



REVISTA

ABP

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

PAVIMENTAÇÃO

ANO XI • Nº 41 • JUL-SET • 2016 • WWW.ABPV.ORG.BR • ISSN 1809-1865

**EFEITO DA VARIAÇÃO
DE ESPESSURAS NO
DESEMPENHO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
AVALIADOS PELO MEPD**

Nayara Donelli Pelisson

José Leomar Fernandes Júnior

Carlos Alberto Prado da Silva Júnior

Heliana Barbosa Fontenele

Evento
Confirmado!
Faça já sua
inscrição.

Participe do principal evento de
pavimentação urbana do país.

20^a
RPU  **2017**
28 a 30
de junho
Reunião de Pavimentação Urbana
6^a EXPO PAVIMENTAÇÃO
CentroSul - Florianópolis/SC

Florianópolis, a bela capital catarinense, será palco da
20^a Reunião de Pavimentação Urbana que acontecerá no
período de 28 a 30 de junho de 2017.

Esperamos por você!

Temário para trabalhos técnicos

- ◆ Financiamento aos municípios
- ◆ Segurança e meio ambiente em vias
- ◆ Materiais para pavimentação
- ◆ Abertura e reaterro de valas de redes subterrâneas
- ◆ Estudos e projetos de pavimentos
- ◆ SMS (Saúde do trabalho, Meio ambiente e Segurança do trabalhador)
- ◆ Manutenção, restauração e gerência de vias
- ◆ Acessibilidades
- ◆ Técnica de construção e controle de qualidade de pavimentos
- ◆ Estradas vicinais

Para mais informações: www.rpu.org.br

Realização



Apoio



Agência Oficial
de Turismo



Local



Organização



EXPEDIENTE

REVISTA PAVIMENTAÇÃO

Ano XI • Nº 41 • Jul - Set 2016
ISSN 1809 - 1865



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

CONSELHO EDITORIAL

Diretoria da ABPv

EDITORA CHEFE

Georgina Libório Azevedo
georgina@abpv.org.br
MTb 31365-RJ

JORNALISTA RESPONSÁVEL

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

Presidente • Eng. José Pedro dos S. Vieira Costa
Vice-Presidente • Eng. Eduardo Alberto Ricci
Diretora Financeira • Arqt. Georgina Libório Azevedo
Diretor Administrativo • Eng. Fernando Augusto Júnior
Diretora Técnica • Eng. Luciana Nogueira Dantas
Diretora de Divulgação • Eng. Michéle Dal Toé Casagrande

COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO

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

Projeto Gráfico e Produção Digital • Luciana Costa Leite
Periodicidade • Trimestral

NOSSA CAPA



Imagem sob licença da Shutterstock.com
Envie sua foto para: abpv@abpv.org.br

SUMÁRIO

EDITORIAL	4
SEÇÃO DE NOTAS	5
ESPAÇO JURÍDICO	8

CADERNO DE TECNOLOGIA

Galeria de águas pluviais (GAP)	10
---------------------------------	----

Francisco José d'Almeida Diogo

ARTIGO 1

Efeito da variação de espessuras no desempenho de pavimentos flexíveis avaliados pelo <i>mechanistic empirical pavement design guide</i> (MEPDG)	23
--	----

Nayara Donelli Pelisson
José Leomar Fernandes Júnior
Carlos Alberto Prado da Silva Júnior
Heliana Barbosa Fontenele

ARTIGO 2

Considerações sobre o dimensionamento do revestimento asfáltico no Brasil e sua relação com a degradação prematura de pavimentos	37
--	----

Alvaro Vieira
Filipe Augusto Cinque de Proença Franco
Carlos Filipe Santos Correia e Silva

ARTIGO 3

Utilização de material fresado como camada de pavimento em construção de faixa adicional	49
--	----

Thiago Breunig Hermes
José Antônio Santana Echeverria
Luciano Pivoto Specht

EDITORIAL

Este ano de 2016 tem-se apresentado com enormes desafios para a área de infraestrutura no Brasil. Notadamente pelo baixo grau de investimento do governo federal, dada a crise econômica que se sucede no país. Muitas obras importantes em diversos seguimentos tiveram de ser adiadas. Outras, já iniciadas, foram interrompidas, como é o caso da duplicação da BR-381 Norte, que liga Belo Horizonte a Governador Valadares, na região do Vale do Rio Doce.

Os Estados, por sua vez, têm seus orçamentos totalmente comprometidos, e amargam a situação de baixa arrecadação de receitas. Todos estes fatores são cruciais para que se mantenha o investimento na infraestrutura.

Os prejuízos para a sociedade são muitos. A ABPv confia e espera que o poder público nas esferas federal e estadual tomem atitudes coordenadas e eficazes para que o país possa ver retomada obras vitais para seu desenvolvimento e, principalmente, manutenção do que já temos. Obra iniciada e parada é prejuízo dobrado.

Nesta edição de meio de ano, a Revista PAVIMENTAÇÃO traz mais uma aula de drenagem do Prof. Francisco José d'Almeida Diogo. O tema dessa vez é a denominada GAP – Galeria de Água Pluviais, onde a água da chuva é engolida por uma caixa coletora, que se conecta a um conduto de ligação e este, a um poço de visita (PV). Inicia-se, então, um trecho de galeria a se unir sucessivamente a outro, até um ponto de lançamento natural como num córrego ou num rio.

Na seção de Artigos, o primeiro deles trata do efeito da variação de espessuras no desempenho de pavimentos flexíveis avaliados pelo programa computacional Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Um

trabalho notável dos autores Nayara Donelli Pelisson, José Leomar Fernandes Júnior, Carlos Alberto Prado da Silva Júnior e Heliana Barbosa Fontenele.

Em seguida, apresentamos um trabalho que traz considerações sobre o dimensionamento do revestimento asfáltico no Brasil e sua relação com a degradação prematura de pavimentos. Situação que chamou a atenção do Tribunal de Contas da União em seu relatório de 2014 onde apontava deficiências estruturais em nove de onze rodovias inspecionadas, pouco tempo após terem sido construídas. O artigo é assinado por Álvaro Vieira, Filipe Augusto Cinque de Proença Franco e Carlos Filipe Santos Correia e Silva.

O terceiro e último artigo desta edição versa sobre a utilização de material fresado como camada de pavimento em construção de faixa adicional em rodovias. O trabalho avança a possibilidade de utilização de métodos construtivos que permitam utilizar ou reciclar materiais destinados ao descarte, na intenção de diminuir os impactos econômicos, sociais e, principalmente, ambientais. Os autores são Thiago Breunig Hermes, José Antônio Santana Echeverria e Luciano Pivoto Specht.

Na coluna Espaço Jurídico, uma questão que tem gerado discussão no âmbito judicial: o DNIT pode multar motoristas por excesso de velocidades nas rodovias? Leia o artigo e entenda o questionamento e o atual entendimento dos Tribunais.

Por fim, convidamos os nossos leitores a seguirem acompanhando a ABPv através da rede social Facebook. Além das informações rapidamente atualizadas sobre e cursos e eventos nacionais e internacionais, a página da ABPv fornece acesso à edição eletrônica da Revista PAVIMENTAÇÃO.



SEÇÃO DE NOTAS

revistapavimentacao@abpv.org.br



A 20ª RPU - Reunião de Pavimentação Urbana/ 6ª Expopavimentação, promovida pela ABPv, está programada entre os dias 28 e 30 de junho de 2017, em Florianópolis, SC, no Centro de Convenções CentroSul.

A participação efetiva de todos é fundamental para a promoção de mais um evento de sucesso e com ótimos resultados para os envolvidos neste importante projeto. Novos prazos para remessa de trabalhos e preços promocionais de inscrição encontram-se disponíveis no site.

A 20ª RPU constituir-se-á numa oportunidade de discussão e reflexão sobre a pavimentação urbana no País, no momento em que a sociedade exige mais atenção das atividades para conservação, ampliação e segurança da malha viária e garantia da mobilidade no meio urbano.

Informações • www.rpu.org.br



A ABPv, realizará a 46ª Reunião de Anual de Pavimentação– RAPV/ 7ª Expopavimentação, entre os dias 26 a 29 de setembro de 2017, na cidade de Bonito, Mato Grosso do Sul. Estamos trabalhando no sentido de fomentar a divulgação para toda a comunidade técnica, objetivando o intercâmbio de experiências e conhecimentos entre pesquisadores, empreiteiros, acadêmicos, engenheiros e técnicos em pavimentação.

A promoção e divulgação da boa técnica de pavimentação nacional; a divulgação da pavimentação como fator de progresso e de desenvolvimento econômico e social à luz dos impactos gerados; a programação de atividades para maior e melhor desenvolvimento da técnica de pavimentação e estudos da colaboração possível entre especialistas e entidades nacionais e estrangeiras visando o progresso e o desenvolvimento através da pavimentação adequada também são objetivos a serem alcançados. Usufruiremos das experiências dos primeiros anos da primeira privatização implantada em Mato Grosso do Sul, em uma das rodovias federais mais importantes do Estado possibilitando trazer a discussão sobre quais os ônus e bônus que foram gerados através da adoção deste modelo de obra. A discussão de projetos como a implantação da rota bioceânica para o estado do Mato Grosso do Sul diante do quadro político e financeiro vivido pelo Brasil também é mais um dos assuntos em destaque.

Informações • www.rapv.org.br



A ABPv e o Instituto KEYNES firmaram parceria, para auxiliar na formação de turmas de cursos de Pós-Graduação em Engenharia de Ferrovias, denominados Especialização, nível “lato sensu”, na cidade de Campo Grande-MS.

Especialização dirigida para profissionais que desejem aprimorar seus conhecimentos na modalidade de ferrovias e estar preparado para o mercado de trabalho que se apresenta com grande demanda.

Ao informar que é sócio quites da ABPv usufruirá de descontos especiais.

**Informações • www.keynes.com.br/especializacao/exatas/engenharia-ferrovias/
contato.keynes@gmail.com**



XXX ANPET

A Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET) realizará de 16 a 18 de novembro de 2016, na FIRJAN, em comemoração aos 30 anos da Associação, um evento histórico, o XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte.

A ANPET, por meio de seu Congresso, tem como principal objetivo ampliar o intercâmbio entre pesquisadores, docentes, estudantes, consultores e profissionais de empresas privadas e públicas, que atuam no planejamento, projeto, construção, operação e manutenção de sistemas de transportes de passageiros e de carga. Objetiva-se também intensificar a interação entre a comunidade técnica e científica brasileira e internacional.

O XXX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes será realizado na sede da Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN)

Informações • www.anpet.org.br/

ESPAÇO JURÍDICO



DNIT PODE MULTAR MOTORISTAS POR EXCESSO DE VELOCIDADE NAS RODOVIAS?

Jean Pierre M. Santiago

Esta questão deverá ser decidida em breve pelo Superior Tribunal de Justiça (STJ). Recentemente a ministra Assusete Magalhães marcou como Recurso Repetitivo a discussão sobre a competência do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) de aplicar multas aos motoristas que descumprem as normas de trânsito em rodovias e estradas federais (Recurso Especial nº 1588969).

Recurso Repetitivo é quando há multiplicidade de Recursos Especiais com fundamento em idêntica controvérsia. Neste caso a análise do mérito recursal pode ocorrer por amostragem, mediante a seleção de recursos que representem de maneira adequada a controvérsia.

Assim, até que a colenda Corte decida a referida controvérsia, todos os processos sobre o assunto ficarão suspensos no Judiciário, por determinação da ministra Assusete Magalhães.

A discussão chegou ao STJ a partir de um julgamento do Tribunal Regional Federal da 4ª Região, que compreende o Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina. Os desembargadores federais entenderam que o DNIT pode impor multas a infrações por excesso de peso, dimensões e lotação dos veículos, além do nível de emissão de poluentes e ruído produzidos pelos veículos automotores ou pela sua carga – conforme previsões que estão no artigo 21 do Código Brasileiro de Trânsito (CTB).

No entanto, o TRF-4 entendeu que o departamento federal não pode autuar os motoristas que descumprem outras normas de trânsito, como dirigir com excesso de velocidade.

O recurso a ser analisado pelo STJ é do próprio DNIT, que alega violação ao artigo 21, inciso VI do CTB, por meio do qual se atribuiu competência aos órgãos rodoviários “executar a fiscalização do trânsito, autuar, aplicar as penalidades de advertência, por escrito, e ainda as multas e medidas administrativas cabíveis, notificando os infratores e arrecadando as multas que aplicar”.

Em sua defesa, o DNIT alega que “na condição de órgão executivo rodoviário da União, está autorizado a usar todo e qualquer equipamento ou aparato técnico que o habilite no desempenho de sua função primeira, controle das vias federais de circulação, dentro do âmbito de sua atuação, qual seja, segurança e engenharia do tráfego, podendo autuar e multar os infratores das normas de trânsito, como também arrecadar as multas que aplicar”.

Em junho deste ano, a 2ª Turma do STJ já havia decidido a causa em favor do DNIT no Recurso Especial nº 1.581.392/RS. O relator do processo, ministro Herman Benjamin, considerou que a Polícia Rodoviária Federal não teria competência exclusiva para aplicar e arrecadar multas, “pois, segundo o art. 21 do CTB, os órgãos e entidades executivos rodoviários da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios podem exercê-la”, escreveu o ministro.

Herman Benjamin também fundamentou a decisão com a Lei 10.233/2001, que, segundo ele, “trouxe uma ampliação das funções exercidas pelo DNIT em seu art. 82, § 3º, inclusive a de aplicar penalidades de trânsito por excesso de velocidade em rodovias federais”:

Art. 82. São atribuições do DNIT, em sua esfera de atuação:

(...)

§ 3o É, ainda, atribuição do DNIT, em sua esfera de atuação, exercer, diretamente ou mediante convênio, as competências expressas no art. 21 da Lei no 9.503, de 1997, observado o disposto no inciso XVII do art. 24 desta Lei”.

Os ministros Mauro Campbell Marques, Assusete Magalhães (Presidente), Diva Malerbi (desembargadora convocada do TRF-3) e Humberto Martins seguiram o voto do relator.

No começo do ano de 2016, o TRF-4 tinha decidido o contrário. Na ocasião, o juiz federal Sérgio Renato Tejada Garcia considerou que a responsabilidade das cobranças seria exclusividade da Polícia Rodoviária Federal.

Resta aguardar que tanto em breve, como mencionado no início deste texto, o STJ decida em definitivo tamanha controvérsia.

Fontes: ABr – Agência Brasil; STJ – Superior Tribunal de Justiça; Jota.info.

Jean Pierre M. Santiago é advogado e jornalista responsável da Revista PAVIMENTAÇÃO. Mestre em Ciência Política pela Universidade Federal Fluminense; sócio do escritório Santiago & Lacerda Advogados e membro do Instituto dos Advogados de Minas Gerais (jean@santiagoelacerda.com.br).

GALERIA DE ÁGUAS PLUVIAIS (GAP)

Francisco José d'Almeida Diogo



GALERIA DE ÁGUAS PLUVIAIS (GAP)

Ao se esgotar a capacidade da rua em conduzir a água da chuva ou para segurança e conforto da população, o escoamento é engolido por uma caixa coletora, que se conecta a um conduto de ligação e este, a um poço de visita¹ (PV), início de um trecho de galeria a se unir sucessivamente a outro, até um ponto de lançamento em um talvegue.

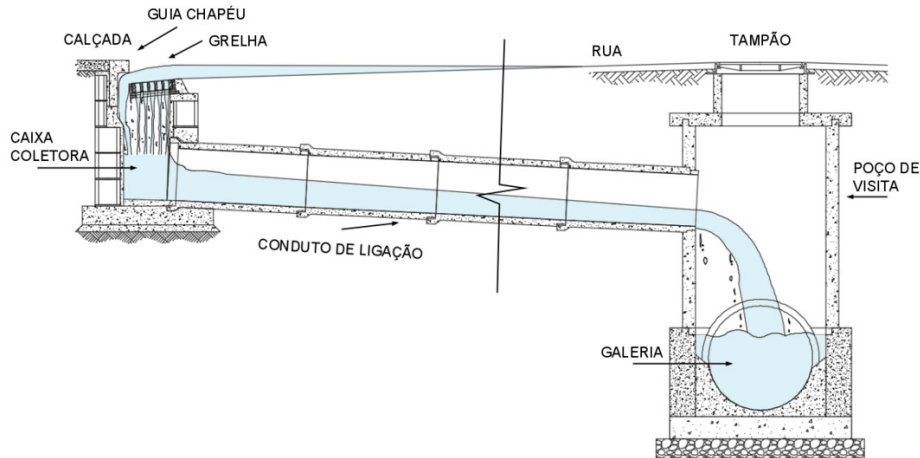


Figura 1 - Esquema em corte transversal de um sistema de águas pluviais.

1 • CRITÉRIOS DE PROJETO

1.1 • Localização das galerias

Os municípios devem regulamentar a posição dos equipamentos urbanos no subsolo. Os dutos de serviços porta a porta como: gás, energia elétrica, cabos óticos, TV a cabo, telefonia fixa, água potável, são indicados para estar sob a calçada, por ocuparem pouco espaço e ficarem próximos aos pontos de entrega, reduzindo impedâncias e custos.

Uma galeria de águas pluviais pode estar nos seguintes locais:

- No leito carroçável se há: norma impedindo o uso da calçada; vantagem técnica e/ou econômica; risco às edificações ou não há espaço na calçada;
- Na calçada se há: norma contra o uso do leito carroçável; vantagem técnica e/ou econômica; uma rede dupla ou tráfego intenso e pesado no leito carroçável.

Em baixadas, terrenos muito planos, recomenda-se uma rede dupla abaixo das sarjetas.

Deve-se verificar, antes do projeto, a previsão de arborização urbana pois as raízes podem inviabilizar galerias próximas.

Em grandes centros, se houver pavimento nobre, um calçadão, é conveniente criar uma calçada técnica com galerias rasas e visitáveis, nos dois lados da via.

1.2 • Valores para seções de galerias

A Tabela 1 apresenta os diâmetros e espessuras mínimas para tubos de concreto.

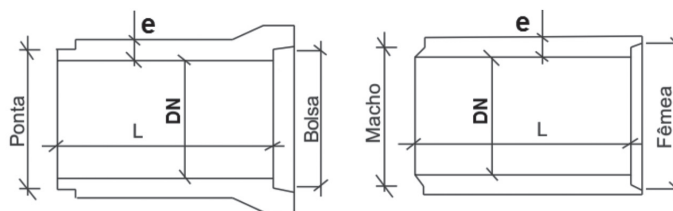


Figura 2 - Corte longitudinal de tubos com encaixe ponta e bolsa e macho e fêmea

¹ Que é uma caixa de reunião, inspeção e manutenção.

Tabela 1 - Espessuras mínimas de paredes de tubos de concreto (NBR 8890/2007)

Diâmetro nominal "DN" e espessura mínima "e" de tubos de concreto (mm)															
DN	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1500	1750	2000
e	Simplex	30	30	40	50	55	---								
	Armado	---	45	45	50	60	66	72	75	80	90	96	105	120	140

A Tabela 2 mostra as dimensões limites recomendadas para galerias em vias urbanas, considerando aspectos construtivos e de conservação. Acima do diâmetro de 2.000 mm, costuma-se moldar a galeria tronco in loco.

Tabela 2 - Valores limites recomendados para seções de galerias urbanas

Tipo de Seção	Emprego	Parâmetro	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Circular	Tronco	Diâmetro	1.000	2.000
	Ramal		400	1.200
	Ligação caixa coletora-PV		300	400
Celular	Tronco	Base ou altura	1.200	3.000

1.3 • Velocidade admissível

A velocidade d'água é verificada no interior de dutos de drenagem, para valores mínimos e máximos, e, ao sair para o terreno natural, para máximos. Dentro da galeria, se abaixo do mínimo, ocorre o assoreamento, acarretando a redução da seção de vazão e serviços constantes de limpeza. Acima do máximo, têm-se a abrasão da galeria reduzindo a sua vida útil, levando à uma restauração difícil e onerosa. Para dimensões inferiores a 1.200 mm, dependendo da extensão, o reparo é praticamente inviável.

A capacidade erosiva da água deve ser verificada ao ser despejada no receptor final. Caso a tenha, pode-se reduzir a declividade terminal, ampliar a seção molhada final, criar estruturas de impacto, de queda ou um ressalto hidráulico, recursos presentes em diversos dispositivos dissipadores de energia.

Na Tabela 3 são apresentados valores limites de velocidade, contidos em normas municipais, norteadores da verificação hidráulica de galerias existentes ou projetadas.

Tabela 3 - Velocidade limite no interior de galeria

Material	Velocidade (m/s)		
	Máxima	Mínima	Município
Tubo de concreto	5,0	0,6	São Paulo
Galeria fechada	5,0	0,8	Rio
Galeria prismática de concreto	12,0	0,75	Belo Horizonte
Tubo de concreto	8,0		
Tubo de PVC helicoidal	(DN < 1,2m)		
	(DN ≥ 1,2m)	5,0	

1.4 • Cobrimento

O objetivo do cobrimento é dispersar a transferência da carga do tráfego, desde o pavimento à galeria, evitando danos. Ele é definido como a distância vertical entre o greide da via e a geratriz superior externa da galeria.

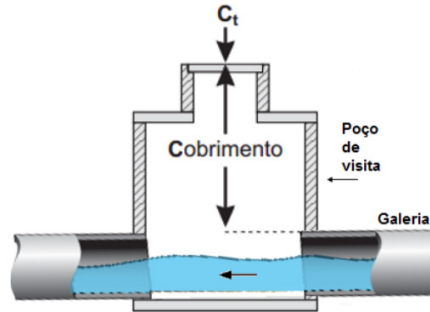


Figura 3 - Cobrimento de uma galeria

Na Tabela 4 são mostrados valores mínimos de cobrimento para diferentes tipos de galerias, cargas de veículos-tipo e classes de tubos de concreto.

