



revista

PAVIMENTAÇÃO

Ano XVI - nº 51 - 2022 - www.abpv.org.br - www.revistanavimentacao.org.br - ISSN 1809-1865

**Estudo do efeito do excesso
de cargas em diferentes
estruturas de pavimento
asfáltico utilizando o MeDiNa**



ABPv

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

SEDE

Rua Miguel Couto, nº 105,
Sobrelôjas 4 e 5 - Centro
RIO DE JANEIRO - RJ
CEP.: 20070-030
(21) 2233-2020

Site: www.abpv.org.br
E-mail: abpv@abpv.org.br

Redes sociais:

instagram@abpv_br
facebook.ABPv1959
Linkedin: AssocBrasPavimentacao

Conselho Editorial

Diretoria da ABPv

Editora-Chefe

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

Arte e Edição

Jornalista Ivan da Costa
lvandac@gmail.com
MTb RH 10819-RJ

Foto da CAPA:
Igor Alecsander

35ª DIRETORIA

Triênio 2020-2022

Diretora-Presidente

Eng^a. Luciana Nogueira Dantas

Diretor Vice-Presidente

Eng. Cássio Alberto Teoro do Carmo

Diretora Administrativa

Arqta. Georgina Libório Azevedo Braga

Diretor Financeiro

Eng. João Vicente Falabella Fabrício

Diretor Técnico

Eng. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Diretor de Divulgação

Jean Pierre Machado Santiago
MTb 27170-RJ

CONSELHO FISCAL

Sócio Coletivo

Betunel Ind. e Comércio Ltda.
JBR Engenharia Ltda.

Sócio Individual

Eng. Cláuber José Bandeira da Costa
Eng. Diegles Simões de Toledo Pereira



Sumário

- 5 47ª RAPv | 24º ENACOR | 3ª ExpoEnacorRAPv - INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE NA INFRAESTRUTURA BRASILEIRA (2022)
- 9 INFLUÊNCIA DA IDADE DO RAP NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO
- Jamille Freitas Fiuza
 - Mario Sergio de Souza Almeida
 - Weiner Gustavo Silva Costa
 - Cleidson Carneiro Guimarães
 - Felipe Freitas Santos de Jesus
 - Marcos Couto Correia
- 25 ESTUDO DO EFEITO DO EXCESSO DE CARGAS EM DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO UTILIZANDO O MEDINA
- Shana Leal Balzan
 - Gracieli Bordin Colpo
- 39 ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE ENSAIO DE CAIXA UTILIZANDO DORMENTE DE POLÍMERO
- Thatyane M. Gonçalves
 - Laura M. G. da Motta
 - Aldo M. W. Machado
 - Luiz F. M. da Silva
 - Gino C. Vizcarra



Com grande satisfação, a Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) apresenta a 51ª edição da Revista Pavimentação. Como a mais tradicional entidade da área no país, a ABPv reafirma seu compromisso com a difusão do conhecimento técnico e científico, valorizando pesquisas e práticas que impulsionam o setor. Esta edição marca mais um passo no fortalecimento da revista como referência nacional. A comissão editorial celebra a publicação e convida os leitores a explorarem conteúdos que refletem a evolução contínua da pavimentação brasileira

**Antônio Carlos Rodrigues Guimarães,
Georgina Libório Azevedo Braga,
Luciana Nogueira Dantas,
Cássio Alberto Teoro do Carmo,
João Vicente Falabella Fabrício e
Jean Pierre Machado Santiago**

Editores da REVISTA PAVIMENTAÇÃO



Eventos



47ª RAPv | 24º ENACOR | 3ª ExpoEnacorRAPv Inovação e Sustentabilidade na Infraestrutura Brasileira (2022)



Retorno ao Formato Presencial e Fortalecimento da Ambiência de Negócios

Em 2022, o setor de infraestrutura de transportes do Brasil vivenciou um importante reencontro com os eventos presenciais, na cidade de Bento Gonçalves (RS), localizada no coração da Serra Gaúcha. A 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), o 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) e a 3ª edição da ExpoEnacorRAPv reuniram cerca de 1.400 participantes, consolidando-se

como um dos principais eventos do calendário técnico nacional.

O evento foi uma realização conjunta da Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) e da Associação Brasileira dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem (ABDER), com o apoio institucional do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS).

Realizado entre os dias 9 e 12 de agosto de 2022, o encontro teve como propósito central promover o debate sobre as principais evoluções, tendências, inovações tecnológicas, políticas públicas e práticas de gestão nas diversas áreas da infraestrutura de transportes.

A programação técnica foi cuidadosamente estruturada para contemplar temas estratégicos, tais como:

- **Pavimentação:** Novas tecnologias, materiais e métodos aplicados à construção e manutenção de pavimentos;

- **Ferrovias e Aeroportos:** Desafios e inovações nos modais ferroviário e aeroportuário;
- **Projetos e Gerência de Pavimentos:** Abordagens relacionadas ao ciclo de vida dos pavimentos e à otimização de recursos;
- **Logística e Segurança Viária:** Infraestrutura como vetor de eficiência logística e redução de acidentes.

Dentre os tópicos discutidos, destacaram-se os impactos das mudanças climáticas sobre a infraestrutura rodoviária, a segurança no transporte terrestre e a incorporação de conceitos de **idades inteligentes** ao setor, refletindo uma visão integrada e sustentável para o futuro da mobilidade no país.

Ao longo do evento, foram realizadas:

- **26 palestras técnicas,**
- **6 minicursos,**
- **3 mesas-redondas,**
- **Apresentação de 94 trabalhos técnico-científicos e estudos de caso,** provenientes de diversos estados brasileiros.

