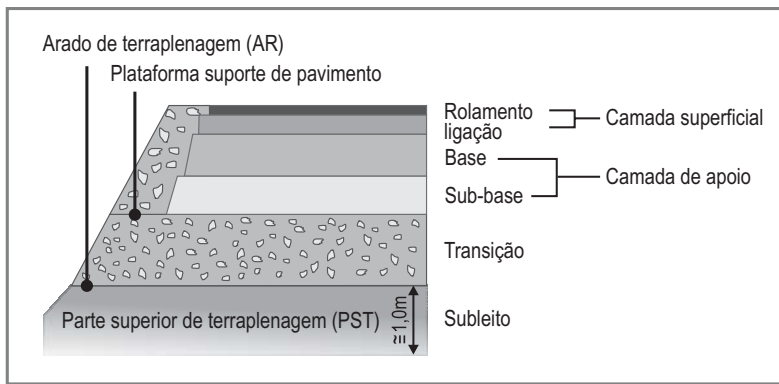


Figura 2 – Composição de uma estrutura de pavimento adotada na França (LCPC/SETRA, 1994).

qualidade: classe 3 > classe 2 > classe 1. A Figura 2 ilustra um exemplo de uma estrutura contendo a totalidade das camadas citadas.

### 3.3.1. Estruturas de pavimento consideradas

Neste trabalho são abordadas as configurações de estruturas de pavimentos de concreto asfáltico destinadas ao tráfego leve a médio da rede não estruturante (VRNS) (*chaussée souple*) e, aqueles aplicáveis a qualquer nível de tráfego da rede estruturante (VRS), bem como ao tráfego pesado da rede não estruturante (VRNS) (*chaussée bitumineuse épaisse*). Logo, os pavimentos invertidos ou com a presença de qualquer camada composta por material tratado, seja com ligante hidráulico (cimento) ou outro material, não fazem parte do estudo proposto.

#### 3.3.1.1. Estruturas de *Chaussée Souple* (Pavimento Flexível)

As estruturas de *chaussée souple* (pavimentos flexíveis) não são autorizadas a serem construídas na rede estruturante (VRS) e nem para aplicação aos tráfegos  $\geq TC6_{20}$  (T0) da rede não estruturante (VRNS).

As camadas de rolamento podem ser projetadas em concretos asfálticos clássicos, tais como *Béton Bitumineux* (BB – concreto betuminoso), *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BSBG – concreto betuminoso semiaberto), *Béton Bitumineux Mince* (BBM – concreto betuminoso delgado), *Béton Bitumineux Très Mince* (BBTM – concreto betuminoso muito delgado) e *Béton Bitumineux Drainante* (BBDr – concreto betuminoso drenante), entre outros. Neste

caso, devido à intensidade não elevada do tráfego, não se prevê a utilização de *Enrobé à Module Élevé* (EME – concreto asfáltico de módulo elevado). As definições de cada um destes concretos asfálticos podem ser encontradas em AFNOR NF EN 13108 (2007) ou em LCPC (2007).

Em algumas soluções de projeto, dependendo do tipo de concreto asfáltico projetado para a camada de rolamento, das condições de tráfego e da disponibilidade econômica para execução da obra, uma

camada de ligação pode ser prevista para atenuar o custo com a execução das camadas de base, principalmente nos casos em que estas últimas forem constituídas por materiais betuminosos. Entretanto, a escolha do tipo de concreto asfáltico a ser utilizado deve ser estudada a cada caso.

De acordo com LCPC/SETRA (1994; 1998a; 1998b), na camada de base podem ser previstos os concretos asfálticos denominados de *Grave-Bitume* de classe 3 (GB3 – granulares britados tratados com betume) ou materiais granulares não tratados (GNT). Estes últimos são definidos em AFNOR NF EN 13285 (2004) como aqueles pertinentes a todas as composições de materiais granulares oriundos normalmente de processos de britagem, pouco argilosos e umidificados à base de água ou não.

Os materiais granulares não tratados (GNT) são divididos basicamente em dois grandes grupos: A, de granulometria homogênea e sem inserção de água em sua formulação e; B, de granulometria variada (que pode compreender agregados graúdos, areias e, eventualmente, finos), calculada e umidificada com água a um teor ótimo determinado sob a energia de compactação modificada do ensaio Proctor. Possuem curvas granulométricas compreendidas, em função das dimensões dos granulares (em milímetros), nos seguintes limites: 0/14, 0/20, 0/31,5 e 0/63 (esta apenas para a categoria A de GNT).

A categoria B é subdividida ainda em função dos seguintes níveis de exigência: compacidade determinada no teor ótimo ( $C_{OPM}$ ) (B1 e B2) do ensaio Proctor,

considerando a energia modificada de compactação e de maneira mais informativa, ou seja, ainda em fase de difusão, quanto ao desempenho mecânico dos parâmetros convencionais característicos (C1 a C4), como o módulo de rigidez ( $E_c$ ) e a deformação permanente ( $\varepsilon_1^c$ ), a partir da execução de ensaios triaxiais cíclicos (LCPC/SETRA, 1998b; AFNOR NF P 98-125, 2009).

De acordo com LCPC/SETRA (1998b), para composição de estruturas de pavimentos, entre as categorias apresentadas anteriormente de GNT, as mais recomendadas para uso são: B1C1 ( $C_{OPM} \geq 80\%$ ,  $E_c \geq 500\text{MPa}$ ,  $\varepsilon_1^c \leq 25 \times 10^{-4}$ ) e B2C2 ( $C_{OPM} \geq 82\%$ ;  $E_c \geq 500\text{MPa}$  e  $25 \times 10^{-4} < \varepsilon_1^c \leq 60 \times 10^{-4}$ ;  $250 \leq E_c < 500\text{MPa}$  e  $\varepsilon_1^c \leq 60 \times 10^{-4}$ ).

Porém, em LCPC/SETRA (1998a) há uma recomendação mais criteriosa quanto à utilização de GNT, pois é previsto unicamente o uso dos tipos B2C1 ou B2C2, em que para as camadas de base são aceitáveis apenas nos casos em que o tráfego for  $\leq \text{TC3}_{20}$ , enquanto, para camadas de sub-base, podem ser projetados normalmente para todas as classes de abrangência dos *chaussées souples*. Para os demais casos, a camada de base é projetada com material granular britado tratado com betume, do tipo *Grave-Bitume* de classe 3 (GB3), em que explicações mais detalhadas sobre estas classes são encontradas em BARRA et al. (2010).

Esta condição percorrida no parágrafo anterior é justificada, devido não ser desejável que se execute o projeto de uma estrutura de pavimento destinada à composição da rede nacional com uma camada composta por materiais granulares não tratados (GNT) de categoria A ou B1, em função da qualidade destes materiais ser heterogênea, podendo conduzir a um mau comportamento do pavimento. Logo, é a diretriz mais correta a ser seguida nestes casos.

Desta forma, os materiais granulares não tratados (GNT) devem também ser utilizados respeitando algumas condições quanto à classe do tráfego e da plataforma de suporte do pavimento ( $\leq \text{TC4}_{20}/\text{T2}$  sobre PF1 e,  $\leq \text{TC5}_{20}/\text{T1}$  sobre  $^3$  PF2) (LCPC/SETRA, 1994).

Todos estes cuidados com a utilização de materiais granulares não tratados (GNT) se dão em função da

experiência francesa em estudos, tanto em campo quanto em laboratório (também em escala real), haver verificado um comportamento muito deformável destes materiais quando submetidos a tráfegos intensos, acarretando falta de estanqueidade da estrutura devido à perda da capacidade de suporte das camadas subjacentes.

Neste contexto, EL ABD (2006) demonstrou a característica deformável destes materiais granulares não tratados (GNT), quando apresentou a inversão dos planos principais de tensão a que estão sujeitos sob a solicitação de carregamentos dinâmicos, citando que os ensaios de cilindro oco são capazes de simular este comportamento em escala real.

A camada de transição (*couche de forme*), se necessária for, também pode ser composta por material granular não tratado (GNT), desde que garanta a rigidez exigida para a PF requerida, em função do material adequado e do nível de tráfego a ser suportado pela estrutura. Maiores detalhes sobre a definição e classificação dos materiais destinados a esta camada podem ser consultados tanto em GTR (2000) quanto em LCPC/SETRA (1998b).

Deve-se atentar, no entanto, que, como os materiais granulares não tratados (GNT) possuem comportamento não linear, as características mecânicas devem ser determinadas em ensaios que permitam descrever o comportamento quase reversível, bem como a evolução das deformações permanentes sob carregamento cíclico, o que normalmente é feito a partir dos ensaios triaxiais cíclicos, em laboratório.

Entretanto, na falta de dados disponíveis sobre esses ensaios, para o uso de materiais granulares não tratados (GNT), as relações modulares dos materiais devem ser, sobretudo, respeitadas de acordo com a posição da camada em que serão previstos no pavimento.

Isto visa ao estabelecimento de uma progressão gradativa da rigidez estrutural até a camada de rolamento, levando em conta o caráter não linear dos materiais granulares não tratados, em que os módulos mais elevados devem ser pertinentes às camadas mais próximas da superfície ( $E_{base} > E_{sub-base}$ , por exemplo), projetando-se estruturas com os módulos mais elevados de

materiais granulares não tratados (GNT) possíveis, na medida em que a camada de rolamento ou superficial seja mais delgada.

Neste contexto, em LCPC/SETRA (1994), estes valores modulares são inerentes às categorias de materiais granulares não tratados (GNT) (1 a 3), que são correlacionadas ao tipo de tráfego a que serão solicitados durante o período inicial de projeto e às propriedades físicas do material, sendo definidos na França da seguinte forma:

– 600MPa [categoria 1, tráfego  $TC_{3,20}/T3$  (0/20; Índice de Britagem  $I_c = 100$ ) e tráfego  $< TC_{3,20}/T3$  (0/20; Índice de Britagem  $I_c \geq 60$ )];

– 400MPa [categoria 2, tráfego  $TC_{3,20}/T3$  (0/20; Índice de Britagem  $I_c \geq 60$ ) e tráfego  $< TC_{2,20}/T4$  a  $T5$  (0/31,5; Índice de Britagem  $I_c \geq 30$ )];

– 200MPa [categoria 3, tráfego  $< TC_{2,20}/T5$ ; até 0/60].

NOTA: o Índice de Britagem ( $I_c$ ) é definido como a percentagem de elementos superiores ao diâmetro máximo ( $D_{máx}$ ) do granular elaborado, contido no material de origem submetido ao processo de britagem (NF P 18-101, 1990). Portanto, quanto maior for esta percentagem, menos friável e, conseqüentemente, mais resistente será o material. Ressalta-se que este índice não deve ser confundido com o percentual de desgaste determinado nos ensaios Los Angeles, pois não se trata de um ensaio de abrasão por choque das partículas com esferas de aço, mas da determinação da resistência do material ao real procedimento de britagem.

Para as situações de tráfego  $\leq TC_{3,20}$  (T3), os valores limite descritos no parágrafo anterior se aplicam diretamente às camadas de base, constituindo os valores finais máximos a serem atingidos em cada caso, considerando uma progressão modular gradual proveniente das camadas inferiores, dependente da categoria do material disponível, que possui coeficientes (k) multiplicadores relacionados (3 para a categoria 1; 2,5 para a categoria 2 e; 2,0 para a categoria 3).

No caso das camadas de sub-base, se a estrutura do pavimento for projetada com uma camada de base também composta por materiais granulares não tratados (GNT), segue a mesma regra quanto ao valor do módulo a ser definido, devendo ser multiplicado pelos

coeficientes citados em cada situação, a partir do valor modular da camada imediatamente inferior. No entanto, se a camada de sub-base for a mais próxima da superfície formada por GNT, vale a condição explanada quanto ao valor modular máximo para a camada de base.

No âmbito dos tráfegos  $TC_{4,20}$  (T2) a  $TC_{5,20}$  (T1), deve-se utilizar o coeficiente multiplicador 3 (correspondente à categoria 1, para se obter o módulo a ser atingido na camada subsequente. Porém, ao contrário do tráfego  $\leq TC_{3,20}$  (T3), o valor modular máximo de chegada na progressão a ser atingido é o de 360MPa, pois haverá materiais com melhor qualidade (maior rigidez) previstos nas camadas superiores.

É importante destacar que em uma dada progressão modular, seja qual for a condição de tráfego correspondente, caso o valor de uma determinada camada de material granular não tratado (GNT) já tenha atingido o valor máximo estipulado, a camada seguinte, caso seja também composta por GNT, será projetada com o mesmo valor máximo modular, não podendo ser ultrapassado.

E, apesar das relações modulares apresentadas deverem ser respeitadas, em primeiro plano, ajustes podem ser efetuados devido à disponibilidade de materiais no momento, desde que sejam atendidas as condições de suporte requeridas em cada caso. Ainda, reitera-se que a melhor solução de projeto será sempre aquela baseada nas propriedades mecânicas dos materiais determinadas em ensaios laboratoriais ou de campo adequados.

### 3.3.1.2. Estruturas de *Chaussées Bitumineuses Épaises* (Pavimentos Betuminosos Espessos)

No caso das estruturas de *chaussées bitumineuses épaisses* (pavimentos betuminosos espessos), destinadas a qualquer nível de tráfego da rede estruturante (VRS) e para classes de tráfego  $\geq TC_{6,20}$  (T0) pertinentes à rede não estruturante (VRNS), os materiais utilizados na camada de rolamento e de ligação (quando houver) seguem o mesmo padrão descrito para a estrutura de *chaussée souple* (pavimento flexível).

Porém, nas camadas de base e sub-base, são permitidas somente as alocações de materiais betuminosos,

do tipo *Grave-Bitume* (material granular britado tratado com betume) de classe 2 ou 3 (GB2 ou GB3), ou ainda *Enrobé à Module Élevé* (concreto asfáltico de módulo elevado) de classe 2 (EME2). Em todos os casos, estas camadas são assentes diretamente sobre o arado de terraplenagem (AR) ou na plataforma de suporte do pavimento (PF) projetados para cada caso específico.

De acordo com LCPC/SETRA (1998a), estes tipos de concretos asfálticos foram escolhidos para compor as camadas de base e sub-base das estruturas submetidas a tráfegos mais intensos, em função de possuírem uma boa resistência à fadiga (ao contrário dos materiais granulares não tratados, GNT, que não apresentam resistência aos esforços de tração), garantindo assim maior integridade, conforto, segurança e economia com custos de manutenção, durante o período para o qual são projetadas.

### 3.4. Critérios de avaliação do desempenho mecânico dos pavimentos

Dois critérios são considerados como principais para a verificação do desempenho mecânico das estruturas de pavimento na metodologia francesa: (i) a deformação de tração na base das camadas betuminosas, no sentido longitudinal de passagem do carregamento solicitante e (ii) a deformação vertical no topo das camadas subjacentes (na abordagem deste trabalho, constituídas por materiais não tratados).

Nas estruturas de *chaussée souple* (pavimento flexível), quando se adotam soluções de projeto em que a camada superficial está assente de forma direta sobre camadas inferiores (base e sub-base) compostas por materiais granulares não tratados (GNT), o critério de verificação das condições de desempenho não se dá pela avaliação da deformação de tração admissível na fibra inferior da camada betuminosa ( $e_{i,ad}$ ), mas pela deformação vertical admissível no topo de cada camada subjacente ( $e_{z,ad}$ ), de maneira preferencial, mas principalmente do subleito, sendo a condição normalmente observada.

E, nas situações em que houver uma camada de transição (*couche de forme*) entre o subleito e a cama-

da de sub-base, constituindo nestes casos o conjunto denominado plataforma de suporte do pavimento (PF), o critério passa a ser a verificação de  $e_{z,ad}$  no topo da PF e não mais no topo da camada de subleito. Estes cálculos podem ser realizados a partir das Equações 6 e 7.

$$\varepsilon_{z,ad} = 0,012(NE)^{-0,222} ; \text{ para tráfegos } \geq TC3_{20/30} \text{ (T3)} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{z,ad} = 0,016(NE)^{-0,222} ; \text{ para tráfegos } < TC3_{20/30} \text{ (T3)} \quad (7)$$

onde:

$\varepsilon_{z,ad}$  = deformação vertical admissível no topo das camadas de subleito e não tratadas;

NE = número equivalente de passagens do eixo-padrão de 130kN (Equação 1).

Porém, quando for prevista uma camada de base em concreto asfáltico, o critério adotado passa a ser não apenas a verificação de  $e_{z,ad}$ , mas também de  $e_{i,ad}$  (Equação 8), em que esta última deve ser observada na camada de base e não na camada superficial. Nestas condições, o mesmo vale para os *chaussées bitumineuses épais* (pavimentos betuminosos espessos), contudo, a  $e_{i,ad}$  deve ser avaliada na fibra inferior da camada de sub-base em concreto asfáltico.

$$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \cdot [E^*(10^\circ C)/E^*(\theta_{eq})]^{0,5} \cdot (NE/10^6)^b \cdot k_r \cdot k_s \cdot k_c \quad (8)$$

onde:

$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$  = deformação admissível do concreto asfáltico, também chamada de  $\varepsilon_{i,ad}$ , após solicitação à flexão alternada em laboratório até a ruptura por NE ciclos, em função de uma dada temperatura equivalente ( $\theta_{eq}$ ) e frequência (f) de aplicação do carregamento;

$\varepsilon_6(\theta, f)$  = deformação para  $10^6$  ciclos de solicitação do concreto asfáltico, em função de uma dada temperatura e frequência (f) características de aplicação do carregamento, no caso da metodologia francesa,  $10^\circ C$  e 25Hz, respectivamente;

$(NE/10^6)^b$  = número de ciclos suportados pelo concreto asfáltico até a ruptura, em relação ao critério padrão metodológico de  $10^6$  ciclos de solicitação, em face da inclinação b da linearidade dos pontos obtidos a partir do cálculo da regressão;

$[E^*(\theta)/E^*(\theta_{eq})]^{0,5}$  = relação entre os módulos complexos nas temperaturas de referência (10°C) e equivalente (15°C, na França);

$k_r, k_s, k_c$  = coeficiente de risco, de minoração da heterogeneidade e de calagem, respectivamente.

Ressalta-se a importância da atenção com o parâmetro relativo à temperatura equivalente ( $\theta_{eq}$ ), para fins de dimensionamento das estruturas de pavimento. Esta não significa a temperatura média observada em uma determinada região ou país, mas aquela correspondente ao dano acumulado sofrido pelo pavimento ao longo do ano, para uma dada distribuição de temperatura, sendo igual ao dano que o pavimento sofreria sob a solicitação de um mesmo tráfego, porém, a uma temperatura constante equivalente. Logo, trata-se de um parâmetro muito particular e deve ser determinado em cada caso. Em LCPC/SETRA (1994) pode ser encontrado o procedimento para a sua determinação em detalhes.

Os critérios de adoção de espessuras para as camadas de cada tipo de estrutura de pavimento abordado possuem muitas variáveis, como: intensidade do tráfego, tipo, classe e desempenho mecânico testado em laboratório do material utilizado, posição da camada na estrutura do pavimento no campo, além dos critérios econômicos de cada alternativa a serem observados pelo projetista no decorrer dos cálculos, entre outros.

Portanto, a fim de evitar uma postura generalista a uma condição variável, o contexto mencionado no parágrafo anterior não é tratado neste trabalho. Informações detalhadas a este respeito podem ser consultadas em LCPC/SETRA (1994; 1998a).

#### 4. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

Para efeito de contribuição ao entendimento da aplicação da metodologia de dimensionamento, um exemplo prático foi escolhido para verificação da dinâmica de cálculo. Cabe enfatizar, porém, que se trata de uma

situação hipotética, logo, não esgota as situações e soluções de projeto possíveis, desde que, quando adotadas, respeitem as diretrizes normativas inerentes do método.

**Situação de projeto:** seja a seguinte situação hipotética;

Volume Médio Diário (MJA): 210 caminhões pesados;

Taxa de crescimento geométrico ( $\tau$ ): 7,0%;

Coefficiente de Agressividade Média (CAM): 1,0;

Número equivalente de eixo-padrão com 130kN (NE; Equação 1):  $3,14 \times 10^6$  (TC4/T2);

Período de projeto inicial (p): 20 anos;

Risco (r): 12%, com  $u = -1,175$  (interpolando da Tabela 3);

Plataforma de suporte do pavimento (PF3): módulo de 120MPa;

Temperatura equivalente ( $\theta_{eq}$ ): 15°C.

NOTA: na falta de valores determinados experimentalmente, a metodologia francesa indica a adoção de um coeficiente de Poisson  $\nu = 0,35$  para todos os materiais betuminosos e não tratados.

As características mecânicas dos concretos asfálticos, obtidas em laboratório, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características mecânicas dos concretos asfálticos.

Tipo de Concreto Asfáltico	$E^*(10^\circ\text{C}/10\text{Hz})$ (MPa)	$E^*(15^\circ\text{C}/10\text{Hz})$ (MPa)	$\epsilon_6$ (10°C/25Hz)	$b^1$	$SN^2$
GB3 0/20 <sup>3</sup>	12300	9300	$90 \times 10^{-6}$	-0,2	0,30
BB2 0/10 <sup>4</sup>	7200	5400	$150 \times 10^{-6}$	-0,2	0,30

1: inclinação da curva de fadiga obtida nas equações de regressão linear do ensaio de fadiga;

2: desvio-padrão da distribuição dos ciclos na ruptura durante os ensaios de fadiga,  $\log(N)$ ;

3: *grave-bitume* de classe 3 e distribuição granulométrica 0/20;

4: *béton bitumineux* de classe 2 com distribuição granulométrica 0/10.

Como foi projetado um concreto asfáltico do tipo GB3 0/20 para a camada de base, a verificação da deformação de tração ( $\epsilon_{t,ad}$ ) será feita em sua fibra inferior. A plataforma de suporte é classificada em PF3, em função de sua rigidez (120MPa). Desta forma, os coeficientes de calagem ( $k_c$ ) e de heterogeneidade ( $k_s$ ) são fixados em 1,3 e 1,0, respectivamente, conforme discorrido no tópico 3.2.

Em função do número de eixos NE (Equação 1), a deformação admissível no topo da plataforma de suporte do pavimento ( $\epsilon_{z,ad}$ ), de acordo com a Equação 6,

para uma classe de tráfego TC4<sub>20</sub> (T2), é de  $433 \times 10^{-6}$ . O coeficiente de risco ( $k_r$ ) é de 0,810 (Equação 4), com base no cálculo de  $u$  (interpolando na Tabela 3), do desvio-padrão ( $\delta$ ; Equação 5) associado à SN,  $b$  (ambos na Tabela 5),  $Sh$  {mín[máx(1,0;  $1+0,3.e-10$ );2,5]} (Tabela 4) e  $c$  ( $0,02\text{cm}^{-1}$ , ver Equação 5).

Entrando com os valores determinados em laboratório (Tabela 5) na Equação 8, a deformação admissível de tração ( $\epsilon_{t,ad}$ ) na fibra inferior da camada de base em concreto asfáltico (GB3 0/20) do pavimento é de  $86 \times 10^{-6}$  (considerando uma espessura de partida para GB3 0/20  $\approx 15\text{cm}$ ).