Tabela 4 - Valores mínimos de cobrimento em galerias

Forma	Material	Classe tubo		Diâmetro	Cobrimento (m)
		Veículo-tipo			
		30kN	45kN		
Celular	Concreto armado	-		-	Projeto específico
Tubular	PVC helicoidal	-		-	Conforme fabricante
	Concreto simples	Classe PS2		-	0,8
		Classe PA1		-	$D/2 + 0,4$
	Concreto armado <i>(Fonte: Rio-Águas)</i>	Classe PA2	PA3	0,30	0,41
				0,40	
			Classe PA2	0,50	0,42
				0,60	0,44
				0,70	0,46
				0,80	0,48
				0,90	0,50
				1,00	0,52
				1,20	0,56
				1,50	0,62
1,75	0,73				
2,00	0,72				

Pode ser que as condições locais imponham cobrimento menor que o mínimo. Nesse caso, pode-se empregar um bueiro celular cujas lajes tenham resistência adequada.

Ao surgir uma interferência com dutos de outros equipamentos urbanos, recomenda-se deixar uma folga de 20 cm entre as partes.

1.5 • Declividades

No projeto, a primeira declividade ensaiada para a galeria é a do greide da via, em obra rasa, com um mínimo de volume escavado, evitando escoramentos caros e rebaixamento de lençol freático. Porém, buscando: máxima eficiência econômica², regime permanente e uniforme e sem remanso; a cota de deságue; velocidade admissível ou adequar-se à seção disponível; um trecho pode ter inclinação própria. Diante disso, o projetista da via e o da drenagem devem buscar uma solução técnica e economicamente adequada.

Num trecho, a declividade do terreno é a razão entre a diferença de cotas, nos topos dos PVs, de montante e de jusante, e a distância **L**, em planta, desse trecho (Fig. 4).

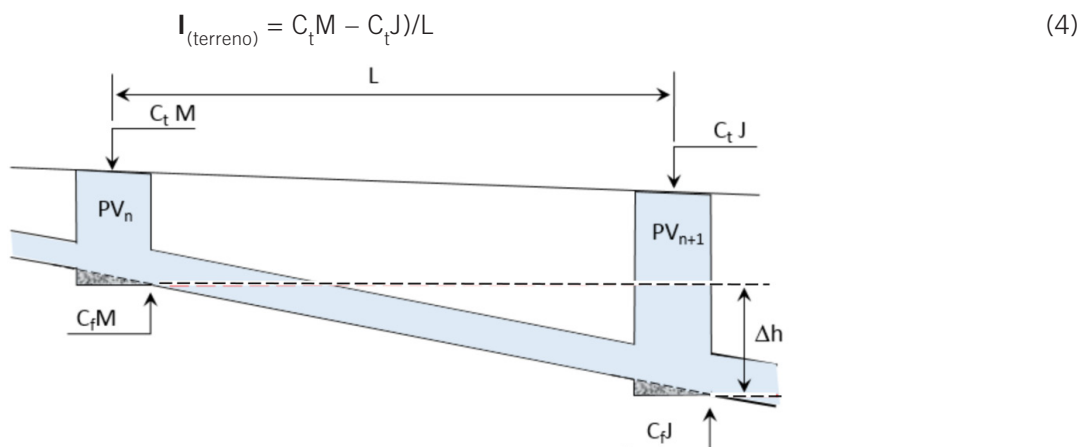


Figura 4 - Desnível e declividades entre dois PVs

A declividade (*m/m*) de um trecho de galeria é a diferença das cotas de fundo do PV de montante e de jusante (*desconsiderando algum aprofundamento para evitar remanso*), dividida pela distância **L** entre os PVs (Fig. 4).

$$I_{(\text{trecho})} = (C_f M - C_f J) / L = \Delta h / L \quad (5)$$

Na Tabela 5 são recomendadas declividades para o projeto de galerias.

Tabela 5 – Declividades recomendadas para galerias

Declividade	Valor (%)
Mais econômica	a do terreno (<i>do greide da via</i>) ou a que leva à menor seção de galeria
Faixa limite	0,3 < I < 4
Mínima da boca coletora ao PV	0,5 (<i>em BH é 3</i>)

1.6 • Cota do fundo de um poço de visita (PV)

1) Primeiro poço a montante

A Figura 5 mostra como determinar a cota de fundo do primeiro poço de visita, usando a seguinte expressão:

$$C_f \cong C_t - (Cob. + DN + e) \quad (Eq. 1)$$

² Em dutos tubulares, um tirante de água de 0,83xD conduz ao maior raio hidráulico e conseqüente velocidade em condições de estabilidade do fluxo.

Onde:

C_t = cota do terreno

Cob. = cobrimento

DN = diâmetro interno do tubo

e = espessura da parede do tubo

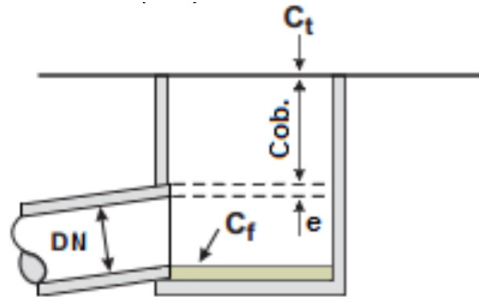


Figura 5 - Ilustração da determinação da cota de fundo do primeiro PV

2) De um poço a jusante

A determinação da cota de fundo de um poço a jusante depende da necessidade ou não em aprofundá-lo para que não ocorra remanso (*refluxo*). A Figura 4 mostra o desnível Δh e a distância **L**, em planta, entre dois PVs, sem compensação.

$$C_{f \text{ poço jusante}} = C_{f \text{ poço montante}} - \Delta h \quad (\text{Eq. 2})$$

O valor de Δh é obtido multiplicando-se a distância **L** (*em m*) entre os dois poços pela declividade do trecho **I** (*em m/m*). Deve-se evitar profundidade de galeria maior que 5 m.

$$\Delta h = L \cdot I_{(\text{trecho})} \quad (\text{Eq. 3})$$

1.7 • Tirante d'água

Para a galeria atuar como conduto livre e justificar custos, tem-se os seguintes limites de altura de lâmina d'água no interior da galeria.

Tabela 6 - Limites para lâminas d'água

Tipo de Seção	Máxima	Mínima
Tubular	$0,85 \times DN$	$0,2 \times DN$
Celular	$0,9 \times \text{altura}$	$0,2 \times \text{altura}$

Onde DN = diâmetro interno da tubulação.

A cota do nível d'água no interior da galeria, quer seja a montante ou a jusante do trecho, se obtém somando-se à cota de fundo da galeria o valor do tirante normal y_n .

$$\text{Nível}_{d'água} = C_f + y_n \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

Cf = cota de fundo da galeria

y_n = profundidade normal - correspondente ao escoamento uniforme

1.8 • Espaçamento máximo entre poços de visita

O espaçamento máximo entre poços de visita deve levar em conta os aspectos hidráulicos, construtivos, de conservação e manutenção da rede. Um maior espaçamento reduz o custo de implantação mas requer serviços especiais (*equipamentos*) de manutenção que podem não estar disponíveis às prefeituras de menor porte.

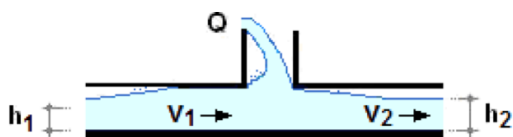
Tabela 7 - Espaçamento máximo entre PVs adotados em alguns municípios

Espaçamento Máximo (m)			
DN (cm)	B. Horizonte	São Paulo	Rio de Janeiro
30	---	120	Entre 30 e 40
50	100	---	
50 - 90	---	150	
80 - 100	120	---	
≥ 100	---	180	
120	150	---	
150	200	---	

Terrenos planos acarretam a necessidade de limpeza constante das galerias e poços de visita menos esparsados.

1.9 • Degrau em poço de visita

Se na saída de um PV a água apresentar um valor de energia maior que o de entrada, o nível d'água irá crescer naturalmente para montante, aumentando a energia, até igualá-la com a de saída (*ocorre um remanso*).



Um remanso pode ocasionar $V_1 < 0,75$ m/s ou encher o tubo $h/D > 0,85$, passando o escoamento de conduto livre para forçado.

Figura 6 - Situação de energia a jusante maior que de montante

Para igualar a energia, a melhor opção é abaixar o fundo do PV de um valor correspondente à diferença entre a energia de saída em relação à de entrada no PV (ΔE). A queda de compensação ΔE , Figura 7, é expressa na fórmula a seguir:

$$\Delta E = (h_2 + v_2^2 / 2g)_{\text{saída}} - (h_1 + v_1^2 / 2g)_{\text{entrada}} \quad (\text{Eq. 5})$$

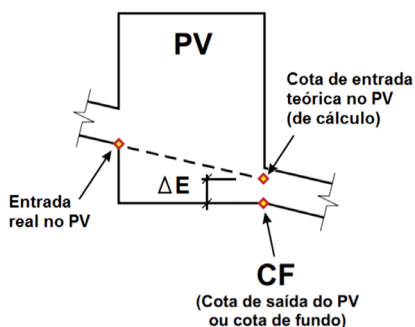


Figura 7 - Esquema de PV com degrau

Considerando o fundo do PV inacabado (*sem almofada*), ele deve ficar com um degrau (10 cm) abaixo da entrada do tubo da galeria de montante para dar continuidade à inclinação de montante e compensar perdas de carga na passagem pelo poço (Figura 7).

2 • PARÂMETROS HIDRÁULICOS DE SEÇÕES DE GALERIAS

Na galeria tubular, a forma de lidar com os parâmetros geométrico hidráulicos é relacionar o enchimento y/D ao ângulo interno ϕ como se observa na equação a seguir e na Tabela 8.

Nas expressões, o ângulo ϕ é empregado em radianos (*rad*).

$$\phi = 2 \arccos \left(1 - \frac{2y}{D} \right) \tag{Eq. 6}$$

Tabela 8 - Parâmetros hidráulicos de seções de galerias

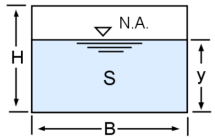
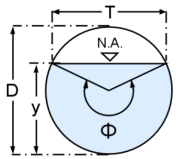
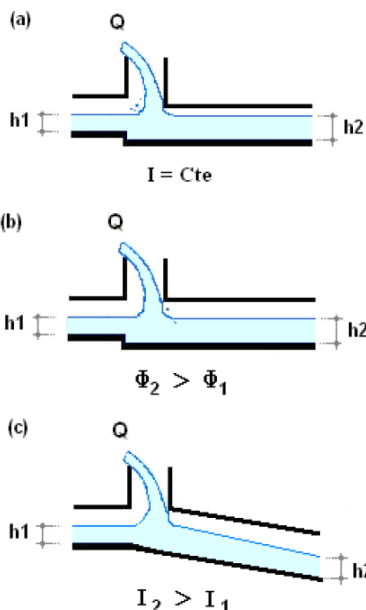
Parâmetro	Seção		
			
Seção molhada	$S = B y$	(Eq. 7)	$S = \frac{\phi - \text{sen}\phi}{8} \times D^2$
Perímetro molhado	$P = B + 2y$	(Eq. 8)	$P = \frac{\phi}{2} \times D$
Raio hidráulico	$R_H = \frac{S}{P} = \frac{By}{B+2y}$	(Eq. 9)	$R_H = \frac{S}{P} = \frac{\phi - \text{sen}\phi}{4\phi} \times D$
Superfície livre do fluxo	$T = B$	(Eq. 10)	$T = D \times \frac{\text{sen}\phi}{2}$
Profundidade hidráulica	$h = S / T$	(Eq. 11)	$h = \frac{S}{T} = \frac{\phi - \text{sen}\phi}{8 \text{sen} \frac{\phi}{2}} \times D$
			(Eq. 12)
			(Eq. 13)
			(Eq. 14)
			(Eq. 15)
			(Eq. 16)

Figura 8 - Algumas soluções para eliminar o remanso



(a) queda no PV para obter o mesmo nível de energia (a melhor solução para evitar remanso)

(b) aumento de diâmetro (os tubos devem ser alinhados pela geratriz superior)

(c) aumento da declividade a jusante

3 • DIMENSIONAMENTO

3.1 • Hidráulica básica

A equação hidráulica de aplicação geral em drenagem é a da continuidade $Q = v.S$ (Eq. 17) onde o valor da vazão Q é obtido da hidrologia e torna-se um invariante. Logo, ao aumentar a seção molhada S reduz-se a velocidade v e vice-versa. A velocidade, em escoamento permanente e uniforme, pode ser obtida da fórmula de Chézy com o coeficiente de Manning $v = R_H^{2/3} \cdot I^{1/2}/n$ (Eq. 18).

O grau de turbulência de um fluxo é dado pelo número de Froude $F = v/(gy)^{0.5}$ (Eq. 19). Se ele for menor que um, têm-se o regime fluvial; se maior, torrencial e, igual a um, o crítico. Um número de Froude acima de 2,5 é considerado alto e requer atenção.

Em canais, se o tirante de água y for menor que o tirante crítico y_c ($F=1$) o regime do fluxo é torrencial (*turbulento, supercrítico ou rápido*) do contrário, fluvial (*tranquilo ou subcrítico*).

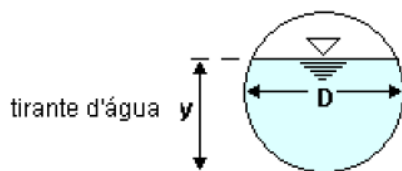


Figura 9 - Indicação de tirante d'água

Dimensiona-se uma galeria de águas pluviais como conduto livre (*canal*), em escoamento permanente e uniforme (*regime fluvial ou torrencial*) e com velocidade segura (*sem assoreamento ou abrasão na galeria*).

3.2 • Equações do fluxo no regime fluvial (*Subcrítico*)

Aplicando a equação da continuidade e a de Chézy/Manning obtém-se o que segue:

Tabela 9 - Equações do fluxo no regime fluvial

Seção	Celular	Tubular
Velocidade (m/s)	$v = \sqrt[3]{\left(\frac{By}{B+2y}\right)^2} \times \frac{I^{1/2}}{n}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 20)</p>	$v = \sqrt[3]{\left(\frac{\phi - \text{sen}\phi}{4\phi}\right)^2} \times D^{2/3} \times \frac{I^{1/2}}{n}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 22)</p>
Vazão (m³/s)	$Q = \sqrt[3]{\frac{(By)^5}{(B+2y)^2}} \times \frac{I^{1/2}}{n}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 21)</p>	$Q = \frac{1}{16} \sqrt[3]{\frac{(\phi - \text{sen}\phi)^5}{2\phi^2}} \times D^{8/3} \times \frac{I^{1/2}}{n}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 23)</p>

3.3 • Equações do fluxo no regime torrencial (*Supercrítico*)

Em uma galeria, considera-se que a passagem do regime fluvial para o torrencial ocorre no início do trecho, através do crítico, onde a seção molhada é maior que qualquer outra adiante, sendo então a seção crítica a de dimensionamento para o regime torrencial.

Tabela 10 - Equações do fluxo no regime crítico para uso no torrencial

Seção	Celular	Tubular
Como	Para $F = 1 \Rightarrow V_c = (gy_c)^{1/2}$ (Eq. 19)	
Como	—	$y = h = \frac{S}{T} = \frac{\phi - \text{sen}\phi}{8\text{sen}\frac{\phi}{2}} \times D$ (Eq. 16)
Velocidade crítica (m/s)	—	$v_c = \sqrt{\frac{\phi_c - \text{sen}\phi_c}{8\text{sen}\frac{\phi_c}{2}} gD}$ (Eq. 26)
Como	$Q = v \times S$ (Eq. 17)	
Como	$S = B \times y$ (Eq. 7)	$S = \frac{\phi - \text{sen}\phi}{8} \times D^2$ (Eq. 12)
Vazão crítica (m ³ /s)	$Q_c \approx 3,13 B y_c^{3/2}$ (Eq. 24)	$Q_c = \sqrt{\frac{g}{\text{sen}\frac{\phi_c}{2}}} \left(\frac{\phi_c - \text{sen}\phi_c}{8}\right)^{3/2} D^{5/2}$ (Eq. 27)
Como (Chézy/Manning)	$I = \frac{n^2 \times V_c^2}{R_H^{4/3}}$ (Eq. 18)	
Declividade crítica (m/m)	$I_c = \frac{n^2 g}{y_c^{1/3}} \left(1 + \frac{2y_c}{B}\right)^{4/3}$ (Eq. 25)	$I_c = \frac{n^2 g \phi_c}{\text{sen}\frac{\phi_c}{2}} \sqrt[3]{\frac{\phi_c}{2D(\phi_c - \text{sen}\phi_c)}}$ (Eq. 28)

Estando a velocidade terminal, para o terreno, no regime torrencial, ela deve ser calculada usando a fórmula de Bernoulli (Eq. 23):

$$v_{\text{jusante}} = (v_{\text{montante}}^2 + 2g\Delta_H)^{1/2} \quad (\text{Eq. 29})$$

Onde:

v_{jusante} = velocidade do deságue final

v_{montante} = velocidade d'água no PV imediato de montante

Δ_H = desnível da galeria entre os dois pontos

g = aceleração da gravidade.

3.4 • Preparação para o dimensionamento

Do cálculo hidrológico, obtém-se a vazão a drenar e são as equações de vazão que iniciam o dimensionamento hidráulico. Nelas há dois tipos básicos de parâmetros: os específicos de um caso, das circunstâncias locais (**Q** e **I**) e de escolha do projetista (**n** e **D**), e os gerais, referentes à geometria da seção molhada de uma galeria. Uma forma eficiente de trabalho é separar, em cada equação, essas tipologias, o que é específico do geral. Este último serve para deixar tabelas prontas, facilitando a avaliação da seção molhada de um caso.

Tabela 11 - Partição das equações de vazão

Regime	Forma	Parâmetros do caso	Parâmetros gerais (da seção)
Fluvial	Celular	$K_{QN} = \frac{Q \times n}{I^{1/2}}$ (Eq. 30)	$K_{QN} = \sqrt[3]{\frac{(By)^5}{(B+2y)^2}}$ (Eq. 34)
	Tubular	$K_{QN} = \frac{Q \times n}{D^{8/3} \times I^{1/2}}$ (Eq. 31)	$K_{QN} = \frac{1}{16} \sqrt[3]{\frac{(\phi - \text{sen}\phi)^5}{2\phi^2}}$ (Eq. 35)
Torrencial	Celular	$Q_c \approx 3,13By_c^{3/2}$ (não necessita particionar) (Eq. 32)	
	Tubular	$K_{QC} = \frac{Q_c}{D^{5/2} \sqrt{g}}$ (Eq. 33)	$K_{QC} = \frac{I}{\sqrt{\text{sen}\frac{\phi_c}{2}}} \left(\frac{\phi_c - \text{sen}\phi_c}{8} \right)^{3/2}$ (Eq. 36)

Um exemplo de preparação para galerias tubulares está na figura a seguir. Nela há quatro colunas, a base é uma série crescente da razão de enchimento y/D . Com ela obtém-se a série correspondente ao ângulo interno $\phi = 2\text{arc cos}(1-2y/D)$. Desta série, usando o parâmetro de seção ϕ , geram-se duas novas sequências, dos coeficientes de cálculo de vazão, uma relacionada à profundidade (ou tirante) normal K_{QN} e outra, à crítica K_{QC} .

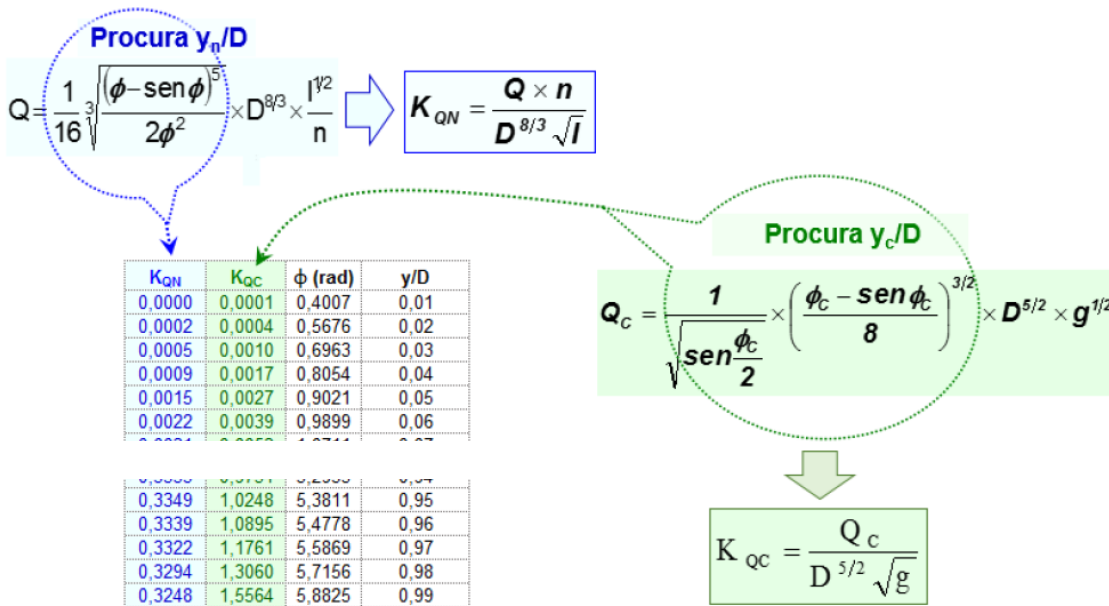


Figura 10 - Montagem de tabela para obter o tirante normal e o crítico⁶

As circunstâncias locais determinam Q e I e critérios técnicos e econômicos, n e D . Esses parâmetros são aplicados nas expressões dos coeficientes K_Q . Com eles, vai-se a uma tabela como da figura anterior e procura-se verticalmente os valores K_{QN} e K_{QC} e deles a razão correspondente y_n/D e y_c/D . Com isso é encontrado o valor da profundidade normal e, a crítica. Usando a função de pesquisa de uma planilha eletrônica, a busca é automática.

O Manual de Drenagem de Rodovias, DNIT⁷, 2006, apresenta, em seu capítulo sobre Drenagem de Travessia Urbana, a planilha mostrada a seguir com as colunas numeradas. As não numeradas são do autor. Ela compõe-se de três partes. A primeira fornece dados sobre os Poços de Visita como localização, cota de fundo e cobrimento (Figura 11).