Reconhecimentos e Valorização Profissional



Um dos momentos de destaque foi a entrega do **Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom – Edição 2022**, homenageando profissionais com atuação relevante no setor:

- **Eng.ª Luciana Nogueira Dantas (DNIT-RJ)**
- **Eng.º Rui Corrêa Vieira (ABDER)**

Compromisso com a Inovação e a Qualificação Contínua

A 47ª RAPv, o 24º ENACOR e a 3ª ExpoEnacor-RAPv reafirmaram o compromisso da ABPv e da ABDER com a **excelência técnica**, a **inovação** e o **desenvolvimento sustentável** da infraestrutura de

transportes no Brasil.

O evento contou com o apoio e a parceria de diversas instituições e empresas, classificadas da seguinte forma:

Patrocinadores

SICEPOT, Mútua, Owntec, Strata Engenharia, E-vias, infraTest, Bidim Wavin, Simemp, Neo Constec, Lisy Segurança Viária, Geobrugg, Pavesys, Shempo, Grupo GTO, Huawei, Softplan, Traçado, 3M, SERPRO.

Apoio

ACO, Base Forte, Sacyr, Maccaferri, ABCP, Romanelli, Dynatest, Rota de Santa Maria.

Apoio Institucional

Greca, Nouryon, PTS Matest, SOLOCAP, Ingenuity.

Apoio Institucional – Palestras

Future Engenharia além da técnica, DYGI, EGIS, Garcia Monteiro, Huesker, Stratura Asfaltos.

Apoio Especial

Nervis Engenharia, Fremix, SOS DOCS.

Capacitação Técnica Online – ABPv 2022

Paralelamente às atividades presenciais, a ABPv promoveu ao longo de 2022 uma série de ações de capacitação virtual, alinhadas com as demandas do setor e com o objetivo de fomentar a atualização técnica contínua dos profissionais. As atividades realizadas foram:

- **Compactação de Solos** – 12/04/2022
- **Compactação de Revestimento Asfáltico** – 19/04/2022
- **Treinamento MeDiNa em foco** – 23 a 27/05/2022 (Módulos 1 a 5)
- **Microrrevestimento Asfáltico a Frio: o que é? Precauções na execução** – 28/06/2022
- **Conceitos Geotécnicos Aplicados a Pavimentos** – 25 a 27/10/2022 (Módulos 1 a 3)
- **Dosagem Superpave e Novos Métodos de Seleção Granulométrica de Agregados** – 03, 07 e 08/12/2022



INFLUÊNCIA DA IDADE DO RAP NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO

Jamille Freitas Fiuza
 Mario Sergio de Souza Almeida
 Weiner Gustavo Silva Costa
 Cleidson Carneiro Guimarães
 Felipe Freitas Santos de Jesus
 Marcos Couto Correia

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
 Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

DOI: 10.21526/abpv.v51.1

RESUMO

A fresagem é uma das técnicas necessárias para manutenção e restauração de pavimentos asfálticos no Brasil. A aplicação dessa técnica gera volumes consideráveis de resíduos do revestimento antigo, conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Paviment*), constituído, basicamente, de agregados diversos e ligante asfáltico envelhecido. Nesse trabalho avaliou-se a influência da idade de RAPs oriundos de três diferentes rodovias do Estado da Bahia, no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente produzidas em laboratório e dosadas com elevado percentual de RAP. Inicialmente utilizou-se o rotarex para determinação do teor de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) existente em cada amostra de resíduo. De posse dos agregados obtidos da extração do CAP foi determinada a granulometria de cada material. Após isso foram dosadas misturas recicladas com adição de CAP e agregados virgens de forma a utilizar o maior percentual possível de RAP. Com o auxílio do método de dosagem Marshall, adicionou-se ao material fresado teores crescentes de CAP novo, do tipo 50/70, para moldagem de corpos de prova e determinação dos parâmetros mecânicos (estabilidade e fluência) e volumétricos (volume de vazios e relação betume vazios) de cada mistura. Os resultados indicaram que a idade do RAP influencia significativamente no comportamento mecânico das misturas e no teor de CAP novo necessário para viabilização dessas misturas asfálticas recicladas para uso como camada de revestimento de rodovias de elevado volume de tráfego.

Palavras-chave:

Material fresado,
Sustentabilidade,
Dosagem Marshall,
envelhecimento do CAP.

ABSTRACT

Milling is one of the necessary techniques for maintenance and restoration of asphalt pavements in Brazil. The application of this technique generates considerable volumes of residues from the old coating, known as RAP (Reclaimed Asphalt Paviment), consisting basically of different aggregates and aged asphalt binder. In this work, the influence of the age of RAPs from three different highways in the State of Bahia was evaluated on the mechanical behavior of hot recycled asphalt mixtures produced in laboratory and dosed with a high percentage of RAP. Initially, rotarex was used to determine the content of Asphalt Petroleum Cement (CAP) in each residue sample. With the aggregates obtained from CAP extraction, the granulometry of each material was determined. After that, recycled mixtures were dosed with the addition of CAP and virgin aggregates in order to use the highest possible percentage of RAP. With the aid of the Marshall dosing method, increasing levels of new CAP, type 50/70, were added to the milled material for molding specimens and determining the mechanical (stability and fluency) and volumetric (volume of voids and bitumen ratio) parameters of each mixture. The results indicated that the age of the RAP significantly influences the mechanical behavior of the mixtures and the content of new CAP needed to make these recycled asphalt mixtures feasible for use as a coating layer for high-traffic roads.