A espessura da camada superficial de BB2 0/10 foi fixada em 6,0cm, em função das especificações deste material indicarem espessuras com aplicação máxima neste valor (LCPC/SETRA, 1994). Todas as interfaces entre as camadas são consideradas perfeitamente aderidas.

Quanto ao critério de aderência das interfaces entre as camadas, na metodologia francesa, para condições iniciais de projeto de pavimentos flexíveis, ou seja, quando da implantação da estrutura, a situação considerada é sempre de total ligação.

Porém, nos casos em que se detecte prejuízo da aderência entre camadas no campo, durante as auscultações executadas para fins de simples verificação ou mesmo para a execução de procedimentos intervencionistas, os processos de redimensionamento da estrutura por meio de retroanálises, por exemplo, devem ser conduzidos considerando graus de aderência diferenciados entre as camadas (que variam de semiaderidos até sem aderência), conforme as condições observadas no campo, em consonância aos resultados dos ensaios realizados, como o de ovalização, mais comumente utilizado no campo para a verificação destas condições interfaciais.

De posse dos dados estruturais e valores limites admissíveis dos materiais, com a utilização da ferramenta de cálculo ALIZÉ (LCPC, 2005), as situações apresentadas na Tabela 6 são encontradas.

De acordo com os resultados obtidos na primeira simulação, é possível notar que, apesar da plataforma de suporte (PF) estar bem resguardada quanto à sua

condição de deformação admissível ( $\epsilon_{z,ad}$ ), a espessura que atenderia o valor admissível na fibra inferior da camada de GB3 0/20 ( $\epsilon_{t,ad}$ ) seria de 18cm.

Contudo, para as camadas de base em concreto asfáltico compostas por GB3 0/20, como é o caso, a metodologia francesa especifica camadas entre 10cm a 15cm, no máximo (LCPC/SETRA, 1994). Logo, o valor de 18cm ultrapassaria esta condição.

Poderiam ainda ser previstas duas camadas de 10cm, formando a base e a sub-base, respectivamente, mas esta solução, além de ultrapassar o limite necessário de espessura para se atingir a deformação admissível requerida, o que encareceria o custo da obra, contrariaria as recomendações da metodologia francesa, que infere sobre a dificuldade de se obter camadas de sub-base com elevada qualidade aplicando-se apenas 10cm de espessura.

Esta limitação é explicada devido à necessidade de se executar um nivelamento de boa qualidade da plataforma de suporte (PF), a fim de minimizar ao máximo o desvio-padrão relacionado às espessuras das camadas, o que nem sempre é possível no campo. Assim, uma nova alternativa terá que ser adotada para solucionar o problema.

Optou-se então pela execução de uma estrutura composta por uma camada delgada de rolamento com 4,0cm de BB2 0/14, mantendo os mesmos 6,0cm também de BB2 0/14 da simulação anterior (agora como

**Tabela 6 – Dados de deformação na estrutura do pavimento.**

Espessura da camada de base (GB3 0/20) (cm)	17,0	18,0	19,0
$\epsilon_t$ na base GB3 0/20	$89 \times 10^{-6}$	$84 \times 10^{-6}$	$79 \times 10^{-6}$
$\epsilon_z$ no topo da PF3	$284 \times 10^{-6}$	$265 \times 10^{-6}$	$248 \times 10^{-6}$

camada de ligação), sendo a base prevista com 14cm de GB3 0/20 assente sobre a PF3 com 120MPa. Os resultados da simulação são apresentados na Tabela 7.

A nova solução adotada atende aos limites de deformação admissível tanto na camada de base ( $\epsilon_{t,ad}$ ) quanto no subleito ( $\epsilon_{z,ad}$ ), com o mesmo número de camadas que em uma estrutura composta por 6,0cm BB/10cm

GB/10cm GB, conforme poderia ser previsto. A solução fornece ainda resultados mais favoráveis do ponto de vista de estanqueidade da estrutura, em função dos eventuais problemas mencionados anteriormente quanto ao nivelamento das plataformas de suporte (PF) quando são aplicadas camadas de sub-base com apenas 10cm no campo.

**Tabela 7 – Dados de deformação na estrutura do pavimento.**

Espessura da camada de base (GB3 0/20) (cm)	13,0	14,0	15,0
$\epsilon_1$ na base GB3 0/20	$92 \times 10^{-6}$	$86 \times 10^{-6}$	$81 \times 10^{-6}$
$\epsilon_z$ no topo da PF3	$294 \times 10^{-6}$	$274 \times 10^{-6}$	$257 \times 10^{-6}$

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia francesa para o dimensionamento de estruturas de pavimento de concreto asfáltico, conforme observado neste trabalho, possui uma aplicação simples de suas equações constitutivas. Todavia, a coerência entre a aplicação dos princípios físicos e a proximidade do fator campo-laboratório, sobretudo no estudo do comportamento reológico e mecânico dos concretos asfálticos, adquirida em função de pesquisas realizadas ao longo de décadas e constantemente em atualização, norteia a parametrização dos valores utilizados, conferindo-lhe o cunho racional de base científica.

Este aspecto de coerência é destacado na determinação da rigidez dos concretos asfálticos com base nos ensaios de módulo complexo, em função dos parâmetros de frequência e temperatura de solicitação, dos quais o comportamento mecânico dos materiais viscoelásticos é dependente, além da deformação admissível obtida no ensaio à ruptura por fadiga em condições mais próximas de solicitação no campo (sinal senoidal de solicitação, a exemplo dos ensaios de módulo complexo, e considerando a deformação como o parâmetro regente do fenômeno).

Quanto às camadas subjacentes, na falta de dados experimentais, a progressão modular especificada para a previsão de camadas compostas por materiais granulares não tratados (GNT) tem o objetivo de considerar o

comportamento não linear dos referidos materiais, fazendo-se coerente diante da utilização de um modelo baseado na Teoria da Elasticidade Linear Clássica, como o de BURMISTER (1943).

Neste contexto, destaca-se que já existe um modelo desenvolvido e validado para a descrição do comportamento não linear dos materiais granulares não tratados (GNT) sob carregamento dinâmico, denominado BOYCE Modificado (HORNYCH, 2007), inclusive, considerando o aspecto anisotrópico destes. Contudo, ainda não está incorporado oficialmente na metodologia francesa, apesar de ser utilizado correntemente em pesquisas, a partir do uso das interfaces denominadas *Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante* (CVCR – Pavimento Viscoelástico sob Carga Rolante) e ORNI (*orniérage* – desenvolvido para descrever a deformação permanente dos materiais granulares não tratados, GNT) do Programa CESAR versão *Recherche* (pesquisa), que faz uso do Método dos Elementos Finitos. O Programa CESAR, em sua versão de pesquisa, foi desenvolvido no LCPC e, atualmente, é restrito às pesquisas internas. O mesmo se aplica ao modelo viscoelástico de HUET-SAYEGH (1965), porém, este último é possível de ser utilizado também pelo Programa VISCOROUTE, disponível no mercado.

No que concerne ao percentual de risco, apesar de ser um aspecto empírico do método, a previsão de danos ao longo do período de projeto não é evidente na prática, devido à ocorrência aleatória no campo. Logo, o fator probabilístico, sobretudo em função da qualidade dos materiais disponíveis, parece ser um critério razoável do ponto de vista de se estabelecer uma estratégia de projeto das estruturas de pavimento ou mesmo de manutenção ao longo de sua vida útil.

Quanto aos coeficientes de calagem e de heterogeneidade, embora possuam um caráter empírico, a forma como são utilizados na metodologia francesa, tornam os valores especificados atribuídos de forma racional, pois provêm de um banco de dados construído ao longo de décadas de monitoramento e controle dos pavimentos em toda a malha viária francesa, em correspondência às experimentações

executadas tanto em laboratório quanto em escala real de campo.

A metodologia francesa apresenta ainda um aspecto versátil, à medida que pode ser incorporada ao contexto de outras regiões ou países, caso sejam estu-

dados e definidos corretamente os seus próprios parâmetros de inserção nas equações constitutivas, ou seja, com base na realidade particular de cada local e com uma correspondência campo-laboratório bem definida quanto ao comportamento dos materiais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFNOR NF P 98-125 (2009), *Assises de Chaussées: Graves Non Traitées - Méthodologie d'Étude en Laboratoire*. Association Française de Normalisation, AFNOR.
- AFNOR NF P 98-261-1 (1993), *Essais Relatifs aux Chaussées: Détermination de la Résistance en Fatigue des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 1: Essai par Flexion à Flèche Constante*. Association Française de Normalisation, AFNOR.
- AFNOR SÉRIE NF EN 13108 (2007), *Mélanges Bitumineux: Specification des Matériaux - Enrobés Bitumineux. Norme Européenne*, Association Française de Normalisation, AFNOR.
- AFNOR NF EN 12697-26 (2004), *Mélanges Bitumineux: Méthode d'Essai pour Mélange Hydrocarboné à Chaud - Partie 26: Module de Rigidité*. Association Française de Normalisation, AFNOR.
- AFNOR NF P 98-261-1 (1993), *Essais Relatifs aux Chaussées: Détermination de la Résistance en Fatigue des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 1: Essai par Flexion à Flèche Constante*. Association Française de Normalisation, AFNOR.
- AFNOR NF P 98-082 (1994), *Détermination des Trafics Routières pour le Dimensionnement des Structures de Chaussées*. Association Française de Normalisation, AFNOR.
- AFNOR NF P 18-101 (1990), *Granulats: Définition et Classification*. Association Française de Normalisation, AFNOR.
- BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSAUD, Y.; HORNYCH, P. (2010), *Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas*. Revista Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv).
- 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.
- BURMISTER, D. M. (1943), *The Theory of Stress and Displacement in Layered Systems and Application of the Design of Airports Runways*. In proceedings of the Highway Research Board, Volume 23.
- CEDEX (2006), *Convenio sobre estudio comparado de los métodos de dimensionamento de firmes de carretera em los estados miembro de la Unión Europea (UE) y países de su entorno. Comparación de fatiga de los materiales*. Centro de Estudios des Transporte, Madrid.
- 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.
- CORTÉ, J-F; GOUX, M. T. (1996), *Design of French Structures: The French Technical Guide*. Transportation Research Record (TRR), nº 1539, pp. 116-124.
- De La ROCHE, C. (1996), *Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux*. Thèse de Docteur. École Central de Paris.
- DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; PRONK, A. & LUNDSTRÖM, R. (2003), *Fatigue of Bituminous Mixtures: different approaches and RILEM Group contribution*, in Proceedings of the 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium; pp. 15-38. Zurich, Switzerland.
- DNIT (2006), *Manual de Pavimentação*. Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). 2ª Edição. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, Brasil.
- DOAN, T. H. (1977), *Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº Spécial V, pp. 215-228.
- DOMEC, V. (2005), *Endommagement par Fatigue des Enrobés Bitumineux en Condition de Traffic Simulé et de Temperature*. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux I, France.
- 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, France.

- FRANCKEN, L.; VERSTRAETEN, J. (1994), *Interlaboratory Test Program - Part II: Repeated Loading Tests. Draft Report*, RILEM TC 152 PBM - Performance of Bituminous Mixtures.
- GTR (2000), *Réalisation des Remblais et de Couches de Forme: Guide Technique - Fascicules I et II*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en partenariat avec le Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA).
- HECK, J-V (2001), *Modélisation des Déformations Reversibles et Permanentes des Enrobés Bitumineux - Application à l'Orniérage des Chaussées*. Thèse de Doctorat. Université de Nantes, France.
- 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. (2007), *Étude Expérimentale et Modélisation du Comportement des Matériaux de Chaussées Non Traités*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Bordeaux 1: École Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur.
- HUANG, Y. H. (2004), *Pavement Analysis and Design*. Ed. Prentice Hall, New Jersey, EUA,
- 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.
- LCPC (2007), *Manuel LPC d'Aide à la Formulation des Enrobés*. Publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Groupe de Travail RST "Formulation des Enrobés". 199 p. Paris, France.
- LCPC (2005), *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Numéro Spécial 256-257: CESAR-LCPC*. ISSN 1269-1496. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). 251p. Paris, France.
- LCPC/SETRA (1998a), *Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves: Réseau Routière National*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en partenariat avec le Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA).
- LCPC/SETRA (1998b), *Assises de Chaussées: Guide d'Application des Normes pour le Réseau Routier National*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en partenariat avec le Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA).
- LCPC/SETRA (1994), *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée: Guide Technique*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en partenariat avec le Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA).
- MAUDUIT, C.; HORNYCH, P.; BALAY, J-M; BODIN, D.; DUVAL, R. (2010), *Evaluation of the Concept of Equivalent Temperature for Pavement Design*, in the Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements. International Society for Asphalt Pavements. Nagoya, Japan.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2005), *Mecânica dos Pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Edição dos autores, v. 1., 570 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).
- MOUTIER, F. (1991), *Etude Statistique de l'Effet de la Composition des Enrobés Bitumineux sur leur Comportement em Fatigue et leur Module Complex*. Bulletin de liaisons des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 172, pp.33-41.
- NCHRP (2004), *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.
- NUNES, P. M. (2006), *Estudo da Utilização de Revestimentos Asfálticos Delgados a Quente para Pavimentos do Tipo BBTM no Brasil*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, SP.
- PERRET, J. (2003), *Déformations des Couches Bitumineuses au Passage d'une Charge de Trafic*. Thèse de Doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, France.
- RAMOS, C. R. (2003), *Estudo para o desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do Município do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RIVIÈRE, N., (1996), *Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I.
- RUDENSKY, A. V. (1997), *Asphalt Concrete Fatigue Properties*, in Proceedings of the 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium. Mechanical Tests for Bituminous Materials (MBTM): Recent Improvements and Future Prospects. Lyon, France.
- SAYEGH, G. (1965), *Contribution à l'Étude des Propriétés Viscoélastiques des Bitumes Purs et des Bétons Bitumineux*. Thèse de Docteur Ingénieur. Faculté des Sciences de Paris.
- SOARES, J. B.; MORENO, A. M.; MOTTA, L. M. G. (2009), *Aspectos Gerais de Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos de Vários Países e a Relação com um Novo Método Brasileiro*. Revista Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv); pp. 20-35.
- YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. (1975), *Principles of Pavement Design*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

# Adaptação e reconstrução de pavimentos em aeroportos

## estudo de caso

### Silvio Rodrigues Filho

Diretor Executivo – ESA Engenharia e Sistemas Ltda  
Engineering Company – Airport & Highway

### Regis Martins Rodrigues

Professor – Instituto Tecnológico da Aeronáutica

#### RESUMO

Pavimentos de aeroportos são implantados considerando não só as tensões e deformações induzidas pelo tráfego como também sob regras rígidas em termos de implantação geométrica vertical.

O anexo XIV da ICAO – International Civil Aviation Organization recomenda certos critérios a serem adotados na implantação geométrica vertical de forma a permitir a evolução das aeronaves em um procedimento de pouso e decolagem de forma segura e eficaz, considerando a grande influência da drenagem superficial no mecanismo de aquaplanagem.

Muitas vezes, aeroportos implantados com determinadas diretrizes de uso de seu pavimento têm tais diretrizes alteradas, como, por exemplo, o caso de um pavimento dimensionado como pista de rolamento passar a vir a ser utilizado como pista de pouso de emergência ou mesmo pista

de pouso alternativa. Dentro dessa linha de raciocínio é apresentado o Estudo de caso, objeto do presente trabalho. Será mostrado que um pavimento dimensionado para operar como pista de rolamento pode ser objeto de demolição em alguns de seus segmentos por problemas de geometria vertical, quando passa a ser utilizado como pista de pouso de emergência ou mesmo pista de pouso alternativa. Será também mostrado a adequação das camadas que compõem a estrutura de pavimento em face do alargamento da faixa de pouso em segmentos que não serão demolidos e sim “reforçados”, por problemas de geometria vertical, quanto se muda a utilização de pista de rolamento para pista de pouso.

#### PALAVRAS-CHAVE

Pavimentos, aeroportos, geometria vertical, adequação de estruturas de pavimentos.

## 1. GENERALIDADES

A implantação de aeroportos, via de regra, é baseada em necessidades de desenvolvimento de uma determinada região, função de suas características es-

pecíficas de demanda, considerando o transporte aéreo um elemento componente do transporte multimodal.

Envolve a necessidade de se desenvolver um Plano Diretor aeroportuário de acordo com as recomendações e exigências da ANAC – Agência Nacional de Aviação

Civil que, em linhas gerais, segue as recomendações da ICAO – *International Civil Aviation Organization*. Trata-se de um documento formal pelo qual são delineadas as alternativas de desenvolvimento das instalações aeroportuárias, visando garantir o funcionamento harmônico dos equipamentos e das instalações as estes associados, as solicitações de mercado e as interferências ou conflitos com outros aeroportos no entorno, implicando estudos de tráfego, planos específicos de proteção ao voo etc.

Esse documento formal de planejamento assegura que o dimensionamento da infraestrutura não será insuficiente, como também evitará investimentos desnecessários. Isso implica se ter como premissa mitigar o risco de ocorrer capacidade ociosa ou gargalos que impeçam o desenvolvimento da atividade de transporte aéreo como elemento fundamental de apoio à indústria, comércio etc. e porque não dizer ao turismo.

Em paralelo a esse documento são desenvolvidos, também, como exigência da ANAC, para sua implantação, Estudos de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (EIA/RIMA) e os projetos que servirão de subsídio inclusive ao EIA/RIMA que é desenvolvido em 3 (três) fases distintas: Licença Prévia, Licença de Adequação e Licença de Operação.

Atualmente, a implantação de um aeroporto tem sido precedida, também, de um Plano de Negócios já visando concessão ou Parceria Público Privada, que tem como objetivo estudar a vocação do aeroporto levando em consideração sua localização geográfica, características socioeconômicas da região e condições do mercado de turismo e transporte aéreo associado, nos seus vários segmentos. Exige trabalho coordenado de diversas especialidades com a aplicação de conhecimentos técnicos e econômicos tanto referentes ao âmbito público quanto ao privado. Levantamento e previsão de receitas, despesas e investimento permitirão concluir pela viabilidade do empreendimento e pelo retorno dos investimentos.

Contudo, os Planos Diretores não entram em detalhes de projeto que futuramente podem gerar situações singulares, como, por exemplo, no caso em questão, em que se estuda a possibilidade de uma pista de rolamento ou táxi, com determinadas características de

geometria horizontal, vertical e de capacidade de suporte, passar a ser utilizada como pista de pouso de emergência ou mesmo como pista de pouso alternativa quando a Pista de Pouso exige intervenção.

Dentro dessa linha é apresentado o Estudo de Caso, objeto do presente trabalho, no qual, será mostrado que um pavimento dimensionado para operar como pista de rolamento pode ser objeto de demolição em alguns de seus segmentos por problemas de geometria vertical, quando esta passa a ser utilizada como pista de pouso de emergência ou mesmo pista de pouso alternativa.

Será também mostrada a adequação das camadas que compõem a estrutura de pavimento em face do alargamento da faixa de pouso em segmentos que não serão demolidos e sim “reforçados”, por problemas de geometria vertical, quanto se muda a utilização de pista de rolamento para pista de pouso.

A figura 1, na página seguinte, apresenta parte do geométrico horizontal da área de movimento, objeto desse Estudo de Caso.

## 2. O USO DE PISTA DE TÁXI COMO PISTA DE POUSO

O RBAC 154 da ANAC, o anexo 14 da ICAO e o *Aerodrome Design Manual/Part 1/Runways* da ICAO estabelecem, dentre outros, critérios de adequação de greide e faixa de pista.

A adequação de greide de uma pista de pouso segue distâncias admissíveis, função do código de pista, entre declividade longitudinal, conforme apresentado na figura 2.

Aplicando esse critério à pista de rolamento “C”, considerando a necessidade de se ter esta seção transversal com 1,5% para cada lado, exceção feita ao trecho em interseção que seria de 1,2% no lado esquerdo e a limitação dos greide máximos de 1,5% aplicável às pistas de rolamento que chegam ou saem da pista de rolamento “C”, chegou-se à conclusão que deveria ser demolido 1.350m desta.

A figura 3, apresenta o perfil longitudinal do eixo da pista de rolamento “C”, de acordo com as distâncias admissíveis, função do código de pista, entre declividade

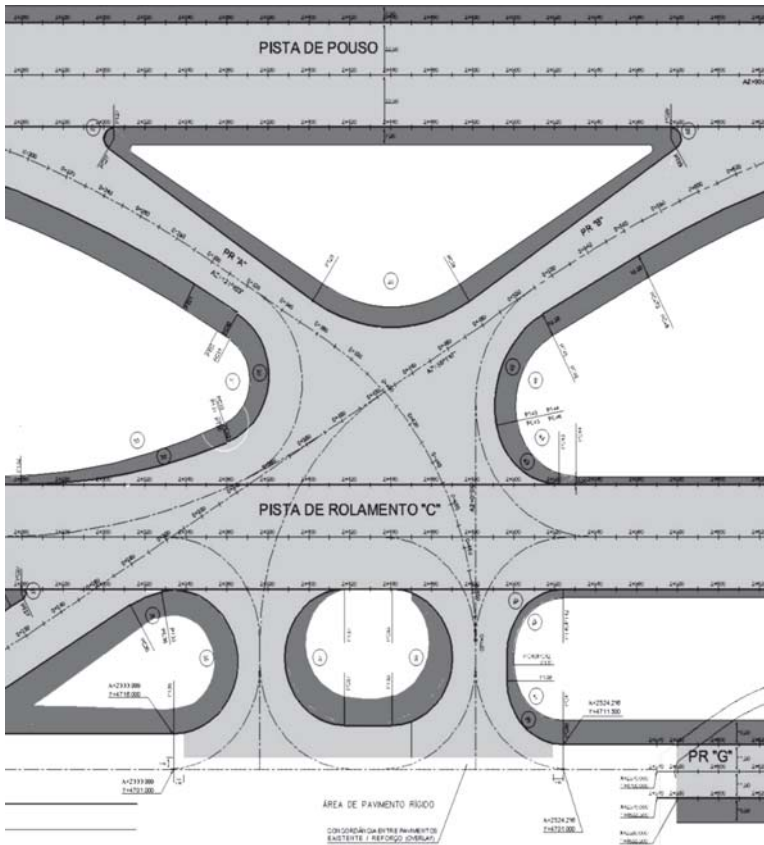


Figura 1 – “Geometrico horizontal de parte da área de movimento de aeronaves

**Distâncias entre mudanças de declividade longitudinal**

Mudanças de declividades longitudinais não devem ser projetadas muito próximas uma das outras. A distância recomendada pela ICAO entre dois pontos de interseção vertical não deverá ser inferior ao maior valor obtido por intermédio dos itens 1 e 2 a seguir:

1. 45m; ou
2. A soma dos valores numéricos absolutos das mudanças de declividades longitudinais correspondentes ao trecho multiplicadas pelo valor de  $k_1$ , (ver figura 4.5 e equação 4.):  
 $K_1 = 30.000$ , quando a pista for de código 4;  
 $K_1 = 15.000$ , quando a pista for de código 3; e  
 $K_1 = 5.000$  quando a pista for de código 1 ou 2,

$$L = | \phi_1 + \phi_2 | \cdot k_1 \quad (4.2)$$

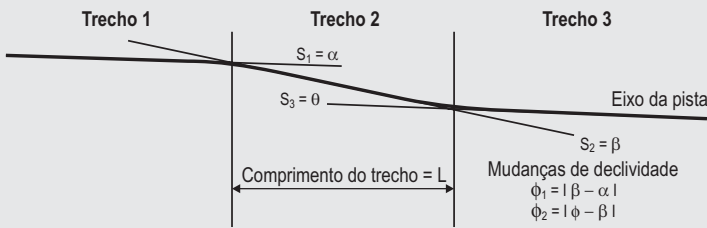


Figura 2 – Distâncias admissíveis entre declividade longitudinal

longitudinal previstos pela figura 2, observando, também, que hoje esta apresenta declividades transversais, em alguns trechos, em um só sentido, o que influenciou na extensão da demolição.