⁶ A posição das colunas atende a função de pesquisa de uma planilha eletrônica.

⁷ DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.

	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4		Col 5	Col 6			
POÇO DE VISITA										
LOCAÇÃO			COTAS NO POÇO							
Trecho	Nº montante	Nº jusante	Estaca	Terreno (m)	Nível d'água (m)	Fundo mínimo (m)	ΔE (m)	Queda (m)	Fundo real (m)	Cobri-mento (m)
1	PV-1	PV-2	46,0	773,10	772,34	772,10	0,000	0,00	772,10	0,60
2	PV-2	PV-3	66,0	767,30	766,44	766,15	-0,044	0,00	766,15	0,65
3	PV-3	PV-4	87,8	763,00	762,13	761,70	-0,313	0,00	761,70	0,70
4	PV-4	PV-5	110,2	762,22	760,59	760,77	-0,003	0,70	760,07	0,75
5	PV-5	PV-6	131,6	759,60	757,64	758,00	-0,034	0,90	757,10	0,80

LEGENDA nn,nn - Valores adotados nn,nn - Valores calculados

Figura 11 - Início da tabela, com informações específicas do PV

A segunda parte é a sequência de cálculo da vazão que adentra cada PV.

Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15
DEFLÚVIO A ESCOAR PARA JUSANTE								
BACIA LOCAL		CONTRIBUIÇÃO PARCIAL						Deflúvio total a escoar
Área (ha)	Coef. Imperm.	Área total (ha)	Coef. Distrib.	Tempo Conc. (min)	Intens. Pluviom. (mm/h)	Coef. Defluv. Fantoli	Defl. Parcial (l/s)	Deflúvio total a escoar (l/s)
1,60	0,6	1,60	0,932	17,09	142,800	0,586	346,69	346,69
0,64	0,6	2,24	1,000	17,47	141,456	0,588	148,02	494,70
0,61	0,6	2,85	1,000	17,90	139,951	0,591	140,22	634,93
4,07	0,6	6,92	0,810	18,54	137,823	0,595	751,25	1386,18
4,61	0,6	11,53	0,795	18,93	136,536	0,597	830,57	2216,75

$i = \frac{aT_r^b}{(t+c)^a}$ $f = m(i.t)^{1/3}$ $Q = 2,78.n.i.f.A$

Figura 12 - Meio da tabela, que calcula o deflúvio para jusante de cada PV

A terceira parte realiza os cálculos hidráulicos da galeria a jusante de cada PV.

Col 16	Col 17	Col 18				Col 19	Col 20	Col 21	Col 22	Col 23			
GALERIA DE JUSANTE													
Declividade		Diâmetro (m)	Enchi-mento (%)	Coeficiente de rugosidade "n"	φ (rad)	Seção molhada (m²)	Coeficientes		TIRANTE		Velocidade (m/s)	Exten-são (m)	Tempo percurso (min)
Terreno (m/m)	Galeria (m/m)						K _{QN}	K _{QC}	Normal (m)	Crítico (m)			
0,058	0,060	0,40	60,0%	0,013	3,54	0,08	0,21	1,09	0,24	0,38	4,40	100,0	0,378
0,039	0,041	0,50	58,0%	0,013	3,46	0,12	0,20	0,89	0,29	0,46	4,19	109,0	0,434
0,007	0,015	0,60	71,0%	0,013	4,01	0,21	0,27	0,73	0,43	0,51	2,96	112,0	0,631
0,024	0,028	0,70	74,0%	0,013	4,14	0,31	0,28	1,08	0,52	0,67	4,54	107,0	0,393
0,045	0,043	0,80	68,0%	0,013	3,88	0,36	0,25	1,24	0,54	0,78	6,09	92,0	0,252

$S = \frac{\phi - \text{sen } \phi}{8} \times D^2$ $K_{QN} = \frac{Q \times n}{D^{8/3} \times I^{1/2}}$ $K_{QC} = \frac{Q}{D^{5/2} \times g^{1/2}}$

Figura 13 - Fim da tabela, que realiza os cálculos hidráulicos

Os parâmetros calculados nesta terceira parte têm as seguintes peculiaridades:

- 1) A razão de enchimento (y/D ou y/H) é o parâmetro norteador do dimensionamento, também fornece o valor do tirante de água que é a energia potencial gravitacional do fluxo.
- 2) A velocidade do fluxo define a sua capacidade de abrasão, o tempo de percurso em cada trecho e a energia cinética da água.
- 3) A altura crítica do caudal é uma referência para o regime em que ele está operando.
- 4) A declividade de um trecho pode ser empregada para eliminar um remanso no interior da galeria e/ou para alterar a velocidade do fluxo. É realizada com queda no PV de montante, para redução ou no PV de jusante para aumento.
- 5) Por imposição local ou construtiva, a largura da base de um celular ou o diâmetro de um tubular são inicialmente estimados pelo projetista. Em geral, buscam-se valores mínimos, disponíveis no mercado, que atendam a razão de enchimento máxima da norma municipal.
- 6) O tempo de percurso é adicionado ao tempo de concentração anterior que por sua vez é aplicado na equação de intensidade duração e frequência da chuva.

3.5 • Execução do dimensionamento

Tendo preparado as duas planilhas anteriores, segue-se o roteiro da Tabela 12.

Tabela 12 - Um roteiro para anteprojeto de microdrenagem

Seq.	Atividades
1	Obter uma planta do local da obra na escala 1:500 ou 1:1000 com curvas de nível de metro em metro contendo arruamentos, lotes e demais áreas a serem drenadas.
2	Demarcar os divisores naturais de água (sub-bacias), da bacia onde se insere o projeto, e os possíveis pontos de lançamento.
3	Indicar o sentido de escoamento das águas pluviais ao longo de cada lado das vias.
4	Delimitar (linhas finas interpontilhadas) as áreas tributárias às linhas de sarjetas das ruas.
5	Definir os coeficientes de deflúvio pelas características de ocupação de cada área a drenar.
6	De montante para jusante, calcular a distância crítica das sarjetas, em função do máximo alagamento permitido nas vias, definindo posições de bocas coletoras e as áreas de contribuição para cada trecho entre essas bocas.
7	Lançar as posições das bocas coletoras, de montante para jusante, as representando por pequenos retângulos: no final da distância crítica das sarjetas; onde a água possa empossar (pontos baixos); e impedindo a travessia em cruzamentos (antes da faixa de pedestres).
8	Usando pequenos círculos, locar os poços de visita (PVs): 1) nas cabeceiras das redes; 2) nos pontos de reunião de dutos (encontros de ruas e ao recolher água de bocas coletoras); 3) nas mudanças: de seção; de declividade; de direção; e de material; 4) nos desníveis das tubulações; e 5) em trechos longos, evitando passar da distância máxima, conforme a seção transversal.
9	Se um PV recebe mais de 4 ligações evitar o uso de caixas de ligação, indicando uma caixa de boca coletora a jusante como receptora de outra a montante.
10	Numerar os poços de visita no sentido crescente das vazões, de montante para jusante, de forma que cada um receba contribuição proveniente de outro de número menor.
11	Usar linhas tracejadas ao representar ramais de ligação entre as bocas coletoras e os poços de visita, dentro da caixa da via.
12	Identificar as cotas do terreno em cada PV, nos cumes, pontos baixos e locais prováveis de despejo d'água.
13	Medir entre os centros dos poços de visita, em planta, a extensão de cada trecho de galeria.
14	Identificar as áreas de contribuição de cada trecho de galeria.
15	Usando a planilha apresentada e o método racional, realizar o dimensionamento da galeria determinando diâmetro, declividade, velocidade, cotas, etc.



EFEITO DA VARIAÇÃO DE ESPESSURAS NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS AVALIADOS PELO MECHANISTIC EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE (MEPDG)

*Nayara Donelli Pelisson*¹

*José Leomar Fernandes Júnior*²

*Carlos Alberto Prado da Silva Júnior*³

*Heliana Barbosa Fontenele*⁴

¹ Universidade Estadual de Londrina - UEL
nayara_donelli@hotmail.com

² Universidade de São Paulo - USP
leomar@sc.usp.br

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE
carlospradojr@hotmail.com

⁴ Universidade Estadual de Londrina - UEL
heliana@uel.br

RESUMO

O dimensionamento de pavimentos de rodovias e de vias urbanas (expressas, arteriais ou coletoras) tem sido realizado em bases empíricas, que apresentam sérias limitações, pois seus resultados são válidos somente para os mesmos, ou muito similares, fatores intervenientes que prevaleciam quando do seu desenvolvimento, há 50 anos. Dessa forma, a AASHTO propôs um novo método para o projeto de pavimentos, cuja base é empírico-mecanística. Tal método, conhecido inicialmente como AASHTO 2002, utiliza para o dimensionamento e previsão do desempenho, os espectros de carga por eixo dos veículos comerciais de carga, além de informações detalhadas sobre o clima e materiais das camadas. No presente trabalho foi realizada uma análise de sensibilidade para investigar o efeito que a variação das espessuras do revestimento, da base e da sub-base acarreta nas respostas estruturais do pavimento flexível, bem como na previsão do seu desempenho. Assim, foram feitas simulações com o programa computacional MEPDG utilizando-se espectros de carga desenvolvidos por Fontenele (2011), cujos resultados quantificam a magnitude dos efeitos causados pelos fatores selecionados e suas interações sobre o desempenho final do pavimento e podem, portanto, contribuir para o aperfeiçoamento do dimensionamento de pavimentos e para a diminuição dos insucessos caracterizados pela deterioração precoce de pavimentos rodoviários e urbanos.

Palavras-chave: MEPDG, pavimentos flexíveis, dimensionamento, desempenho.

ABSTRACT

The pavement design of highways and urban roads (freeways, arterials or collectors) has been performed on empirical basis, which present serious limitations, because their results are just valid for the same, or very similar, intervening factors that prevailed at the time of its development, more than fifty years ago. In this way, the AASHTO proposed a new method of pavements design, whose base is mechanistic-empirical. This method, which was initially known as AASHTO 2002, uses the axle load spectra of commercial vehicles for design and performance prediction, as well as detailed information about climate and layers materials. This work performed a sensitivity analysis to investigate the effect that thickness variation of bituminous and base layers can produce to the structural responses of flexible pavements and their effects on pavement performance. Thus, simulations were made with the computer program MEPDG using load spectra developed by Fontenele (2011) and it was quantified the effects magnitude caused by the selected factors and their interaction on the final performance of pavements. Therefore, it can contribute to the improvement of pavement design and the reduction of failures characterized by the early deterioration of highways and urban pavements.

Keywords: MEPDG, flexible pavements, design, performance.

1 • INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas estudos têm sido desenvolvidos para buscar representar com maior proximidade à realidade de campo as condições impostas pelo carregamento de veículos e seus efeitos no pavimento. Essas pesquisas visam determinar estruturas eficientes que apresentem comportamento adequado e previsível perante as solicitações de tráfego esperadas durante o período de projeto. Tais estudos têm sua contribuição, inclusive, no Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), com vistas a adequar o emprego de recursos disponíveis a partir da escolha de corretas intervenções e da verificação do momento adequado de ocorrência das mesmas.

O dimensionamento de pavimentos, nos últimos anos, tem sido baseado em métodos de bases empíricas, resultantes de experimentos realizados na década de 60. Esses métodos têm seu conceito apoiado nas observações da evolução da condição dos pavimentos em campo e os resultados associados a fatores como a resistência dos materiais e a repetição de cargas do tráfego, sendo então a vida remanescente do pavimento expressa pelo número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 8,2 tf. Os métodos de origem empírica apresentam limitações quanto à representação do efeito do tráfego nas estruturas do pavimento, uma vez que os resultados só são reproduzíveis em regiões com as mesmas, ou muito similares, condições naturais daquela na qual ele foi desenvolvido. Tal situação ainda é agravada pela modificação das características dos veículos, como tipo de eixo, tipo de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e alteração dos tipos de cargas transportadas; sendo, portanto, muito diferentes das características de cerca de 50 anos atrás.

Em função do exposto, atualmente observa-se a tendência em substituir os métodos puramente empíricos pelos empírico-mecanísticos, em que se relaciona o empirismo de ensaios de campo e laboratoriais com métodos de cálculo mais precisos e realistas, permitindo a determinação das respostas estruturais do pavimento (tensão, deformação e deslocamento). Tais respostas estruturais são utilizadas para analisar o desempenho dos pavimentos quanto ao surgimento das mais comuns deteriorações (trincas por fadiga e deformações permanentes nas trilhas de roda), prevendo assim os danos acumulados ao longo do período de projeto (Fernandes Jr., 1994; Fontenele, 2011).

A análise do pavimento através do método empírico-mecanístico parte de uma estrutura pré-dimensionada. Com o auxílio de recursos computacionais, as respostas estruturais são determinadas e, através delas, são calculados os danos acumulados durante a vida útil da via. Isso permite estimar e comparar o comportamento do pavimento com os critérios de desempenho estabelecidos para a vida em serviço. Caso estes critérios não sejam obedecidos, é necessário variar os parâmetros de projeto definidos, como as espessuras e as propriedades dos materiais das camadas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), até que a condição ideal seja obtida (Fernandes Jr., Paes, Pereira, 2007; Fontenele, 2011). Assim, este trabalho tem como objetivo investigar o efeito que a variação de certos parâmetros usados em projeto (espessuras do revestimento, da base e da sub-base) acarreta nas respostas estruturais do pavimento flexível, bem como na previsão do seu desempenho.

2 • MÉTODO EMPÍRICO-MECANÍSTICO DA AASHTO

A partir de uma pesquisa do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), patrocinada pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), foi desenvolvido em 2004 o projeto 1-37 A. No projeto foi apresentado um novo método, de base empírico-mecanística, para o dimensionamento de pavimentos novos e reabilitados (AASHTO, 2008). O método ficou conhecido inicialmente como AASHTO 2002, fazendo parte do pacote um software computacional, conhecido como MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*). No novo mé-

todo a forma de caracterização do tráfego foi modificada, sendo então feita a partir da consideração dos espectros de carga por eixo (*Axle Load Spectra*).

Segundo Haider e Harichandran (2007), os espectros de carga por eixo consistem em informações de carga por eixo e de suas repetições para várias configurações (eixos simples, tandem duplos e triplos), sendo então usados para criar distribuições que representem as cargas dos eixos e as variações a elas associadas. Desta forma, é possível esboçar os dados necessários de tráfego de uma maneira mais fiel ao existente em campo.

Assim, o programa MEPDG, inserido no guia de dimensionamento da AASHTO, analisa, a partir de método empírico-mecânico, o desempenho da estrutura de um pavimento mediante critérios pré-estabelecidos. Verificando um comportamento indesejado, a conformação da estrutura é reavaliada a partir de variações nos parâmetros de projeto, de forma a buscar sua adequação. O procedimento é repetido até que a condição desejada seja alcançada. O software também se utiliza de uma aproximação hierárquica na incorporação das variáveis de entrada, em função da importância do projeto e da disponibilidade dos dados, o que permite ao projetista uma maior flexibilidade. Tal aproximação se refere aos dados de tráfego, materiais e meio ambiente. A Figura 1, adaptada da NCHRP (2004), apresenta um fluxograma que exemplifica sucintamente as etapas de manuseio dos dados e a maneira como estes são interpretados pelo método da AASHTO.

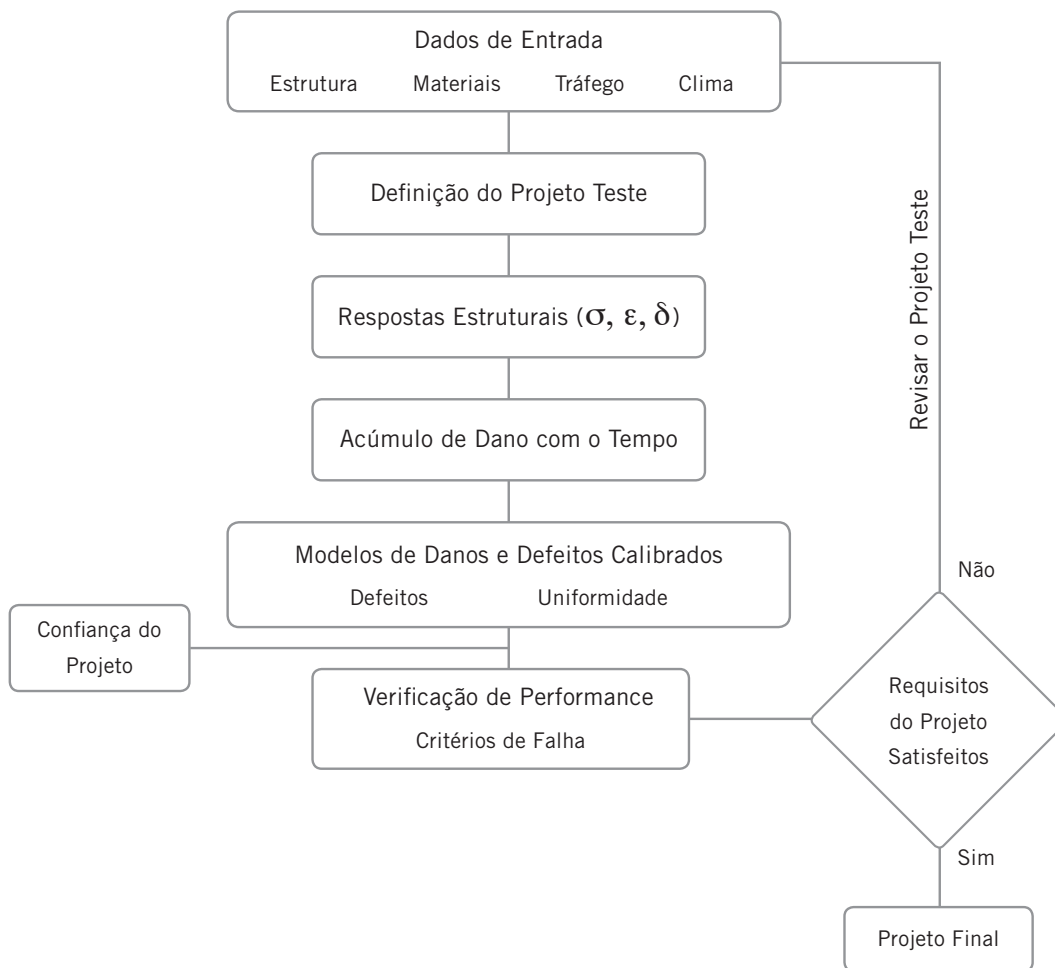


Figura 1 - Fluxograma representando o método da AASHTO

Fonte: Adaptado de NCHRP (2004).

Análise de Sensibilidade

A partir dos resultados obtidos com o MEPDG, é possível conduzir uma análise de sensibilidade para verificar os efeitos da variação dos parâmetros no comportamento dos pavimentos ao longo de sua vida em serviço. De acordo com Schwartz *et al* (2013), uma análise de sensibilidade é a distribuição da variabilidade dos dados de saída de um modelo para os seus diversos dados de entrada. Ainda segundo os autores, um conjunto rico e poderoso de técnicas formais e rigorosas para realização da análise de sensibilidade foi desenvolvido ao longo dos últimos 25 anos, podendo ser classificados de diferentes maneiras, como análises locais de sensibilidade ou métodos globais de análise. Seu trabalho foca na análise global de sensibilidade de pavimentos flexíveis para dados de projeto do MEPDG sob cinco condições climáticas e três níveis de tráfego. Os resultados encontrados apontam para o fato de que um dos dados de projeto mais consistentes nas categorias de sensibilidade para todos os defeitos foi a espessura do revestimento asfáltico. As trincas por fadiga e as longitudinais também apresentaram sensibilidade com relação à espessura da base.

Shahji (2006) avaliou a sensibilidade dos parâmetros de dimensionamento de pavimentos flexíveis e rígidos com base nos resultados do MEPDG. A análise foi realizada alterando um parâmetro de cada vez, mantendo todos os outros constantes. Em sua pesquisa, o autor variou as espessuras em seis valores dentro de uma faixa: do revestimento entre 5 cm e 17,5 cm (2 a 7 pol); da base entre 12,5 cm e 25 cm (5 a 10 pol) e de sub-base entre 17,5 cm e 30 cm (7 a 12 pol). A partir disso, ele verificou que houve uma maior influência da variação das espessuras do revestimento para a ocorrência dos defeitos.

No trabalho, o autor afirma que o modelo de trincas no revestimento do tipo *up-down* são menos sensíveis a todos os parâmetros de projeto por ele considerados (tráfego, espessuras e módulos de elasticidade), mas são muito sensíveis à variação da espessura do revestimento asfáltico. Foi observado também que as trincas por fadiga do tipo *bottom-up* são mais influenciadas pelos parâmetros de tráfego (VDMA) e espessura do revestimento asfáltico e têm pouco efeito pelos outros parâmetros de projeto, como espessura da sub-base e módulo de elasticidade do subleito. A deformação permanente nas trilhas de rodas na camada de revestimento é mais influenciada pelo volume de tráfego e pela espessura do mesmo.

E, de forma surpreendente, os resultados da pesquisa de Shahji (2006) levaram à conclusão que as mudanças nas propriedades da base, sub-base e subleito não têm muito impacto na deformação do pavimento, o que o autor salienta como “não muito realista”. Com relação à deformação permanente total do pavimento, foi percebido que a maior influência era devido ao tráfego e à espessura da camada asfáltica. O autor conclui, por fim, que o desempenho do pavimento depende da combinação de espessuras de camada asfáltica e do módulo de subleito usados para o projeto.

MÉTODO

O procedimento desenvolvido nesta pesquisa teve início com a determinação dos parâmetros de projeto a serem variados. Definiu-se para a análise a variação das espessuras das camadas do pavimento (revestimento, base e sub-base), como forma de investigar a influência das mesmas com relação às respostas estruturais e, por conseguinte, ao desempenho do pavimento. Posteriormente foram definidos os dados de entrada no programa computacional MEPDG, bem como a determinação dos critérios de desempenho da estrutura analisada.