Keywords:

*Milled material,
sustainability,
Marshall dosing,
CAP aging.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente prática na Engenharia rodoviária no uso de técnicas alternativas (ALMEIDA-COSTA e BENTA, 2016; RAPOSEIRAS *et al.*, 2017) e aproveitamento de resíduos diversos em obras de pavimentação, com destaque para borracha de pneus e resíduo de construção e demolição (RCD), vem tendo reflexos ambientais e econômicos em diferentes países (IZAKS *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2016; UNGER FILHO *et al.*, 2020). Entretanto, o material fresado do revestimento asfáltico da própria via, conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Paviment*), se destaca como o RCD mais utilizado nas obras que optam pelo uso da reciclagem (SEGUNDO *et al.*, 2016, LIZÁRRAGA *et al.*, 2018). No Brasil, em especial, com aproximadamente 213,5 mil km pavimentados, dos quais 99% possuem revestimento asfáltico (CNT, 2019), minerar agregados e ligantes asfálticos envelhecidos em obras de restauração para aproveitamento em misturas asfálticas recicladas vem se tornando uma rotina, principalmente em rodovias concessionadas. De acordo com o manual de restauração de pavimentos asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006b), a economia de energia gerada pelo uso da reciclagem de pavimentos asfálticos pode variar entre 16%, quando a mistura é produzida em usina, até 65%, quando a reciclagem é realizada na própria pista.

O aumento do custo do ligante de asfalto nos últimos anos também vem fomentado a utilização de RAP na produção de misturas asfálticas recicladas, aliado ao fato de ser uma alternativa ecológica por reduzir a necessidade de materiais virgens (IZAKS *et al.*, 2015). Nessa linha, Moghaddam e Baaj (2017) destacam que os benefícios relacionados a reutilização de agregados e ligantes asfálticos disponíveis no RAP contribuem para redução significativa no custo de construção do pavimento, atrelado a diferentes benefícios ambientais. Neste cenário, vários estudos ao redor do mundo procuram viabilizar a utilização do RAP em misturas asfálticas quentes, mornas e frias. Izaks *et al.* (2015) projetaram três misturas formadas pela combinação de RAP de duas diferentes origens e agregados locais para rodovias de média e alta intensidade de tráfego. A

análise do ligante do RAP mostrou envelhecimento significativo, com penetração em torno de 38 (0,1 mm) e ponto de amolecimento de 56 °C. Foram projetadas misturas contendo 30% e 50% de RAP de cada origem sem uso de agente rejuvenescedor. Foi adicionado, entretanto, um ligante mais macio, caracterizado pela penetração 70/100 (0,1 mm), em contraposição ao tradicionalmente utilizado na Estônia, cuja penetração se enquadra em 50/70 (0,1 mm), para compensar a rigidez provocada pelo envelhecimento do ligante do RAP e, assim, melhorar a qualidade do ligante asfáltico resultante da mistura (velho + novo). Os resultados dos testes de deformação na trilha de roda demonstraram que todas as misturas testadas apresentaram alta resistência e os resultados de testes de fadiga usando viga de flexão de quatro pontos foram semelhantes aos praticados na mistura tradicional. Estes resultados demonstraram que as misturas recicladas com alto teor de RAP podem ser projetadas com sucesso para atender aos requisitos volumétricos e de desempenho compatíveis com as misturas convencionais.

Lizárraga *et al.* (2018) desenvolveram estudos de laboratório e campo voltados para utilização de elevados teores de RAP (70% e 100%) na dosagem de misturas asfálticas mornas para aplicação em vias urbanas. O RAP foi inicialmente caracterizado para dosagem e, posteriormente, as misturas foram produzidas em uma usina protótipo a uma temperatura de mistura abaixo de 100 °C, com uso de aditivo. Em seguida, para comparar seu desempenho mecânico, seções testes foram construídas com a mistura reciclada morna produzida e com uma mistura a quente convencional. Após um ano da construção das seções testes foram coletadas amostras para ensaio em laboratório para determinação de espessuras, densidade, módulo de rigidez, resistência à tração indireta e resistência à fadiga a 20 °C. Os resultados mostraram que o desempenho das misturas mornas pode ser comparado com o das misturas convencionais a quente em termos de resistência à fadiga e resistência a deformações permanentes.

Unger Filho *et al.* (2020) avaliaram o compor-

tamento de misturas asfálticas recicladas a frio, dosadas com 100% de RAP e emulsão asfáltica de reciclagem, para utilização como camada de base de pavimento. Foram realizadas análise em laboratório e campo sobre a influência do tempo de estocagem da mistura reciclada de 7, 14 e 28 dias, antes da compactação, e do tempo de cura de 1, 3, 7, 26 e 56 dias, após compactação, no seu comportamento mecânico. Os resultados indicaram, segundo os autores, que o tempo de armazenamento melhorou, a princípio, as propriedades mecânicas da mistura devido à interação entre o asfalto envelhecido e o agente de reciclagem de asfalto emulsionado na condição solta. Entretanto, esse aumento inicial mostrou-se insignificante com relação aos tempos de cura avaliados.

Bolina da Cunha *et al.* (2018) avaliaram o comportamento mecânico de misturas usinadas a quente contendo 50% e 100% de RAP e adição de diferentes teores de cimento asfáltico de petróleo (CAP) novo, entre 2,5% e 4,5%. O RAP utilizado foi proveniente da rodovia BR-290, situada no trecho entre os municípios de Rosário do Sul e São Gabriel, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A caracteri-

zação do material fresado foi realizada através de ensaios de granulometria, extração de ligante, estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral, em corpos de prova cilíndricos compactados de acordo com a metodologia Marshall. Os resultados obtidos demonstraram valores de estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral satisfatórios para a aplicação das misturas asfálticas testadas para uso em camadas de rolamento.

Na utilização dessas misturas, entretanto, um ponto importante a se destacar é a importância da origem e idade do RAP na demanda da mistura asfáltica reciclada pela adição de ligante asfáltico novo, ou mesmo agente de reciclagem que proporcione melhorias nas características de consistência do ligante envelhecido presente no material fresado. Gaspar *et al.* (2020) destacam o desafio de produzir misturas asfálticas recicladas com maior conteúdo RAP sem comprometer o desempenho da mistura no campo. Na reciclagem a quente e morna, segundo os autores, o ligante do RAP é ativado, mas a quantidade que realmente interage com o ligante novo é ainda desconhecida (Figura 1).