No que concerne a faixa de pista, envolve esta toda a extensão da pista de pouso, acrescida do Stopway, quando este existir.

PERFIL LONGITUDINAL - ROL "C" - EIXO

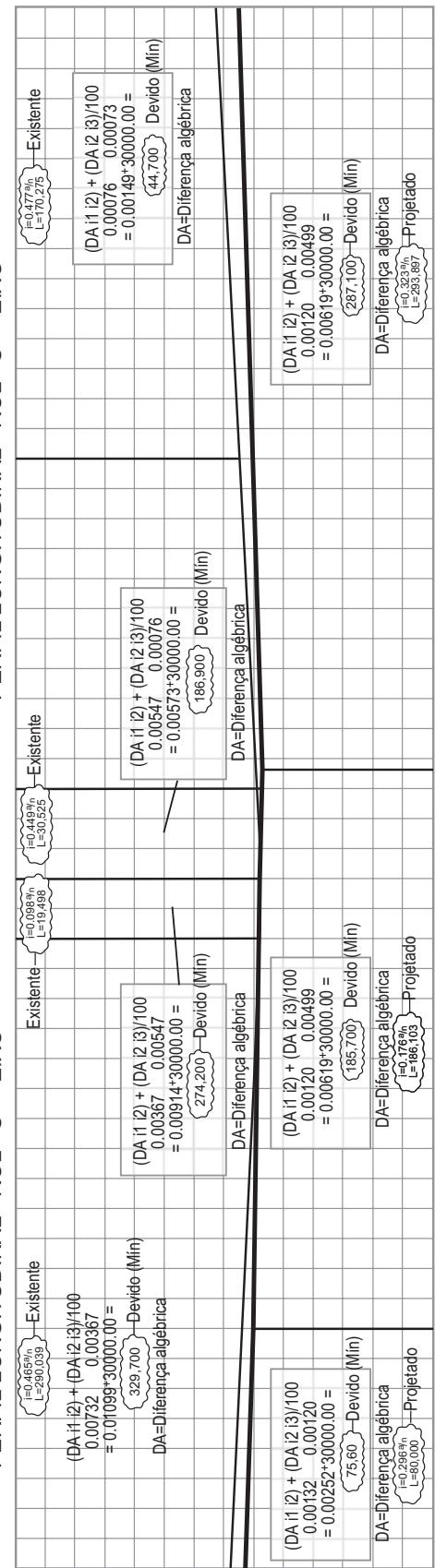


Figura 3 – Perfil Longitudinal de trecho do eixo da Pista de Rolamento “C”

O objetivo é reduzir o risco de dano à aeronave, caso esta venha a sair da pista. Nem toda faixa de pista precisa ser terraplenada. Apenas parte desta deve ser preparada. A faixa de pista preparada de um aeroporto é função da classe deste.

A tabela 1, a seguir, apresenta as larguras de faixa de pista e faixa de pista preparada em função da classe do aeródromo e do tipo de operação.

**Tabela 1 – limites de faixa preparada função da classe do aeródromo**

DIMENSÕES	TIPO DE FAIXA	CLASSE DO AERÓDROMO							
		VFR			IFR não precisão		IFR precisão		
		Código de pista			Código de pista		Código de pista		
		1	2	3,4	1,2	3,4	1,2	3,4	
A(m)	DE PISTA	60	80	150	150	300	150	300	
	de pista PREPARADA	60	80	150	80	150	80	Variável 150 à 210	
B(m)	DE PISTA	30	60		30		30		
	de pista PREPARADA	30			30		30		

NOTA: "A" refere-se a largura da faixa de pista e "B" a distância a partir da cabeceira da pista ou do stopway. Adaptação do anexo XIV da ICAO.

Aplicando esse critério ao caso em questão, considerando que as operações nessa pista seriam em condições visuais – VFR (*Visual Flight Rules*), observou-se a necessidade de adequação da faixa de pista preparada entre a Pista de Pouso e a pista de rolamento ou táxi, paralela à pista de pouso, considerando:

### 1. Lado direito da pista de pouso, faixa de pista preparada de 105m:

Declividade máxima de 2,5% já considerando a declividade de 5% nos 3m, após o acostamento, onde a norma abre ensejo a essa permissividade ou seja:

#### **Declividades transversais**

A declividade transversal recomendada pela ICAO deve ser adequada a fim de prevenir o acúmulo de água na superfície da faixa de pista preparada. No entanto elas não devem ser superiores a:

- 2,5%, quando a pista for de código 3 ou 4; e
- 3,0%, quando a pista for de código 1 ou 2.

Com o intuito de facilitar e agilizar a drenagem da pista de pouso, os três primeiros metros após a borda da pista de pouso, a declividade transversal pode chegar até 5%.

### 2. Lado esquerdo da pista de rolamento, faixa de pista preparada de 75m:

Declividade mínima de 0,5% e um máximo de 2,5%. Isso se justifica por ser a declividade mínima de 0,5% a necessária para se obter um mínimo escoamento da água que irá percolar pela superfície até alcançar o sistema de drenagem superficial que ficará entre os limites de faixa de pista preparada.

### 3. Lado direito da pista de rolamento, faixa de pista preparada de 75m

O lado direito da pista de rolamento, entretanto, ao se utilizar o mesmo critério de simetria ao lado esquerdo, gerou um conflito de sobreposição de faixa de pista preparada, haja vista a existência de uma outra pista de rolamento paralela a esta. Portanto, a solução proposta foi a de se utilizar a mesma faixa de pista com 47,5m utilizada por esta pista paralela para o lado direito da pista de rolamento considerando a declividade mínima de 0,5% e um máximo de 2,5% .

Pode-se depreender então que apenas o Lado direito da pista de rolamento não irá atender à largura da faixa de pista preparada que passará de 75m para 47,5m, haja vista a distância de 101,00m entre eixos da pista de rolamento "C" e a pista de rolamento paralela. Contudo, na maior parte do tempo de sua vida útil, irá operar como pista de táxi. Portanto, nesse caso específico de não atendimento a faixa de pista preparada, quando a pista de rolamento estiver operando como pista de emergência, bastará uma notificação via NOTAM (*Notice to the Airmen*) ou no AIP (*Aeronautical Information Publication*).

As seções transversais apresentadas a seguir, nas figuras 4 e 5, mostram como ficam as declividades das faixas de pistas considerando o ajuste de greide da



pista de rolamento com a pista de pouso, visando atender ao RBAC 154, anexo 14 da ICAO e *Aerodrome Design Manual/Part 1/Runways da ICAO*.

### 3. O PAVIMENTO DA PISTA DE TÁXI COMO PISTA DE POUSO

A pista de rolamento "C" para passar a atuar como pista de pouso, mantendo a demanda de aeronaves e não alterar a rotina de operações do aeroporto, teve sua geometria horizontal, vertical e sua estrutura de pavimento devidamente adequadas.

No que concerne a geometria vertical, o item anterior teceu os devidos comentários e apresentou as soluções passíveis de serem introduzidas.

No tocante a geometria horizontal, a largura da pista de rolamento se cingia aos 23m exigidos por norma e dispunha de um acostamento de 10,5m para cada lado, perfazendo um total de 44m de área pavimentada.

Estabeleceu-se então que esta passaria a ter 45m de largura com 3,5m de acostamento para cada lado. O

problema então passou a ser de adequar a estrutura do pavimento a esse alargamento, a exigência da geometria vertical e a essa nova demanda de aeronaves.

O que se procurou então, em função de um mix de aeronaves e de aeronaves *wide body*, foi avaliar as tensões e deformações permanentes excessivas no subleito de forma a evitar que esse se rompesse por cisalhamento, bem como as deformações de tração na fibra inferior do revestimento, visando à fadiga dos materiais. O que se buscou foi não exceder nem a resistência ao cisalhamento de nenhuma camada e nem a fadiga do revestimento devido à repetição de cargas.

O pavimento existente da pista de pouso e da pista de rolamento "C" foi analisado, utilizando-se, como dados de entrada, as bacias de deflexões medidas com o FWD (*Falling Weight Deflectometer*) que foram interpretadas de modo a se retroanalisar os módulos de elasticidade das camadas do pavimento e fornecer subsídios à análise de comportamento decorrente, com base na teoria de camadas elásticas. Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 2, a seguir apresentada.

Pista	Parâmetro	E <sub>1</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>2</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>3</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>4</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>1</sub> (21°C) (kgf/cm <sup>2</sup> )	D <sub>0</sub> (0,01 mm)
Pista Principal	Média =	147311	41432	76202	3730	132983	6.7
	Desvio =	40101	32759	27001	8982	36833	2.4
	Cv (%) =	27.2	79.1	35.4	240.8	27.7	35.6
	Projeto =	142271	37315	72809	2601	128354	7.0
Táxis	Média =	87353	19578	38202	3124	75953	11.9
	Desvio =	64740	21255	39090	1522	56345	6.2
	Cv (%) =	74.1	108.6	102.3	48.7	74.2	52.0
	Projeto =	78001	16508	32555	2904	67815	12.8
Pista C (Trecho 1)	Média =	113078	42978	-	3853	104992	9.9
	Desvio =	61628	39241	-	4831	56986	5.2
	Cv (%) =	54.5	91.3	-	125.4	54.3	52.7
	Projeto =	101968	35904	-	2982	94719	10.8
Pista C (Trechos 2 e 3)	Média =	73029	25157	3333	3422	65564	19.4
	Desvio =	48694	32091	2642	1343	43780	7.9
	Cv (%) =	66.7	127.6	79.3	39.2	66.8	40.8
	Projeto =	64334	19427	2861	3182	57747	20.8

Tabela 2 – Síntese da avaliação com o FWD

Onde:

E<sub>1</sub> = módulo de elasticidade das camadas asfálticas do revestimento (CAUQ);

E<sub>2</sub> = módulo de elasticidade da camada de base;

E<sub>3</sub> = módulo de elasticidade da camada de sub-base;

E<sub>4</sub> = módulo de elasticidade do subleito;

C<sub>v</sub> = coeficiente de variação (desvio-padrão / média);

D<sub>0</sub> = deflexão do pavimento sob a carga de 4100 kgf, com o revestimento a 21°C.

Os valores indicados como de “projeto” correspondem à aplicação da fórmula:

$$Par = Média - \frac{t_{90}\sigma}{\sqrt{n-1}}$$

onde *Par* é o valor de projeto do parâmetro analisado, *n* é o número de ensaios, *s* é o desvio-padrão e *t*<sub>90</sub> é o valor da Distribuição *t* de *Student* para um nível de confiabilidade igual a 90%.

No caso da Pista de Pouso e dos Táxis, os valores de *E*<sub>2</sub> se referem à camada de base em Concreto Rolado (CCR), com cerca de 12cm de espessura, os valores de *E*<sub>3</sub> se referem à placa de Concreto Cimento Portland (CCP) do pavimento original, com 30cm de espessura, e os valores de *E*<sub>4</sub> se referem ao sistema formado pela sub-base original em Macadame Hidráulico (10cm) e pelo solo de subleito.

No Trecho 1 da Pista de Rolamento “C”, os valores de *E*<sub>2</sub> correspondem às camadas de CCR e CCP consideradas como uma só, com 38cm de espessura, sendo *E*<sub>4</sub> o sistema formado pelas camadas de Macadame Hidráulico (10cm) e solo de subleito. No caso dos Trechos 2 e 3 da Pista C, os valores de *E*<sub>2</sub> se referem à base em BGTC (15cm), os valores de *E*<sub>3</sub> à sub-base granular (Macadame Hidráulico ou Brita Graduada, 10 a 20cm) e *E*<sub>4</sub> corresponde ao solo de subleito.

A Tabela 3, a seguir, mostra a parcela mais importante do *mix* de aeronaves hoje atuante no aeroporto, considerando apenas as aeronaves mais pesadas, e o A-380, que poderá vir a operar no futuro. Observa-se que existe a necessidade de um PCN (*Pavement Classification Number*) mínimo da ordem de 70 para acomodar estas operações.

**Tabela 3 – Tráfego das aeronaves mais pesadas**

Aeronave	PMD (tf)	ACN rígido	ACN flexível
B747-400F	337,4	58	60
MD-11	250	61	57
A-380 (a operar no futuro)	580	70	70

NOTA: ACN (*Aircraft Classification Number*); PMD (Peso Máximo de Decolagem)

A Tabela 4, a seguir, mostra os resultados dos ensaios CBR na argila arenosa do subleito, correspondentes a amostras coletadas em diversos locais no aeroporto, os quais indicam que pode ser adotado um valor de projeto CBR<sub>p</sub> = 10. Tendo em vista que o módulo de elasticidade

de projeto para a Pista de Pouso, onde está concentrada a maior parte das avaliações realizadas com o FWD, é *E* = 2600 kgf/cm<sup>2</sup>, resulta a relação *E*/CBR = 260 para a argila arenosa do subleito.

Na pista de pouso os resultados do FWD indicam uma elevada integridade estrutural para as camadas asfálticas do revestimento. As camadas cimentadas (concreto rolado e concreto de cimento Portland) devem apresentar um grau apenas moderado de trincamento.

O PCN atual é da ordem de 87, para um CBR efetivo *in situ* do solo de subleito igual a 10. Este cálculo foi feito considerando existir ainda uma vida de fadiga restante na placa de CCP do pavimento original.

Desta forma, a restauração do pavimento deve envolver apenas as ações necessárias à correção geométrica vertical, não havendo necessidade de acréscimo de reforço de natureza estrutural.

Esta conclusão é válida também para as pistas de táxi (PCN = 83), embora as condições ali não sejam tão boas quanto às da Pista de Pouso. No caso da Pista de Rolamento “C”, o Trecho 1 apresenta condição estrutural semelhante à dos Táxis, exceto pela maior incidência de trincas de reflexão. Seu PCN é igual a 80, considerando o mesmo critério (proteção da vida de fadiga da placa de CCP do pavimento original).

A presença das trincas de reflexão requer, antes do recapeamento, a aplicação de uma camada de Massa Fina de PMQ (2 cm, diâmetro máximo de agregados de 3/8" e teor de asfalto maior que 6% em peso).

Nos Trechos 2 e 3 da Pista de Rolamento “C”, existe hoje um pavimento semi-rígido onde as camadas asfálticas

**Tabela 4 – Ensaios CBR no solo de subleito**

Ensaio	CBR
1	11.0
2	9.0
3	7.5
4	9.1
5	5.9
6	11.2
7	12.7
8	10.7
9	13.7
10	10.3
11	14.7
12	12.2
13	7.7
14	7.3
15	12.7
16	11.7
17	13.7
18	13.3
19	10.0
n (ensaios) =	19
t <sub>90</sub> =	1.35
Média =	10.8
Desvio-padrão =	2.50
CBR p =	10

e cimentadas estão seriamente comprometidas pelo trincamento, a julgar pelos baixos módulos de elasticidade destas.

O PCN é da ordem de 56, considerando ser a estrutura, em termos efetivos, um pavimento flexível, onde o critério crítico é a proteção do solo de subleito contra deformações plásticas excessivas.

Para a obtenção de um PCN = 70, deve ser aplicado um recapeamento em CAUQ com 8,0 cm de espessura, após ter sido aplicada a Massa Fina de PMQ (2 cm) a título de provisão contra o trincamento por reflexão.

### 3.1. Cálculo do PCN

No recapeamento de pavimentos rígidos, seja por uma camada de concreto asfáltico ou por concreto cimento, os critérios empíricos adotados pela FAA (*Federal Aviation Administration*) e que resultaram de ensaios acelerados bastante restritos realizados pelo USACE (*United States Army Corps of Engineers*) nas décadas de 1940 e 1950 são bastante insatisfatórios.

Um método mecanístico-empírico foi desenvolvido pelo próprio USACE, o qual se baseia no modelo de previsão de desempenho mostrado na Figura 6, a seguir, que apresenta a evolução, com o número acumulado de coberturas, do *Structural Condition Index* (SCI), que é o PCI apenas com os elementos relacionados ao trincamento estrutural. As seguintes fórmulas definem o modelo:

$$DF = 0,5234 + 0,3920 \log C_0$$

$$DF = 0,2967 + 0,3881 \log C_F$$

$$DF = \frac{R_{TF}}{\sigma_t}$$

onde:

DF = "design factor";

$R_{TF}$  = resistência à tração na flexão (ASTM C-78);

$\sigma_t$  = tensão máxima de tração, calculada pela teoria de camadas elásticas.

Para um número acumulado de coberturas maior que  $C_0$ , a queda gradual do SCI é dada por:

$$SCI = 100 \frac{\log\left(\frac{C_F}{C}\right)}{\log\left(\frac{C_F}{C_0}\right)}$$

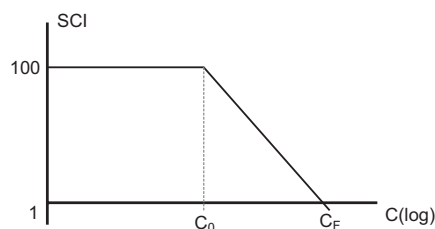
Quando SCI atinge o valor zero, tem-se uma condição de ruptura estrutural do pavimento. A tensão  $\sigma_t$  é calculada considerando a hipótese de uma placa infinita no plano horizontal.

Desta forma, o modelo não considera de forma explícita as tensões máximas de tração que ocorrem ao longo das juntas. Contudo, implícito no modelo está um grau de transferência de carga nas juntas superior a 25%. Caso essa transferência seja inferior a 25% (que é o valor de projeto admitido pelo USACE), deve-se aumentar a tensão  $\sigma_t$  calculada pelo seguinte fator multiplicativo:

$$X = \frac{(1-\alpha)^{0,972}}{0,7561}$$

Onde  $\alpha$  é o grau de transferência de carga na junta (se  $\alpha < 25\%$ ). É fundamental que, quando da aplicação desse modelo, seja considerado o prosseguimento da degradação estrutural da placa subjacente, mesmo após o recapeamento. A perda gradual de suporte é considerada através do módulo de elasticidade efetivo da camada, podendo-se aplicar o modelo:

$$\frac{E_{ef}}{E_0} = 0,02 + 0,0064 \times SCI + (0,00584 \times SCI)^2$$



Na Pista de Pouso, este modelo indica que o pavimento rígido antigo deve ter SCI da ordem de 44, o que implica presença significativa de defeitos de natureza estrutural. Nos Táxis, tem-se SCI = 20, indicando uma deterioração estrutural mais severa ainda.

As trincas severas e as juntas do pavimento rígido antigo devem ter sofrido reflexão através da camada de CCR que foi sobreposta, visto que o módulo de elasticidade do CCR se encontra bem abaixo do esperado para uma camada íntegra (módulos da ordem de 150.000 kgf/cm<sup>2</sup>), novamente com uma condição de deterioração mais severa nos Táxis.

O pavimento só vem apresentando desempenho satisfatório em vista da elevada espessura do recapeamento.

mento em CAUQ (17cm), a qual tem sido capaz de moderar os efeitos do trincamento por reflexão, associada aos efeitos benéficos, em termos de controlar a severidade das trincas de reflexão, propiciadas pelo entrosamento de agregados nas paredes das trincas refletidas dados pela camada de CCR e pelo Binder do recapeamento.

Aplicando este modelo às condições estruturais de projeto da Pista de Pouso, resulta PCN = 87 em termos de se dar uma proteção adequada ao pavimento antigo em CCP contra trincamento por fadiga. Este valor indica que a máxima carga de roda simples que pode operar de forma irrestrita, sob pressão de pneus de 12,5 kgf/cm<sup>2</sup>, é de  $Q_R = 23,5$  tf. Sob esta carga, a máxima tensão de tração sob a placa de CCP será de  $\sigma_t = 22,0$  kgf/cm<sup>2</sup>.

Este valor foi obtido pela teoria de camadas elásticas (programa FLAPS) em um cálculo a favor da segurança, considerando o revestimento asfáltico com módulo de elasticidade de 30.000 kgf/cm<sup>2</sup>, minorado para os dias mais quentes do ano.

Para uma resistência à tração na flexão  $R_{TF} = 45$  kgf/cm<sup>2</sup>, ter-se-á uma relação tensão-resistência SSR =  $\sigma_t/R_{TF} = 49\%$ , valor suficientemente baixo para que não ocorra progressão significativa, sob a ação das cargas repetidas, do processo de fadiga no revestimento antigo de CCP, por estar abaixo de 50%.

Tendo em vista que não operam nesta pista aeronaves com ACN desta magnitude, conclui-se que a última restauração que foi executada foi capaz de bloquear a continuidade do processo de trincamento por fadiga no pavimento rígido.

Toda a deterioração que ocorreu desde a última restauração se deveu a dois mecanismos simultâneos: trincamento por reflexão, através do CCR e do CAUQ, das trincas e juntas do pavimento rígido e deformações plásticas sob cargas repetidas durante os dias mais quentes nas camadas de CAUQ.

Este último mecanismo tem tido efeito apenas reduzido, pois não há deformações plásticas excessivas na pista. O trincamento por reflexão, por sua vez, não pode ser combatido de forma eficaz por aumentos de espessura do revestimento asfáltico, mas sim atuando nas condições de interface

entre a nova camada de recapeamento a ser aplicada e as áreas mais severamente trincadas do pavimento atual.

Desta forma, para a Pista de Pouso pode-se considerar existir hoje PCN = 87, de modo que a restauração do pavimento deve envolver recapeamento nas espessuras requeridas para as correções da geometria vertical que se fizerem necessárias, aplicando-se antes do recapeamento uma camada intermediária anti-reflexão de trincas nas áreas severamente trincadas. O mesmo diagnóstico é válido para os Táxis e para o Trecho 1 da Pista C, para os quais resultam os valores mostrados na Tabela 5, a seguir apresentada.

Tabela 5 – Cálculo do PCN (fadiga da placa de CCP)

Parâmetro	Pista Principal	Táxis	Pista C (Trecho 1)
PCN	87	83	80
$Q_R$ (tf)	43,5	41,5	40
$\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	22	21,88	22,15
SSR = $\sigma_t/R_{TF}$ (%)	48,9	48,6	49,2

No caso de pavimentos flexíveis, importa a proteção das camadas granulares e de solos contra o acúmulo de deformações plásticas excessivas, produzidas pela ação repetida das cargas do tráfego. Portanto, a resistência efetiva *in situ* destas camadas deve ser avaliada de forma apropriada.