Estruturas de Pavimento

As estruturas de pavimento utilizadas nesta pesquisa são apresentadas nas Tabelas 1 a 5.

Tabela 1 - Espessuras das camadas, Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson.

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson
1	7,5; 10,0; 12,5; 15,0	4.000	0,30
2	15,0; 17,5; 20,0; 22,5	400	0,40
3	20,0; 22,5; 25,0; 27,5	200	0,40
Subleito	∞	70	0,45

Tabela 2 - Características da Camada 1 (revestimento)

Camada 1								
Distribuição Granulométrica			Ligante Asfáltico		Vol. de vazios	Densidade da Mistura	Condutividade Térmica do Asfalto	Capacidade de Calor do Asfalto
Faixa C - DNIT								
#	% RA	% PA	Tipo	Teor (%)	(%)	Kg/cm ³ (pcf)	BTU/hr-tf-F°	BTU/lb-F°
3/4"	0	-	CAP 60-70	6	4	2,5 (142)	0,67	0,23
3/8"	20	-						
n° 4	42	-						
n° 200	-	6						

É importante ressaltar que para todas as camadas foi adotado o nível 3 do MEPDG, o qual é considerado como o de menor precisão, sendo utilizados dados médios da região de coleta. Para parâmetros não especificados acima, foram utilizados dados padrões do programa.

Tabela 3 - Características da Camada 2 (base).

Camada 2					
Distribuição granulométrica		Base			Coeficiente de pressão Lateral
Faixa C - DER/SP					
#	% PA				
n° 4	50	Granular	Brita graduada simples	Compactada	0,5
n° 200	10				

Tabela 4. Características da Camada 3 (sub-base).

Camada 3		
Sub-base		Coeficiente de pressão Lateral
Solo A-2-6	Compactada	0,5

Tabela 5 - Características da Camada 4 (subleito).

Camada 4		
Subleito		Coeficiente de pressão Lateral
Solo A-7-6	Não compactado (natural)	0,5

Tráfego

Os dados de tráfego foram considerados como nível 1, ou seja, o de maior precisão e aquele que é usado para o dimensionamento de pavimentos onde as consequências de um colapso precoce podem ser significativas. Foram inseridos no programa valores locais como distribuição de veículos por classe do volume diário médio anual de tráfego (VDMA), fator de crescimento linear, espectros de carga por eixo e número de eixos por caminhão.

Os espectros adotados, relativos à carga por eixo, foram aqueles desenvolvidos no trabalho de Fontenele (2011). Os dados correspondentes aos veículos utilizados para a elaboração dos mesmos pertenciam ao posto de pesagem localizado no km 28 da Rodovia dos Imigrantes; os quais foram coletados de Janeiro a Dezembro de 2008, com pesagens realizadas durante 24 horas por dia. O tráfego observado na via foi composto por sete classes de veículos comerciais. As classes, segundo as classificações do DNIT (2005), eram: 2C, 3C, 2S1, 2S2, 2S3, 3S3 e 3D4. As frequências relativas a cada uma delas na via foram: 8,72%; 7,41%; 8,41%; 11,18%; 27,40%, 13,32% e 23,56%.

O VDMA do tráfego utilizado para o ano base de 2009 estava disponível no site do DER-SP, segundo dados fornecidos pela Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transportes do Estado de São Paulo (ARTESP). Esse volume de tráfego foi obtido a partir de contagens na praça de pedágio do km 32,381 (Piratininga – sentido Sul), da Rodovia SP-160, e por sensor de tráfego no sentido contrário, no Km 38,04 (Piratininga - sentido norte). Assim, no ano de 2009 o VDMA verificado foi igual a 10.993 veículos/dia. Nos demais anos de projeto (de 2009 a 2028) o volume de tráfego de cada ano foi calculado considerando uma taxa de crescimento do tráfego de 4% ao ano. A velocidade utilizada foi a padrão do programa, ou seja, de, aproximadamente, 100 km/h. A pressão de enchimento dos pneus considerada foi de 120 psi (844 kPa).

Clima

Foi considerada a condição climática de Orlando (Flórida - EUA), em função da similaridade dos índices pluviométricos da região onde se encontra a Rodovia dos Imigrantes. Em média, tal índice é de aproximadamente 1.317 mm de chuva por ano. A profundidade do lençol freático foi de 10 m.

Critérios de Desempenho do Pavimento

O nível de confiança (segurança) considerado para todos os critérios foi de 90%, uma vez que, conforme é proposto pela NCHRP (2004), o nível de confiança para restaurações e pavimentos novos nas vias interestaduais e nas *Freeways* em áreas urbanas deve estar entre 85 e 97% e em áreas rurais entre 80 e 95%.

Os critérios de desempenho considerados são: Irregularidade longitudinal inicial (IRI_{ini}) com valor igual a, aproximadamente, 1 m/km (63 in/mi), onde geralmente o valor ideal para pavimentos novos é de 0,79 a 1,18 m/km (50-75 in/mi); Irregularidade longitudinal final (IRI_{final}) igual a 4 m/km (172 in/mi); Trincas longitudinais *up-down* de 189 m/km (1000 ft/mi); Trincas por fadiga classe 3 *bottom-up* igual a 25%; trincas transversais térmicas igual a 189 m/km (1000 ft/mi), Afundamento nas trilhas de rodas no CBUQ igual a 6,35 mm (0,25 in) e Afundamento nas trilhas de roda do pavimento todo igual a 19,5 mm (0,75 in).

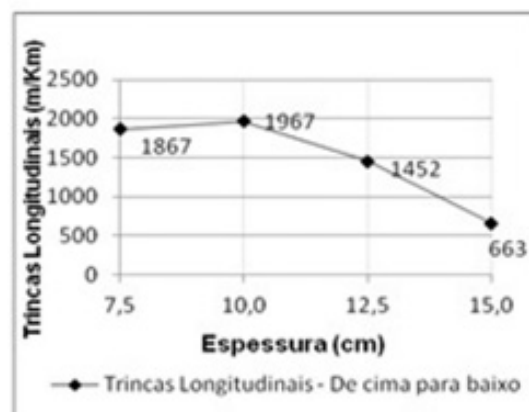
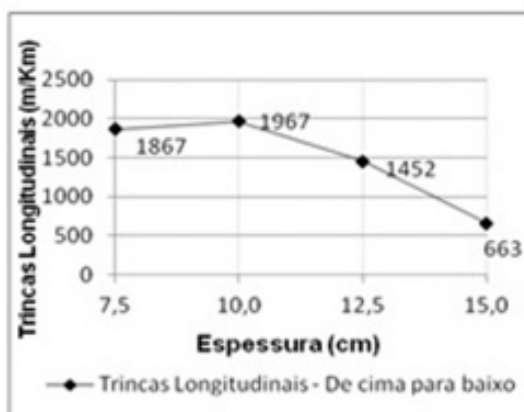
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das curvas de desempenho geradas pelo MEPDG, com a variação da espessura das camadas, foi possível desenvolver uma análise de sensibilidade. Tal análise foi realizada alterando a espessura de cada uma das camadas por vez, mantendo as outras constantes. Vale ressaltar que os valores de referência, que se mantiveram fixos quando da variação de cada uma das espessuras das camadas, foram de 12,5 cm (5 pol) para o revestimento, 20 cm (8 pol) para a base e 25 cm (10 pol) para a sub-base. Logo, ao se variar a espessura do revestimento, as espessuras de base e sub-base se mantiveram inalteradas, conforme os valores citados. Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados os gráficos gerados a partir dos valores previstos para o 20º ano de projeto. Pode ser observado que todos os valores apresentados ultrapassaram o limite de projeto, exceto os relativos à IRI. A estrutura não foi alterada de forma a buscar a adequação em termos de critérios máximos de projeto, tendo em vista que o objetivo desta pesquisa era apenas de verificar a sensibilidade à variação dos parâmetros de projeto.

Inicialmente a análise foi feita para a variação da espessura da Camada 1 (correspondente ao revestimento asfáltico) de 7,5 a 15,0 cm. Nessa conformação estrutural, a base possui 20,0 cm e a sub-base 25,0 cm. Os resultados quanto a essa variação são apresentados na Figura 2.

Para as trincas longitudinais (de cima para baixo) é possível verificar que o defeito atinge o ponto de máximo para a espessura de revestimento de 10,0 cm, ou seja, 1.967 m/km. À medida que se aumenta a espessura da camada, ocorre uma redução do defeito, atingindo um valor mínimo de 663 m/km para a espessura de 15,0 cm. A variação de cerca de 66% do valor mínimo em relação ao máximo revela que o defeito é sensível à variação de espessura da camada. As trincas por fadiga (de baixo para cima), da mesma forma, sofrem uma redução de valores com o aumento da espessura da camada, apresentando um máximo de 81,1% para 7,5 cm e um mínimo de 35% para 15,0 cm. A redução corresponde é igual a 57%, o que indica que o defeito também é sensível à variação de espessura do revestimento.

As deformações permanentes (apenas no revestimento) atingem seu ponto de máximo (20 cm) para a espessura do revestimento de 7,5 cm. Com o aumento da espessura da camada para 15,0 cm é prevista uma deformação de 14,5 mm (ponto mínimo). A redução de 27,5% mostra que o defeito em questão é sensível à variação da espessura. Já com relação às deformações permanentes em todo o pavimento, é apresentada uma redução do defeito ao se aumentar a espessura do revestimento. Tem-se o valor máximo de 40 mm para 7,5 cm de espessura do revestimento e o valor mínimo de 33 mm para 15,0 cm da camada. Há, então, para as deformações em todo o pavimento uma redução de 17,5%, o que mostra certa sensibilidade do defeito em função da variação da espessura da camada.



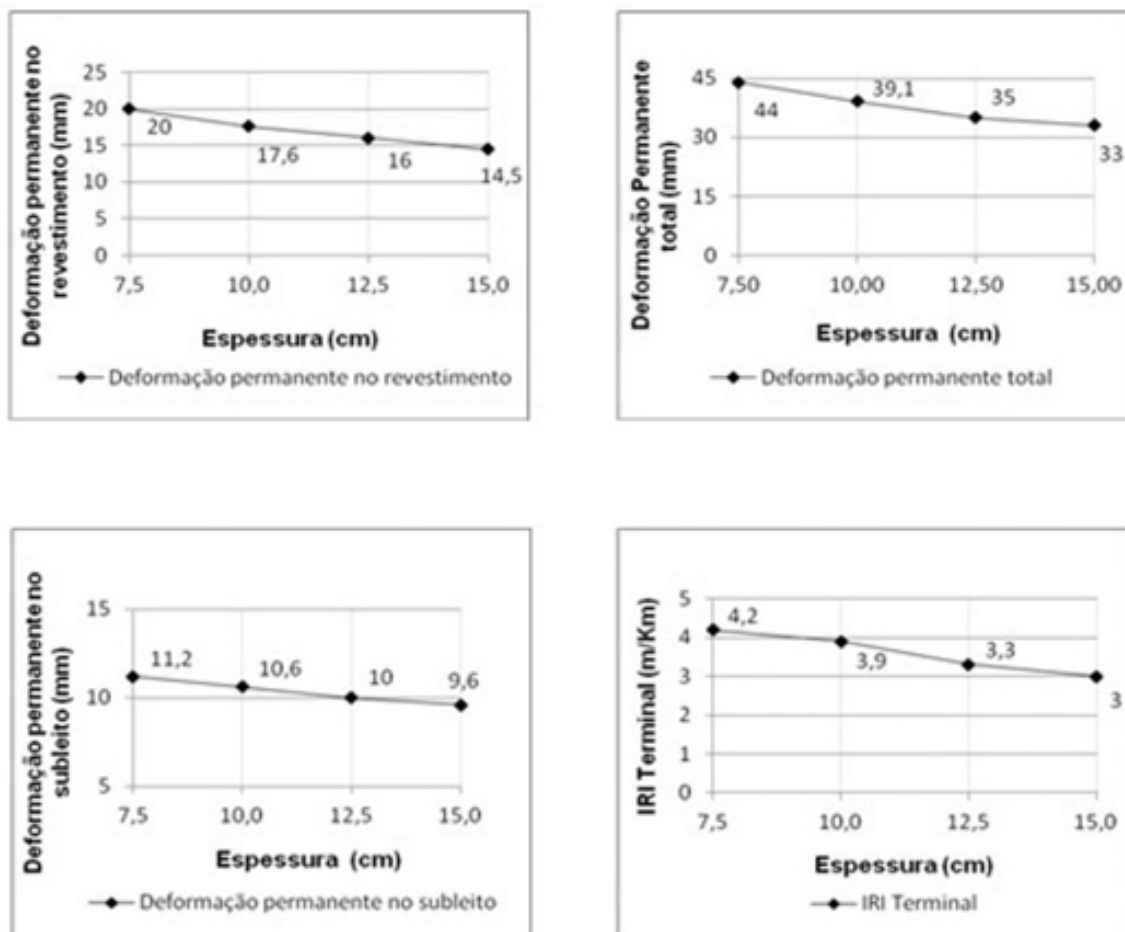


Figura 2 - Variação das medidas relativas às deteriorações analisadas para a variação da espessura do revestimento.

Da mesma forma, a deformação permanente apenas no subleito apresenta uma redução com o aumento da espessura do revestimento, havendo uma variação de 14,3% entre os extremos. O Índice de Irregularidade Internacional (IRI) apresentou valor máximo de 4,2 m/km para a espessura de 7,5 cm do revestimento e mínimo de 3 m/km para 15,0 cm do revestimento. Essa redução de cerca de 29% indica que a irregularidade longitudinal é sensível à variação da espessura da camada.

A segunda análise foi feita para a variação da espessura da Camada 2 (base de brita graduada simples), numa faixa de 15,0 a 22,5 cm. Em tal conformação estrutural, o revestimento possui 12,5 cm e a sub-base 25,0 cm. Os resultados quanto a essa variação são apresentados na Figura 3.

É possível verificar que o defeito do tipo trincas longitudinais (de cima para baixo) atinge seu ponto de máximo para a espessura de base de 15,0 cm, ou seja, 1.908 m/Km. À medida que a espessura da base aumenta, ocorre uma redução do defeito, atingindo um valor mínimo de 1.266 m/Km para a espessura de 22,5 cm. A variação de cerca de 34% do valor mínimo em relação ao máximo revela que o defeito é sensível à variação de espessura da camada. As trincas por fadiga (de baixo para cima), da mesma forma, sofrem uma redução de valores com o aumento da espessura da camada, apresentando um máximo de 56% para 15,0 cm e um mínimo de 47,8% para 22,5 cm. A redução corresponde a uma porcentagem de cerca de 15%, o que indica que o defeito não é tão sensível quanto às trincas longitudinais à variação de espessura da base.

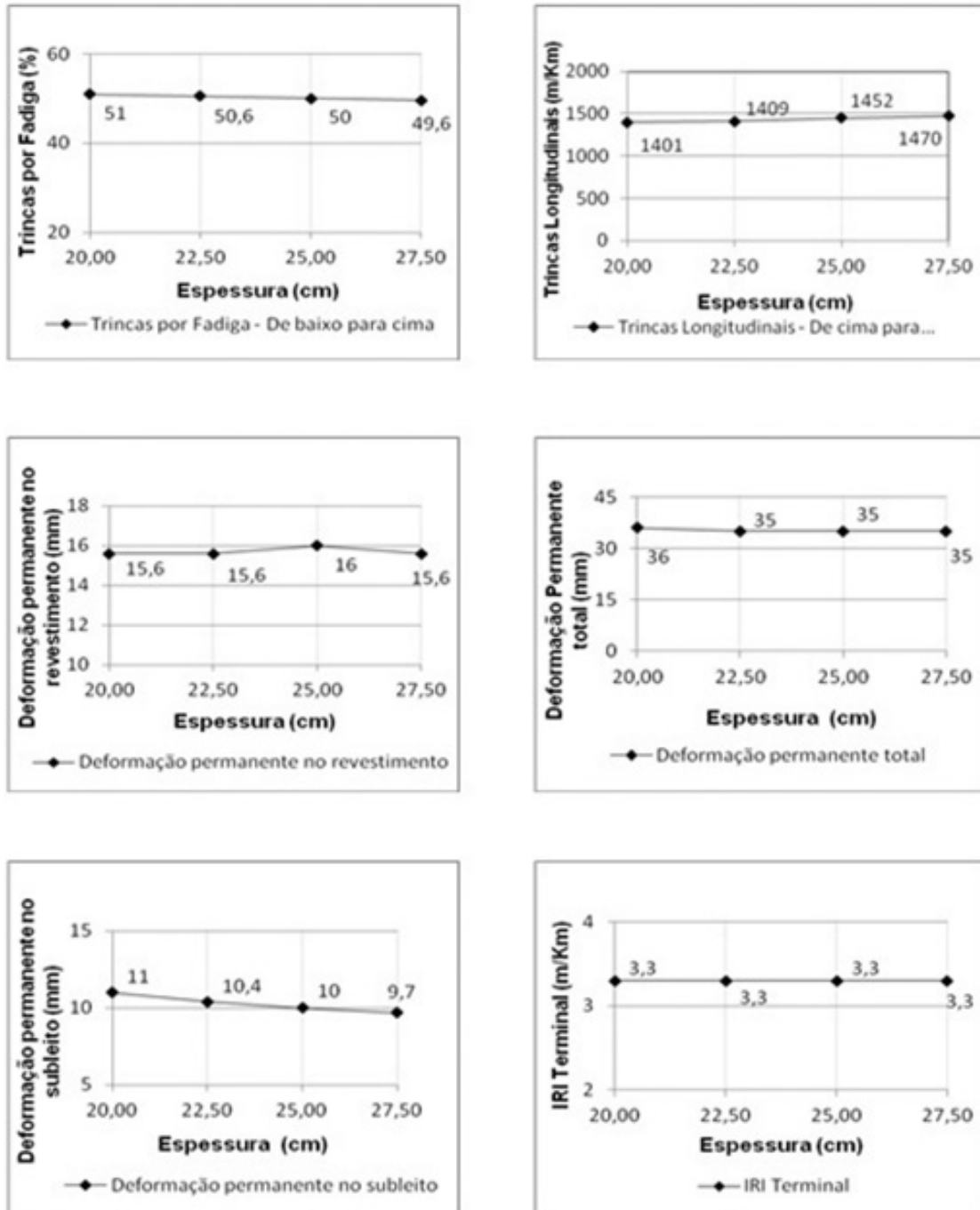


Figura 3 - Variação das medidas relativas às deteriorações analisadas para a variação da espessura da base.

As deformações permanentes apenas no revestimento atingem seu ponto de máximo (16 mm) para as espessuras da base de 15,0 cm e 20,0 cm. Com essa situação de variação, cujo defeito mínimo é de 15,3 mm para a espessura de 17,5 cm e a redução com relação ao máximo é de 3,75%, é possível constatar que o defeito é pouco sensível à variação da espessura da base. Já com relação às deformações permanentes em todo o pavimento, é apresentada uma redução do defeito ao se aumentar a espessura da base. Tem-se o valor máximo de 36 mm para 15,0 cm de espessura do revestimento e o valor mínimo de 35 mm para 22,5 cm da camada. Há, então, para as deformações em todo o pavimento uma redução de 2,8%, o que expressa quase nenhuma sensibilidade do defeito em função da variação da espessura da camada. O mesmo ocorre com a deformação apenas no subleito, havendo uma variação de 11,8% entre os extremos.

O Índice de Irregularidade Internacional (IRI) apresentou valor máximo de 3,4 m/km para a espessura de 15,0 cm do revestimento e mínimo de 3,2 m/km para 22,5 cm da base. Essa redução de cerca de 6% indica que a irregularidade longitudinal também não é tão sensível à variação da espessura da camada.

A terceira e última análise foi feita para a variação, numa faixa de 20,0 a 27,5 cm da espessura da Camada 3 (sub-base de solo A-2-6). Em tal conformação estrutural, o revestimento possui 12,5 cm e a base 20,0 cm. Os resultados quanto a essa variação são apresentados na Figura 4.

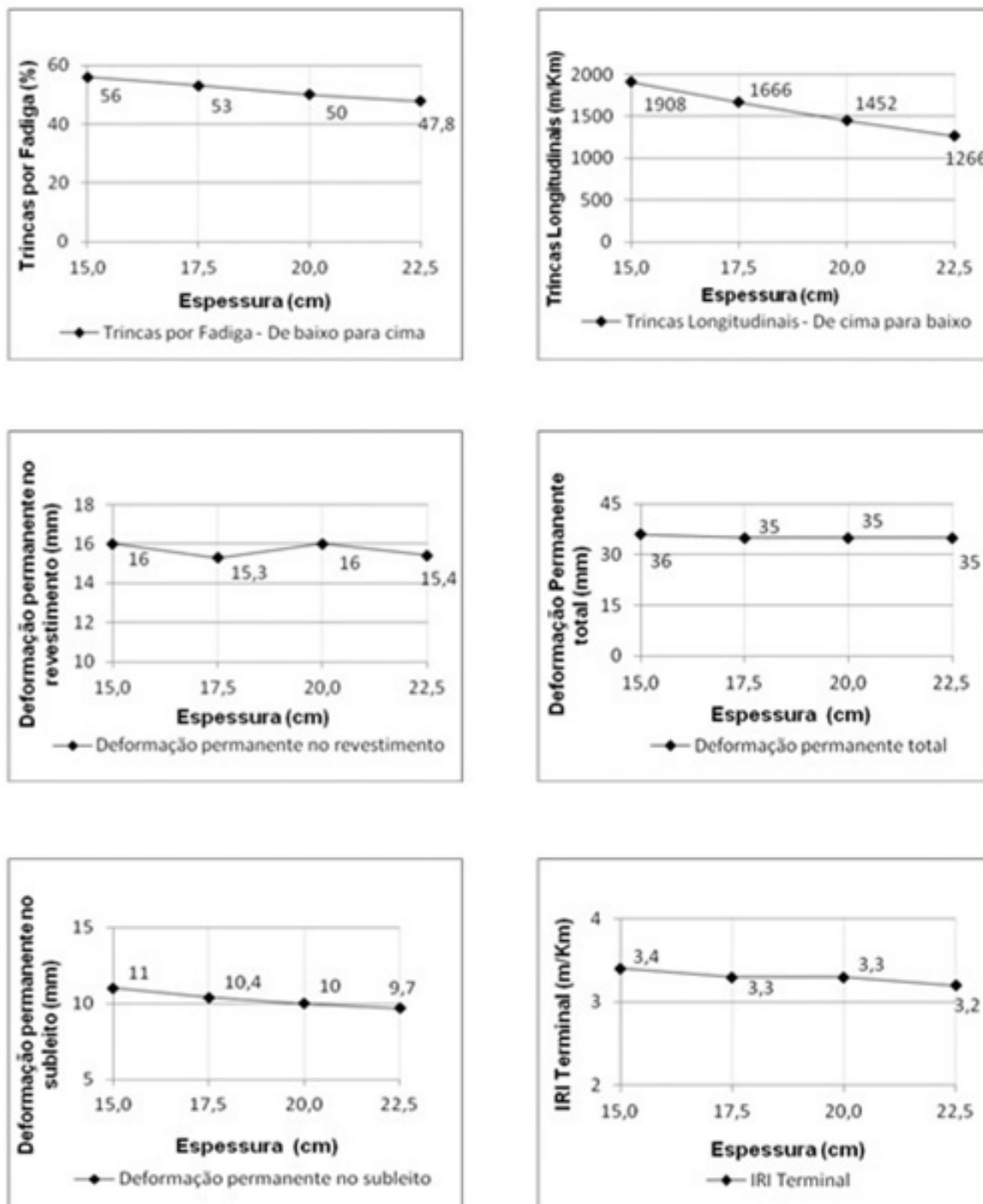


Figura 4 - Variação das medidas relativas às deteriorações analisadas para a variação da espessura da sub-base.