Nessa perspectiva o objetivo do presente estudo é avaliar a influência da idade de diferentes tipos de RAP, oriundos de rodovias do Estado da Bahia, no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas dosadas em laboratório com elevados percentuais de RAP.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental teve início com a coleta do material fresado (RAP) em cada uma das rodovias contempladas no presente estudo, sendo duas delas rodovias Federais, BR-324/BA, km 540 e BR-101/BA, km 505,6, além da rodovia Estadual BA-093, km 37. As amostras foram levadas para o Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), onde deu-se início aos ensaios de caracterização.

Os revestimentos das rodovias BR-324 e a BA-093, usinados à quente, do tipo concreto asfáltico (CA), possuíam, no momento da coleta, cerca de 10 anos de executados, com espessura média de corte na operação de fresagem dessas duas rodovias de 5,0 cm. Na BR-101, o revestimento, também em CA, havia sido executado há cerca de dois anos. O motivo para a fresagem precoce no segmento onde coletou-se a amostra foi justificado pela ocorrência de trilhas de roda excessivas, devido a instalação de ondulação transversal (“quebra molas”) no local, as

quais estavam comprometendo a trafegabilidade e, por isso, a espessura fresada para regularização foi da ordem de 2,0 cm.

Para confecção dos traços de mistura asfáltica reciclada, foram adquiridos 50 kg de brita 5/8” e 50 kg de brita 3/4”, ambas da pedra Pedra do Cavalo, situada no município de Muritiba/BA, além de 20 litros de CAP 50/70, cedido pela Empresa Brasileira Produtos Asfálticos Ltda.

Para nortear o processo de dosagem das misturas recicladas, bem como aferir o comportamento mecânico e volumétrico das respectivas misturas, utilizou-se como referência (controle) os parâmetros do traço original do concreto asfáltico executado na BR-101.

2.1 Parâmetros de controle do traço original da BR 101

Os parâmetros de interesse do traço original do concreto asfáltico executado na BR-101, que serviram de controle para dosagem e avaliação das misturas asfálticas recicladas, foram os teores de CAP testados com os respectivos valores de massa específica aparente (Gmb), vazios do agregado mineral (VAM), volume de vazios (Vv), relação betume/vazios (RBV), estabilidade e fluência, os quais estão apresentados na Tabela 1.



Figura 1: Ilustração de três cenários possíveis de misturas entre os ligantes asfálticos (novo e envelhecido). Fonte: Adaptado de GASPAR *et al.* (2020).

Tabela 1: Parâmetros relativos ao traço original da BR 101 (Controle)

Teor de CAP (%)	GMB (g/cm ³)	VV (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	fluência (mm)
4,5	2,35	6,21	16,28	61,85	1343	1,90
5,0	2,37	4,87	16,13	69,82	1328	2,60
5,5	2,39	3,51	15,99	78,02	1245	3,20
6,0	2,41	1,93	15,67	87,66	1094	4,10
6,5	2,43	0,44	15,44	97,16	901	5,00

2.2 Caracterização do material fresado e agregados virgens

As amostras de RAP foram coletadas imediatamente após os serviços de fresagem à frio, armazenados em sacos de 50 kg (cerca de 100 kg por rodovia) e transportados para o laboratório. No processo de quarteamento percebeu-se a presença de grumos no material fresado, sendo que na BR-324 a presença foi mais acentuada. As amostras de RAP foram quarteadas utilizando-se o quarteador de abertura 3/4", sendo que o material passante foi o utilizado no presente estudo. Os RAPs foram caracterizados com base na especificação de serviço do DNIT 33 (DNIT, 2005), contemplando a extração do ligante asfáltico residual, via Rotarex, método

DNER 53 (DNER, 1994b), análise granulométrica do agregado oriundo da extração, método DNER 83 (DNER, 1998b), densidade real e absorção do agregado graúdo, método DNER 81 (DNER, 1998a) e densidade real do agregado miúdo, método DNER 84 (DNER, 1998c).

Na Tabela 2 são apresentados os teores de CAP e nas Tabelas 3 e 4 as características dos agregados obtidos após extração com o Rotarex de cada amostra de RAP. Os agregados virgens adquiridos para comporem o traço junto com o RAP, foram submetidos aos ensaios de análise granulométrica (DNER, 1998b), densidade e absorção (DNER, 1998a). As granulometrias dos dois agregados virgens estão apresentadas na Tabela 3 e suas demais características encontram-se na Tabela 4.

Tabela 2: Teores de CAP dos materiais fresados

Método de ensaio	Teor de CAP BR-324/BA (%)	Teor de CAP BA-093/BA (%)	Teor de CAP BR-101/BA (%)
Rotarex	5,53	5,65	7,57

Tabela 3: Granulometrias dos agregados do fresado e agregados virgens

PENEIRAS		BR-324	BA-093	BR-101	BRITA 5/8"	BRITA 3/4"
Nome	Abertura (mm)	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
2"	50,8	100	100	100	100	100
1 1/2"	38,1	100	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	100	100	99,80
1/2"	12,7	97,15	97,07	98,84	71,28	10,64
3/8"	9,5	92,75	93,63	97,21	33,65	3,29
#4	4,8	75,14	73,56	80,74	0,93	1,20
#10	2,0	54,93	55,92	61,17	0,67	0,94
#40	0,42	29,03	31,59	34,61	0,62	0,74
#80	0,175	16,70	19,10	23,44	0,59	0,60
#200	0,075	8,79	10,08	13,67	0,50	0,44

Tabela 4: Caracterização dos agregados

Ensaio	BR-324		BA-093		BR-101		Brita 5/8"	Brita 3/4"
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Densidade aparente	2,73	-	2,74	-	2,62	-	2,76	2,76
Densidade real	2,79	2,73	2,78	2,75	2,67	2,71	2,79	2,79
Absorção	0,80	-	0,76	-	0,58	-	0,38	0,43