No solo de subleito, partindo do conhecimento da relação E/CBR = 260, pode ser determinado o valor do CBR efetivo *in situ* em cada área como sendo: CBR = E/260.

Nos Trechos 2 e 3 da Pista C, a base em BGTC apresenta-se severamente trincada, de modo que não há como tentar protegê-la contra o trincamento por fadiga.

O seu PCN foi calculado, portanto, como sendo duas vezes a maior carga de roda simples, sob pressão igual a 12,5 kgf/cm<sup>2</sup>, que pode ser aplicada sem que sejam produzidas deformações plásticas excessivas no pavimento.

As solicitações no solo de subleito foram mais críticas que nas camadas granulares a este respeito. Foi admitida a necessidade de se manter as tensões de cisalhamento atuantes abaixo de 50% da resistência ao cisalhamento do solo, de modo que o comportamento do solo em termos de geração de deformações plásticas sob cargas repetidas fosse estável, com velocidade de progressão decrescente com o número de ciclos de carga.

A resistência à compressão simples foi estimada por:  $R_{CS} = 0,26 \times \text{CBR}$  (kgf/cm<sup>2</sup>), levando a  $R_{CS} = 3,2$  kgf/cm<sup>2</sup>

e a uma resistência ao cisalhamento  $\tau_f = R_{cs}/2 = 1,6 \text{ kgf/cm}^2$  para  $\text{CBR} = 3180/260 = 12,2$ . Para a seção de pavimento atual, a carga  $Q_R = 28 \text{ tf}$  (correspondente a  $\text{PCN} = 56$ ) aplica uma tensão máxima de cisalhamento no topo do subleito igual a  $\tau = 0,8 \text{ kgf/cm}^2$ , atendendo portanto ao critério  $\tau \leq \tau_{adm} = 0,5 \times \tau_f = 0,8 \text{ kgf/cm}^2$ .

Outro critério a ser verificado é se a máxima tensão de cisalhamento atuante está abaixo da tensão admissível dada por:

$$\tau_{adm} = a(\log N_p)^b$$

$$a = 0,287 \times \text{CBR}^{1,4384}$$

$$b = 0,0094 \times \text{CBR} + 1,714$$

modelo este que sintetiza diversos critérios de deformações plásticas sob cargas repetidas. Neste caso, resulta:

$$a = 10,521 \text{ e } b = 1,829$$

$$\tau_{adm} = 0,834 \text{ kgf/cm}^2$$

Para que esta seção venha a ter  $\text{PCN} = 70$ , será necessário aplicar um recapeamento em CAUQ com 8cm de espessura, uma vez que, sob a carga de roda

simples  $Q_R = 35.000 \text{ kgf}$ , ter-se-á:  $\tau = 0,82 \text{ kgf/cm}^2$  no solo de subleito, admitindo que a camada de BGTC prosseguirá no processo de trincamento, degenerando em direção a se tornar, em termos de deformabilidade elástica, similar a uma Brita Graduada, com módulo de elasticidade  $E = 2.500 \text{ kgf/cm}^2$ .

### 3.2. As estruturas de pavimento

Em face dos estudos desenvolvidos, partiu-se então para buscar uma composição estrutural de um pavimento novo e de reforço de forma a atender às imposições da geometria vertical e não exceder nem a resistência ao cisalhamento de nenhuma camada e nem a fadiga do revestimento devido a repetição de cargas.

A figura 7, a seguir apresentada, de uma determinada estaca da pista de rolamento "C" refere-se às camadas que compõem o reforço do pavimento e a estrutura do pavimento novo, considerando a partir dos 11,5m do eixo 3,5m com a mesma capacidade estrutural do trecho reforçado, 7,5m a partir de então com 80% dessa capacidade estrutural e o acostamento com 3,5m.

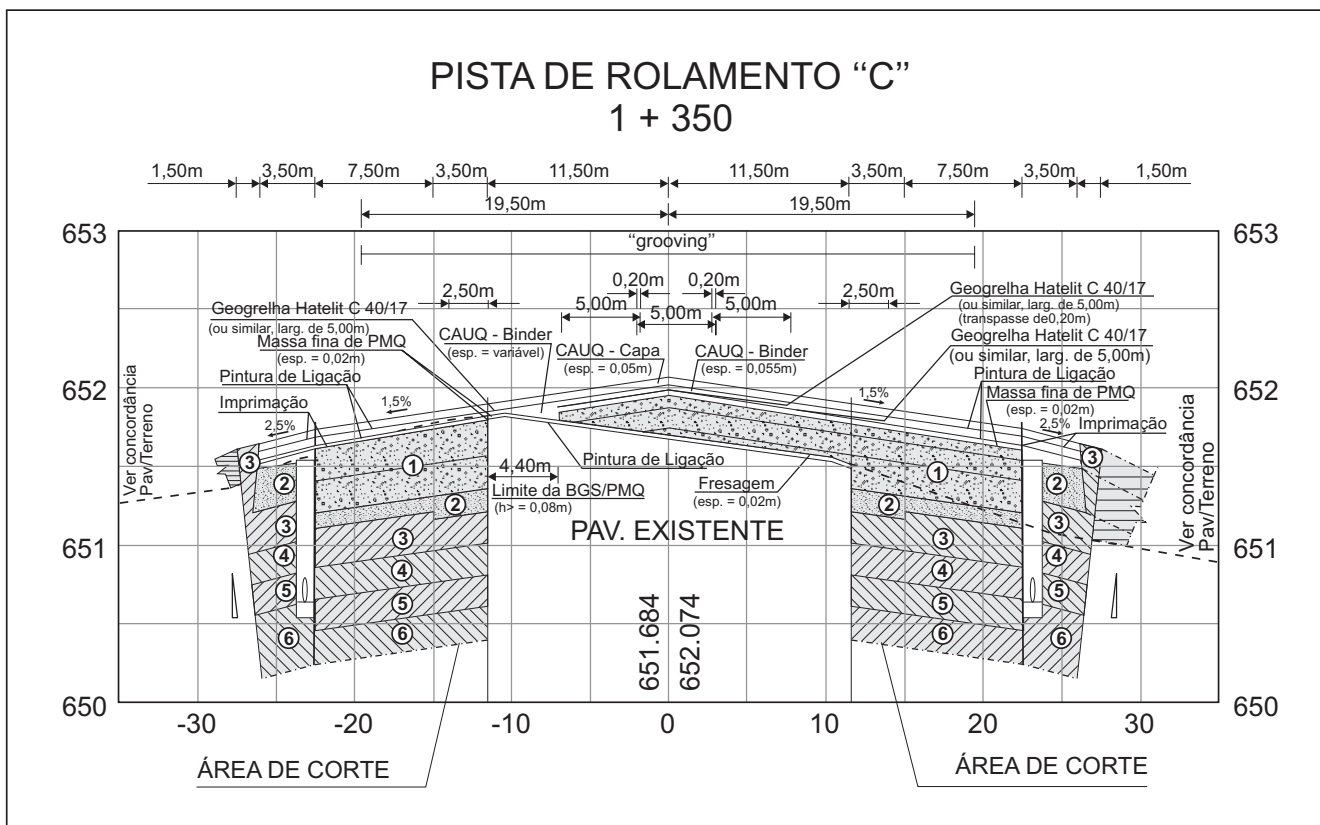


Figura 7 – Composição da estrutura do pavimento em trecho de reforço e trecho novo

Onde:

- 1 – BASE DE BRITA GRADUADA SIMPLES, CBR  $\geq$  80% (Compactação: 100% da densidade máxima seca da energia Proctor Modificado, ensaio AASHTO-T180, 55 golpes ou método DIRENG 01/87 a +/- 2% da umidade ótima.
- 2 – SUB-BASE DE SOLO ESTABILIZADO GRANULOMÉTRICAMENTE, CBR  $\geq$  60%, Compactação: 100% da densidade máxima seca da energia Proctor Modificado, ensaio AASHTO-T180, 55 golpes ou método DIRENG 01/87 a +/-2% da umidade ótima.
- 3 – SOLO LOCAL CBR  $\geq$  10%, (Compactação: 95% da densidade máxima seca da energia Proctor Modi-

ficado, ensaio AASHTO-T180, 55 golpes ou método DIRENG 01/87 a +/- 2% da umidade ótima

- 4 – SOLO LOCAL CBR  $\geq$  10%, (Compactação: 90% da densidade máxima seca da energia Proctor Modificado, ensaio AASHTO-T180, 55 golpes ou AASHTO-T180, 55 golpes ou método DIRENG 01/87.
- 5 – SOLO LOCAL CBR  $\geq$  10%, (Compactação: 85% da densidade máxima seca da energia Proctor Modificado, ensaio AASHTO-T180, 55 golpes ou método DIRENG 01/87 a +/- 2% da umidade ótima.
- 6 – SOLO LOCAL CBR  $\geq$  10%, (Compactação: 80% da densidade máxima seca da energia Proctor Modificado, ensaio AASHTO-T180, 55 golpes ou método DIRENG 01/87 a +/- 2% da umidade ótima.

A figura 8, a seguir apresentada, de uma determinada estaca da pista de rolamento "C" refere-se às camadas que compõem a estrutura do pavimento novo,

no trecho em interseção, onde se observa a modificação na seção transversal, da declividade em direção ao bordo esquerdo de 1,5% para 1,2%.

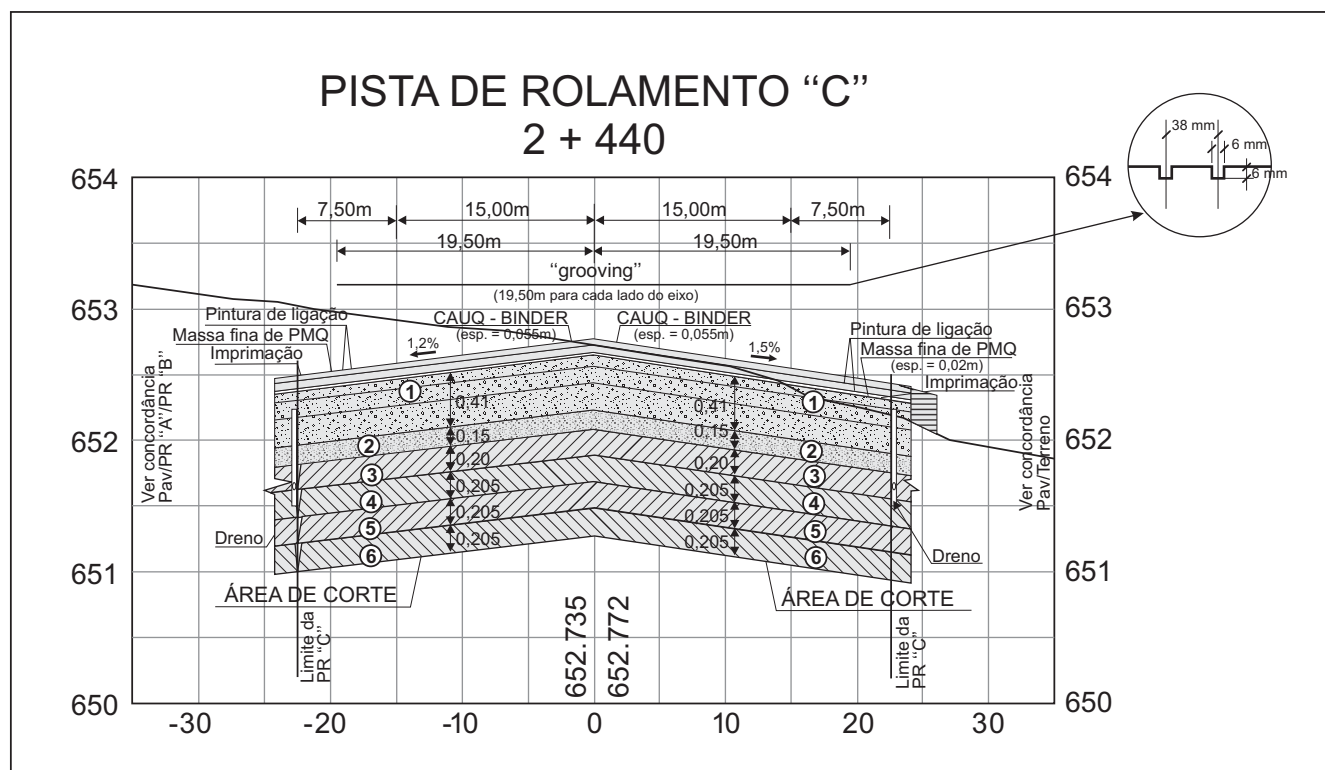


Figura 8 – Composição da estrutura do pavimento em trecho novo, em interseção

#### 4. CONCLUSÃO

Demonstrou-se que a introdução de alterações de uso em *Pista de Táxi*, que envolvam mudanças de concepção operacional, pode acarretar reconstrução e adequação desta à sua nova realidade, em função das condições de geometria vertical existentes na área de movimento de aeronaves, quer seja em decorrência da *Faixa de Pista*, da *Pista de Pouso*, da *Pista de Táxi* ou em função das *Saídas de Pista*.

Demonstrou-se que a reconstrução e adequação estão diretamente ligadas às exigências de geometria horizontal, vertical e de declividade transversal quando

uma *Pista de Táxi* passa a ser utilizada como *Pista de Pouso*. Caracterizou-se ainda a dificuldade em se adequar o *greide* de uma *Pista de Táxi* quando esta se situa entre uma *Pista de Pouso* e um *Pátio de Aeronaves*, com diversas opções de *Saídas de Pista*.

Em decorrência, ficou então caracterizado a necessidade de se adequar a estrutura do pavimento não mais em função da espessura de reforço ou *overlay* requerida pelo dimensionamento, função das avaliações defleto-métricas, e sim em decorrência das recomendações internacionais de ajuste de *greide* provocado pelas exigências de geometria vertical e de declividade transversal, quando uma *Pista de Táxi* passa a ser utilizada como *Pista de Pouso*.

#### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- RBAC 154 da ANAC (Agencia Nacional de Aviação Civil);
- Anexo 14 da ICAO (*International Civil Aviation Organization*);
- Aerodrome Design Manual/Part 1/Runaways da ICAO (*International Civil Aviation Organization*).

# Casos de obras Pavimentação com qualidade Uma visão de um experiente engenheiro rodoviário

Baseado em palestra do autor na 16ª Reunião de Pavimentação Urbana da ABPv em Belo Horizonte em abril de 2009

**José Mário Cortes Chaves**

Engenheiro consultor de pavimentação e responsável pelo controle de qualidade da OHL Brasil

## RESUMO

*Este artigo apresenta um apanhado de conceitos e práticas ligadas à dosagem, fabricação e aplicação de misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico, resultante de anos de experiência e estudos do autor. São mostrados conceitos de qualidade aplicados à prática da engenharia rodoviária, discutidos paradigmas a serem*

*contestados e mudados, processos importantes a serem implementados visando alcançar a melhor qualidade possível nas obras de pavimentação asfáltica. Comentam-se aspectos que mudaram a partir da metodologia SUPERPAVE e que podem ser aplicados imediatamente às misturas asfálticas das obras brasileiras.*

## INTRODUÇÃO

A pavimentação é um ramo da engenharia civil na qual o número de variáveis intervenientes é muito grande, e o sucesso de uma obra depende de inúmeros fatores: escolha e seleção dos materiais, dosagem das misturas asfálticas, dimensionamento das camadas, métodos construtivos, controle tecnológico da usinagem e da construção, operação da via, controle de cargas, clima da região, só para citar alguns poucos.

Na prática brasileira, a maior parte das estradas e ruas é revestida com misturas asfálticas usinadas a quente: os concretos asfálticos (CA) ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) para manter a sigla mais tradicional. Há talvez centenas de milhares de usinas de

concreto asfáltico espalhadas pelo país, com idades variáveis e tipos de processos distintos. Há também milhares de acabadoras e rolos compactadores em operação nas centenas de obras novas realizadas a cada ano e milhares de operações de manutenção e restauração acontecendo a cada dia em toda a malha pavimentada de cerca de 250.000km de estradas e incontável número de ruas.

Numa obra rodoviária, a mistura asfáltica que compõe o revestimento é em geral a parte mais cara do pavimento, sendo quase sempre a única "industrializada", o que confere grande responsabilidade a esta camada para promover o sucesso ou insucesso de um trecho pavimentado.

Neste contexto este trabalho relata conceitos e práticas adequados para melhoria da qualidade de misturas

asfálticas densas usinadas, derivadas da grande vivência do autor em inúmeras obras rodoviárias.

Para o autor qualidade é: executar uma obra dentro das especificações do projeto com os equipamentos e equipes devendo estar preparados para executar o previsto, sem improvisações. As maiores falhas encontradas nas obras estão diretamente vinculadas a equipes sem treino e equipamentos inadequados.

## ALGUNS PRINCÍPIOS

O papel do controle da construção é fundamental na garantia da qualidade de uma obra de pavimentação. O controle de qualidade é um processo de informação gerencial. Quando as informações geradas pelo controle não são usadas corretamente, defeitos vão aparecer e deverão ser refeitos.

A qualidade significa produção responsável com custo compatível.

A cultura da qualidade pressupõe: produzir com qualidade é buscar melhor relação custo versus benefício. Não interfere no volume previsto de produção e pode inclusive aumentar o mesmo. Pressupõe se adequar para produzir da maneira correta, dentro do previsto, sem contratempos.

Na empresa que tenha a cultura da qualidade, o gerente deve adotar uma postura responsável, levando em conta as informações geradas pelo controle de qualidade, independente de fiscalização. O controle de qualidade sempre custa menos que refazer.

## PREMISSAS A SEREM SEGUIDAS

Alguns controles e aspectos de dosagem são fundamentais devido ao grande impacto na vida útil de uma camada asfáltica, tais como os três seguintes, considerados relevantes pelo autor do presente trabalho:

- A porcentagem de vazios não deve ser abaixo de 3%, porque gera exsudação, e nem acima de 7%, porque gera redução significativa da vida útil da camada;
- a utilização da cal hidratada CH-1 deve ser feita em todas as misturas betuminosas, inclusive aber-

tas, como melhorador de adesividade e parte do percentual de fíler;

- deve-se executar os serviços sempre visando obter a mínima irregularidade na camada: um índice internacional de irregularidade, IRI, ou um Quociente de Irregularidade, QI, alto logo na construção significa redução de vida útil.

## MUDANÇAS DE PARADIGMA

Existem padrões de dosagem, usinagem e construção já defasados de acordo com os novos conhecimentos e equipamentos que continuam a ser aplicados. Alterar estes padrões é muito difícil, pela resistência natural a mudanças e inovações às vezes presentes no corpo técnico rodoviário, apesar de novos processos já terem sido desenvolvidos e consagrados em outros locais nacionais e mesmo no exterior.

Como exemplo, pode ser citado: uso de acabadora com mesa fixa *versus* mesa extensível e uso de rastelos no espalhamento da massa após passagem da mesa, prática pouco recomendável.

Diz Antony Robbins: “se você faz o que sempre fez, você obterá o que você sempre obteve”.

Nos últimos anos houve mudança muito grande em vários pontos, tais como: a forma de conceber os projetos de misturas asfálticas, os equipamentos de pavimentação – usinas, acabadoras e rolos, e os processos executivos.

As usinas atuais dispõem de automação, principalmente por quê? Para redução de mão de obra: a automação eliminou trabalhos repetitivos e reduziu mão de obra, mas para isto é necessário treinamento do operador para usar todos os recursos disponíveis nesta automação, com segurança e competência. Em alguns casos se criou um falso paradigma sobre esta automação: a usina é automática, portanto não é necessário calibrar. Isto é *errado*. Mas em função desta prática, se produz massa fora de padrões aceitáveis.

Deve-se checar constantemente as informações enviadas para o computador pela usina automática: as células de carga, as placas coletoras de dados e o programa de controle sofrem panes que levam a erros

na produção da massa. É necessário ter um laboratorista monitorando constantemente e ajustando o traço de massa asfáltica.

Outro ponto importante é o uso de agitadores nos tanques de asfalto (CAP) nas usinas, conforme modelos e atuação mostrados nas Figuras 1 e 2, a seguir. Na Figura 3 mostra-se outro exemplo esquemático de agitação de tanque com recirculação do produto.

Os benefícios do uso de agitadores no tanque de ligante (CAP) são muitos, e os problemas da falta deles

também. Na Figura 4 mostram-se exemplos de problemas na usinagem onde não há agitação permanente do asfalto modificado, podendo perceber fios de borracha no entorno do silo durante a operação da usina.

Quanto aos cuidados com os estoques de agregado, é comum que as pilhas sejam colocadas em locais desabrigados, sujeito a chuvas e contaminações diversas. O novo paradigma é o investimento em galpões que mantenham as pilhas abrigadas, conforme exemplo mostrado na Figura 5. Este cuidado tem reflexo

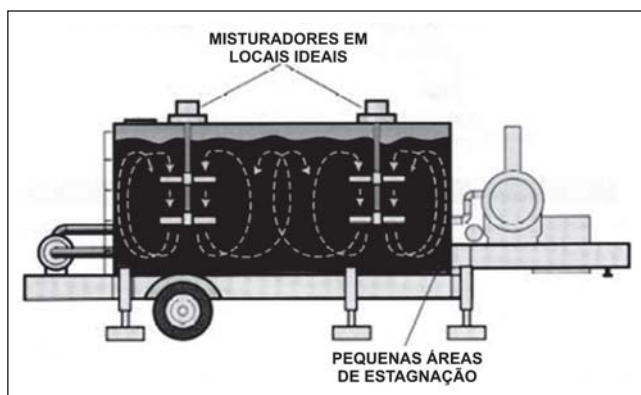


Figura 1 – Exemplo de tanque com fluxo horizontal com dois misturadores. (Fonte: TP T-133)

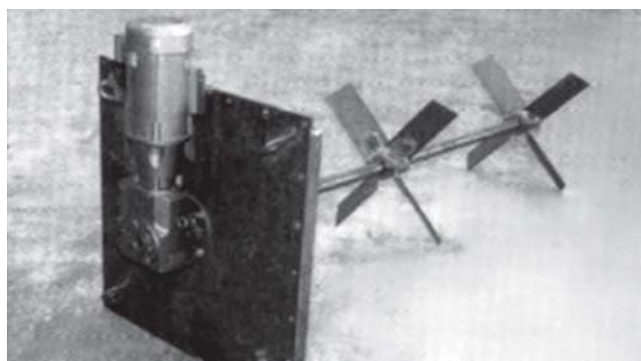


Figura 2 – Detalhes do Misturador usado em tanque de ligante asfáltico (Fonte: TP T-133)

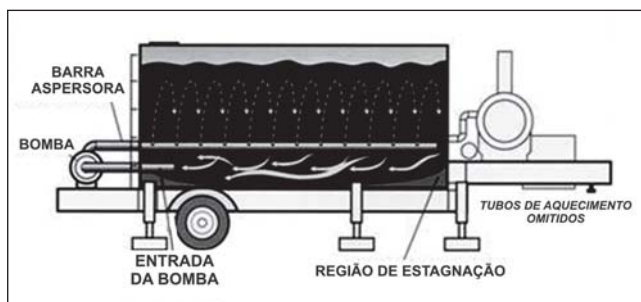


Figura 3 – Exemplo esquemático de recirculação com agitação. (Fonte: TP T-133)



Figura 4 – Exemplos de falta de agitação no tanque de CAP (Fonte: J.M.Chaves)



Figura 5 – Exemplos de estoques de agregados. (Fonte: Juan Pablo – Rettenmaier)

direto na qualidade da massa asfáltica e nos custos, pois gasta-se muito menos energia na secagem e aquecimento dos agregados durante o processo de usinagem quando estes estão protegidos.