Na Figura 4 é possível verificar que o defeito do tipo trincas longitudinais (de cima para baixo) atinge seu ponto de máximo para a espessura de sub-base de 27,5 cm, ou seja, 1470 m/km. À medida que aumenta a espessura da camada, ocorre um aumento do defeito, cujo valor mínimo é de 1401 m/km para a espessura de 20,0 cm. Foi verificado que houve uma variação de cerca de 5% do valor mínimo em relação ao máximo, revelando que o defeito não é tão sensível à variação de espessura da camada. As trincas por fadiga (de baixo para cima) sofrem uma redução de valores com o aumento da espessura da camada, apresentando um máximo de 51% para 20,0 cm e um mínimo de 49,6% para 27,5 cm. A redução corresponde a uma porcentagem de cerca de 2,7%, o que indica que o defeito é pouco sensível à variação de espessura da sub-base.

As deformações permanentes apenas no revestimento atingem seu ponto de máximo (16 mm) para a espessura da sub-base de 25,0 cm. O valor mínimo atingido (15,6 mm) permaneceu igual para todas as outras variações de espessura. Tal situação reflete que o defeito não é sensível à variação da espessura da camada, visto também que a diferença entre os valores em porcentagem é de 2,5%. Já com relação às deformações permanentes em todo o pavimento, é apresentada uma redução do defeito ao se aumentar a espessura da sub-base de 20,0 a 22,5 cm. Tem-se o valor máximo de 36 mm para 20,0 cm de espessura da sub-base e o valor mínimo de 35 mm para 22,5 cm da camada, permanecendo constante para todas as outras variações. Há, então, para as deformações em todo o pavimento uma redução de 2,8%, o que expressa nenhuma sensibilidade do defeito em função da variação da espessura da camada. Da mesma forma que para todo o pavimento, a deformação somente no subleito sofre uma redução com o aumento da espessura da camada, havendo uma variação considerável de 11,8% entre os valores extremos.

O Índice de Irregularidade Internacional (IRI) apresentou valor constante de 3,3 m/km para todas as espessuras de sub-base. Esse resultado demonstra que a irregularidade longitudinal não é sensível à variação da espessura da camada.

CONCLUSÕES

A partir da análise realizada foi possível verificar que a ocorrência dos defeitos trincas longitudinais e trincas por fadiga são bem mais sensíveis quando se varia a espessura do revestimento asfáltico. Também houve certa sensibilidade quando a espessura da base foi variada, entretanto, em menor magnitude, havendo ainda uma diminuição de sensibilidade do defeito trincas por fadiga quando comparado às trincas longitudinais. Vale ressaltar que tais defeitos pouco foram influenciados com a variação da espessura da sub-base.

Já com relação às deformações permanentes, é possível verificar que a deformação apenas no revestimento apresentou maior sensibilidade com a variação da espessura do revestimento e, quase nenhuma, com as da base e sub-base. Tal situação também ocorreu para a deformação em todo o pavimento, porém apresentando uma menor sensibilidade à variação da espessura do revestimento quando comparada à deformação apenas no revestimento e no subleito. Para o IRI, foi constatada uma maior sensibilidade apenas com a variação da espessura do revestimento, sendo muito pouco influenciado pelas variações relacionadas à base e nenhuma pela da sub-base.

Alguns dos resultados do presente trabalho diferem daqueles apresentados por Shahji (2006). Em sua análise de sensibilidade, Shahji (2006) constatou que o aumento da espessura do revestimento só produz uma queda nas formações de trincas de cima para baixo após a espessura de 15,0 cm, bem como nas trincas de baixo para cima após a espessura de 10 cm. Tal discordância pode ser explicada pelo fato do autor ter utilizado algumas características diferentes, como, por exemplo, o tráfego e os materiais. De forma semelhante, entretanto, o presente trabalho verificou que as variações da espessura da base e sub-base contribuem pouco para o surgimento desse tipo de deterioração. Outro aspecto semelhante foi com relação às deformações permanentes, sendo essas mais influenciadas pela variação da espessura do revestimento.

Diante do exposto, em termo de variação de espessuras é possível constatar que, independentemente das conformações de base e sub-base, a espessura do revestimento foi o parâmetro que mostrou ter o maior efeito, principalmente no que se refere ao defeito trincas. Em relação às trincas longitudinais, percebe-se um ponto de máxima deterioração para a espessura de 10 cm, enquanto que, para as trincas por fadiga do revestimento, os valores máximos ocorrem entre 5 e 7,5 cm.

Confirmam-se, assim, as evidências de estudos anteriores, inclusive os que levaram à adoção, há muito tempo, por parte da AASHTO (1986), de espessura mínima de 12,5 cm para o revestimento asfáltico de rodovias com tráfego médio, ou seja, correspondente a um número de aplicações do eixo-padrão relativamente baixo ($>5 \times 10^6$). Infelizmente, no Brasil, todas as evidências relacionadas à importância da espessura da camada de revestimento asfáltico têm sido ignoradas, com adoção de valores que, se representam alguma economia no custo de construção, resultam em custos altíssimos de manutenção e reabilitação e, mais ainda, de operação de veículos ao longo da vida em serviço.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária pelo auxílio financeiro à pesquisa (Chamada 14/2011 - Protocolo nº 24685).

Referências Bibliográficas

- AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D. C., 1986.
- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A manual of practice. Interim edition*. Washington, D. C., 2008.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. *Manual de Projeto de Intersecções*. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L. *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos*. 1994. 293 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 1994.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. *Avaliação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis portugueses e brasileiros*. *Revista Pavimentação*, Ano II, n.5, PP.28-38. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, Rio de Janeiro, 2007.
- FONTENELE, B. H. *Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.
- HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. *Characterizing axle load spectra by using gross vehicle weights and truck traffic volumes*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C. 2007.
- NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report NCHRP 1-37 A. Champaign, Illinois, 2004.
- SCHWARTZ, W. C.; LI, R.; CEYLAN, H.; KIM, S.; GOPALAKRISHNAN, K. *Global Sensitivity Analysis of Mechanistic-Empirical Performance Predictions for Flexible Pavements*. *Transportation Research Board*. TRB 2013 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C. 2013.
- SHAHJI, S. *Sensitivity Analysis of AASHTO's 2002 Flexible and Rigid Pavement Design Methods*. 2006. Master of Science in the Department of Civil & Environmental Engineering – College of Engineering and Computer Science – University of Central Florida. Orlando, Florida, 2006. 📍



CONSIDERAÇÕES SOBRE O DIMENSIONAMENTO DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO NO BRASIL E SUA RELAÇÃO COM A DEGRADAÇÃO PREMATURA DE PAVIMENTOS

Alvaro Vieira¹

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco²

Carlos Filipe Santos Correia e Silva³

¹ Instituto Militar de Engenharia - IME

² Centro de Estudos e Projetos de Engenharia da Aeronáutica - CEPE

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

RESUMO

O Tribunal de Contas da União – TCU, em relatório divulgado em março de 2014, apontou deficiências estruturais em nove de onze rodovias inspecionadas, pouco tempo após terem sido construídas. Com uma média de tempo de 7 meses após a entrega, as nove obras já apresentavam deformações permanentes, trincas e fissuras, e nem de perto tinham potencial para durar os 10 anos exigidos nos contratos. Veículos com excesso de carga, emprego de materiais inadequados, execução deficiente e falhas na supervisão da obra têm sido os argumentos mais comumente usados para justificar a reduzida vida útil da maioria dos pavimentos. Falhas de projeto raramente são ventiladas. O presente artigo apresenta uma análise dos critérios de dimensionamento de pavimentos asfálticos adotados por países mais desenvolvidos, comparando-os com os critérios adotados no Brasil. Comparando-se os resultados obtidos para um mesmo tráfego solicitante, observa-se que o procedimento brasileiro resulta numa espessura do revestimento significativamente inferior às obtidas pelos métodos estrangeiros. Conclui-se pela necessidade de desenvolvimento de estudos sobre os critérios de dimensionamento de pavimentos no Brasil, com vistas a esclarecer as razões dessa diferença, o que pode vir a esclarecer as causas da prematura deterioração das nossas obras.

Palavras-chave: pavimentos asfálticos; ruptura precoce; Sispav.

ABSTRACT

The Brazilian Court of Audit - TCU, in a report in March 2014, showed structural weaknesses in nine of eleven inspected roads, shortly after they were built. With an average time of 7 months after the delivery, the nine works already had rutting, cracks and potholes, and not nearly had the potential to last the 10 years required in the contracts. Vehicles with overweight loads, use of inappropriate materials, poor execution and lacking of work supervision have been the most common plea used to justify the reduced life of most pavements. Design flaws are rarely ventilated. This article presents an analysis of the design criteria of asphalt pavements adopted by developed countries, comparing them with the criteria adopted in Brazil. Comparing the results for the same requester traffic, it is observed that the Brazilian procedure results in a significantly lower layer thickness to those obtained by foreign methods. It concludes the needs of new research on asphalt pavement design criteria in Brazil, in order to clarify the reasons for this difference, which can come to clarify the causes of premature deterioration of our pavements.

Keywords: asphalt pavements, premature deterioration, Sispav.

1 • INTRODUÇÃO

A revista Exame na edição do dia 29/11/2014 (<http://exame.abril.com.br/topicos/tcu>) apresentou o resultado de um relatório técnico do TCU extremamente alarmante para o contribuinte em geral, mas particularmente preocupante para a comunidade técnica ligada à pavimentação. Trata-se da avaliação de 11 obras em rodovias federais, recentemente executadas, das quais 9 apresentaram deficiências gravíssimas, como a rodovia BR-316/MA, que apresentou 82,3% com defeitos após apenas 5 meses de tráfego e a rodovia BR-230/PA que apresentou 35,5% com problemas após 1 mês de concluída. A Tabela 1 resume os resultados do relatório.

Tabela 1 - Resultado da avaliação das obras

Rodovia	% com problemas	Há quanto tempo estava pronta	Custo da obra (10 ⁶ R\$)	Custo da restauração (10 ⁶ R\$)
BR-116/CE (km 420,7 ao km 478,2)	62,87%	6 meses	55	22,5
BR-116/MG (km 704,14 ao km 816,7)	5,32%	9 meses	118	3,7
BR-163/MT (km 836 ao km 899,3)	10,72%	13 meses	43	4,5
BR-230/MA (km 480,28 ao km 571,49)	35,5%	1 mês	152	20
BR-267/MS (km 124,18 ao km 185,38)	27,7%	6 meses	52	9,7
BR-267/MS (km 185,38 ao km 248,68)	22,2%	3 meses	44	8
BR-316/MA (km 0 ao km 320)	82,3%	5 meses	108	72
BR-356/RJ (km 146,5 ao km 187,7)	38,6%	9 meses	23,5	4,7
BR-356/RJ (km 34,7 ao km 98,6)	20,7%	8 meses	59	14

Segundo a citada publicação, a direção geral do DNIT, na época, reconheceu “*certa fragilidade*” na supervisão das obras, o que “... *pode ter acarretado riscos para a qualidade final dos serviços*”. Trata-se, evidentemente, de um diagnóstico simplório que não resiste à mais elementar análise técnica. Considerando que, pelas Especificações de Serviço do DNIT, o controle

tecnológico da obra é atribuição do executante (DNER-277/97 – PRO), fica irremediavelmente comprometida a eficácia da atuação da supervisora da obra como garantidora da qualidade dos serviços. Segundo essa norma, o controle da qualidade do serviço é feito através de ensaios e determinações de acordo com um “*Plano de Amostragem Aleatória*”, a ser definido pela construtora, onde o número de exemplares a serem coletados e o seu local de coleta são (inevitavelmente) definidos como “*aleatórios*”, dando margem a que o executante “escolha” e “selecione” quantas e quais amostras serão analisadas. Pode-se, por isso, inferir que, desde a implantação dessa norma, em 1997, dificilmente um serviço de pavimentação tenha sido rejeitado, particularmente aqueles que deveriam ter sido. Mas esse tema já vem merecendo as devidas críticas, há mais de quinze anos, e certamente continuará a merecê-las, neste mesmo fórum, até que essa norma seja devidamente revista e modificada pelo órgão competente, corrigindo essa anomalia da nossa normalização técnica.

Voltando ao tema das obras prematuramente deterioradas, é evidente que contribuíram para o seu fracasso todos os fatores citados na Introdução, com intensidades variadas, mas torna-se pouco razoável admitir-se que TODAS as construtoras contratadas para essas obras se esmeraram em fazer um trabalho de péssima qualidade. Pouco razoável é também admitir-se que em todas elas foram empregados insumos de baixa qualidade, quando se sabe que quase todos os materiais empregados nos serviços de pavimentação são industrializados (ligantes, agregados, aditivos, etc.) sujeitos a controles de qualidade cada vez mais rigorosos. O excesso de carga dos veículos, fartamente comprovado e reconhecido em nossas rodovias, por si só é insuficiente para justificar um insucesso tão prematuro como o ilustrado. Por isso, vários autores têm se dedicado a pesquisar outros fatores intervenientes nos processos de degradação precoce de pavimentos, como Wang e Al-Qadi (2010), de Beer (1994), Su et al. (2008) e Nunes et al. (2014), entre outros, todos abordando aspectos ainda pouco conhecidos, como a ruptura por cisalhamento nas fibras superiores do revestimento e modelos viscoelásticos de plastificação, como indicativo de deformações prematuras em pavimentos asfálticos. No entanto, os resultados preliminares têm mostrado - até agora - que os estados multiaxiais de tensões atuantes nos revestimentos raramente alcançam a envoltória de resistência dos modelos usuais de ruptura por cisalhamento.

Um aspecto pouco abordado nas análises de casos de deterioração precoce refere-se à verificação dos critérios de dimensionamento da espessura do revestimento. Afinal, desde o aparecimento dos métodos mecanicistas de dimensionamento de pavimentos na década de 70, assume-se que o trincamento por fadiga, iniciado na fibra inferior da camada de revestimento, é o mecanismo de degradação mais crítico. Entretanto, tem sido observado ultimamente defeitos prematuros em pavimentos flexíveis, como trincamentos que se originam na superfície do revestimento e deformações de trilha de roda por cisalhamento do revestimento, sem a contribuição das camadas inferiores e sem o comprometimento estrutural. Daí surgiu a curiosidade de se analisar os critérios adotados pelos países mais desenvolvidos para dimensionamento das camadas do pavimento, em particular da espessura do revestimento.

2 • METODOLOGIA DE ANÁLISE

Tomou-se por base os resultados disponíveis no relatório final do projeto COST 333 - *Development of New Bituminous Pavement Design Method (Forum of European National Highway Research Laboratories-FEHL)*, cujo objetivo foi de contribuir para o desenvolvimento de um novo método europeu unificado de projeto de pavimentos, levando em conta as peculiaridades do tráfego, das condições climáticas, dos materiais e dos modelos de análise de cada país. Para fins de comparação de resultados, foram aplicados também critérios consagrados não europeus de projeto de pavimentos, como o da AASHTO, do Asphalt Institute, entre outros. Nesse estudo, foram analisados os critérios de projeto e os modelos de desempenho adotados pelas instituições mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Instituições participantes da pesquisa

País	INSTITUIÇÕES EUROPEIAS	Código
Austria	Institute fur Straßenbau und Straßenerhaltung (ISTU)	AT
Bélgica	Belgian Road Research Centre (BRRC)	BE
Croácia	Civil Engineering Institute os Croatia (IGH)	HR
Dinamarca	Technical University (DTU)	DK
Finlândia	Technical Research Centre of Finland (VTT)	FI
França	Laboratoire Central des Ponts et Chaussée (LCPC)	FR
Alemanha	Bundesanstalt fur Straßenwesen (BAS) Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal (BUGH)	DE
Grécia	National Technical University of Athens (NTUA)	GR
Hungria	Institute for Transport Sciences Ltd (KTR)	HU
Islândia	Iceland Building Research Institute	IS
Irlanda	National Roads Authority (NRA)	IE
Itália	Università Degli Studi di Firenze	IT
Holanda	Dienst Weg-em Waterbouwkunde (DWW)	NL
Noruega	Norwegian Road Research Laboratory (NRRL)	NO
Polônia	Institute Badawczy Drog I Mostow	PL
Portugal	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)	PT
Romênia	Iptana-Search	RO
Eslovênia	Druzbazadrzavneeste	SI
Espanha	Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX) Universidad Politécnica de Madrid (UPM)	ES
Suíça	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (LAVOC)	CH
Suécia	Swedish Road and Transport Research Institute (VTI)	SE
Reino Unido	Transport Research Laboratory (TRL)	GB
País	INSTITUIÇÕES NÃO EUROPEIAS	Código
EUA	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	AA
	Asphalt Institute	AI
Reino Unido	Shell International Petroleum Company Limited	SH
	University of Nottingham	NT
Austrália	Australian Road Research Board (ARRB)	AU
Japão	Japan Road Association	JA
Nova Zelândia	National Roads Board	NZ
África do Sul	National Institute for Transportation and Road Research	SA

Os autores do estudo enviaram um questionário às instituições da Tabela 2, solicitando o dimensionamento de um pavimento considerando três casos hipotéticos de tráfego, com número $N_{AASHTO} = 10^6$, 10^7 e 10^8 , para o eixo padrão de 80 kN, e admitindo um subleito com CBR=5%. As camadas do pavimento deveriam ser dimensionadas levando em conta as propriedades dos materiais normalmente utilizados em cada país. Um resumo dos resultados obtidos na pesquisa está mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos

Pavimento projetado		Tráfego acumulado (N_{AASHTO})		
		10^6	10^7	10^8
Espessura do revestimento (mm)	Média	128	222	295
	Máxima	300	425	375
	Mínima	25	150	190
Espessura total do pavimento (mm)	Média	529	618	626
	Máxima	1030	1110	1050
	Mínima	210	280	330

Para fins de comparação, foram aplicados, no presente estudo, os critérios de projeto comumente adotados no Brasil, considerando um tráfego com $N_{USACE} = 4 \times 10^7$ (equivalentes a $N_{AASHTO} = 10^7$) e os parâmetros dos materiais mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros adotados no dimensionamento

Camada	Tipo de material	CBR	Módulo de Resiliência	Coef Poisson	Referência
Subleito	Solo argiloso	5%	$10,4 \times \text{CBR} = 52 \text{ MPa}$	0,45	Heukelom&Klomp (1962)
Sub-base	Solo laterítico	20%	$22 \times \text{CBR}^{0,8} = 241 \text{ MPa}$	0,40	IP-08 PMSP
Base	Brita Graduada Simples - BGS	-	400 MPa	0,35	
Revestimento	Concreto asfáltico (Faixa C-CAP 50/70)	-	3.500 MPa	0,35	Soares et al. (2000)

2.1 • Pré-dimensionamento do pavimento pelo Método DNER-81

R = 10 cm
 H₅ = 72 cm
 H₂₀ = 29 cm

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{20} \dots (10 \times 2) + (B \times 1) \geq 29 \dots B \geq 9 \dots B_{\text{adot}} = 15 \text{ cm}$$

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + H_{20} \cdot K_{SB} \geq H_5 \dots (10 \times 2) + (15 \times 1) + (H_{20} \times 0,77) \geq 72 \dots H_{20} \geq 48 \text{ cm}$$

Na Figura 1 está mostrado o pavimento obtido:

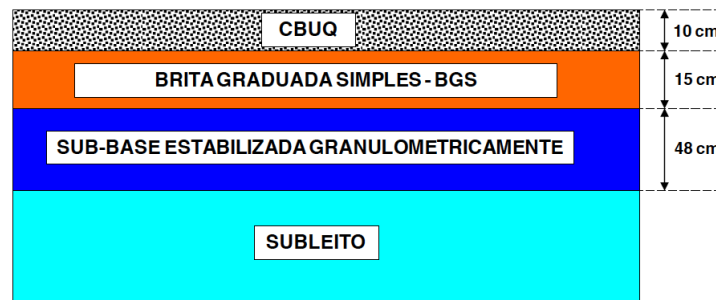


Figura 1 - Pavimento dimensionado pelo método DNER (1981)

Nas Figuras 3 e 4 estão indicadas as espessuras das camadas obtidas pelas diversas metodologias estrangeiras de dimensionamento, em comparação com as obtidas pelo método empírico brasileiro.

2.2 • Verificação mecânica da estrutura projetada.