2.3 Caracterização CAP 50/70 novo

O CAP 50/70 novo foi caracterizado por meio dos ensaios de Penetração, método DNIT 155 (DNIT, 2010b), Viscosidade Saybolt-Furol, método DNER 4 (DNER, 1994a), Ponto de Fulgor, método DNER 148 (DNER, 1994d), e ponto de amolecimento, método DNIT 131 (DNIT, 2010a). A densidade do CAP 50/70 foi considerada igual a 1,03 g/cm³, conforme caracterização encaminhada pelo fornecedor do ligante. Os dados de caracterização do ligante asfáltico utilizado nos traços estão apresentados, de acordo com especificação de material DNIT 95 (DNIT 2006a), na Tabela 5. Com os dados

de viscosidade obtidos nas temperaturas de 135 oC, 150 oC e 177 oC e atendendo os limites de viscosidade estabelecidos pelo método 43 (DNER 1995), foram determinadas as temperaturas para a mistura e compactação do concreto asfáltico reciclado (Figura 2). A faixa de temperatura para mistura variou entre 149,9 oC e 156,5 oC, enquanto para compactação a temperatura ficou compreendida entre 131,6 oC e 140,4 oC.

Cabe destacar que não foi utilizado agente rejuvenescedor no presente estudo, motivo pelo qual escolheu-se o CAP 50/70 novo de um lote que apresentou a menor consistência possível, da mesma forma que Izaks *et al.* (2015), conforme os valores medidos de penetração, viscosidade e ponto de amolecimento, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização do CAP novo

ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DNIT-EM 95/2006	RESULTADO	MÉTODO DE ENSAIO
Penetração a 25 °C (0,1 mm)	50 - 70	70	DNIT-ME 155/2010
	135 °C	Min. 141	
Viscosidade Saybolt-Furol (s)	150 °C	Min. 50	DNER-ME 4/1994
	177 °C	30 - 150	
Ponto de fulgor (°C)	Min. 235	335	DNER-ME 148/1994
Ponto de amolecimento (°C)	Min. 46	39,5	DNIT-ME 131/2010

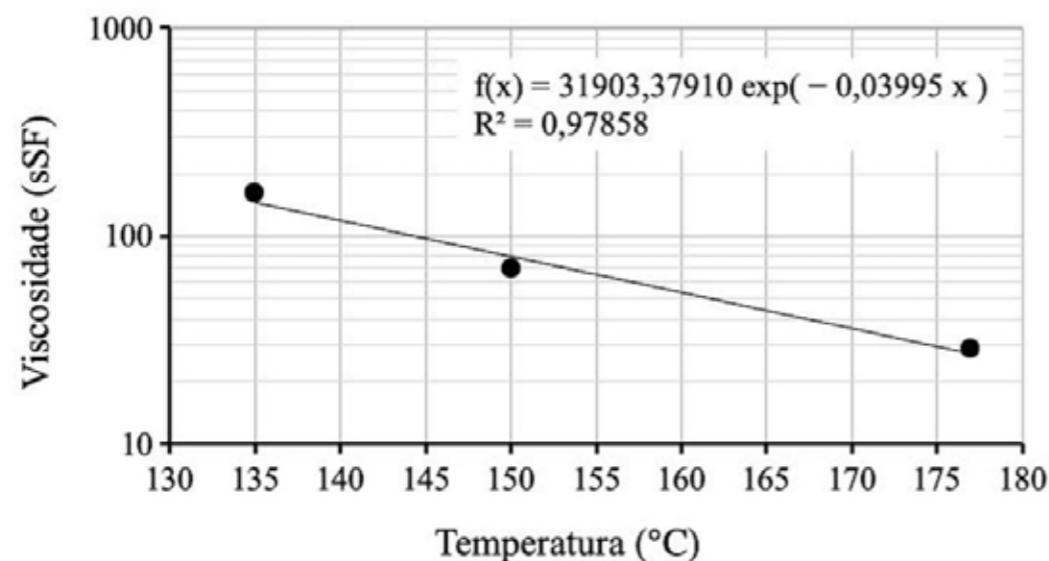


Figura 2: Curva viscosidade x temperatura do CAP novo

2.4 Dosagem da mistura asfáltica reciclada

O manual de restauração de pavimentos asfálticos (DNIT, 2006b) estabelece que na dosagem da mistura reciclada a quente, quando for necessária uma correção granulométrica do RAP, deverá ser determinada a quantidade e qualidade dos agregados ou da mistura a ser adicionada, de maneira a satisfazer da melhor forma a faixa granulométrica específica adotada. Simultaneamente, deverá ser analisada a necessidade de utilização do CAP adicional.

Dessa forma, conhecendo-se a curva granulométrica dos agregados do RAP e dos agregados virgens (Tabela 2), definiu-se de forma interativa as porcentagens, em massa, de cada material para a

dosagem da mistura reciclada. O critério utilizado para tal foi de que o acréscimo dos agregados fosse realizado de forma que houvesse o melhor enquadramento possível na faixa C da especificação de Serviço DNIT 33 (DNIT, 2005), com o maior teor possível de fresado. As quantidades de brita 5/8", brita 3/4" e RAP que melhor se ajustaram em cada dosagem, nessa ordem, foram:

- a) BR-324: 10%; 10%; 80%;
- b) BA-093: 17%; 10%; 73%;
- c) BR-101: 18%; 15%; 67%.

As granulometrias de cada traço estão apresentadas junto com os limites estabelecidos pela faixa C da especificação de serviço DNIT 33 (DNIT, 2005) na Figura 3.