Outro pequeno cuidado básico, que muitas vezes não é seguido, diz respeito ao carregamento do caminhão na usina: a primeira carga deve ser efetuada atrás na caçamba, depois na frente e ao final no meio do caminhão, evitando segregação e promovendo melhor distribuição da carga. Um exemplo está mostrado na Figura 6.



Figura 6 – Forma correta de carregar um caminhão com massa asfáltica na usina. (Fonte: Juan Pablo – Rettenmaier)

## OBSERVAÇÕES SOBRE OPERAÇÕES NA CONSTRUÇÃO

Faz-se a seguir alguns comentários sobre as operações de aplicação de massa asfáltica no campo, desde cuidados básicos com operação dos caminhões até procedimentos com a acabadora.

Alguns treinamentos básicos devem ser dados aos motoristas dos caminhões transportadores de massa asfáltica. Alguns podem parecer até banais, mas acontecem acidentes deste tipo com alguma frequência, como o exemplo mostrado na Figuras 7 a seguir: cuidados na operação de ré! Também é preciso treinar o motorista para que seja feito o carregamento na usina de forma adequada, como mostrado na Figura 6.

Nas Figuras 8, 9 e 10 ilustram-se cuidados a serem tomados com a pintura de ligação entre camadas asfálticas: deve ser feita sempre com a barra espargidora, bem controlada e calibrada, e, se a nova ca-

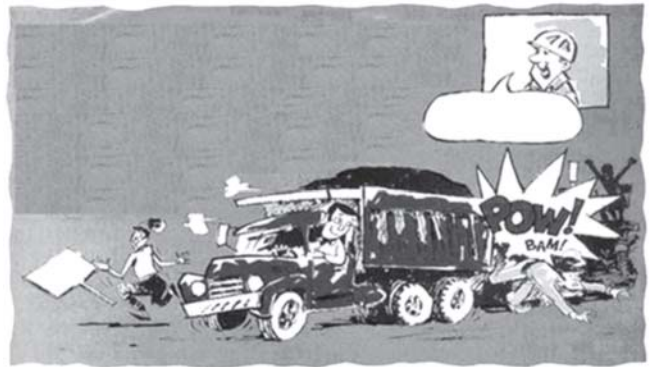


Figura 7 – Exemplo de treinamento a ser dado aos motoristas de caminhões de transporte de massa asfáltica (Fonte: Truck Driving Techniques)



Figura 8 – Cuidados na pintura de ligação – uso adequado de barra espargidora (Foto do autor)

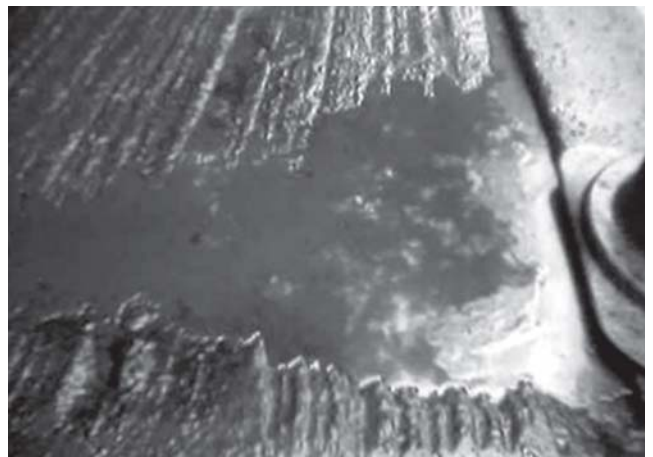


Figura 9 – Cuidados na pintura de ligação – excesso de emulsão em pontos localizados. (Foto do autor)

mada asfáltica a ser colocada tiver espessura abaixo de 4cm, deve-se usar emulsão modificada na pintura. A barra bem calibrada evita a formação de poças de emulsão e má distribuição da emulsão, conforme mostrado.

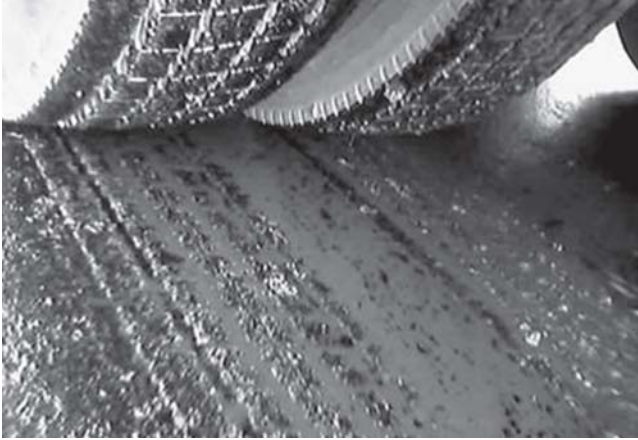


Figura 10 – Cuidados na pintura de ligação – excesso de emulsão e passagem de veículos sobre a emulsão não rompida. (Foto do autor)

As acabadoras atuais possuem diversos dispositivos para facilitar o trabalho do operador e evitar erros, tais como:

- mesa extensível: elimina trabalhos de acabamento atrás da acabadora e reduz perdas de massa;
- controle de nivelamento: garante bom acabamento da pista;
- controle de enchimento do sem fim: garante que a massa na caixa da mesa mantenha sempre nível constante e facilita o trabalho do operador.

Mas há alguns problemas de transporte e espalhamento da massa que não é tão fácil de resolver, mesmo com as acabadoras mais modernas: é a manutenção da temperatura da massa no intervalo adequado para a compactação e distribuída de forma equânime em todos os pontos do caminhão e da mesa. Nas Figuras 11, 12, 13 e 14 mostram-se algumas medições realizadas com equipamento especial de infravermelho que ilustram os problemas apontados de variação das temperaturas na massa asfáltica, enquanto nas Figuras 15 e 16 apresentam-se algumas das soluções possíveis hoje. Na Figura 11 mostram-se duas fotos de um mesmo caminhão: uma normal, outra por infravermelho, ficando nesta visível o resfriamento variável durante o transporte.

Este resfriamento da massa devido ao tempo de viagem, especialmente em caçambas não protegidas (Figura 12), causa muitos problemas na pista. Na Figura 12 mostra-se que alguns pontos já estão com tempe-

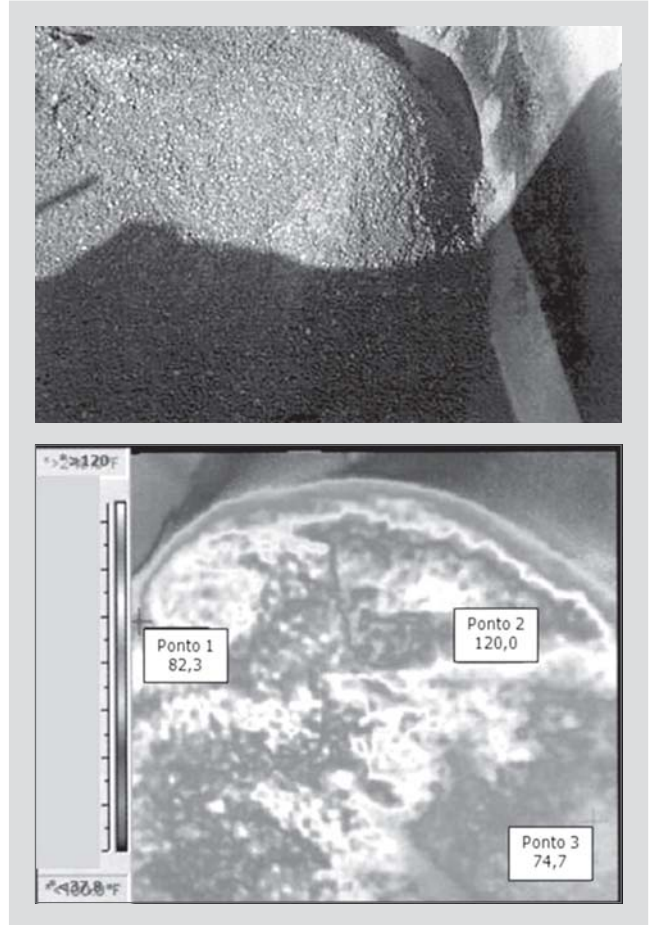


Figura 11 – Fotos, normal e infravermelho, tiradas da massa asfáltica depositada na caçamba de um caminhão. (FONTE: ASTEC - TP 134)

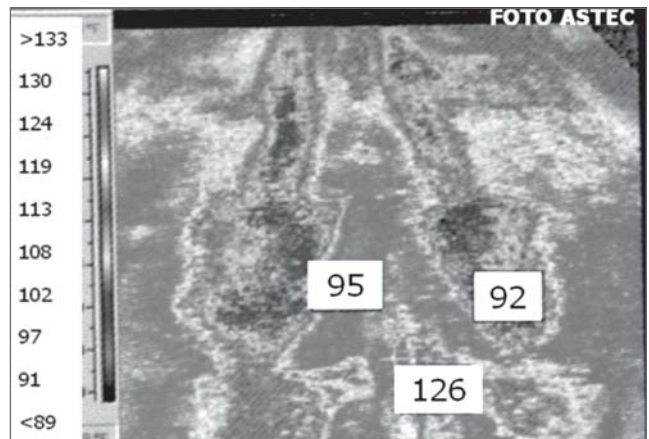


Figura 12 – Foto infravermelho de massa asfáltica com temperaturas variáveis (FONTE: ASTEC - TP 134)

ratura abaixo da mínima para compactação. Uma mesa espalhando esta massa não terá um bom acabamento.

Para diminuir este problema, têm sido buscadas várias soluções, uma delas como indicado na Figuras 13,

que envolve uso de parafusos sem fim que tanto é solução para homogeneizar a temperatura da mistura no silo da acabadora como reduz a segregação e diminui problemas de compactação.

No entanto, medindo-se a variação da temperatura na pista após espalhamento, como mostra a Figura 14, percebe-se que o acabamento está melhor do que na Figura 12, mas ainda assim existem problemas de diferenças de temperatura, portanto de grau de compactação também.

Uma forma moderna que permite a melhoria mais efetiva deste problema da variação da temperatura na massa é utilizar um sistema de transferência de massa (Figura 15): promove a uniformização da temperatura de espalhamento (Figura 16), com isso melhora as condições de compactação da camada. Outro aspecto que



Figura 13 – Uso de misturador na mesa da acabadora. (FONTE: ASTEC - TP 134)

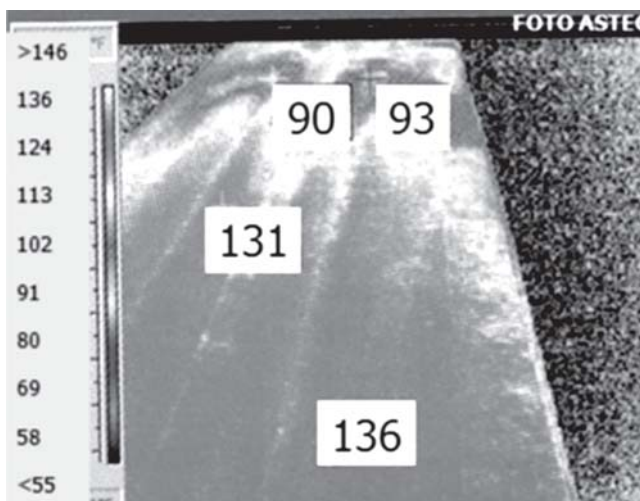


Figura 14 – Variação da temperatura da massa asfáltica na pista. (FONTE: ASTEC - TP 134)



Figura 15 – Sistema de transferência de massa asfáltica para a acabadora. (FONTE: ASTEC - TP 134)

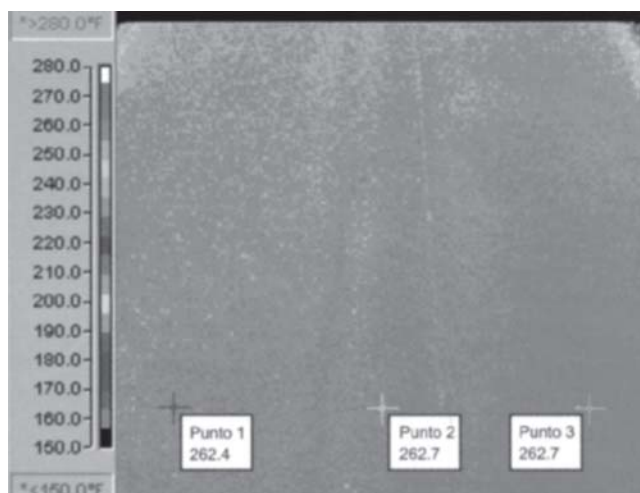


Figura 16 – Homogeneidade de temperatura obtida com sistema de transferência de massa asfáltica. (FONTE: ASTEC - TP 134)

merece destaque na garantia da qualidade da construção de um revestimento asfáltico é o ponto de partida de operação de uma acabadora. Garante-se boa transição entre trechos se for utilizada régua (espaçadores) para garantir o empolamento da massa na partida, conforme mostrado na Figura 17.

Quanto ao espalhamento de massa alguns cuidados devem ser tomados quanto ao rastelamento: deve ser mínimo e adequado, somente nas bordas e nos excessos laterais, conforme mostrado na Figura 18. Na Figura 19 ilustra-se um procedimento inadequado, com rastelamento excessivo.

Nas Figuras 20 a 24 são mostrados procedimentos diversos de atitudes adequadas quanto ao espalhamento da massa asfáltica em várias situações: trechos contíguos, emendas, controle de espessura e acabamento.

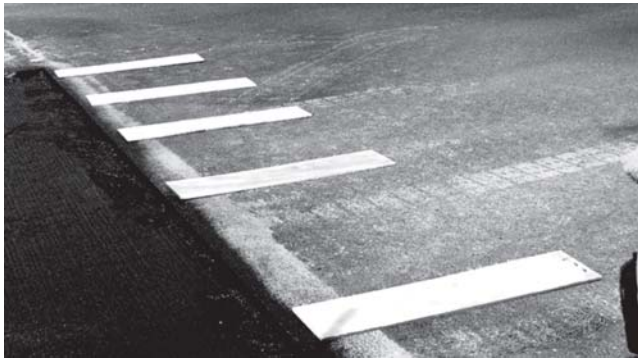


Figura 17 – Uso de réguas (espaçadores) na partida da acabadora. (Foto do autor)

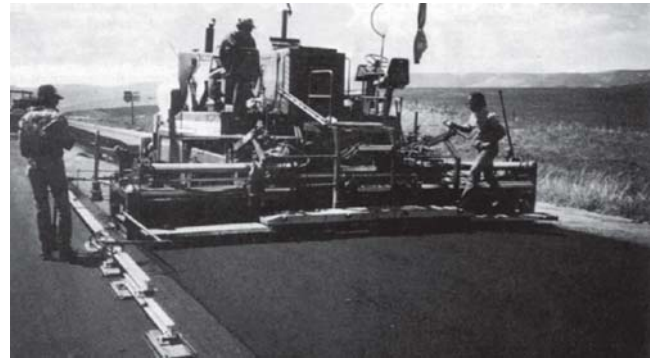


Figura 21 – Junta executada sem necessidade de rastelar. (Fonte: AASHTO Handbook)



Figura 18 – Rastelamento adequado na distribuição da massa asfáltica. (Fonte: AASHTO Handbook)

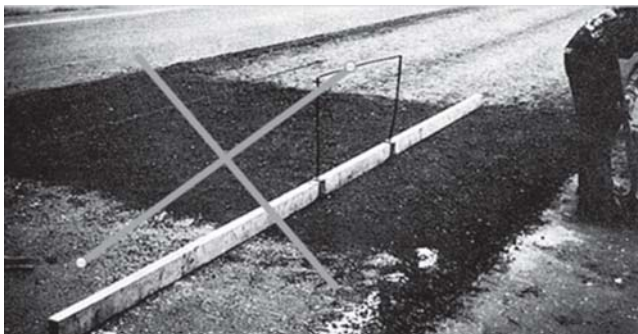


Figura 19 – Exemplo de rastelamento excessivo e inadequado. (Fonte: AASHTO Handbook)



Figura 22 – Controle de espessura e acabamento. (Foto do autor)



Figura 23 – Espalhamento da massa. (Foto do autor)



Figura 20 – Exemplo de espalhamento de camada nova contígua à antiga. (Fonte: AASHTO Handbook)



Figura 24 – Espalhamento da massa e controle do acabamento: observar o empolamento na junta (Foto do autor)

## ROLOS COMPACTADORES

Os rolos vibratórios ajudam a melhorar a eficiência de rolagem: tração nos dois cilindros, vibrações de alta frequência etc.

Para uma boa compactação é importante observar a relação entre o diâmetro máximo da mistura betuminosa e a espessura da camada. A relação ideal entre o diâmetro máximo e a espessura é de 3 vezes (aceitável até 2,5). Com isto se elimina arraste de agregado e permite que os agregados se movimentem dentro da camada durante a compactação.

A compactação é também importante para garantir uma vida útil adequada à camada betuminosa. É fun-

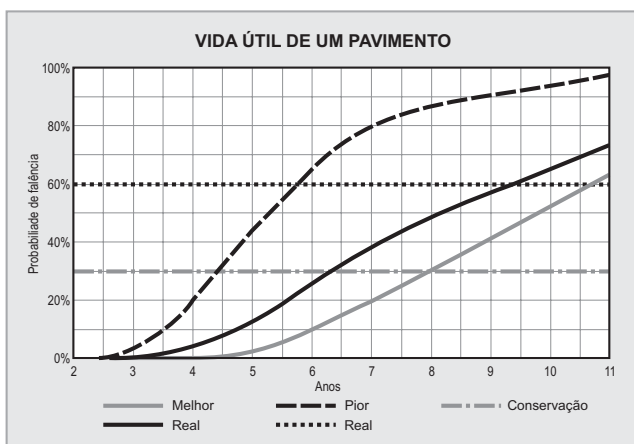


Figura 25 – Gráfico: número de anos de vida útil de um revestimento sob várias condições de compactação versus probabilidade de ruptura. (Fonte: AASHTO Handbook)

damental que o teor de vazios da camada esteja entre 3% e 7% e para isto acontecer é de suma importância controlar a temperatura na descarga da massa na acabadora, como já explicado. A compactação deve ser iniciada imediatamente após o espalhamento para se aproveitar a temperatura da massa. Se a massa estiver trincando ou se movimentando, deve haver algum problema no projeto da mistura ou na confecção da massa.

Os resultados de todos estes controles de processo têm reflexo direto na vida útil da camada e no seu desempenho global no campo: menos defeitos e maior durabilidade. Na Tabela 1 e na Figura 25 são mostrados exemplos de resultados de campo de amostragem de grau de compactação e vida útil correspondente. Esta

avaliação é estatística e está baseada em uma vida útil média para uma camada betuminosa de 8 anos até a restauração. Foram adotados três tipos de comportamento. O real, do meio, e estimou-se o comportamento dos outros dois substituindo-se os valores extremos por valores encontrados nos ensaios. No listado como melhor foram trocados os valores de vazios mais altos por outros dentro daqueles já existentes na pista. No pior fez-se o contrário.

Pode-se perceber que com pequenos ajustes na qualidade dos serviços pode-se melhorar ou piorar significativamente a vida útil de uma camada, a tal ponto que, no caso da pior situação, atinge-se o critério de rejeição do serviço.

Tabela 1 – Exemplos de resultados de controle de campo de porcentagem de vazios

CP	% Vazios		
1	5,9%	5,9%	5,9%
2	4,5%	4,5%	4,5%
3	4,5%	4,5%	8,1%
4	6,3%	6,3%	6,3%
5	4,6%	4,6%	7,2%
6	5,8%	5,8%	5,8%
7	6,7%	6,7%	6,7%
8	4,5%	7,2%	7,2%
9	5,8%	5,8%	5,8%
10	5,2%	5,2%	5,2%
11	6,6%	6,6%	6,6%
12	5,0%	5,0%	7,2%
13	4,3%	4,3%	8,1%
14	4,2%	4,2%	8,1%
% VV médio	5,3%	5,7%	6,9%
Desvio-padrão	0,89%	1,17%	0,99%
% VV mínimo	6,2%	6,2%	7,9%
GC médio	98,7%	98,2%	97,0%
GC mínimo	97,7%	96,9%	96,0%
Condição*	Aprovado	Aprovado	Rejeitado

## SUPERPAVE

Uma grande inovação que aconteceu nos últimos anos diz respeito aos desenvolvimentos e proposições advindas do Programa SUPERPAVE, desenvolvido nos EUA nos anos 1980-1990. Serão comentados a seguir

somente aspectos deste programa vinculados às mudanças no projeto da massa asfáltica.

## PROJETO DE MISTURA

No projeto da mistura pelo SUPERPAVE, a análise dos agregados passou a indicar controles mais restritos. Na definição dos ligantes mais adequados para cada projeto, a consideração do clima do local e das condições de carregamento tornou a escolha mais precisa. As considerações sobre granulometria passaram a gerar esqueleto pétreo mais estruturado: a compactação por amassamento utilizando o compactador giratório representa melhor a compactação de campo. O cálculo de VAM (vazios do agregado mineral) está mais vinculado ao processo volumétrico e mais compatível com os tamanhos máximos nominais (TMN) dos agregados.

Os principais aspectos quanto aos agregados são os seguintes:

- índice de forma no agregado graúdo – máximo 10% dos grãos com tamanho maior na relação 1:5;
- índice de forma no agregado fino – medido indiretamente por ensaio específico de “chuveiramento” da areia sob volume conhecido e normalizado, limitando teor de vazios mínimo de 45% para tráfego pesado.

Quanto à granulometria, em determinadas condições de TMN, recomenda uma porcentagem maior de agregado graúdo em relação à faixa C tradicional brasileira – acréscimo de  $\pm 6\%$  de brita 1 e 0.

Quanto à compactação, a utilização de compactador giratório trouxe muita vantagem em relação ao procedimento Marshall: há menor porcentagem de quebra do agregado graúdo no processo de compactação, e o esqueleto mineral fica mais parecido com o obtido no campo.

Quanto ao VAM, o método SUPERPAVE utiliza o procedimento volumétrico com alteração feita quanto à consideração da massa específica aparente do agregado no cálculo: o CAP absorvido faz parte do agregado, não conta para efeito dos vazios cheios de betume (VCB). Considera-se o peso dos agregados e depois das misturas com superfície saturada e seca.