Utilizando-se o programa AEMC (Sispav2007), foram calculadas as tensões e as deformações resultantes da solicitação do eixo padrão de 80 kN, mostradas na Tabela 5, admitindo-se aderência entre as camadas granulares e não aderência do revestimento com a base.

Tabela 5 - Tensões e deformações obtidas com o programa AEMC

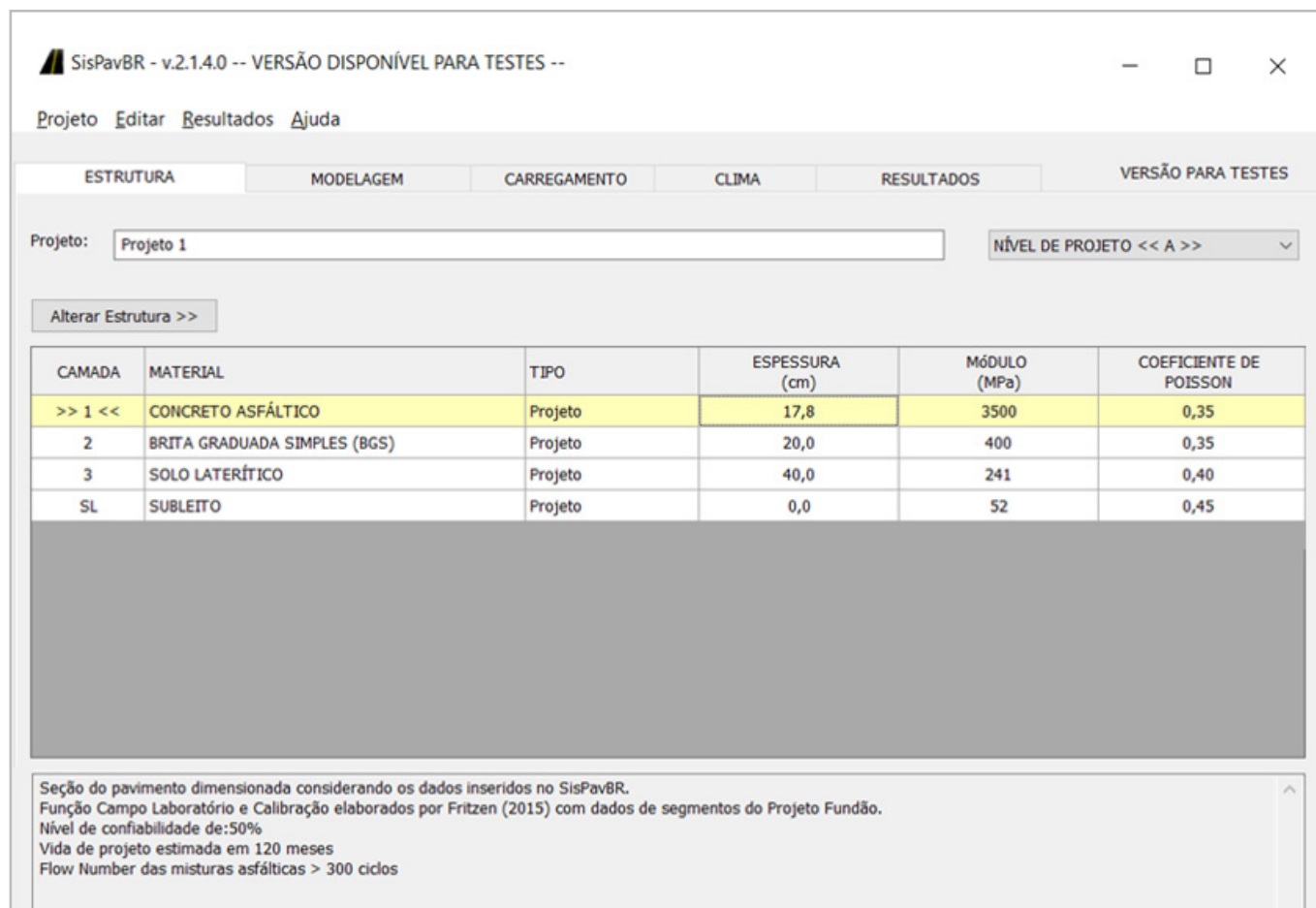
Parâmetro	R = 10 cm
Deflexão na superfície - D ₀ (10 ⁻² mm)	53
Deformação de tração na fibra inferior do revestimento – ε _t (m/m)	2,55 x 10 ⁻⁴
Deformação vertical no topo do subleito – ε _v (m/m)	3,30 x 10 ⁻⁴
Tensão vertical no topo do subleito – σ _v (kg/cm ²)	0,19

Na Tabela 6 estão mostrados os critérios mecânicos comumente adotados em projeto e os valores admissíveis de N obtidos em função das tensões e deformações calculadas. Nessa tabela, observa-se que alguns valores de N não atendem à solicitação de projeto, indicando o subdimensionamento do pavimento. Repetindo-se a análise para espessuras maiores do revestimento, conclui-se que a espessura mínima do revestimento de 15 cm atende a todos os critérios considerados, mantendo-se inalteradas as espessuras das demais camadas.

Se for aplicado o critério de fadiga do revestimento, segundo o modelo de Franco (2007), utilizando uma versão Beta do programa SispavBR, do mesmo autor, é possível obter-se a vida de projeto da estrutura, bem como a estimativa de área trincada do pavimento ao fim de sua vida útil. A versão Beta do SispavBR, ainda em testes, realiza uma nova forma de cálculo, onde se avalia a fadiga em 110 pontos distribuídos na camada asfáltica, adotando a calibração obtida por Fritzen (2016), que permite estimar a área trincada do pavimento, com base no dano de fadiga calculado.

Utilizando o recurso de dimensionamento da versão teste do programa SispavBR, a camada de revestimento encontrada para as condições do trabalho foi de 17,8 cm de espessura, a de base com 20 cm e a de sub-base com 40 cm, para um nível de confiabilidade de 50%. A Figura 2 apresenta a tela do programa SispavBR, com o resultado do dimensionamento.

Figura 2 - Tela de dimensionamento do programa SispavBR (versão para testes)



The screenshot shows the SispavBR software interface. The title bar reads "SispavBR - v.2.1.4.0 -- VERSÃO DISPONÍVEL PARA TESTES --". The menu bar includes "Projeto", "Editar", "Resultados", and "Ajuda". The main window has several tabs: "ESTRUTURA", "MODELAGEM", "CARREGAMENTO", "CLIMA", "RESULTADOS", and "VERSÃO PARA TESTES". The "ESTRUTURA" tab is active. Below the tabs, there is a "Projeto:" field with "Projeto 1" and a "NÍVEL DE PROJETO << A >>" dropdown menu. A button "Alterar Estrutura >>" is also present. The main area contains a table with the following data:

CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Projeto	17,8	3500	0,35
2	BRITA GRADUADA SIMPLES (BGS)	Projeto	20,0	400	0,35
3	SOLO LATERÍTICO	Projeto	40,0	241	0,40
SL	SUBLEITO	Projeto	0,0	52	0,45

Below the table, there is a text box with the following information:

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos no SispavBR.
Função Campo Laboratório e Calibração elaborados por Fritzen (2015) com dados de segmentos do Projeto Fundação.
Nível de confiabilidade de: 50%
Vida de projeto estimada em 120 meses
Flow Number das misturas asfálticas > 300 ciclos

Tabela 6 - Critérios mecanísticos de análise. (Considerando as camadas granulares aderidas e R=10 cm)

Critério	Parâmetro	Modelo adotado	Expressão	Valor solicitante	Valores admissíveis											
Fadiga do revestimento	Deflexão na superfície	DNER-PRO 11/79	$N_{USACE} = 10^{(17,102 - \frac{\log D_0}{0,176})}$	53	$2,0 \times 10^7$ USACE											
	D_0 (10^{-2} mm)	Pinto&Preussler (1994)	$N_{USACE} = 10^{(16,744 - \frac{\log D_0}{0,188})}$		$3,74 \times 10^7$ USACE											
	Deformação de tração na fibra inferior do revestimento ϵ_t (m/m)	AsphaltInstitute (1976)	$N_{AASHTO} = 1,092 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3,512}$	$2,55 \times 10^{-4}$	$4,55 \times 10^6$ AASHTO											
	Deformação vertical no topo do subleito ϵ_v (m/m)	Shell Oil (Domon&Metcalf)	$N_{USACE} = \left(\frac{\epsilon_v}{A}\right)^{1/B}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nível de confiança</th> <th>A</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50%</td> <td>0,028</td> <td>-0,25</td> </tr> <tr> <td>85%</td> <td>0,021</td> <td>-0,25</td> </tr> <tr> <td>95%</td> <td>0,019</td> <td>-0,21</td> </tr> </tbody> </table>	Nível de confiança	A	B	50%	0,028	-0,25	85%	0,021	-0,25	95%	0,019	-0,21	$3,30 \times 10^{-4}$
Nível de confiança	A	B														
50%	0,028	-0,25														
85%	0,021	-0,25														
95%	0,019	-0,21														
	AsphaltInstitute	$N_{AASHTO} = 1,365 \cdot 10^{-9} \cdot \epsilon_v^{-4,477}$	$5,27 \times 10^6$ AASHTO													
Ruptura do subleito	Tensão vertical no topo do subleito σ_v (kg/cm ²)	Heukelom e Klomp (1962)	$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \cdot M_R}{1 + 0,7 \log N}$ σ_{adm} (kg/cm ²) M_R (kg/cm ²) N (AASHTO)	$0,19 \text{ kg/cm}^2$ Tráfego: $N = 1 \times 10^7$ (AASHTO) Subleito: $CBR_{SL} = 5$ $MR_{SL} = 500$ kg/cm^2	$0,50 \text{ kg/cm}^2$											
		Yoder&Witzack (1975)	$\sigma_{adm} = 0,035 \cdot CBR^{1,5}$ σ_{adm} (kg/cm ²)		$0,40 \text{ kg/cm}^2$											

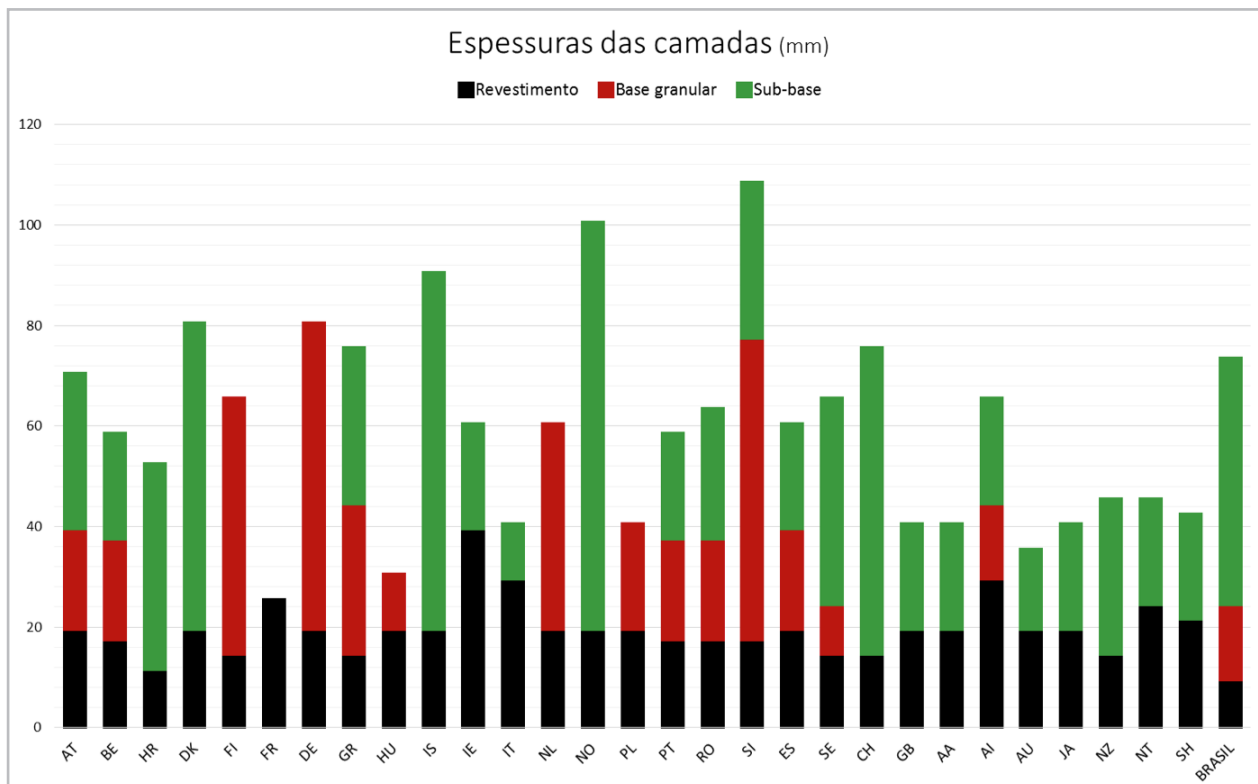


Figura 3 - Espessuras das camadas obtidas pelos diversos critérios

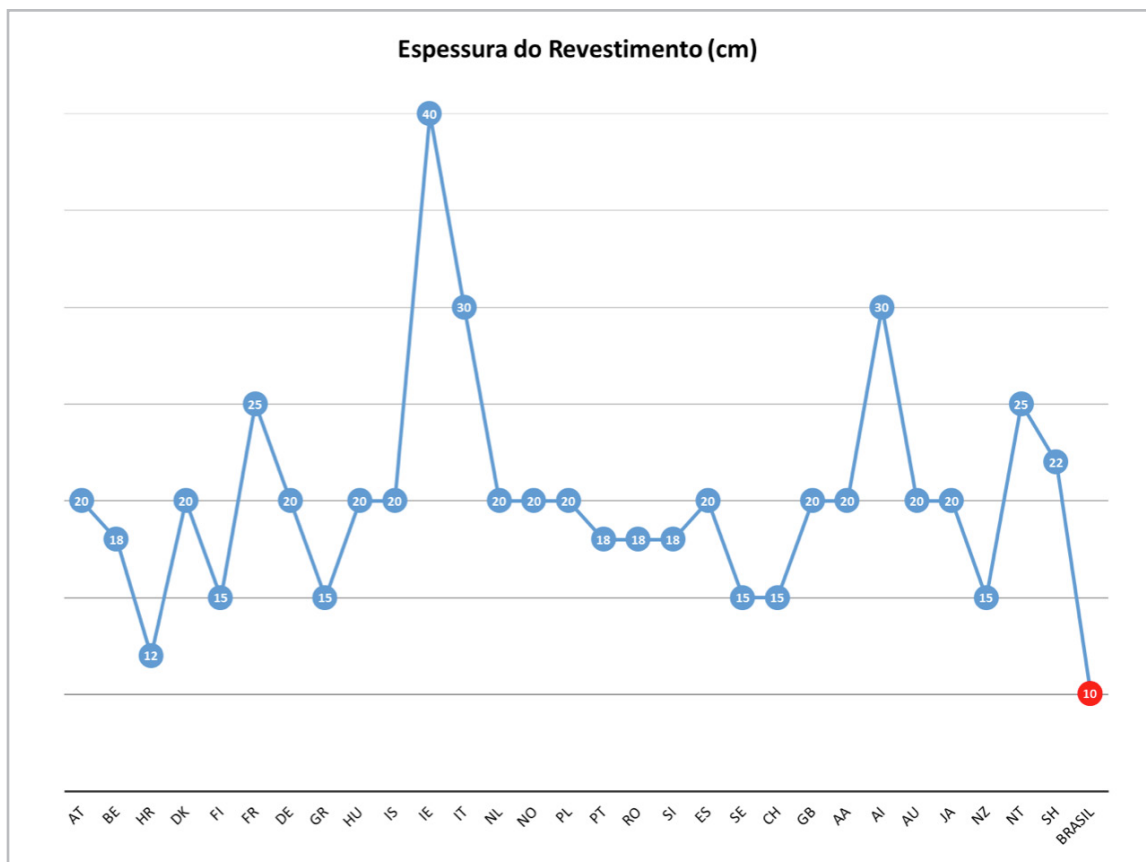


Figura 4 - Espessura do revestimento segundo os critérios empregados

3 • CONCLUSÕES

As principais conclusões sobre esse estudo são:

a) As espessuras das camadas, para um mesmo tráfego, variam significativamente de um país para outro. Contribuem para isso diferenças nas configurações dos eixos padrão adotados, nas temperaturas consideradas para o pavimento e na frequência do carregamento. A propósito, dos métodos analisados, sete países adotam eixo padrão de 80 kN, oito adotam 100 kN e a França, Grécia e Espanha adotam 130 kN. Alguns deles não prevêm pavimentos asfálticos para tráfegos superiores a 10^8 repetições do eixo padrão.

b) Os métodos analíticos - empregados por cerca de 60% dos países - são similares conceitualmente e empregam modelos elástico lineares para cálculo de tensões e deformações. Os parâmetros de projeto são a tensão de tração na fibra inferior, para fins de estimativa da vida de fadiga do revestimento e a pressão vertical no subleito, para estimativa da deformação permanente. Todos os métodos europeus são calibrados empiricamente e levam em conta fatores climáticos, práticas construtivas e propriedades dos materiais típicos da região.

c) Em resposta à pergunta sobre o mecanismo de ruptura mais observado, os europeus informaram que as deteriorações dominantes são a deformação da trilha de roda das camadas do revestimento (capa e binder) e o trincamento iniciado na superfície do revestimento. Ao contrário do esperado, as deformações permanentes das demais camadas e o trincamento por fadiga iniciando na base do revestimento acontecem raramente. Considerando que esses modelos de deterioração não são os comumente esperados pelos modelos atuais, atribuem-se esse comportamento ao uso de critérios conservadores projeto.

d) A espessura do revestimento, obtida pelos critérios de projeto adotados no Brasil, é inferior à obtida pelos principais métodos de dimensionamento estrangeiros, podendo, por isso, estar associada à deterioração precoce dos pavimentos brasileiros. Por isso, há necessidade urgente de serem desenvolvidas pesquisas sobre a adequação dos atuais critérios de projeto, que levem em conta as solicitações reais devidas ao tráfego atual, as propriedades dos materiais utilizados e a identificação de fatores empíricos de correção das correlações empíricas estrangeiras adotadas no nosso método. Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos, como o programa SisPavBR, que, mesmo em fase de testes, indica a necessidade de espessuras maiores de revestimento.

e) O meio técnico especializado em pavimentação não apresentou – até agora – uma argumentação convincente que justifique a execução de espessuras tão pequenas dos revestimentos asfálticos empregados no país atualmente. Não se pode continuar tratando a questão da deterioração precoce dos pavimentos unicamente sob a ótica jurídica da responsabilidade civil, deixando-a a cargo dos agora afamados tribunais de contas.

Referências Bibliográficas

- COST 333 - Development of New Bituminous Pavement Design Method (Forum of European National Highway Research Laboratories – FEHRL. 1999.
- DE BEER, M.; FISHER, C.; KANNEMEYER, L. Tire-Pavement Interface Contact Stresses on Flexible Pavements –Quo Vadis?In: Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. 22 p., 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Publicação 667/22. Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. Eng. Murillo Lopes de Souza. 3ª edição. 1981.
- FRANCO, F.A.C.P. Método automático de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos. Tese de doutorado. COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2007.
- FRITZEN, M. A. Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. Tese de doutorado. COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.
- NUNES, W.P.; CERATTI, J.A.P. e PINTO, P.R.R. Afinal porque pavimentos novos estão rompendo precocemente? Um estudo sobre as causas de degradações prematuras na superfície de pavimentos asfálticos. In: Anais do 4º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Foz do Iguaçu, PR. 2011.
- SU, K.; SUN, L.; HACHIYA, Y.; MAEKAWA, R. Analysis of Shear Stress in Asphalt Pavements Under Actual Measured Tire-Pavement Contact Pressure. In: Proceedings of the 6th ICPT. Japan. p.11-18. 2008.
- WANG. H; Al-Qadi, I.L. Near-Surface Pavement Failure Under Multiaxial Stress State in Thick Asphalt Pavement. Transportation Research Record. N° 2514. p.91-99., 2010. 📍



UTILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO COMO CAMADA DE PAVIMENTO EM CONSTRUÇÃO DE FAIXA ADICIONAL

*Thiago Breunig Hermes*¹

*José Antônio Santana Echeverria*²

*Luciano Pivoto Specht*³

¹ Engenheiro Civil - Neovia Engenharia

² Mestre, Engenheiro Civil - UNIJUÍ/DNIT

³ Doutor, Engenheiro Civil - UFSM

RESUMO

Com o intuito de minimizar o problema da formação de longas filas de veículos e facilitar a ultrapassagem, melhorando o nível de serviço da via, podem ser implantadas faixas adicionais em trechos estratégicos, onde, normalmente, formam-se comboios devido à baixa velocidade dos veículos comerciais. Nesse cenário, surge a possibilidade de utilização de métodos construtivos que permitam utilizar ou reciclar materiais destinados ao descarte, na intenção de diminuir os impactos econômicos, sociais e, principalmente, ambientais. Os serviços de recuperação do revestimento asfáltico geram uma quantidade expressiva de material fresado e, muitas vezes, o destino final não é adequado. Tendo em vista a importância de desenvolver um destino ecologicamente correto para esse material e a execução de pavimentos de forma econômica, este trabalho relata como foi utilizado o material fresado oriundo do revestimento asfáltico, durante a execução de um pavimento flexível de terceira faixa (faixa adicional), na BR-386/RS. Também são apresentados os resultados de desempenho e o comportamento mecânico obtidos após um período de 9 meses de utilização dessa faixa adicional.

Palavras-chave: reciclagem; material fresado; retroanálise; faixa adicional; módulo de resiliência.