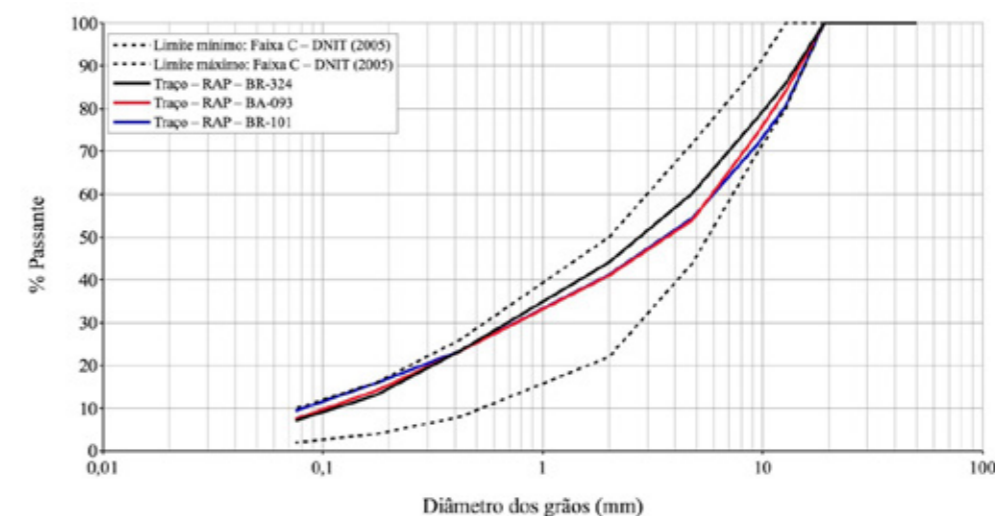


Figura 3: Granulometria dos diferentes traços.

Os teores de CAP utilizados na dosagem da mistura reciclada (soma do CAP envelhecido do RAP e CAP 50/70 novo) variaram de acordo com as características de cada tipo de RAP. Inicialmente todos os traços receberam adição de CAP até o limite de 2,5%. Entretanto, com o objetivo de analisar o comportamento de uma das misturas com RAP mais antigo, definiu-se que para a mistura com o RAP da BR-324 a quantidade adicional de CAP novo seria maior, ficando próximo de 3%. Para cada traço foram moldados, de início, CPs sem adição de CAP novo, ou seja, apenas com o teor de ligante originalmente presente em cada RAP, para servir como uma espécie de controle para avaliação da variação das propriedades mecânicas e volumétricas das amostras testadas com teores crescentes de CAP novo.

Na Tabela 6 encontra-se o detalhamento da quantidade dos materiais utilizados para confecção dos corpos de prova de 1200 g cada, para os diferentes teores de ligante asfáltico que foram testados, baseado nos traços determinados anteriormente (Tabela 1).

De acordo com o método DNER 43 de ensaio Marshall (DNER, 1995), para cada teor de ligante foram moldados três corpos de prova. O objetivo deste ensaio foi determinar o teor ótimo de CAP

total que representasse o melhor comportamento quanto a resistência à compressão (estabilidade), fluência, volume de vazios (VV) e relação betume/vazios (RBV), de forma a atender as especificações estabelecidas pela especificação de serviço 33 (DNIT, 2005). Essa preparação resultou em 18 CPs para as misturas com RAP da BA-093 e BR-101 e 24 CPs para a mistura com RAP da BR-324.

Os materiais foram aquecidos, conforme temperaturas definidas pela curva de viscosidade elaborada (Figura 2). O RAP foi pré-aquecido em estufa a 120 °C para retirada dos grumos remanescentes e depois foi quarteado para obtenção da quantidade necessária para cada teor. Em seguida, o fresado foi aquecido na mesma faixa de temperatura definida para o CAP 50/70 novo (Figura 2) e os agregados virgens foram aquecidos a temperatura de 12,5 °C acima da temperatura do CAP, aproximadamente, conforme o método 43 (DNER, 1995). Após atingirem as devidas temperaturas cada material foi levado ao tacho de mistura, sendo que o CAP foi adicionado por último sobre os agregados e RAP. A temperatura final de cada mistura ficou por volta de 150 °C e a temperatura de compactação em torno de 138 °C. A compactação da mistura foi realizada com 75 golpes do soquete Marshall em cada face do corpo de prova.

Tabela 6: Detalhamento da dosagem de cada mistura reciclada testada

ORIGEM DO RAP	BRITA 5/8"	BRITA 3/4"	RAP			CAP NOVO		CAP TOTAL
	(g)	(g)	Agregado (g)	CAP (g)	CAP (%)	(g)	(%)	(%)
BR-324	114,63	114,63	917,04	53,68	4,47	0,00	0,00	4,47
	114,24	114,24	914,29	53,53	4,46	3,59	0,30	4,76
	113,76	113,76	909,00	53,27	4,44	9,25	0,77	5,21
	113,21	113,21	905,66	53,01	4,42	14,91	1,24	5,66
	112,68	112,68	901,41	52,77	4,40	20,47	1,71	6,10
	112,15	112,15	897,20	52,51	4,38	25,99	2,17	6,54
	111,63	111,63	893,02	52,28	4,36	31,45	2,62	6,98
BA-093	195,46	114,97	839,31	50,26	4,19	0,00	0,00	4,19
	194,29	114,29	834,29	49,96	4,16	7,18	0,60	4,76
	193,36	113,74	830,33	49,72	4,14	12,84	1,07	5,21
	192,45	113,21	826,42	49,49	4,12	18,44	1,54	5,66
	191,55	112,68	822,54	49,26	4,10	23,98	2,00	6,10
	190,65	112,15	818,69	49,03	4,09	29,48	2,46	6,54
BR-101	204,76	170,60	762,18	62,42	5,20	0,00	0,00	5,20
	203,77	169,81	758,49	62,12	5,18	5,80	0,48	5,66
	202,82	169,01	754,93	61,83	5,15	11,41	0,95	6,10
	201,87	168,22	751,40	61,54	5,13	16,96	1,41	6,54
	200,93	167,44	747,91	61,25	5,10	22,47	1,87	6,98
	200,00	166,67	744,44	60,97	5,08	27,92	2,33	7,41