Também é obrigatória a obtenção da massa específica máxima efetiva da mistura solta ( $\%V_v = 0\%$ )

em substituição da densidade máxima teórica para se calcular a volumetria e suas relações. Esta medida vem sendo chamada no Brasil de Densidade Máxima Medida da mistura (DMM) ou, como prefere o autor do presente trabalho, usar a sigla METM. Esta se faz através do ensaio conhecido como de Rice, já normalizado no país pela ABNT. O equipamento necessário para executar este ensaio está mostrado na Figura 26. Na Figura 27 é apresentado um gráfico que indica para uma mistura asfáltica a influência do tempo de cura. A mistura é mantida aquecida em estufa na temperatura de compactação durante duas horas até o momento da compactação. Com o tempo há absorção do CAP, pelo agre-



Figura 26 – Equipamento para execução do ensaio Rice de determinação da densidade máxima da mistura no estado solto, (Foto do autor)

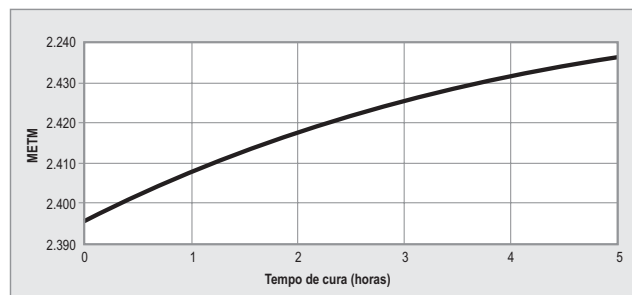


Figura 27 – Influência do tempo de cura na determinação da METM. (Fonte: AASHTO Handbook)

gado há um aumento no valor da Massa Específica Máxima Solta da Mistura. Com a absorção falta ligante livre para preencher os vazios, alterando os valores previstos na pista.

Quanto à determinação da densidade aparente dos corpos de prova, o método SUPERPAVE adota a imer-

são do corpo de prova em água por quatro minutos, obtendo três pesos: o peso seco, o peso saturado com superfície seca e o peso imerso. Isto corrige distorção de avaliação do volume do método usado no Brasil que só considera peso seco e peso imerso. Com esta diferença, a determinação do volume de vazios vai ser impactada, conforme demonstrado na Figura 28 a seguir. Na Figura 29 mostram-se estas diferenças considerando ainda uma terceira forma de atentar para o peso dos corpos de prova moldados que é utilizando a parafina para revestir os mesmos. As diferenças variam com a faixa de vazios que está sendo avaliada como esperado. Estes resultados foram obtidos no laboratório, durante o processo de avaliação das diferenças entre os métodos de ensaios.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O autor procurou elencar neste trabalho uma forma de relato de “casos” de obras genericamente agrupados por observações sistemáticas nos muitos anos de acompanhamento de campo de problemas recorrentes no trato com as misturas asfálticas. Muitas são observações que para os profissionais mais preparados e conscientes podem parecer óbvias, mas lamentavelmente ainda continuam ocorrendo em muitas obras pelo país afora. Também foram feitos comentários sobre a tecnologia SUPERPAVE que re-

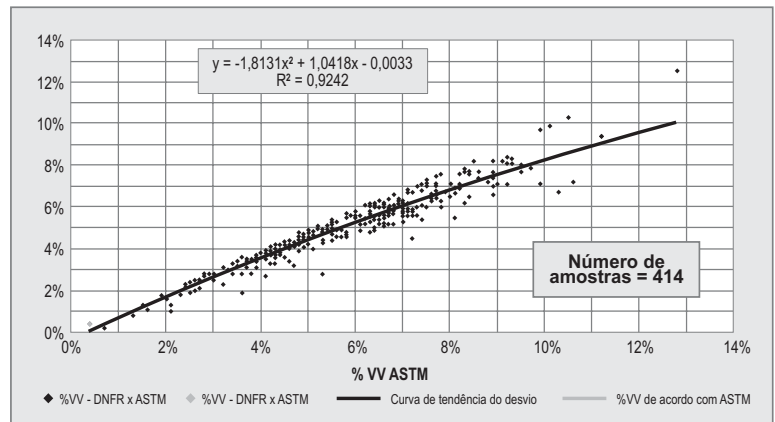


Figura 28 – Desvios no volume de vazios calculados pelo método ASTM indicado pelo SUPERPAVE e pelo método do DNER. (Fonte: autor)

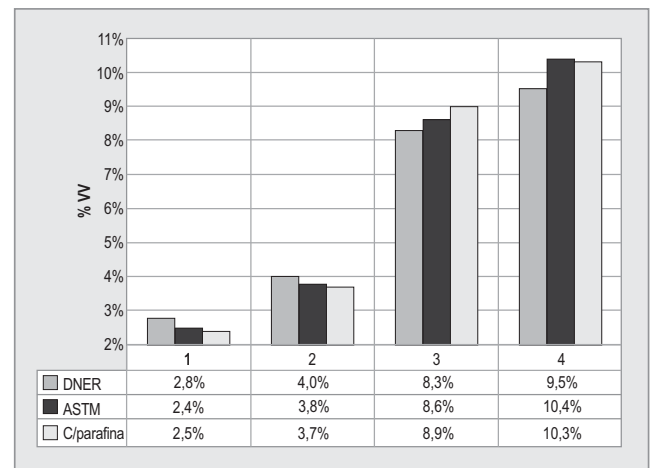


Figura 29 – Diferença de cálculo de volume de vazios considerando três formas de medir o peso do corpo de prova (Fonte: autor)

presenta uma mudança importante de paradigma nas dosagens das misturas asfálticas densas e que o autor já vem aplicando em seu exercício profissional.

## Referências bibliográficas

- Technical Paper T-133 – Heating, mixing and storing Modified Asphalt – Jim May and Tom Wilkey  
 Truck Driving Techniques – NAPA  
 Technical Paper T-134 – Temperature segregation/Temperature Differential Damage  
 Hot Mix Asphalt Paving – Handbook 2000 – US Army Corps of Engineers  
 Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of problem and recommended solutions – Prithvi S. Kandhal, P. E. – NCAT  
 Special report 180 - SUPERPAVE Construction Guidelines – NAPA  
 IS 210 – Procedures to Improve the Precision of HMA Volumetric Calculations – Asphalt Institute  
 MS 4 – The Asphalt Handbook – Asphalt Institute  
 AASHTO Handbook  
 IS 125 – Paver operations for quality

# Transporte de cargas perigosas na malha rodoviária da região metropolitana de Campinas

Natália Magalhães Rosa Andrade

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Rachel Russo Seydell

Faculdade de Engenharia Ambiental

da Pontifícia Universidade Católica de Campinas

## RESUMO

No Brasil, segundo análise do setor e pesquisas recentes, o transporte de cargas perigosas, tais como produtos inflamáveis, infectantes, resíduos sólidos, entre outros, é caracterizado pela falta de recursos e investimentos para disposição final, pelos congestionamentos de tráfego e índices de poluição. Este plano de trabalho tem por objetivo principal avaliar o transporte de cargas perigosas na malha rodoviária da Região Metropolitana de Campinas e discutir seus impactos ao meio ambiente. O método de pesquisa consiste de revisão bibliográfica sobre os aspectos abordados na regulamentação do transporte de produtos perigosos no Brasil e da coleta de dados e informações sobre acidentes ocorridos envolvendo caminhões de trans-

porte de cargas perigosas. Através de mapas rodoviários foram identificadas as vias utilizadas como canais de distribuição e os trechos mais carregados, que se constituem em áreas potenciais para a ocorrência de impactos ambientais. Foi feita coleta de dados junto à CETESB e de informações obtidas dos registros de ocorrências da Polícia Rodoviária Estadual e do Corpo de Bombeiros sobre índices de acidentes ocorridos nas rodovias, possíveis causas, frequência, horários e tipo de produtos envolvidos. Os resultados da pesquisa foram disponibilizados sobre um mapa temático para melhor visualização.

## PALAVRAS-CHAVE

Transporte rodoviário, cargas perigosas, acidentes.

## INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico e científico e consequente interação entre os países, há a necessidade de criar e modificar formulações químicas, principalmente para obtenção de produtos de desenvolvimento e bem-estar do ser humano. Inevitavelmente, o desenvolvimento econômico conduz ao aumento do consumo industrial de produtos químicos. Assim, o ho-

mem produz um volume grande de substâncias químicas, podendo ser danosas ou não ao ser humano e ao meio ambiente.

O aparecimento dessas substâncias impõe a movimentação de produtos perigosos pelos diversos modos de transporte, fundamental para a cadeia produtiva. Porém, independente do modal adotado, a atividade do transporte de produtos perigosos envolve riscos pela possibilidade de acidentes (TEIXEIRA, 2005).

As políticas e os programas de desenvolvimento econômico adotados pelo Brasil nas últimas décadas privilegiaram o transporte rodoviário, mas não excluíram o transporte ferroviário, marítimo, fluvial e através de dutos. O modo rodoviário é responsável pelo funcionamento de vários outros setores, como fábricas de caminhões, peças automotivas, pneus, combustíveis etc., o que, segundo Melo Filho (1971), trata-se do maior mercado de trabalho no Brasil ao longo dos últimos anos.

É grande o risco de acidentes com produtos perigosos no Brasil devido à extensa malha rodoviária. São Paulo é o estado mais vulnerável por ser um grande centro produtor e consumidor, por ser ligação entre outros polos industriais do Brasil e por suas áreas densamente povoadas. Além disso, este estado possui três grandes refinarias (em Cubatão, Paulínia e São José dos Campos) e um polo petroquímico (Capuava), levando à instalação de um grande número de indústrias químicas (TEIXEIRA JUNIOR, 1998). Em São Paulo, segundo a Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados (ABIQUIM), ocorre a maior incidência de emergências químicas.

O objetivo deste trabalho é ampliar o conhecimento sobre o tema e verificar a vulnerabilidade da população e do meio ambiente, sujeitos aos riscos provenientes do transporte de produtos perigosos através da malha rodoviária da Região Metropolitana de Campinas (RMC), fornecendo dados para prevenção de acidentes e planejamento de transportes. O estudo mostra índices de acidentes ocorridos nas rodovias, trechos mais carregados, as possíveis causas, frequência, horários e tipo de produtos envolvidos.

O método de pesquisa abrange a revisão bibliográfica e a análise de dados da CETESB e informações obtidas dos registros de ocorrências da Polícia Rodoviária Estadual e do Corpo de Bombeiros.

## 1. PRODUTOS PERIGOSOS

Segundo a norma 10004:2004, da Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os produtos perigosos são aqueles que possuem características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, pato-

genicidade e que apresentem riscos ao meio ambiente e à saúde pública.

A Resolução 420/04, da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), define produto perigoso como “substâncias ou artigos encontrados na natureza ou produzidos por qualquer processo que, por suas características físico-químicas, representem risco para a saúde das pessoas, para a segurança pública ou para o meio ambiente”.

Os produtos perigosos são classificados pela Organização das Nações Unidas (ONU) e publicados no “Modelo de Regulamento – Recomendações para o Transporte de Produtos Perigosos”, conhecido como Orange Book. Considerando os tipos de riscos que essas substâncias apresentam, os produtos são alojados em classes e subclasses:

- Classe 1 – Explosivos
  - 1.1 – Substância e artigos com risco de explosão em massa.
  - 1.2 – Substância e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa.
  - 1.3 – Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão ou de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa.
  - 1.4 – Substâncias e artigos que não apresentam risco significativo.
  - 1.5 – Substâncias muito insensíveis, com risco de explosão em massa.
  - 1.6 – Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa.
- Classe 2 – Gases
  - 2.1 – Gases inflamáveis
  - 2.2 – Gases não inflamáveis, não tóxicos
  - 2.3 – Gases tóxicos
- Classe 3 – Líquidos Inflamáveis
- Classe 4 – Sólidos Inflamáveis
  - 4.1 – Sólidos inflamáveis
  - 4.2 – Substâncias sujeitas à combustão espontânea
  - 4.3 – Substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis

- Classe 5 – Substâncias Oxidantes e Peróxidos Orgânicos

5.1 – Substâncias oxidantes

5.2 – Peróxidos orgânicos

- Classe 6 – Substâncias Tóxicas e Substâncias Infectantes

6.1 – Substâncias tóxicas

6.2 – Substâncias Infectantes

- Classes 7 – Material Radioativo

- Classe 8 – Substâncias Corrosivas

- Classe 9 – Substâncias e Artigos Perigosos Diversos

## 2. TRANSPORTE DE PRODUTOS PERIGOSOS

Pelo glossário de Defesa Civil do Ministério da Integração Nacional, transporte é uma atividade logística referente ao movimento de pessoal e material de uma região para outra, compreendendo o emprego do equipamento e dos meios necessários à sua execução e controle. O transporte terrestre é aquele que se desenvolve sobre o solo (ferroviário, rodoviário e dutoviário). O transporte de produtos perigosos pode ser definido como o transporte, por via pública, de produto que represente risco para a saúde de pessoas ou para o meio ambiente.

Devido ao aumento do transporte rodoviário de produtos perigosos e, assim, um conseqüente aumento de riscos ao meio ambiente, infraestrutura e população, os órgãos governamentais definiram instruções, normas e legislações com o objetivo de conter os problemas causados por acidentes contendo substâncias perigosas.

De acordo com a norma ABNT 13221:2007, "o transporte por meio terrestre de resíduos perigosos deve obedecer ao Decreto 96044, à Resolução 420 da ANTT e às normas da ABNT NBR 7500, NBR 7501, NBR 7503 e NBR 9735. Os resíduos perigosos devem ser transportados obedecendo aos critérios de compatibilidade, conforme ABNT NBR 14619".

Segundo o Departamento de Estradas de Rodagem (DER), para o transporte rodoviário de produtos

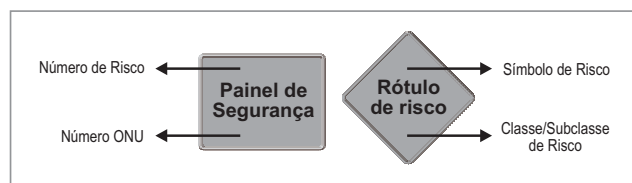


Figura 1 – Painel de segurança e rótulo de risco. Fonte: DER-SP

perigosos, é necessária uma identificação por meio de sinalização da unidade de transporte, composta por um painel de segurança e um rótulo de risco.

Os painéis de segurança são placas retangulares de 30 x 40cm, de cor alaranjada e que devem conter o número de risco na parte superior e o número da ONU na parte inferior, na cor preta (Figura 1). O número de risco fixado na parte superior do painel de segurança é constituído por até três algarismos (mínimo de dois), que indicam a natureza e a intensidade dos riscos, conforme estabelecido na Resolução 420/04, da ANTT (Figura 2). A Tabela 1 mostra os significados dos algarismos.

O número de risco permite determinar imediatamente o risco principal (primeiro algarismo) e os riscos subsidiários do produto (segundo e terceiro algarismos). Usando várias combinações têm-se diferentes números de riscos. Os rótulos de risco têm a forma de quadrado, colocados em ângulo de 45° (losango),

Tabela 1 – Significados dos algarismos dos números de risco

Algarismo	Significado
2	Desprendimento de gás devido à pressão ou à reação química
3	Inflamabilidade de líquidos (vapores) e gases ou líquido sujeito a auto aquecimento
4	Inflamabilidade de sólidos ou sólidos sujeitos ao auto aquecimento
5	Efeito oxidante (intensifica o fogo)
6	Toxicidade ou risco de infecção
7	Radioatividade
8	Corrosividade
9	Risco de violenta reação espontânea
X	Substância que reage perigosamente com água (utilizado como prefixo do código numérico)

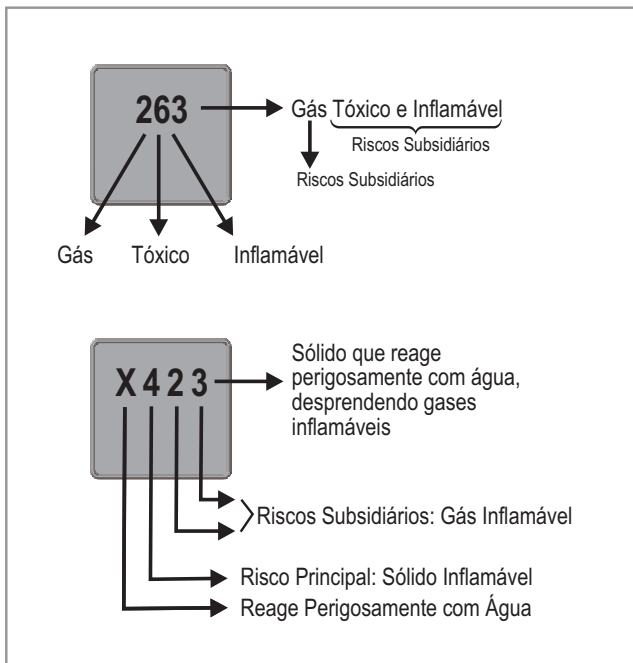


Figura 2 – Exemplo da aplicação da metodologia de identificação dos números de risco.

podendo conter símbolos, figuras e/ou expressões emolduradas, referentes à classe/subclasse do produto perigoso. Os rótulos de risco (Figura 3) possuem cores de fundos diferentes, com o objetivo de identificar melhor os produtos, e são divididos em duas metades:



Figura 3 – Rótulo de Risco da Classe 3 – Líquidos Inflamáveis

Tabela 2 – Significado das cores de fundo dos rótulos de risco

Cor de Fundo do Rótulo	Significado
Vermelho	Inflamável
Verde	Gás não inflamável
Laranja	Explosivo
Amarelo	Oxidante
Preto/Branco	Corrosivo
Amarelo/Branco	Radioativo
Vermelho/Branco listrado	Sólido inflamável
Azul	Perigoso quando molhado
Branco	Veneno

a metade superior destina-se a exibir o pictograma, símbolo de identificação do risco, exceto para as subclasses 1.4, 1.5 e 1.6; a metade inferior destina-se a exibir o número da classe ou subclasse de risco e grupo de compatibilidade, conforme apropriado e quando aplicável o texto indicativo da natureza do risco. A tabela 2 mostra o significado das cores de fundo dos rótulos de risco.

Gomes (2006) comenta que, apesar de existirem regras para o transporte de produtos perigosos, estas não são cumpridas, gerando um agravamento nos riscos de acidentes, podendo ocasionar eventos adversos como:

- Incêndio, envolvendo materiais combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, inclusive equipamentos elétricos energizados;
- Formação de bolas de fogo e explosão de vapores em expansão, a partir de líquidos em ebulição;
- Extravasamento de produtos perigosos, que pode ocorrer sob a forma de escape de gases, derrame de líquidos ou fugas multifásicas;
- Evaporação incrementada de produtos líquidos, como consequência de superaquecimentos, e dispersão nos cenários de desastres e para a atmosfera;
- Contaminação e poluição do ar, da água e do solo por gases, elementos particulados, efluentes líquidos e resíduos ou despejos sólidos resultantes do processo industrial.
- Produção de radiações térmicas, nucleares, ionizantes, ondas sonoras e outros efeitos;
- Reações químicas em geral, de oxidação, corrosão ou outras;
- Reações tóxicas causadas por organismos vivos com propriedades patogênicas e por produtos químicos tóxicos;
- Contaminação e poluição ambiental, com reflexos danosos para os biótopos e biocenoses.

### 3. ANÁLISE DE DADOS

#### 3.1. Acidentes no Transporte de Produtos Perigosos

Analisando dados obtidos no Cadastro de Acidentes Ambientais (CADAC) publicado pela CETESB (SP), verificou-se que, no período de 1983 a 2004, o número

de acidentes ambientais atendidos foi de 2.202, sendo o interior do estado responsável por 65% das ocorrências.

Nesse período, os acidentes mais frequentes continuam líquidos inflamáveis (gasolina, óleo diesel e álcool etílico) e em alguns eventos não foi possível a identificação da substância, como mostra a Tabela 3, prejudicando, assim, o atendimento ao acidente.

**Tabela 3 – Acidentes ambientais atendidos pela CETESB – Transporte Rodoviário. Período: 1983 – 2004**

Classe de Risco	Porcentagem (%)
Líquidos Inflamáveis	36
Corrosivos	22
Não Classificadas	11
Perigosos Diversos	7
Não Identificadas	5
Tóxicas/ Infectantes	4
Sólidos Inflamáveis	3
Oxidantes/Peróxidos	2

De acordo com a CETESB, há vários fatores que podem ocasionar acidentes no transporte de produtos perigosos, como condição meteorológica, do veículo e da infraestrutura viária, desrespeito à legislação de trânsito, conduta do motorista, entre outros. Dados do CADAC mostram que, do total de acidentes ocorridos entre 1983 e 2004, 35,7% não foram identificados. Isso ocorre, em geral, quando não há envolvimento com outros veículos, e o motorista, para isentar-se da responsabilidade, atribui a algum fator causador externo.

A Tabela 4 mostra as causas de acidentes atendidos pela CETESB no período de análise.

Segundo Ferreira (2003), acidentes com produtos perigosos ocorrem com mais frequência em dias

úteis com uma concentração nas sextas-feiras. Aos domingos a frequência é menor e, aos sábados, fica numa situação intermediária. Com relação aos horários, Ferreira (2003) afirma que a maior parte dos acidentes ocorre das 12 às 18 horas, com incidência maior entre 16 e 18 horas, como ilustra a Tabela 5.

### 3.2 Acidentes no Transporte de Produtos Perigosos na Região Metropolitana de Campinas

Campinas é a cidade do interior de São Paulo que mais se destaca na ocorrência de acidentes com transporte de produtos perigosos, por possuir, na região metropolitana, um parque industrial com alta concentração de indústrias de grande porte de importantes setores industriais – automobilístico, químico, petroquímico, informática e de telecomunicações, entre outros (TEIXEIRA, 2005). Segundo dados da Fundação SEADE, a região de Campinas detém quase um quinto da produção industrial estadual, com participações expressivas nos setores de refino de petróleo e álcool, material eletrônico e de comunicações, de papel e celulose e têxtil.

Além de Campinas, as cidades de Americana, Artur Nogueira, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Holambra,

**Tabela 4 – Acidentes atendidos pela CETESB Transporte rodoviário – Causas de Acidentes Período: 1983 – 2004**

Causa do Acidente	Porcentagem (%)
Não identificada	35,7
Colisão	19,1
Falha mecânica	18,2
Falha operacional	16,1
Queda/Ruptura de embalagens	6,8
Pista/Visibilidade	2,1
Outras	1,9

**Tabela 5 – Acidentes segundo o horário do acidente. Período: 1997 a 1999**

Ano	1997		1998		1999	
	Nº absoluto	%	Nº absoluto	%	Nº absoluto	%
Horário do Acidente						
0 – 6 h	71	14,58	82	16,08	96	19,96
6 – 12 h	124	25,46	152	29,8	142	25,09
12 – 18 h	165	33,88	154	30,2	188	33,22
18 – 24 h	127	26,08	122	23,92	140	24,73

Hortolândia, Indaiatuba, Itatiba, Jaguariúna, Monte Mor, Nova Odessa, Paulínia, Pedreira, Santa Bárbara d'Oeste, Santo Antonio de Posse, Sumaré, Valinhos e Vinhedo formam a RMC, que apresenta uma expressiva concentração industrial.