ABSTRACT

Aiming at minimizing the problem of formation of long vehicle queues and facilitating the overtaking, to improve the route service level, it may be deployed additional lanes at strategic locals, where usually there is traffic jam due to the trucks' low speed. Being so, to develop constructive methods to use or recycle materials for disposal is a good possibility of reducing the economic, social, and mainly environmental impact. The coating asphalt recovery generate a big amount of milled material and often its final destination is not appropriate. Given the importance of developing an environmentally friendly destination for this material and the execution of pavements economically, this work reports how it was used the milled material from the asphalt coating during the execution of a flexible pavement third track (additional track), at route BR-386/RS. This work also presents the performance results and the mechanical behavior after 9 months of the additional track use.

Keywords: recycling; reclaimed asphalt pavement; back analysis; additional lanes; resilient modulus.

1 • INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a taxa de crescimento da frota de veículos, principalmente comerciais, vem aumentando consideravelmente, bem mais do que o previsto na época em que as rodovias foram projetadas. Segundo o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2016), em março de 2016, a quantidade de veículos no país chegou a 91,4 milhões. Sendo assim, faz-se necessária a ampliação da capacidade de muitas rodovias brasileiras, dando fluidez ao tráfego, segurança e conforto a todos os usuários. Porém, o custo para execução de tais obras é elevado e, muitas vezes, os recursos são limitados.

Visando diminuir o problema da grande formação de filas de veículos e facilitar a ultrapassagem, melhorando, assim, o nível de serviço da rodovia, podem ser implantadas faixas adicionais em trechos onde a circulação de veículos comerciais forma comboios, devido à sua baixa velocidade. Para tanto, podem ser utilizados métodos construtivos que possibilitem a utilização ou reciclagem de materiais destinados ao descarte, minimizando, por conseguinte, impactos econômicos, sociais e ambientais.

Com a utilização de materiais reciclados (materiais não convencionais em obras correntes), se faz necessária a obtenção de parâmetros de resistência e principalmente de deformabilidade para emprego das teorias das camadas elásticas e/ou elementos finitos na análise e dimensionamento de pavimentos com a abordagem da Mecânica de Pavimentos (MEDINA; MOTTA, 2015), de forma a compatibilizar as tensões e deformações atuantes e resistentes nas camadas. Estes parâmetros de deformabilidade de novos materiais, como é o caso dos módulos resilientes das camadas, podem ser obtidos através de retroanálise, gerando dados mais precisos e confiáveis para a avaliação do comportamento dos materiais do pavimento.

A tarefa de executar obras sustentáveis é uma atividade complexa e desafiadora. Este artigo relata uma experiência de obra utilizando material fresado na construção de uma faixa adicional, localizada na BR-386/RS, no município de Tio Hugo/RS. Para tal, são apresentados os parâmetros elásticos para subsidiar projetos de pavimentos com este material, obtidos através de retroanálise. Ainda, são apresentados os dados de monitoramento em campo e uma análise de desempenho pós-execução.

2 • UTILIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO

Há muito tempo o material fresado é estudado. Entretanto, só nos últimos anos ele vem despertando o interesse dos órgãos responsáveis pela manutenção das rodovias bem como de alguns pesquisadores. Tanto os órgãos quanto os pesquisadores têm percebido a possibilidade de utilizar material fresado nas obras de pavimentação como camada estrutural, motivados pela redução dos impactos ambientais oriundos da armazenagem inadequada e exploração das jazidas de materiais pétreos, também devido ao viés econômico pois, com a exclusão parcial de aquisição de novos agregados minerais e seu transporte há redução de gastos.

Pasche et al. (2014) apresentam a caracterização de material fresado originado das operações de restauração em trechos rodoviários localizados no estado do Rio Grande do Sul, sendo três de rodovias federais, BR-158/RS; BR-285/RS e BR-290/RS, e uma de rodovia estadual, RS-509. Foram realizados ensaios de caracterização granulométrica antes e depois da extração de ligante, massa específica, compactação e resistência mecânica (ISC). A partir dos resultados foi concluído que o material não sobre quebras de agregados durante as operações de fresagem e, considerando o material sem a película de ligante, o material se enquadra na faixa C do DNIT-ES 031/2006, que trata de concreto asfáltico.

Para corrigir a deficiência de finos e enquadrar do material fresado na faixa C da DNER-ES 303/97 para utilização com material de base, Silva (2012) definiu, a partir de ensaios de caracterização granulométrica, a quantidade em massa de 70% de material fresado e 30% de pó de pedra. A partir dos dados característicos dessa mistura, foi realizado um estudo de caso em uma rua lateral à BR-285, no município de Bozano-RS, na qual utilizou-se material fresado estabilizado granulometricamente como uma camada de base de pavimento com 15 cm de espessura revestida com tratamento

superficial duplo (TSD). Também foram obtidos os módulos de resiliência através da retroanálise de bacias deflectométricas, medidas pelo ensaio da viga Benkelman, resultando em um módulo médio de 341MPa para a camada de base de material fresado mais pó de pedra.

Outro exemplo de utilização do material fresado é relatado por Specht et al. (2013), referindo-se à utilização executada em uma rua lateral à BR-290, no município de Eldorado do Sul. O trecho estudado possui extensão de 1.240 m e foi dividido em 3 partes, nas quais foram executados trechos com camada de base utilizando material fresado, material fresado estabilizado granulometricamente com pó de pedra e outro segmento executado com Brita Graduada Simples. Como revestimento da estrutura, utilizou-se concreto asfáltico com 5 cm de espessura.

3 • IMPLANTAÇÃO DA FAIXA ADICIONAL COM MATERIAL FRESADO E PÓ

3.1 • Local da implantação

A implantação da faixa adicional ocorreu na BR 386/RS – rodovia federal Governador Leonel de Moura Brizola – que liga os municípios gaúchos de Canoas, na região metropolitana de Porto Alegre, e Iraí, município localizado no extremo noroeste do Rio Grande do Sul e que faz divisa com Santa Catarina. Foi implantada uma faixa adicional com estrutura de material fresado entre os quilômetros 208 e 209, totalizando 1.120 m de extensão em aclave, com 3,6 m de largura, localizada no município de Tio Hugo, conforme apresentado na Figura 1.

O tráfego, segundo levantamento executado em maio de 2016, registrou um Volume Diário Médio (VDM) de 2.177 veículos, dos quais, 42% são comerciais, chegando a um N10 (USACE) de 4,69.107 .

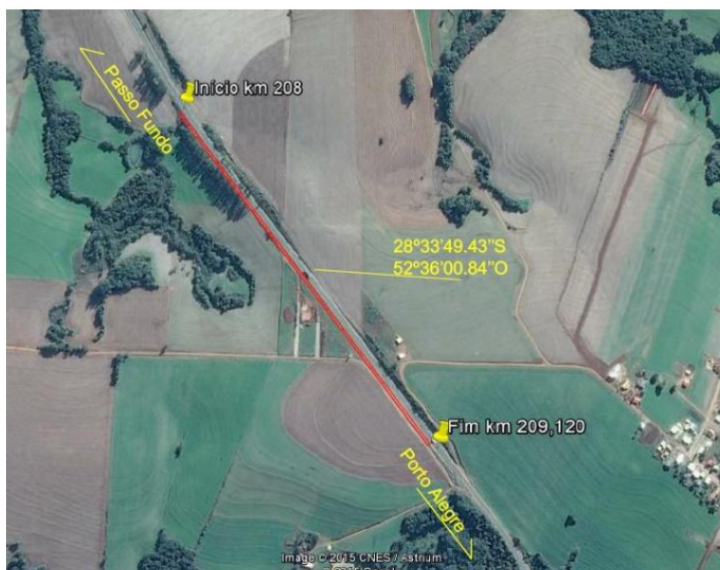


Figura 1 - Localização da terceira faixa

3.2 • Caracterização do material fresado

O material fresado, utilizado para a execução da estrutura do pavimento da terceira faixa, resultou das obras de recomposição do revestimento asfáltico executadas na própria BR-386/RS, em contrato de manutenção e conservação da rodovia, sob jurisdição da Unidade Local do DNIT de Cruz Alta/RS.

O material coletado foi inicialmente passado pela peneira 37,5mm para eliminar os grumos retidos e analisou-se a granulometria para verificar o enquadramento dos materiais nas faixas de bases estabilizadas granulometricamente (DNER-ES 303/97).

A Tabela 1 e a Figura 2 apresentam o resultado da análise granulométrica do fresado (com betume) e do pó de pedra obtidos através do processo de peneiramento manual (DNER-ME 083/98), bem como a faixa da especificação 303. A partir da análise dos resultados fica evidente que o fresado apresenta em sua constituição uma deficiência de finos, causando o desenquadramento da faixa de estabilização utilizada para camadas de base granular.

Tabela 1 - Configuração granulométrica do material fresado (com betume)

Peneira (n)	Retido acumulado (g)	Passante acumulado (g)	% Passante	Faixa C DNER-ES 303/97	
1/2"	0	1207	100,00	100	100
3/8"	396	811	67,19	50	85
4	720	487	40,35	35	65
10	868	339	28,09	25	50
40	1030	3	14,66	15	30
200	1150	57	4,72	5	15

Com o objetivo de enquadrar a granulometria próximo ao centro da faixa especificada, realizou-se a mistura de material fresado mais adição de pó de pedra nas relações de 70% e 30% de suas massas, respectivamente, apresentando os resultados na Tabela 2 e Figura 2.

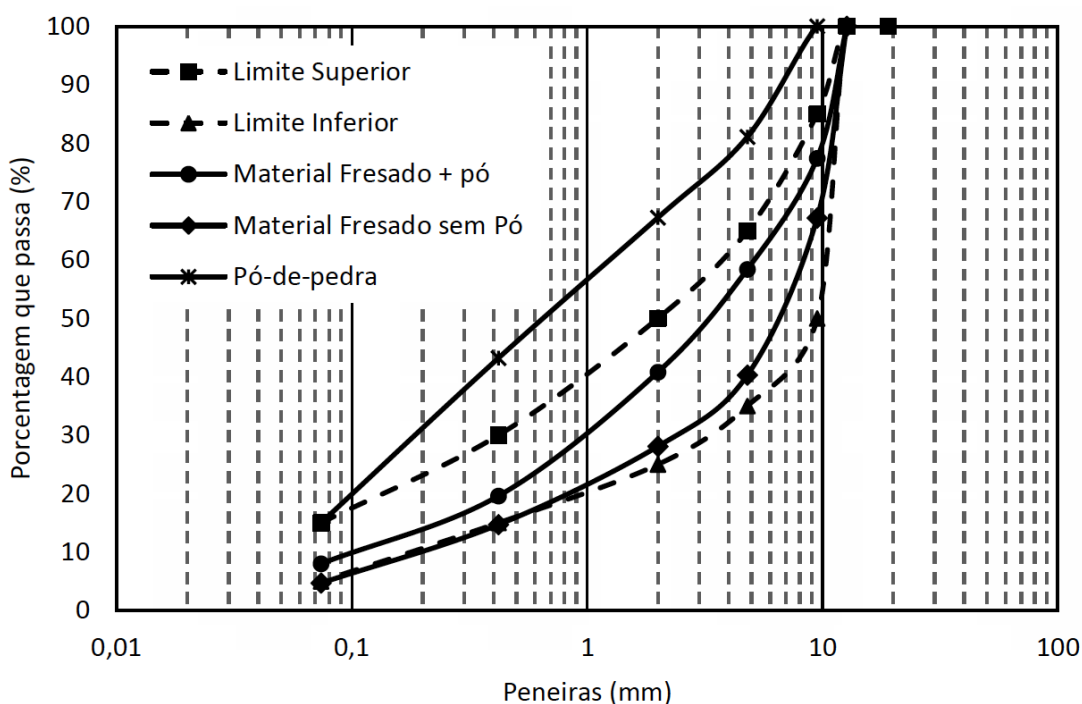


Figura 2 - Composição da granulometria do material fresado com e sem pó de pedra

Tabela 2 - Configuração da granulometria do material fresado (com betume) mais adição de pó de pedra

Peneira (n)	Retido acumulado (g)	Passante acumulado (g)	% Passante	Faixa C DNER-ES 303/97	
1/2"	0	2163	100,00	100	100
3/8"	489	1674	77,39	50	85
4	900	1263	58,39	35	65
10	1280	883	40,82	25	50
40	1740	423	19,56	15	30
200	1990	173	8,00	5	15

Com o objetivo de determinar o teor de umidade ótima do material fresado mais a incorporação de 30% de pó de pedra, foi realizado o ensaio de compactação, seguindo as orientações da norma DNER-ME 129/94, definindo então a massa específica aparente seca máxima para a energia de compactação modificada e o Índice de Suporte Califórnia (ISC), conforme preconiza a norma DNER-ME 049/94. Os resultados foram de 19,83 g/cm³ de massa específica aparente seca máxima, 8,2% de umidade ótima e 128 % de ISC.

3.3 • Etapas da construção da faixa adicional

Inicialmente, foi executada a remoção do acostamento com escavação mecanizada até chegar na cota do subleito. Após a regularização do subleito, foram executadas três camadas de 15 cm de espessura com a mistura de material fresado e pó de pedra, formando a estrutura do pavimento como reforço do subleito, sub-base e base. Os serviços foram executados entre os meses de outubro e novembro do ano de 2014.

A mistura entre o material fresado e pó de pedra foi executada *in loco*, com pá carregadeira hidráulica nas proporções de 70% e 30% de material, respectivamente. Um relatório fotográfico da execução é apresentado na Figura 3.

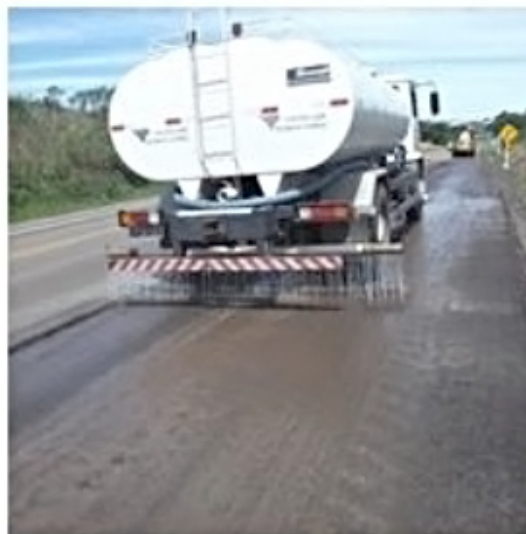




Figura 3 - Relatório fotográfico da execução

O espalhamento e a distribuição da mistura foram executados com motoniveladora, tendo o acompanhamento por equipe de topografia para garantir a uniformidade e a espessura final de 15 cm de cada camada.

Antes de dar início à compactação, foi executado o umedecimento do material com caminhão irrigador, e a umidade ótima foi controlada por equipe de laboratório, utilizando o método DNER-ME 052/94, a cada 100 m de pista. A variação do teor de umidade admitida foi de 1%.

A compactação das camadas foi executada com rolo compactador liso-vibratório da Caterpillar, modelo CS 533E com peso operacional de 11,9t e um rolo de pneus da Bomag, modelo BW25RH, com peso operacional de 12t. A compactação iniciou pelos bordos das camadas evoluindo longitudinalmente.

Após a conclusão das camadas, analisaram-se os ensaios de compactação, constatando que as camadas de sub-base e base haviam obtido um grau de compactação médio (GC) de 98%. Tendo em vista esses resultados e a não satisfação visual da camada, foi determinada a remoção total das camadas de base e sub-base, para sua reconstrução.

Para a remoção foi utilizado escarificador e, posteriormente, foram feitos todos os processos novamente. Na intenção de aumentar a energia de compactação, foi acrescentado um lastro de areia no rolo compactador de pneus, elevando seu peso operacional para 23t. Com isso, foi obtido sucesso com os novos resultados de compactação, conforme a Tabela 3, levando em consideração a densidade específica aparente seca máxima de projeto.

Tabela 3 - Grau de compactação antes e após reconstrução das camadas de base e sub-base

Camada	Localização	Densidade aparente seca (g/cm ³)	GC antes da reconstrução	GC após reconstrução
sub-base	208+350	19,515	98,41%	101,90%
sub-base	208+400	19,635	99,01%	101,32%
sub-base	208+440	19,547	98,57%	101,62%
base	208+340	19,319	97,43%	102,14%
base	208+440	19,590	98,79%	102,95%
base	208+500	19,344	97,55%	102,46%

Após a conclusão da camada de base, foi executada a varredura com vassoura mecânica, a fim de eliminar qualquer material solto, preparando a superfície para aplicação da imprimação com asfalto diluído CM-30. As taxas de aplicação comumente utilizadas nas imprimações de brita graduada simples são da ordem de 0,6 a 1,80 l/m², segundo a norma DNIT 144/2014-ES, porém, como a textura do material fresado mais pó ficou fechada, utilizou-se a taxa de 0,5 l/m².

Para o revestimento foi executado uma camada de 10 cm de espessura com concreto asfáltico Faixa B DNIT ESP 031/2006 com ligante CAP 50-70.

4 • DESEMPENHO DO PAVIMENTO

4.1 • Retroanálise

Com o objetivo de retroanalisar e comparar os valores dos módulos de resiliência das camadas de forma distinta, ou seja, antes e após a execução da camada subsequente, foram executados os levantamentos deflectométricos das bacias camada por camada, e nomeadas como: “Levantamento A” a camada de reforço do subleito, “Levantamento B” a camada de sub-base, e assim sucessivamente, conforme ilustra o esquema da Figura 4.

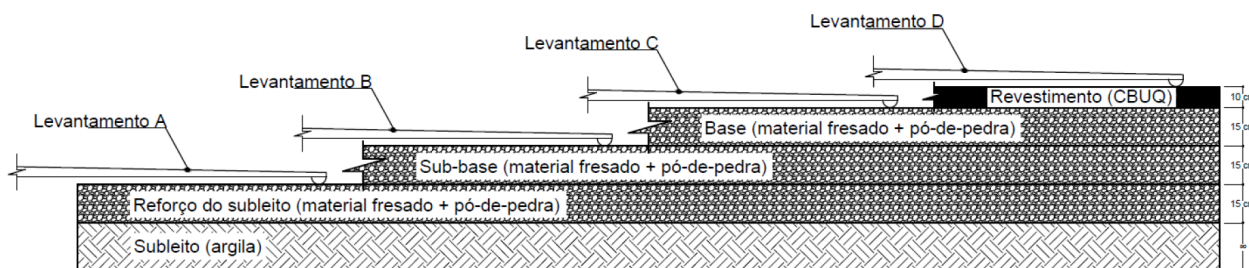


Figura 4 - Estrutura do pavimento

Os módulos foram obtidos com o auxílio do módulo de retroanálise do programa Sispav (FRANCO, 2007). Para isso, existe a necessidade de converter os dados levantados pelo ensaio da Viga Benkelman (VB), pois o programa foi desenvolvido para receber dados coletados por equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

A conversão dos dados obtidos pela VB foi baseada no estudo elaborado por Theisen et al. (2009), que considera as camadas do pavimento com espessura constante, apenas um módulo de Elasticidade, um coeficiente de Poisson e o

carregamento das placas simétrico e constante. Sendo assim, pode admitir apenas uma das rodas do eixo padrão (eixo simples de roda dupla - ESRD) como aplicação de carga, ou seja, a carga aplicada é 2050 kg e as deflexões medidas em campo são divididas por 2. Com isso, são calculadas novas distâncias dos pontos de aplicação de carga, conforme ilustra a Figura 5 e a Equação 1.

$$X_i = \sqrt{(x_i)^2 + (0,5dy)^2} \tag{Equação 1}$$

A precisão dos resultados obtidos pela retroanálise foi verificada pelo método RMSE (*Root Mean Square Error* ou, erro médio quadrático em percentual), indicado na ASTM D5858/2008. É importante ressaltar que foram considerados valores de módulos com até 3% de RMSE.

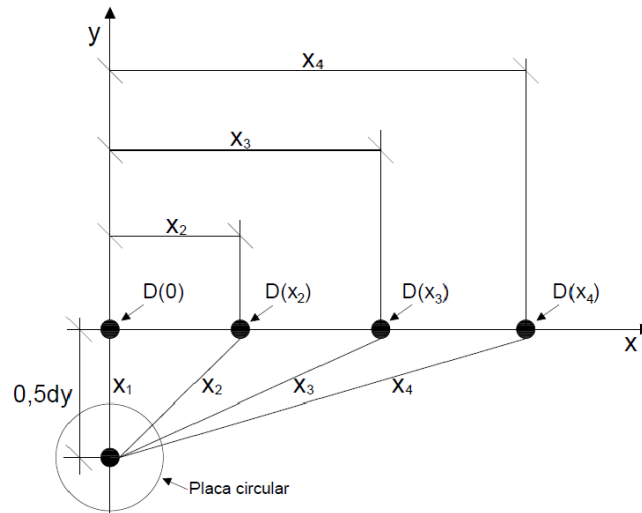


Figura 5 - Ilustração das distâncias dos pontos de carregamento de um eixo padrão (Theisen, 2009)

A Tabela 4 apresenta os resultados de módulo de resiliência obtidos pela retroanálise; observa-se pouca variação dos valores após a execução da camada subsequente, principalmente, na sub-base e na base. A média encontrada considerando as três camadas foi de 223MPa (de 156 a 306MPa), valores um pouco abaixo, mas semelhantes, ao encontrado por Silva (2012) de 341MPa para uma camada de base executada com material fresado e adição de pó de pedra nas mesmas proporções desta pesquisa.

Tabela 4 - Módulos de resiliência por camada

Módulo de resiliência por camada (mpa)	Camada onde o levantamento foi executado					
	Reforço Subleito (A)	Sub-base (B)	Base (C)	Revestimento (D)	Média	Coefficiente de Variação
Revestimento	—	—	—	4099,86	4099,86	—
Base	—	—	288,89	306,29	297,59	4,1%
Sub-base	—	198,33	183,67	182,71	188,24	4,7%
Reforço do subleito	157,20	174,38	205,56	200,00	184,28	12,3%
Subleito	53,00	55,44	75,00	30,00	53,36	34,5%

4.2 • Tensões nas camadas

Visando determinar as tensões (σ) nas camadas do pavimento, foi realizada a análise mecanística no *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) de Franco (2007), utilizando como dados de entrada as médias dos módulos de resiliência obtidos pelo processo de retroanálise, da aplicação de carga do eixo padrão ESRD de 8,2t, no topo do revestimento, e as espessuras das camadas.