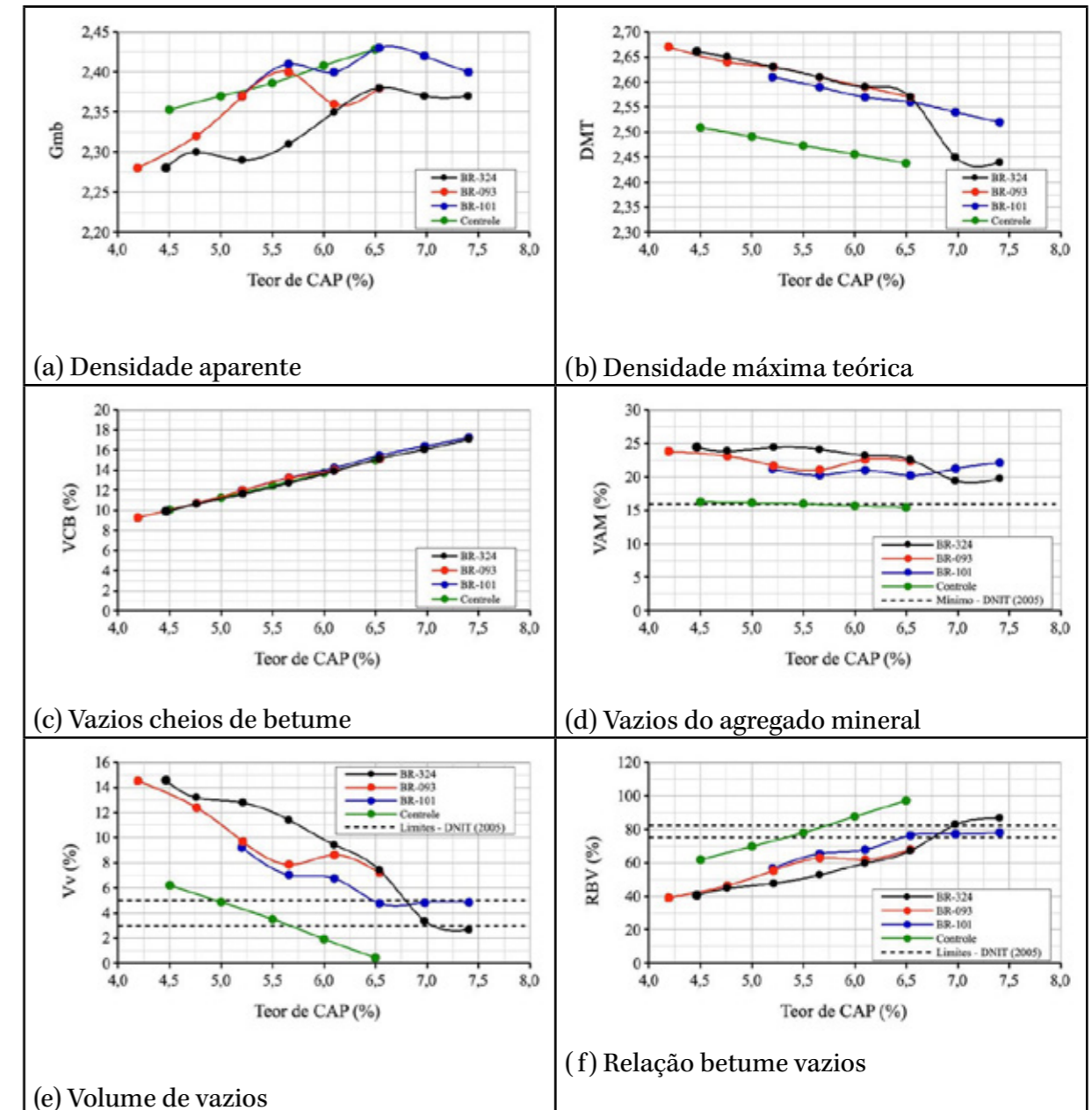
Após a compactação os moldes foram colocados em uma superfície lisa e permaneceram em repouso por cerca de 14 horas para depois serem desmoldados. Após extração foram coletadas quatro medidas de altura dos CPs em posições diametralmente opostas. Os CPs foram pesados ao ar e posteriormente pesados imersos em um recipiente com água, conforme o método DNER 117 (DNER, 1994c). Em seguida as amostras foram imersas em banho-maria a $(60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C})$ por um período de 30 a

40 minutos. Por fim, um a um, os CPs foram rompidos na prensa Marshall para determinação dos valores de estabilidade e fluência. O critério adotado para definição do teor ótimo de ligante considerou o menor teor entre aqueles que atenderam a todos os parâmetros volumétricos, de resistência e deformabilidade, preconizados pela especificação de Serviço 33 (DNIT, 2005) e analisados no presente estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Características volumétricas dos traços

Estão apresentados na Figura 4, de forma comparativa, os resultados de densidade aparente (Gmb), densidade máxima teórica (DMT), volume de vazios (Vv), vazios cheios de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV), referentes às misturas recicladas dosadas.


Figura 4: Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas.