A RMC possui uma malha viária de boa qualidade, que a integra com outras regiões do país, composta pelas rodovias:

- SP-065 – Dom Pedro I: ligação entre Via Dutra (Vale do Paraíba e Rio de Janeiro) e Fernão Dias (Belo Horizonte);
- SP-330 – Anhangüera e SP-348 – dos Bandeirantes: ligação para a cidade de São Paulo e o interior;
- Rodovia Washington Luiz: liga a região de São Carlos e Araraquara ao noroeste;
- Rodovia Campinas-Mogi-Mirim: ligação para o sul de Minas Gerais.

De acordo com a CETESB, a Região Metropolitana de Campinas foi responsável por 192 dos 1.450 acidentes com produtos perigosos registrados no interior de São Paulo entre 1993 e 2004, sendo que 137 acidentes ocorreram em Campinas.

Segundo Pedro (2006), a Rodovia Dom Pedro I (SP-065) obteve a maior incidência de acidentes, seguida pela Rodovia dos Bandeirantes (SP-348) (Tabela 6).

Em levantamento realizado com dados de acidentes com transporte de produtos perigosos em Campinas, no período de 1985 a 1990, Fricke (1992) identificou um total de 163 acidentes, tendo o ano de 1989 apresentado

**Tabela 6 – Número e porcentagem de acidentes com transporte de produtos perigosos nos trechos das principais rodovias no município de Campinas, Período: 1997 a 2004**

Rodovia	Nº de Acidentes	Frequência (%)
SP-065	95	43,8
SP-348	40	18,4
SP-330	39	17,9
SP-332	26	12,0
SP-075	8	3,7
SP-340	5	2,3
SP-083	3	1,4
SP-101	1	0,5a

\* SP-065 (Dom Pedro I); SP-348 (dos Bandeirantes); SP-330 (Anhangüera); SP-332 (General Milton Tavares de Souza); SP-075 (Santos Dumont); SP-340 (Gov. Dr. Adhemar de Barros); SP-083 (José Roberto Magalhães Teixeira) e SP-101 (Jornalista Francisco Aguirra Proença).

o maior valor (58), e 1985 o menor valor (5). Em média, ocorreram 27,2 acidentes por ano. O valor médio do número de acidentes anuais é semelhante ao encontrado no levantamento realizado por Pedro (2006), com 27,1 acidentes no período de 1997 a 2004.

Como mostra a Figura 4, a rodovia SP-065 (Dom Pedro I) apresentou maior incidência de acidentes (95 eventos), totalizando cerca de 43,8% dos ocorridos no período. Em seguida, a rodovia SP-348 (Rodovia dos Bandeirantes), apresentando um total de 45 ocorrências, que representa 20,7% do total dos acidentes no período analisado.

No período de 1980 a 1990, analisado por Fricke (1992), os maiores índices de acidentes rodoviários com

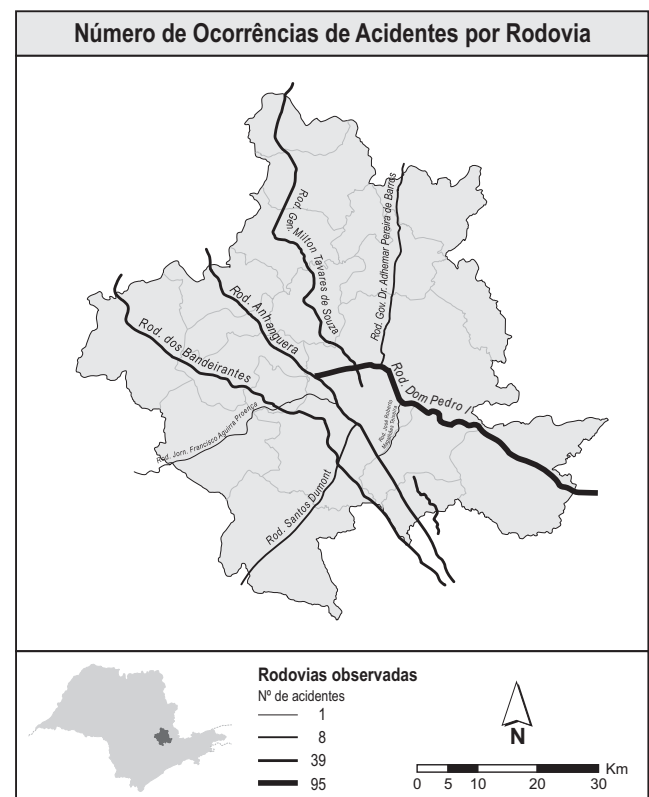


Figura 4 – Mapa temático com as principais rodovias da RMC e número de acidentes.

produtos perigosos foram observados na rodovia SP-332 (que interliga Paulínia, Campinas e a Rodovia Anhangüera).

Uma pesquisa feita pela Fundação SEADE, em parceria com a Fundacentro/Ministério do Trabalho e Emprego e o Denatran/Ministério da Justiça, analisou as informações dos boletins de ocorrência de 1.622 acidentes de transporte com produtos perigosos, registrados pela Polícia Rodoviária Estadual e Federal do Estado de

São Paulo, entre 1997 e 1999. Segundo Ferreira (2003), do total dos acidentes ocorridos nesse período, 1.563 ocorreram em rodovias do estado e 59 em rodovias federais (BR-381 – Fernão Dias, BR-116 – Dutra e Régis Bittencourt e BR-153 – Transbrasiliana). A Tabela 7 mostra que, dos acidentes ocorridos em rodovias estaduais, a maior concentração foi na SP-330 (Anhanguera), seguida pela SP-332 (General Milton Tavares de Souza).

Ferreira (2003) identificou a SP-330 (Anhanguera) como sendo a de mais elevada frequência de acidentes, com uma média anual de 81 acidentes, no período ana-

lisado. Na Tabela 6, verifica-se que a média anual do número de acidentes no trecho da Rodovia Anhanguera em Campinas foi de 4,3.

Em relação à rodovia SP-332 (General Milton Tavares de Souza), importante ligação entre Campinas e o polo petroquímico de Paulínia, foram identificados 26 acidentes no período, totalizando 12,0% do total e resultando numa média anual de cerca de 3,3 acidentes. Esse número, quando analisado para a rodovia como um todo, aumenta para 46 ocorrências anuais. (FERREIRA, 2003).

Com frequência de ocorrência de acidentes menos elevada, isto é, valores menores que 4%, encontram-se as demais rodovias do município de Campinas: SP-075 (Santos Dumont), SP-340 (Gov. Dr. Adhemar Pereira de Barros), SP-083 (José Roberto Magalhães Teixeira) e SP-101 (Jornalista Francisco Aguirra Proença).

Segundo Ferreira (2003), os municípios paulistas que concentraram os maiores números de acidentes entre 1997 e 1999 foram: Paulínia (72 acidentes), Limeira (72), Campinas (71), São Bernardo do Campo (53), Cubatão (46) e Cosmópolis (36). A presença de uma refinaria de grande porte na região é a principal explicação para o intenso movimento de produtos perigosos.

A análise dos dados de acidentes com produtos perigosos nas rodovias que cruzam o município de Campinas, classificando por tipo de produto perigoso em função do número da ONU, originou a Tabela 8, onde se

**Tabela 7 – Acidentes no transporte de produtos perigosos nas principais rodovias estaduais. Período: 1997-1999**

Rodovia	Ocorrência de Acidentes (%)
SP-330 (Anhanguera)	15,55
SP-332 (Gen. Milton Tavares de Souza)	8,83
SP-310 (Washington Luiz)	8,00
SP-270 (Raposos Tavares)	4,54
SP-150 (Anchieta)	4,29
SP-300 (Rondon)	4,29
SP-304 (Luiz de Queiroz)	4,09
SP-225 (Eng. Paulo Nilo Coelho)	3,45
SP-280 (Castelo Branco)	3,45
SP-348 (dos Bandeirantes)	3,33
Demais rodovias	40,18

**Tabela 8 – Número e porcentagem de acidentes por tipo de produto. Período: 1997 a 2004**

Produto*	SP-065	SP-348	SP-330	SP-332	SP-075	SP-340	SP-083	SP-101	Total	(%)
1005	1	1	1	1	0	0	0	0	4	1,8
1075	9	2	5	1	0	1	0	0	18	8,3
1170	15	7	6	4	0	1	0	0	33	15,2
1203	33	9	7	15	3	1	0	0	68	31,3
1307	3	0	0	1	1	0	0	0	5	2,3
1824	0	4	0	0	1	0	2	0	7	3,2
3082	2	1	1	0	0	0	0	0	5	2,3
Outros	17	12	14	1	3	1	0	1	48	22,1
Indefinido	15	4	5	3	0	1	1	0	29	13,4
Total	95	40	39	26	8	5	3	1	217	100,0

\* Produto: 1005 – amônia, anidra; 1075 – gás(es) de petróleo, liquefeito(s); 1170 – etanol (álcool etílico) ou solução de etanol; 1203 – combustível automotor, incluindo álcool – motor e gasolina; 1307 – xilenos; 1824 – hidróxido de sódio, solução; 3082 – substância que apresenta risco ao meio ambiente, líquida; Outros – demais produtos; Indefinido – não especificado.

observa que a maior frequência de ocorrência (31,3%) dos acidentes foi com o produto número ONU 1203 (combustível automotor, incluindo álcool – motor e gasolina).

Dos 68 acidentes observados, 33 deles ocorreram na SP-065 e 15 na SP-332. Esses números podem decorrer do fato da SP-332 ligar Campinas ao polo petroquímico de Paulínia, gerando um grande volume diário de tráfego de caminhões transportando combustíveis. Além disso, o fluxo de transporte de combustível de Paulínia para outras rodovias passa, necessariamente, no município de Campinas, pela SP-065. (PEDRO, 2006)

Estudos elaborados pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo mostram que 40% dos veículos da frota nacional circulam no Estado de São Paulo, sendo 24% referente a diesel e 33% a óleo lubrificante. (TEIXEIRA JÚNIOR, 1998)

Segundo Fricke (1992), as maiores frequências de ocorrências de acidentes com produtos perigosos no município de Campinas são de: óleo diesel (11,87%), álcool (9,8%), GLP (9,2%), gasolina (4,9%) e produtos químicos diversos (11,7%).

Na Tabela 8, 13,4% dos acidentes são de produtos indefinidos, provavelmente, por não apresentarem identificação ou documentação do produto.

A Tabela 9 mostra a frequência de ocorrência de acidentes por classe de produto transportado. No período analisado não foram verificados acidentes com a classe 1 (explosivos) e nem com a classe 7 (materiais radioativos).

Verifica-se que o valor mais expressivo de acidentes ocorreu com o transporte de líquidos inflamáveis, com

**Tabela 9 – Ocorrência de acidentes por classe de produtos no município de Campinas. Período: 1997 a 2004**

Nº de Risco	Classe de Produto	Nº de Acidentes	Frequência de Ocorrência (%)
2	Gases	25	11,5
3	Líquidos Inflamáveis	125	57,6
4	Sólidos Inflamáveis	1	0,5
5	Substâncias Oxidantes	2	0,9
6	Substâncias Tóxicas	2	0,9
8	Corrosivos	22	10,1
9	Diversos	10	4,6
	Indefinidos	30	13,8
	<b>Total</b>	<b>217</b>	<b>100,0</b>

frequência de 57,6% do total. Dentre os constituintes desta classe de produtos encontram-se as principais substâncias utilizadas como combustível para veículos: gasolina, outros derivados de petróleo e álcool.

A mesma tendência de valores elevados de frequência de acidentes para a classe de líquidos inflamáveis foi observada por Costa (2001), em Portugal. O pesquisador cita que 70% das substâncias perigosas transportadas correspondem a combustíveis. No Brasil, Ferreira (2003) encontrou valores de 57% para os inflamáveis. Real (2000), ao analisar dados da ABIQUIM, no período de 1990 a 1997, relata que a classe dos inflamáveis teve o maior número de chamadas para atendimento das ocorrências, 25,2%. A Classe 2 (gases) e a Classe 8 (corrosivos) apresentaram valores de frequência de ocorrência de acidentes de, respectivamente, 12,3 e 9,6%. As outras classes, 4, 5, 6 e 9, apresentaram valores de frequência de ocorrência de acidentes menores que 5% no período analisado. (PEDRO, 2006)

Apesar dos dados avaliados por Real (2000) serem relativos ao atendimento de ocorrências, percebe-se a mesma tendência nos valores de ocorrência de acidentes avaliados neste estudo, tendo sido a maior frequência de ocorrência com os produtos da Classe 3 (líquidos inflamáveis), seguidos pelos da Classe 2 (gases) e da Classe 8 (corrosivos).

Na análise dos dados da CETESB, relativos a produtos envolvidos em acidentes rodoviários, Teixeira Júnior (1998) identificou as frequências de ocorrência de acidentes por classe de produtos, quais sejam:

- Classe 2: 9%;
- Classe 3: 25%;
- Classe 8: 20%;
- Não definidos: 45% e
- Outras classes: 5%.

Segundo Pedro (2006), na Rodovia D. Pedro I, entre os quilômetros 138 e 142, ocorreu a maioria dos acidentes registrados para essa rodovia. Na SP-330 ficou evidenciada uma concentração de acidentes entre os quilômetros 103 e 104. Na SP-332 os acidentes ocorreram principalmente entre os quilômetros 113 e 115, e, na SP-348, a maior concentração de acidentes foi observada entre os quilômetros 89 e 93.

Fricke (1992) mostra que, no período de 1980 a 1990, as rodovias que cruzam o município de Campinas

tiveram críticos os trechos: SP-332 (km 134); SP-348 (km 92 ao km 95); SP-340 (km 105 ao km 110); SP-330 (km 81 ao km 85) e SP-065 (km 121).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando-se os resultados obtidos nesta pesquisa com os resultados de Fricke (1992), verifica-se que, para a SP-348, a maior incidência de acidentes ocorreu nos mesmos trechos da rodovia. Algumas das concentrações diferem quanto à localização, principalmente para as rodovias SP-332, SP-340, SP-330 e SP-065. Essas diferenças ocorreram, provavelmente, pelo fato de que neste estudo foram considerados dados de acidentes ocorridos, também, fora dos limites do município de Campinas. Além disso, deve ser levada em consideração uma diferença na escala temporal dos dados analisados.

Ferreira (2003), analisando dados no período de 1998 a 1999, encontrou, para a SP-332, uma maior concentração de acidentes com produtos perigosos entre os quilômetros 130 e 140 (36 acidentes). A frequência de acidentes aumenta a partir do quilômetro 110 e reduz depois do quilômetro 150. Pedro (2006) verificou que, no trecho dentro do município de Campinas, a maior concentração de acidentes ocorreu entre os quilômetros 113 e 119, totalizando 19 acidentes.

No caso da SP-330, Ferreira (2003) constatou uma maior concentração de acidentes entre os quilômetros 100 e 109. Esses valores coincidem com a ocorrência de acidentes analisada por Pedro (2006), que indicou uma maior concentração entre os quilômetros 103 e 106.

Analisando-se os principais pontos de concentração, percebe-se que os acidentes estão associados à confluência de rotas de transporte de produtos perigosos com as principais rotas de outros tipos de produtos ou veículos de

passeio, onde a ocupação do espaço é significativamente mais elevada, e, conseqüentemente, o risco de acidentes é maior. A RMC, assim como a Grande São Paulo e a Baixada Santista, por possuir diversos polos de indústrias químicas e petroquímicas, requer cuidado especial na programação de rotas para o transporte de cargas perigosas, a fim de reduzir os riscos de acidentes e suas conseqüências.

Este estudo mostrou que as rodovias da Região Metropolitana de Campinas são vias de escoamento estratégicas, o que proporciona um elevado trânsito de veículos transportadores de produtos perigosos. A vulnerabilidade da região fica evidenciada, pois a probabilidade de ocorrência de acidentes se intensifica. É necessário um planejamento conjunto entre todas as cidades da região juntamente com outros órgãos responsáveis pelo setor de produtos perigosos, como a Polícia Rodoviária, o Corpo de Bombeiros e a CETESB.

Apesar dos dados mostrados, ainda é pequena a quantidade de informações obtidas com relação aos acidentes no transporte de cargas perigosas, dificultando esta e outras pesquisas, a tomada de ações e o planejamento para o setor dos produtos perigosos. A integração dos dados obtidos pelos órgãos responsáveis seria uma medida eficaz para combater os principais problemas nessa área.

Os acidentes com produtos perigosos podem provocar vários tipos de impactos ao meio ambiente, ao patrimônio público e privado, à saúde e à segurança da população. Ainda que exista legislação específica referente ao transporte e manuseio de produtos perigosos, estas muitas vezes não são respeitadas. A imprudência é grande, e a fiscalização é deficiente. As pessoas envolvidas nesse setor devem estar sempre informadas dos riscos e da importância da obediência às normas, regras e procedimentos sobre produtos perigosos, para garantir maior segurança e melhor qualidade de vida.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7500. Símbolos de risco e manuseio para o transporte e armazenamento de materiais.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação. 2004
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13221. Transporte de Resíduos – Procedimento. 2007
- ANTT – Associação Nacional dos Transportes Terrestres. Resolução 420/04 – Legislação do Transporte de Produtos Perigosos. Disponível em [www.antt.gov.br](http://www.antt.gov.br). Acesso em 13 de setembro de 2008.

- DER – Departamento de Estradas de Rodagem. Sistema Integrado de Informações para Atendimento de Ocorrências no Transporte de Produtos Perigosos (SIIPP). Disponível em [www.der.sp.gov.br](http://www.der.sp.gov.br). Acesso em 05 de dezembro de 2008.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – Emergências Químicas. Disponível em [www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/emergencia.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/emergencia.asp). Acesso em 10 de outubro de 2008.
- COSTA, M. J. Transporte de matérias perigosas em Portugal continental. 2001. 120 f. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia do Meio Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- DEPARTAMENTO ESTADUAL DE DEFESA CIVIL – SANTA CATARINA (DEDC/SC). Produtos perigosos. Disponível em [www.defesacivil.sc.gov.br/perigosos.htm](http://www.defesacivil.sc.gov.br/perigosos.htm). Acesso em 02 de dezembro de 2008.
- FERREIRA, C. E. C. Acidentes com motoristas no transporte rodoviário de produtos perigosos. São Paulo em Perspectiva, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 68-80, 2003.
- FRICKE, G. T. Vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água de Campinas e acidentes com o transporte de produtos perigosos. 1992. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento) – Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas.
- GOMES, I. S. As Características do Transporte de Produtos Perigosos no Distrito Federal. Florianópolis, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres – CEPED, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 112f. (Especialização em Planejamento e Gestão em Defesa Civil).
- MELO FILHO, M. O Desafio Brasileiro. 11ª Ed. Rio de Janeiro: Bloch Editores, 1971.
- PEDRO, F. G. Acidentes com transporte rodoviário de produtos perigosos: análise e aplicação de modelo conceitual georreferenciado para avaliação de risco ambiental no município de Campinas-SP. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, 2006. 133f. Dissertação (Mestrado).
- REAL, M.V. A informação como fator de controle de riscos no transporte rodoviário de produtos perigosos. 2000, 195 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Resolução 420 de 12 de fevereiro de 2004. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT) Legislação do transporte de produtos perigosos.
- TEIXEIRA JÚNIOR, A. A. Avaliação do risco potencial de danos à saúde pública devido a acidentes envolvendo o transporte rodoviário de produtos perigosos no estado de São Paulo, através do emprego da Árvore de Falhas. 1998, 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Saneamento e Ambiente), Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas.
- TEIXEIRA, M. S. Relatório de atendimento a acidentes ambientais no transporte rodoviário de produtos perigosos: 1983 a 2004. Série Relatórios, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, CETESB, São Paulo, 2005, 41 p.

# Conceitos fundamentais para utilização de bases com predominância de solo fino laterítico

O Livro *Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos*, de autoria dos Eng<sup>os</sup> Douglas Fadul Villibor e Job Shuji Nogami, que trata sobre alternativas de pavimentos apresenta tecnologia mais barata e adequada às condições tropicais.

A Revista PAVIMENTAÇÃO publica, a partir desta edição, com a permissão dos autores, os conceitos fundamentais para utilização de base com predominância de solo fino laterítico que corresponde ao Anexo 1 onde serão abordados:

- 1 – Conceituação
- 2 – Campo de Aplicação
- 3 – Ocorrências de Jazidas
- 4 – Técnica Construtiva e Controle Tecnológico
- 5 – Comportamento Tecnológico
- 6 – Conservação e Recuperação

Este Anexo apresenta, por meio de discussão de questões, os conceitos fundamentais para o uso de bases com predominância de solo fino laterítico: SAFL, ALA e SLAD. Alerta-se para o fato de algumas questões discutidas serem síntese de assuntos já tratados e outras envolverem explicações que se repetem por tratarem de assuntos interligados.

## ASSUNTOS ABORDADOS

Conforme os assuntos, as questões foram agrupadas nos blocos de 1 a 6, a saber:

### 1 – Conceituação

- 1) Qual o Conceito de Pavimento Econômico?
- 2) Quais são os tipos de Base de Baixo Custo utilizadas em Pavimentos Econômicos no Estado de São Paulo?
- 3) Conceitue os Solos Finos Lateríticos Arenosos e Argilosos.
- 4) Quais as Peculiaridades Mineralógicas e das Microfábricas dos Solos Lateríticos e Saprolíticos?

- 5) Onde ocorrem os SAFL no Brasil?
- 6) Qual a Extensão das Rodovias e a Área das Vias Urbanas que utilizam Pavimentos com Base de SAFL?
- 7) Quais os Trechos mais Antigos com Base de SAFL?

### 2 – Campo de Aplicação

- 8) Para quais Tipos de Tráfego e Características Climáticas pode-se usar Pavimentos com Base de SAFL, ALA ou SLAD?
- 9) Quando um SAFL é adequado para Base de Pavimentos?

### 3 – Ocorrências de Jazidas

- 10) Quais as Peculiaridades das Ocorrências de SAFL para Bases?
- 11) Pode-se obter SAFL Artificial para uso em Bases?

### 4 – Técnica Construtiva e Controle Tecnológico

- 12) Qual a relação entre o Tipo de SAFL e a Técnica Construtiva das suas Bases?

- 13) Quais os cuidados na Compactação e Acabamento das Bases de SAFL e ALA?
- 14) Nas Bases de SAFL e ALA, quais as Funções e a Dosagem da Imprimadura?
- 15) Pode-se se Imprimir as Bases de SAFL, ALA e SLAD com Emulsão Asfáltica?
- 16) Quais as Normas para execução das Camadas de Revestimento sobre Bases de SAFL, ALA e SLAD e quando se usa a Camada de proteção?
- 17) Como é o Controle Tecnológico das Bases de SAFL e ALA?