Calculadas a tensão octaédrica e de confinamento (θ e σ_3), na parte mediana das camadas do pavimento, verifica-se, a partir dos gráficos representados pelas Figuras 6 e 7, respectivamente, que o módulo de resiliência do material fresado mais pó independem das camadas do pavimento em que foi executado, pois se mantém não tem relação direta com o estado de tensões. Bernucci et al. (2010), explicam que, nesses casos, os módulos resilientes das camadas independem da tensão de confinamento e são pouco variados pela tensão desvio, possivelmente devido à cimentação do ligante asfáltico envolvido pelos agregados finos da mistura.

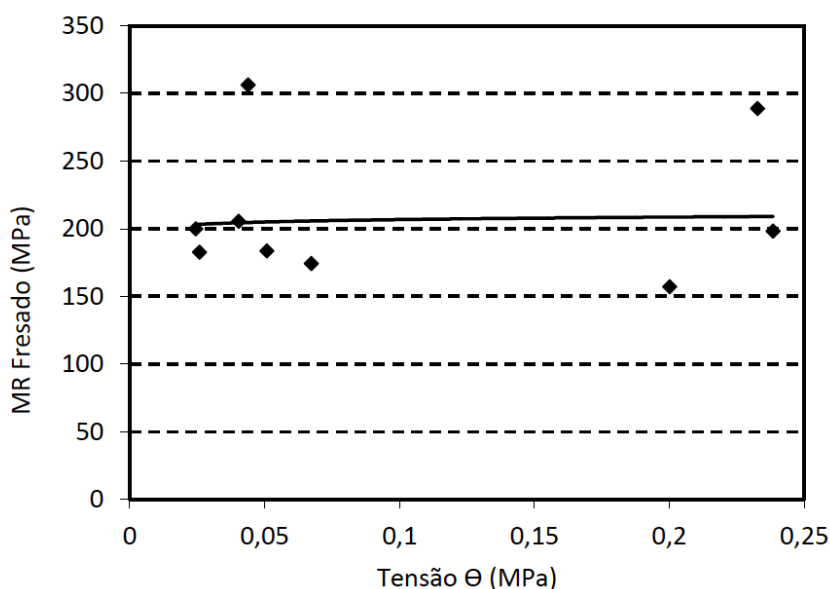


Figura 6 - Comportamento da tensão octaédrica *versus* módulo de resiliência

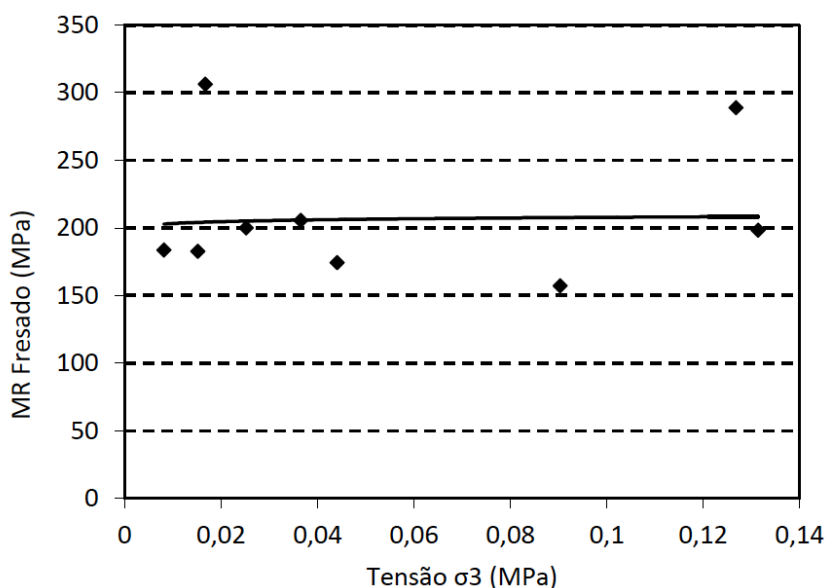


Figura 7 - Comportamento da tensão de confinamento *versus* módulo de resiliência

Também, verificou-se que, após a conclusão da camada de base, foi possível perceber que o módulo de resiliência aumenta consideravelmente em comparação ao grau de compactação de cada camada, conforme o gráfico da Figura 8. Vale ressaltar que a energia aplicada foi a modificada na condição próxima da umidade ótima (8,2%) e massa específica máxima de seus respectivos ensaios de compactação. Isso reforça a necessidade de cuidados executivos o que altera a deformabilidade e o desempenho do pavimento.

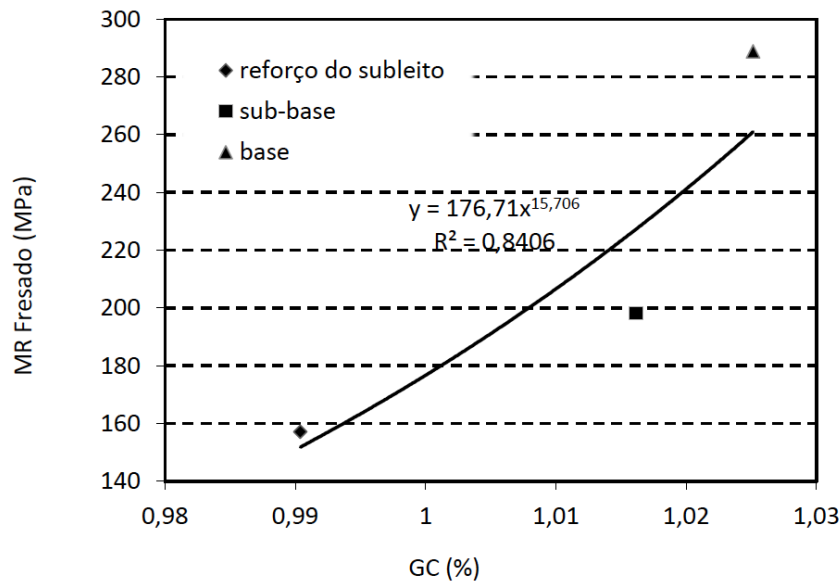


Figura 8 - Comportamento do módulo de resiliência versus grau de compactação

4.3 • Previsão de comportamento e monitoramento de campo

Considerando a deformação de compressão e tração na fibra inferior da camada de revestimento (ϵ), estimou-se a deformação permanente e a vida de fadiga do pavimento. Utilizando o modelo do Asphalt Institute (1987), conforme a Equação 2, que estipula como critério terminal os afundamentos com flechas até 13 mm para o número equivalente de solicitações de eixo padrão. Com o valor de $\epsilon_C = 0,000191 \text{ m/m}$, resultou em um N igual a $6,09 \times 10^7$, maior que o valor de $N_{10 (USACE)}$ de $4,69 \times 10^7$ da rodovia BR-386, no local do estudo.

$$N = 1,365 * 10^{-9} * \left(\frac{1}{\epsilon_C}\right)^{4,477} \tag{Equação 2}$$

Para o cálculo da fadiga, utilizou-se o modelo de Pinto (1991), conforme a Equação 3. Com o valor $\epsilon_t = -0,000021 \text{ m/m}$, resultou em um N de solicitações igual a $2,97 \times 10^8$.

$$N = 9,07 * 10^{-9} * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{2,65} * \left(\frac{1}{MR}\right)^{-0,033} \tag{Equação 3}$$

Os afundamentos nas trilhas de rodas (ATR) foram medidos conforme preconiza a norma DNIT 006/2003-PRO, que determina a utilização de uma treliça metálica, padronizada. Desta forma, foi realizado o levantamento de ATR após um período de 285 dias de utilização da terceira faixa. Foram avaliadas todas as seções do segmento de 20 em 20 metros, com medições nas trilhas internas (TRI) e externas (TRE) como mostra a Tabela 5.

Os resultados obtidos de deformação permanente nas trilhas de rodas demonstram uma boa resposta estrutural do pavimento, considerando o local de tráfego lento e canalizado. A média calculada dos ATR da faixa adicional resultou em 2,53 mm no período de 285 dias de utilização.

Essas deformações mostraram-se bastante homogêneas, salvo as estacas entre os km 208+820 e 208+900, onde houve deslocamento da massa asfáltica, possivelmente ocasionado por um problema executivo de excesso de ligante no concreto asfáltico ao emprego de ligante convencional CAP 50-70, que apresenta ponto de amolecimento abaixo de 50°C.

Tabela 5 - Levantamento de ART na terceira faixa, após 285 dias de utilização

Localização	TRE (mm)	TRI (mm)	Seção Terraplenagem	Localização	TRE (mm)	TRI (mm)	Seção Terraplenagem
208+040	0,0	0,0	CORTE	208+600	3,0	4,0	ATERRO
208+060	0,0	0,0	CORTE	208+620	4,0	4,0	ATERRO
208+080	0,0	0,0	CORTE	208+640	5,0	4,0	ATERRO
208+100	0,0	0,0	CORTE	208+660	4,0	5,0	ATERRO
208+120	0,0	1,0	CORTE	208+680	4,0	4,0	ATERRO
208+140	0,0	1,0	CORTE	208+700	5,0	5,0	ATERRO
208+160	0,0	1,0	CORTE	208+720	6,0	6,0	ATERRO
208+180	0,0	0,0	CORTE	208+740	5,0	6,0	ATERRO
208+200	1,0	0,0	CORTE	208+760	5,0	9,0	ATERRO
208+220	2,0	1,0	CORTE	208+780	3,0	3,0	ATERRO
208+240	1,0	0,0	CORTE	208+800	3,0	4,0	ATERRO
208+260	0,0	0,0	CORTE	208+820	4,0	9,0	ATERRO
208+280	0,0	1,0	CORTE	208+840	5,0	7,0	ATERRO
208+300	0,0	1,0	CORTE	208+860	9,0	18,0	CORTE
208+320	0,0	0,0	CORTE	208+880	6,0	17,0	CORTE
208+340	0,0	0,0	CORTE	208+900	4,0	12,0	CORTE
208+360	0,0	1,0	CORTE	208+920	3,0	7,0	CORTE
208+380	1,0	3,0	CORTE	208+940	3,0	5,0	CORTE
208+400	3,0	3,0	CORTE	208+960	2,0	4,0	CORTE
208+420	0,0	4,0	CORTE	208+980	2,0	0,0	CORTE
208+440	0,0	2,0	CORTE	209+000	1,0	0,0	CORTE
208+460	1,0	2,0	CORTE	209+020	0,0	0,0	CORTE
208+480	1,0	2,0	CORTE	209+040	0,0	1,0	CORTE
208+500	2,0	2,0	CORTE	209+060	0,0	0,0	CORTE
208+520	2,0	2,0	CORTE	209+080	0,0	0,0	CORTE
208+540	2,0	4,0	CORTE	209+100	0,0	0,0	CORTE
208+560	4,0	2,0	CORTE	209+120	0,0	0,0	CORTE
208+580	3,0	3,0	CORTE				

Também foi realizado levantamento deflectométrico utilizando a viga Benkelman, conforme a norma DNER-ME 024/94, após a conclusão do revestimento asfáltico. A Tabela 6 demonstra os valores das deflexões (do)

Tabela 6 - Levantamento deflectométrico com Viga Benkelman, após a conclusão do revestimento do pavimento

Localização	d ₀ (0,01mm)	Localização	d ₀ (0,01mm)	Localização	d ₀ (0,01mm)
208+040	36	208+420	42	208+800	44
208+060	45	208+440	55	208+820	36
208+080	47	208+460	38	208+840	38
208+100	50	208+480	47	208+860	47
208+120	39	208+500	44	208+880	44
208+140	47	208+520	49	208+900	49
208+160	50	208+540	47	208+920	47
208+180	42	208+560	42	208+940	42
208+200	42	208+580	54	208+960	43
208+220	44	208+600	47	208+980	43
208+240	44	208+620	49	209+000	32
208+260	43	208+640	49	209+020	38
208+280	42	208+660	40	209+040	39
208+300	42	208+680	36	209+060	39
208+320	38	208+700	47	209+080	45
208+340	40	208+720	28	209+100	48
208+360	47	208+740	44	209+110	41
208+380	43	208+760	48	–	–
208+400	47	208+780	43	–	–

A média das deflexões (0,01 mm) e o desvio padrão, resultaram em 43,4 e 4,9 respectivamente. A homogeneidade dos resultados mostra que o pavimento como um todo manteve-se homogêneo ao longo do segmento avaliado bem como comprova a eficiência da técnica empregada.

5 • CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões do estudo relatado nesse artigo são:

- Devido ao comportamento do material fresado ser diferente dos materiais comumente utilizados para execução de pavimentos, cuidados adicionais devem ser tomados, como a taxa de imprimção e a energia de compactação.
- Os módulos de resiliência das camadas do pavimento executado com material fresado e adição de pó-de-pedra não dependem das tensões de confinamento e tensão desvio, provavelmente devido à cimentação oriunda do ligante asfáltico envolvido por agregados miúdos.
- O módulo de resiliência das camadas do pavimento aumenta conforme o grau de compactação. Na camada de sub-base onde o GC é 101,9%, o módulo resiliente apresenta valor de 188MPa e, na camada base, onde o GC chega a ser 102,95%, o módulo resiliente passa a ser 306MPa e seus valores são semelhantes aos resultados encontrados na bibliografia.
- Com base nos baixos valores de deflexão medidos, na vida de fadiga calculada e nos valores de deformação de tração na fibra inferior, a expectativa é que o pavimento tenha um bom desempenho.

Salienta-se, finalmente, que um pavimento flexível executado com material fresado, nas condições apresentadas, resulta em um comportamento estrutural adequado para se utilizar em pavimentos rodoviários. Levando em conta a importância de se conhecer as características granulométricas para dar enquadramento nas faixas de trabalho usuais, controle tecnológico na execução e acompanhamento do desempenho, essa técnica pode ser aplicada não só em construções de faixas adicionais, mas também na reconstrução de pavimentos deteriorados, dando destino sustentável e ecologicamente correto ao material fresado.

Referências Bibliográficas

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982. 22 p.
- ASPHALT INSTITUTE. Alternatives in pavement maintenance, rehabilitation and reconstruction. Maryland: Ed. 01 College Park, 1987.
- ASTM D5858/2008. Standard guide for calculating in situ equivalent elastic moduli of pavement materials using layered elastic theory. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ES 303/97: Pavimentação: base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997. 7 p.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 083/98: Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 024/94: Pavimento: determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. 6 p.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 129/94: Solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 049/94: Solos: determinação do índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 14 p.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 052/94: Solos e agregados miúdos: determinação da umidade com emprego do “Speedy”. Rio de Janeiro, 1994.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ES 144/2014: Pavimentação: imprimação com ligantes asfálticos. Rio de Janeiro, 2014. 7 p.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ES 031/2006: Pavimentos flexíveis: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. PRO 006/2003: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos. Rio de Janeiro, 2003. 10 p.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2008. 504 p.
- DENATRAN – DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. Frota de veículos no Brasil, consulta online. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2016.htm>>. Acesso em: 03 maio 2016.
- FRANCO, A. C. P. F. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos: SisPav. Rio de Janeiro: UFRJ, 2007. 294 p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE, Rio de Janeiro, 2007.
- MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015. 640 p.
- PASCHE, E; SILVA, C. F. S. C.; PIRES, G. M.; ECHEVERRIA, J. A. S.; SPECHT, L. P. Estudo das características tecnológicas do fresado e suas utilizações em camadas de pavimento no Rio Grande do Sul, Anais do 21º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, 9 p., maio 2014.
- PINTO, S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Rio de Janeiro: UFRJ, 1991. 489 p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE, Rio de Janeiro, 1991.
- SILVA, C. F. S. C. Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material de base para pavimentos flexíveis. Ijuí: Unijuí, 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação Engenharia Civil) Universidade Regional do Noroeste Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.
- SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, FERNANDO.; BERGMANN, E. C. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. Reunião Anual de Pavimentação, 42, Gramado, 2013.
- THEISEN, K. T.; MATTOS, J. R. G.; TREICHEL, D. S.; CERATTI, J. A. P. Método de retroanálise de bacias obtidas por carregamento de eixo padrão através do uso de softwares adaptados para FWD. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 12 p. Trabalho do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 📌

NORMAS DE PUBLICAÇÃO

Submissão de Trabalhos Técnicos para Revista PAVIMENTAÇÃO

1 • A Revista PAVIMENTAÇÃO é uma publicação técnica e científica de divulgação da ABPv. As contribuições para a revista devem ser de caráter exclusivamente técnico e estão abertas aos sócios e aos profissionais da Engenharia Rodoviária, Ferroviária e Aeroportuária nacional e internacional.

2 • A Revista pode também apresentar, eventualmente, matérias especiais redigidas pelo seu corpo técnico editorial e pela diretoria da ABPv, como forma de divulgação de opiniões ou comentários considerados relevantes como “voz” da ABPv.

3 • Os artigos e contribuições como nota técnica, inéditos, podem ser enviados em qualquer época do ano para serem publicados em uma das quatro edições anuais ou até no ano seguinte, dependendo do número de matérias selecionadas. Os trabalhos são apresentados na íntegra, sendo de total responsabilidade do autor todas as informações neles contidas.

4 • Os trabalhos, sejam científicos, sejam técnicos ou de outra natureza encaminhados para eventual publicação, serão submetidos a avaliação de três profissionais que compõem o Comitê Técnico-Científico da Revista, escolhidos de acordo com o perfil do material a ser julgado. Aos avaliadores não será dado a conhecer os autores do artigo ou trabalho antes da avaliação e também é vedada a divulgação para os autores da identidade dos avaliadores.

5 • Os avaliadores recebem da ABPv um questionário indicativo dos itens a serem avaliados em cada contribuição para Revista PAVIMENTAÇÃO, podendo sugerir três opções de encaminhamento:

- O trabalho é aceito para publicação;
- O trabalho não é aceito para publicação e será então devolvido aos autores;
- O trabalho poderá vir a ser aceito caso os autores concordem em fazer algumas modificações sugeridas por um ou mais avaliadores.

6 • Cabe à Diretoria da ABPv julgar os casos omissos e autorizar a publicação de contribuições de caráter não técnico, eventualmente, em função dos assuntos abordados e da disponibilidade de espaço.

7 • O resultado da avaliação de qualquer material encaminhado à Revista PAVIMENTAÇÃO será levado ao conhecimento dos autores dos mesmos informando o destino que será dado à sua contribuição que pode ser: publicação imediata no próximo número a ser lançado, publicação em número subsequente devido ao excesso de contribuições ou não publicação. Aprovado o artigo pelo Comitê Técnico-Científico, este será publicado gratuitamente.

8 • O Autor ou autores das contribuições aceitas para publicação devem concordar com a reprodução de seu material sem nenhum direito a qualquer custo de direitos autorais já que a ABPv é uma entidade sem fins lucrativos e a Revista PAVIMENTAÇÃO destina-se preferencialmente aos sócios e não será utilizada para venda com fins lucrativos.

9 • As contribuições para a Revista PAVIMENTAÇÃO devem ser encaminhadas de preferência por meio digital, podendo estar em formato PDF somente na fase de julgamento pelo Comitê. Os originais deverão ser produzidos em programa Microsoft Word. As figuras deverão ser fornecidas em separado, com resolução mínima de 300dpi. Caso a foto seja digital, a resolução deverá ser de no mínimo de 3.2 mega pixels. Não sendo as fotos do(s) autor(es), este(s) será(ão) responsável(eis) por declarar os créditos das mesmas e obter a autorização para publicação. Nos gráficos, evitar utilizar cores e dar preferência a símbolos que possam distinguir claramente as informações relevantes da figura. Nas tabelas não devem ser utilizadas formatações, bordas ou sombreamentos. As tabelas devem ser bem nítidas, identificadas com numeração própria e título. As equações podem ser criadas por um aplicativo externo, podem ser feitas com fontes de símbolos ou com o editor de equações do próprio programa usado para o trabalho. Em qualquer caso, elas devem ser numeradas consecutivamente ao longo do documento. As unidades deverão ser expressas no SI.

10 • As contribuições podem ser de no mínimo 2 e de no máximo 15 páginas em formato A4, editoradas em fonte Times New Roman, tamanho 12, espaço simples. Número maior de páginas poderá ser aceito em casos excepcionais a critério da Editoria da Revista.

11 • Os textos deverão ser escritos em português, em linguagem adequada e correta, sendo de responsabilidade do(s) autor(res) a revisão ortográfica, as referências bibliográficas devem seguir o padrão ABNT, tipo por citação de sobrenome e ano (ex. MATHEUS, 1994) e preferencialmente os artigos devem apresentar um resumo de 200 a 300 palavras, resumo em inglês de igual conteúdo do resumo em português (ABSTRACT) e indicar de 3 a 5 palavras-chaves. Artigos em outros idiomas podem eventualmente serem aceitos a critério da Editoria da revista.

12 • Essas especificações podem ser eventualmente revistas a critério da Editoria da Revista e da Diretoria da ABPv a qualquer tempo, cabendo aos artigos e contribuições já submetidos se adequarem seguindo as regras existentes à época da submissão do seu material. Associe-se e acesse todas as edições da revista na íntegra. Colabore para a manutenção da Revista Pavimentação enviando seu artigo para abpv@abpv.org.br, sugestões e se associando à ABPv.



20^a
RPU **2017** 28 a 30
de junho
Reunião de Pavimentação Urbana
6^a EXPO PAVIMENTAÇÃO
CentroSul - Florianópolis/SC

**SOMENTE UMA CAPITAL TÃO LINDA PODERIA
SER PALCO DESTE GRANDE EVENTO**

Floripa - Como é carinhosamente conhecida, é uma cidade moderna e cosmopolita, onde o novo e o antigo convivem harmoniosamente.

Paisagens naturais que estão entre as mais belas do Brasil.

Oferece ainda um dos mais modernos parques hoteleiros do Brasil, Shoppings, Teatros, Cinemas e Restaurantes de nível internacional com várias especialidades.

Floripa te aguarda. Inscreva-se já!

Para mais informações: www.rpu.org.br

Realização



Apoio



Agência Oficial
de Turismo



Local



Organização