## 5 – Comportamento Tecnológico

- 18) O que explica o Bom Comportamento das Bases de SAFL, ALA e SLAD?
- 19) Quais as Experiências que mostram a Ação do Gradiente Térmico e da Cura por Secagem da Base no Comportamento do Pavimento?
- 20) Por que não se recomenda o uso de Critérios Tradicionais para o Estudo das Bases com Predominância de Solo Fino Laterítico?
- 21) Podem ser usados Solos Argilosos Finos Lateríticos (LG') em Bases de Pavimento Econômico?
- 22) Solos Arenosos pouco Coesivos, com elevados valores de CBR, podem ser usados para Bases?
- 23) O Acostamento é essencial nos Pavimentos com Base de Baixo Custo?
- 24) O que explica o Bom Comportamento dos Pavimentos com Bases de SAFL e ALA revestidas com Tratamentos Superficiais?
- 25) Qual o Período de Vida da Base e o do seu Revestimento de Tratamento Superficial, em Pavimentos Econômicos?
- 26) Como ocorre a Deterioração Estrutural da Base de SAFL?
- 27) Qual o Conceito, a Especificação e a Técnica Construtiva das Bases de SLAD?

## 6 – Conservação e Recuperação

- 28) Quais os Principais Defeitos no Revestimento de Tratamento Superficial dos Pavimentos Econômicos com Base de Baixo Custo?
- 29) Qual o Procedimento Recomendado para Recuperação de Pavimentos Econômicos com Elevado Nível de Deterioração?

## DISCUSSÃO DAS QUESTÕES

### 1 – Conceituação

#### 1ª Questão: Qual o Conceito de Pavimento Econômico?

É o pavimento que:

- Utiliza base constituída de materiais naturais ou misturados com pequena porcentagem de agregado, cujos custos de execução são substancialmente menores do que aqueles apurados nas bases tradicionais, como: brita graduada, macadame hidráulico, solo-cimento etc.
- Utiliza revestimento betuminoso, tipo tratamento superficial duplo ou triplo, com espessura máxima de 3cm e, frequentemente, da ordem de 1,5/cm.
- Suporta um tráfego máximo do tipo médio, com  $N_t d''^{10^6}$  solicitações do eixo simples padrão de 80 kN.

A figura A.1 exemplifica uma seção transversal típica de um pavimento econômico rodoviário, sem escala e com medidas em m. Observe-se que a imprimadura impermeabilizante também deve ser executada nas bordas da base e nos acostamentos, para evitar a infiltração de água pelas laterais.

Para efeito de ilustração serão apresentadas as vantagens do uso de pavimento econômico com base de SAFL, em comparação com aqueles que usam bases tradicionais, abrangendo aspectos econômicos e ambientais. Quanto ao aspecto econômico, foi realizado um estudo dos preços por  $m^2$  de pavimentos, com diversos tipos de base e revestimento de tratamento superficial duplo, utilizados em rodovias vicinais.

A figura A.2 ilustra a estrutura de um pavimento usual de rodovia vicinal (com quatro alternativas para a base), que forneceu subsídios ao estudo econômico. Com esta estrutura foi gerado o orçamento, das camadas indicadas na tabela A.1 que teve, como referência, os preços unitários da tabela do DER-SP de Dezembro de 2008.

A tabela A.2 apresenta dados para comparação dos preços unitários da base de SAFL e das tradicionalmente utilizadas no Estado de São Paulo, além dos preços dos pavimentos resultantes. Utilizou-se o preço por  $m^2$  dessas bases, considerando que tenham espessura de 15cm e que a distância média de transporte seja de 5km.

Analisando a primeira coluna da tabela A.2, verifica-se que o preço da base de SAFL é o menor, sendo da ordem de 29% do preço da de solo brita, ou da de solo

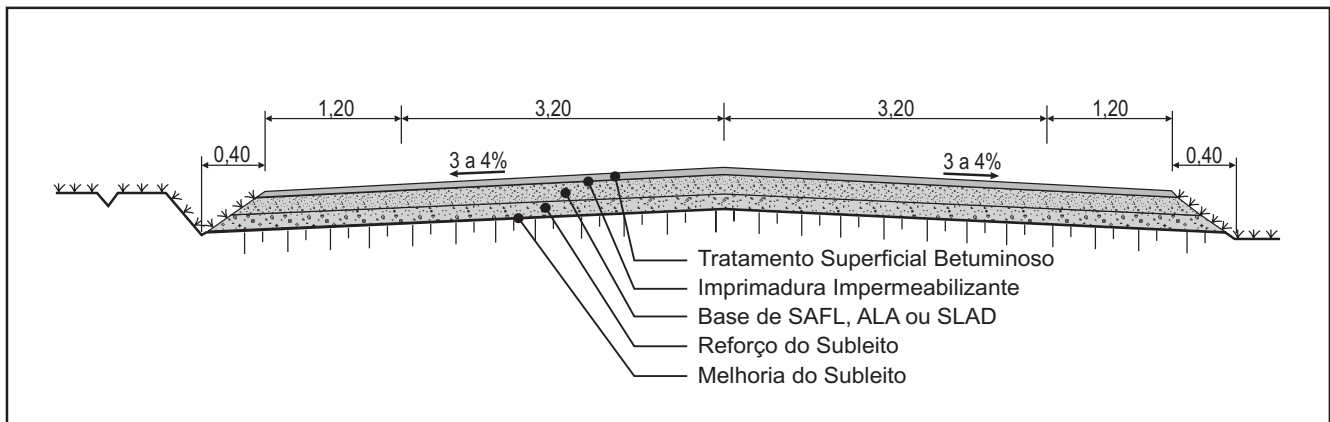


Figura A.1 – Secção transversal típica de um pavimento econômico rodoviário.

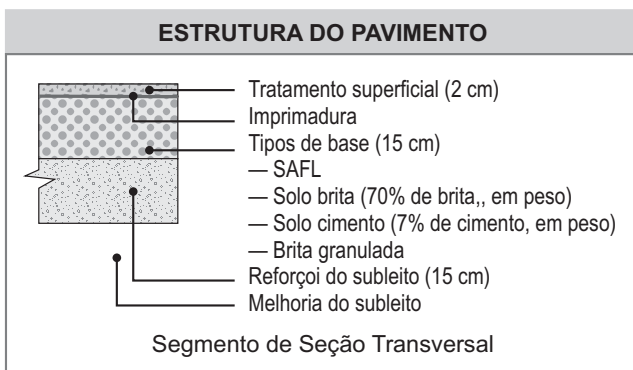


Figura A.2 – Estrutura de um pavimento econômico, com diversos tipos de base.

Tabela A.1 – Preço de execução de camadas, por m<sup>2</sup>

CAMADA	R\$/m <sup>2</sup>
Tratamento superficial .....	7,19
Imprimadura .....	3,18
Reforço .....	2,79
Melhoria do subleito .....	0,97
Subtotal:	E = 14,13

Tabela A.2 – Comparação de preços, por m<sup>2</sup>, de pavimentos com diversos tipos de base

TIPO DE BASE	BASE	E	PT	RC
	R\$/m <sup>2</sup>			(%)
SAFL	3,95	14,13	18,08	100
Solo Brita	13,59	14,13	27,72	153
Solo Cimento	13,73	14,13	27,87	154
Brita Granulada	20,38	14,13	34,51	191

E = Preço de execução dos serviços da Tabela A-1  
 PT = Preço total dos pavimentos (Referência: Preço Unitário DER-SP (Dez/08)  
 RC = Relação de Custo em Porcentagem (Referência Base de SAFL = 100%)

cimento e 19% do de brita graduada. As duas últimas colunas (PT e RC) mostram que o preço total dos pavimentos com base de solo brita, solo cimento e brita graduada é muito superior ao do pavimento com base de SAFL.

O tipo de base, com preço total mais próximo daquele correspondente à base de SAFL, é o solo brita, que resulta 53% mais caro; os demais resultam maiores, respectivamente: 54% (solo cimento) e 91% (brita graduada). Esses percentuais mostram a grande vantagem do uso das bases de SAFL para a execução de rodovias vicinais: com o orçamento necessário para executar 1.000km de pavimento de solo brita (largura de 8,40 m), podem-se executar 1.530km de um pavimento estruturalmente similar com SAFL, ou seja, construir uma extensão 53 % maior.

Além dos benefícios econômicos há, também, vantagens ambientais proporcionadas pelo uso das bases de SAFL, em relação às tradicionais de brita graduada, solo brita e solo cimento. Essas vantagens estão ligadas ao fato de suas jazidas serem ocorrências naturais, o que permite:

- Executar um projeto de recuperação da área degradada pela exploração, com uma configuração que a reintegre à paisagem existente, além de proporcionar um sistema de drenagem superficial adequado, minimizando os danos ao meio ambiente.
- Reconstituir a vegetação de sua superfície, por meio da reposição do material orgânico (proveniente da camada vegetal estocada quando da limpeza da jazida), diminuindo o dano ambiental, pela rebrota rápida da cobertura original.

Por outro lado, as bases tradicionais utilizam, na sua execução, materiais beneficiados (agregados britados e

cimento), cuja obtenção cria sérios problemas ambientais, tais como:

- Degradação da área explorada.
- Ruídos e resíduos sólidos (pó) gerados na exploração das pedreiras.
- Gastos com energia e equipamentos específicos para o beneficiamento dos materiais.

Esses três aspectos são relevantes na execução de grandes programas de rodovias vicinais, por demandarem elevadas quantidades de materiais beneficiados.

Isto posto, ambientalmente, a alternativa do uso dos SAFL é a mais favorável por gerar menor passivo ambiental do que as bases tradicionais.

## **2ª Questão: Quais são os tipos de Base de Baixo Custo utilizados em Pavimentos Econômicos no Estado de São Paulo?**

Os tipos são:

- Bases de SAFL com materiais de ocorrências naturais.
- Bases de Solo Laterítico-Agregado, a saber:
  - De granulação fina, designado ALA, cujo material é constituído de mistura de argila laterítica com areia. Vide questão 11.
  - De granulação grossa, designado SLAD, cujo material é constituído de mistura de solo laterítico com baixa porcentagem de agregado (brita, pedregulho ou laterita). Vide capítulo 7.

A secção transversal da estrutura desses pavimentos é a mesma indicada na figura A.1.

## **3ª Questão: Conceitue os Solos Finos Lateríticos Arenosos e Argilosos.**

Conceitua-se, tecnologicamente, como Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL) aquele que:

- Possui menos de 10% de fração retida na peneira de 2,00 mm (nº 10).
- Possui mais de 50% de fração retida na peneira de 0,075mm (nº 200).
- Essas frações devem ser constituídas, predominantemente, de grãos de quartzo.
- Pertence à classe de solos de comportamento laterítico e a um dos grupos LA, LA' ou LG', da Classificação Geotécnica MCT (conforme M9).

Conceitua-se, tecnologicamente, como Solo Argiloso Fino Laterítico aquele que:

- Possui menos de 10% de fração retida na peneira de 2,00mm (nº 10).
- Possui menos de 50% de fração retida na peneira de 0,075mm (nº 200).
- Essas frações podem conter, além do quartzo, óxidos e hidróxidos de Fe, Al e Ti.
- Pertence à classe de solos de comportamento laterítico e ao grupo LG', da Classificação MCT.

Houve a necessidade de se introduzir, no meio técnico brasileiro, as designações e conceituações acima, para evitar que os Solo Arenoso Fino Laterítico e Solo Argiloso Fino Laterítico fossem confundidos com os Pedregulhos Lateríticos ou Cascalhos Lateríticos ou, ainda, Concreções Lateríticas (popularmente designados de Canga, Tapiocanga, Piçarra etc.), constituídos de elevada porcentagem de fração retida na peneira de 2,00mm. Esses últimos materiais foram designados de Solos Lateríticos nas normas do DNIT, o que pode ocasionar confusões conceituais.

## **4ª Questão – Quais as Peculiaridades Mineralógicas e das Microfábricas dos Solos Lateríticos e Saprolíticos?**

As peculiaridades mineralógicas e microfábricas inerentes aos solos conhecidos como lateríticos (na gíria geotécnica) são consequência de terem sido submetidos, por um longo tempo durante sua formação, a processos pedogenéticos de laterização próprios de regiões tropicais úmidas.

A figura A.3 mostra o perfil de um corte rodoviário onde ocorrem, na superfície natural do terreno, uma camada de solo laterítico e, subjacentes, camadas de solo saprolítico, peculiares às rochas sedimentares. Essas camadas são resultantes da ação das intempéries sobre a rocha e herdaram, ainda, microfábricas da rocha matriz, formada por camadas plano-paralelas. Este tipo de solo saprolítico gera, no talude, uma forma erosiva característica desta parte do corte, conforme mostrado na figura A.3.

Pela análise das microfábricas das duas camadas em consideração, pode-se notar diferenças facilmente perceptíveis, mesmo por técnicos não especializados, a saber:

- Laterítica – os grãos são muito pequenos (da ordem de milionésimo de mm), constituídos externamente por

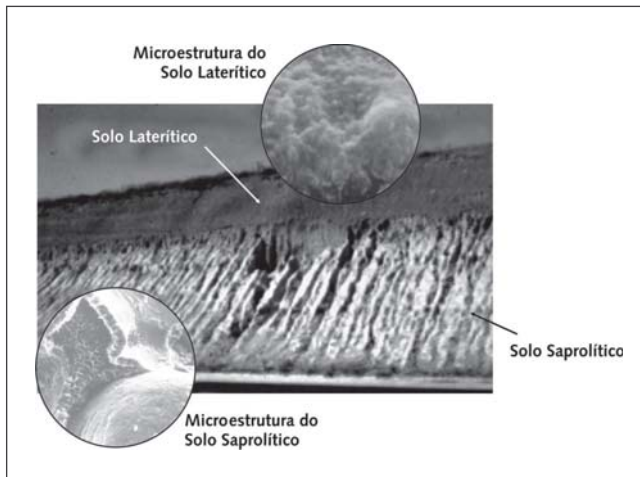


Figura A.3 – Corte rodoviário, com camada laterítica sobrejacente a camadas saprolíticas de origem sedimentar, com as correspondentes microfábricas.

óxidos e hidróxidos de Fe e Al; além de serem pouco expansivos em contato com a água funcionam, quando secos, como um cimento natural e se coalescem, formando uma fábrica conhecida como “pipoca” ou “esponja”. Quando classificado pela MCT, este solo pertence à classe de comportamento Laterítico (Solos L).

- Saprolítica – são percebidos, nitidamente, grãos de areia e, preenchendo os vazios intergranulares, cristais em forma de folhas associadas, o que dá um aspecto de bucho de vaca, correspondente a um argilomineral da família das smectitas (ou da montmorillonita), que se caracteriza pela sua elevada expansibilidade na presença da água livre. Quando ensaiado pela sistemática MCT, este solo pertence à classe de comportamento Não Laterítico (Solos N). Aos interessados em um aprofundamento científico nesse assunto, sugere-se a leitura do livro de Nogami e Villibor (1995).

### 5ª Questão: Onde ocorrem os SAFL no Brasil?

Estimativas iniciais, baseadas em considerações geológicas e pedológicas, previam a ocorrência de jazidas de SAFL em cerca de 60% do território ocupado pelo Estado de São Paulo. Posteriormente, dados obtidos sobre a distribuição efetiva das jazidas de SAFL confirmaram aquela porcentagem.

Também, pelo exame de mapas geológicos e pedológicos disponíveis, foi possível prever a potencialidade da ocorrência de SAFL, em áreas fora do Estado de São

Paulo, tais como nos Estados do Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Bahia, entre outros.

A figura A.4 ilustra áreas de solos lateríticos arenosos (LA e LA') e argilosos (LG'), perfazendo 65% do território brasileiro. Nessas áreas ocorrem jazidas promissoras de solos para execução de bases de SAFL, tanto *in natura*, como artificial com material obtido por mistura. Dois tipos de misturas podem ser efetuadas para a utilização desses materiais como base de pavimentos, ou



Figura A.4 – Ocorrências de Solos Finos Arenosos e Argilosos, de comportamento laterítico, no Brasil.

seja: em caso de ocorrência de solos argilosos lateríticos (LG') nas proximidades da obra, estes devem ser corrigidos com a adição de areia laterítica quartzosa e/ou areia lavada de rio; se houver ocorrência de areia laterítica (LA), a ela deverá ser adicionado solo argiloso laterítico.

Ainda, mesmo nas áreas em amarelo, ocorrem pequenas áreas de solo laterítico.

### 6ª Questão: Qual a Extensão das Rodovias e a Área das Vias Urbanas que utilizam Pavimentos com Base de SAFL?

A tabela A.3 indica os dados da extensão e da área desses pavimentos, em vários estados do Brasil. Particularmente, a figura A.5 ilustra, no mapa do Estado de

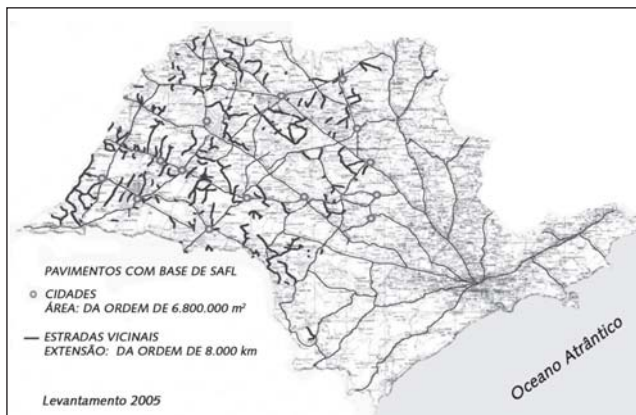


Figura A.5 – Vicinais e cidades com pavimento de SAFL no Estado de São Paulo.

Tabela A.3 – Pavimentos com bases de SAFL no Brasil (2005)

ESTADO	Rodovia [km]	Via Urbana [km <sup>2</sup> ] x 10 <sup>6</sup>
Acre	-	0,4
Bahia	700	0,6
D. Federal	-	0,8
Goiás	600	0,5
Mato Grosso	1.200	0,8
Paraná	1.800	2,3
São Paulo	8.000	6,8
Total	12.300	12,2

São Paulo, a localização das vicinais e das cidades que possuem pavimentos com base de SAFL.

Mais detalhes sobre o uso de base de SAFL em pavimentos urbanos podem ser obtidos no mestrado de Alexandre Zuppolini Neto (1994).

### 7ª Questão: Quais os Trechos mais Antigos com Base de SAFL?

Os trechos mais antigos estão indicados na tabela A.4. Os três primeiros foram executados como sendo uma “proteção à terraplanagem”; no entanto, pelo comportamento apresentado, foram considerados, pelo DER-SP, como efetivamente pavimentados. Os demais foram executados como pavimentos de baixo custo com base de SAFL e com penetração invertida simples, dupla, ou tripla, tanto na execução como no recapeamento.

Analisando a tabela A.4 verifica-se que, em 2005, as primeiras bases de SAFL já estavam em funcionamento há mais de 32 anos, mostrando o acerto do uso desse solo para bases. Na ocasião, em todo o Brasil, a rede de vicinais com esse tipo de base, com tratamento superficial, já ultrapassava os 12.000/ km (vide tabela A.3).

Tabela A.4 – Trechos mais antigos com base de SAFL

TRECHO	ABERTURA AO TRÂNSITO	MELHORIA DO SUBLEITO	PAVIMENTO			RECAPEAMENTO	TRÁFEGO VDM (2005)
			REFORÇO DO SUBLEITO	BASE DE SAFL	REVESTIMENTO		
EXTENSÃO [km]	IDADE[anos]	ESPESSURA (cm)			[cm]		Nt (1)
Cambaratiba-Borborema 18,43	2/73	15,0	0-15	—	Penetração Simples 0,5	Penetração Dupla (Após 15 anos)	1.368
	32	GC= 95% PN (2)	GC= 95% PS				3,0 x 10 <sup>6</sup>
Ramal de Terra Roxa 17,41	2/73	15,0	—	15	Penetração Tripla 3,0	Lama Asfáltica (Após 13 anos)	939
	32	95% PN		GC= 95% PM(3)			3,1 x 10 <sup>6</sup>
Ibitinga-Itápolis 24,87	7/75	15,0	0 - 30	—	Penetração Dupla 1,4	Lama Asfáltica (Após 12 anos)	1.111
	20	95% PM	95% PM				2,5 x 10 <sup>6</sup>
Ramal Viradouro 25,40	7/75	15,0	—	—	Penetração Tripla 3,0	5,0 cm de PMQ(4) (após 16 anos)	1.367
	20	95% PN					3,3 x 10 <sup>6</sup>
Ramal Cândido Rodrigues 12,95	6/75	15,0	20	15	Penetração Tripla 3,0	Lama Asfáltica (Após 14 anos)	585
	20	95% PN	95% PM	95% PM(3)			1,1 x 10 <sup>6</sup>

(1) Nt = Número total de solicitações do eixo simples padrão de 80 kN (2) PN = Proctor Normal (3) PM = Proctor Modificado (4) PMQ = Pré-misturado a quente (5) GC = Grau de Compactação



# PATTROL

## Investigação Geotécnica e Instrumentação

### Controle Tecnológico

Controle de Compactação com Densímetro Nuclear - aterros, pavimentos ou barragens - PCH e UHE  
Acompanhamento e controle executivo de obras de rodovias, ferrovias, portos, barragens e indústrias  
Instrumentação - Instalação e monitoramento de Piezômetros, Inclinômetros e Placas de Recalque



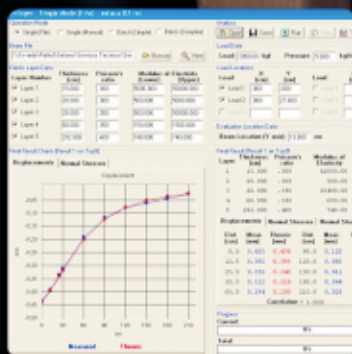
### Sondagens e Prospecção

Sondagens à Percussão - SPT, Sondagens Mistas e Sondagens Rotativas Diamantadas  
Sondagens Ambientais com Determinação de Eletro-resistividade e coleta de "liners" para análise  
Ensaio Especial de Campo: CPTU - Piezocone Sísmico e Resistivo - VST - Mane Test Elétrico



### Avaliação de Pavimentos

Avaliação Estrutural com levamento deflectométrico pela Viga Benkelman Eletrônica  
Análise Mecânica pela Retroanálise dos Módulos Resilientes utilizando o programa WinElsym  
Segmentação de trechos de comportamento homogênea utilizado o programa WinDelyn



### Laboratório de Ensaios

Ensaio de caracterização em Solos, Agregados, Cimento, Ligantes e Misturas Betuminosas  
Ensaio Especial de Geotecnia - Triaxiais, Adensamento, Cisalhamento Direto e Permeabilidade  
Ensaio Dinâmicos - Triaxial Dinâmico em corpos de prova 5x10, 10x20 ou 15x30 cm



**Pattrol - Pavimentos, Traçados, Obras Ltda**  
Rua Desembargador Continentino 68, Pedro II Belo Horizonte MG Brasil  
www.pattrol.com.br bruno@pattrol.com.br Tel +55 31 3462-0722





Trecho da Rodovia BR-116 Porto Alegre-Caxias do Sul, RS