Os resultados da Figura 4 demonstram que os valores da densidade aparente (Gmb) das três misturas cresce com o aumento do teor de CAP total até o atingimento de seu valor máximo para os teores de 6,54%, 6,54% e 5,66%, para BR-324, BA-093 e BR-101, correspondendo a 2,17%, 1,54% e 1,41% de adição de CAP novo, respectivamente (Tabela 6). Entretanto, observa-se que para baixos teores de CAP, os maiores valores de Gmb são apresentados para a mistura de controle, demonstrando que a densificação das misturas sofre influência da rigidez do CAP. Quanto a densidade máxima teórica (Gmm) ocorre o inverso, ou seja, há uma queda contínua deste parâmetro com o aumento do teor de CAP, pois, por ser este o de menor densidade real entre os materiais constituintes das misturas asfálticas, seu acréscimo implica na redução relativa dos demais componentes, culminando na redução da Gmm. Em relação aos valores de VCB e VAM, calculados com base em cada mistura produzida para determinação do Vv e RBV, apresentam comportamentos distintos, sendo que enquanto o primeiro apresenta valores praticamente coincidentes para as três misturas testadas e cresce continuamente com o aumento do teor de CAP, o segundo apresenta diferenças entre as misturas e sua variação tende a pequena queda com aumento do teor de ligante. O comportamento do VAM da mistura de controle seguiu a mesma tendência e variação ainda menor que as apresentadas pelas misturas recicladas. Finalmente, os resultados de VV e RBV, que são fisicamente correlacionados, apresentam comportamentos esperadamente antagônicos, onde VV decresce com o aumento do teor de CAP e, conseqüentemente, RBV aumenta com o aumento da quantidade de ligante na mistura. Cabe reiterar que o comportamento apresentado pelas misturas em relação ao Gmb tem reflexos no Vv e RBV, pois as misturas recicladas que apresentaram dificuldades de compactação para os teores mais baixos de CAP, tenderam a apresentar volumes de vazios maiores que a mistura de controle nestes pontos. À medida que o teor de CAP foi aumentando nas misturas recicladas o Vv foi diminuindo e, conseqüentemente, o RBV foi crescendo.

Na Figura 4 (e) e (f) encontram-se sinalizados os limites de Vv e RBV estabelecidos pela especificação de serviço DNIT 33 DNIT (2005), de 3% a 5% e 75% a 82%, respectivamente, para misturas recicladas a quente. Com base nisso, é possível verificar que a mistura com RAP da BR-324 somente apresentou resultado compatível de Vv para o teor de 6,98% de CAP total (adição de 2,62% de CAP novo). Entretanto nesse teor o RBV foi de 82,77, ou seja, acima do limite máximo estabelecido. Entretanto, a mesma norma define que caso o RBV não seja atingido, basta que a mistura atenda ao limite mínimo de VAM de 16%, sinalizado na Figura 4 (d), para que atenda a esse critério. Para a mistura com RAP da BR-093, cujo resíduo é de mesma idade que o da BR-324, com os teores testados de CAP total e CAP novo adicionado, não foi possível atingir as exigências da referida norma para Vv, demonstrando, conforme comprovado com o RAP da BR-324, da necessidade de utilização de teores maiores de CAP novo na mistura.

Quanto a mistura com o RAP da BR-101, sendo este o mais novo dentre os três resíduos analisados, as exigências da especificação de serviço DNIT 33 DNIT (2005) foram atendidas com menor percentual de CAP total (6,54%) e de CAP novo (1,44%). Vale destacar que nesse CAP total tem-se 5,10% de ligante do RAP que quando comparado ao RAP da BR-324, esse teor é 17% maior. Mesmo considerando-se essa diferença, a demanda por CAP novo da mistura com o RAP da BR 324 é 31% maior, demonstrando haver relação entre a idade do RAP e a demanda por ligante novo para viabilizar a mistura com o ligante envelhecido. Comparativamente, a mistura de controle atendeu aos critérios da especificação de serviço DNIT 33 DNIT (2005) com teor ótimo de 5,5%. É interessante ainda observar que o comportamento da mistura de controle com diferentes teores de CAP apresentou variação linear dos parâmetros avaliados, enquanto que o mesmo não ocorreu nas demais misturas. Tal fato pode estar relacionado com o processo de interação entre o CAP residual do RAP com o CAP novo adicionado descrita por GASPAR *et al.* (2020).

3.2 Estabilidade e fluência Marshall

Na Figura 5 são apresentados os resultados de estabilidade e fluência Marshall para os diferentes teores testados de CAP total das misturas recicladas e da mistura de controle. Os resultados de estabilidade demonstram uma maior rigidez para baixos teores de CAP das misturas com RAP mais antigos (BR-324 e BR-093), em comparação aos resultados da mistura com o RAP da BR-101, mais novo entre os três. A mistura de controle corrobora essa constatação, visto que apresenta os menores valores de estabilidade até 5,5% de CAP e, a partir desse teor, praticamente se iguala a mistura reciclada da BR 101. A maior rigidez das misturas recicladas se justifica pela presença predominante do CAP do RAP para os menores teores testados que determina o comportamento da mistura pela sua excessiva rigidez provocada pelo seu envelhecimento. Prova disso é que nas misturas testadas sem acréscimo de CAP novo foram as que apresentaram maiores

valores de estabilidade e menores valores de deformação (fluência) nas três misturas estudadas.

Do ponto de vista de atendimento da especificação de serviço DNIT 33 DNIT (2005), cuja exigência de estabilidade mínima é de 500 kgf, conforme linha tracejada da Figura 4 (a), todas as misturas atenderam a esse parâmetro. Quanto a fluência esse parâmetro é utilizado atualmente apenas para avaliar a tendência de deformação de misturas asfálticas, não existindo mais, entretanto, exigência desse parâmetro em norma para aprovação de projeto de traço de misturas asfálticas. Assim, considerando-se valores anteriormente praticados para esse parâmetro, onde os limites ficavam entre 2 e 4,5 mm, sinalizados com linha tracejada na Figura 5 (b), todas as misturas em algum teor de CAP seriam aprovadas, demonstrando a assertividade da norma em deixar de exigí-lo como critério de aceitação. Na Figura 5 é possível observar que o potencial das misturas recicladas, em comparação ao controle, conforme contatado por Lizárraga *et al.* (2018), Bolina da Cunha *et al.* (2018) e Unger Filho *et al.* (2020).

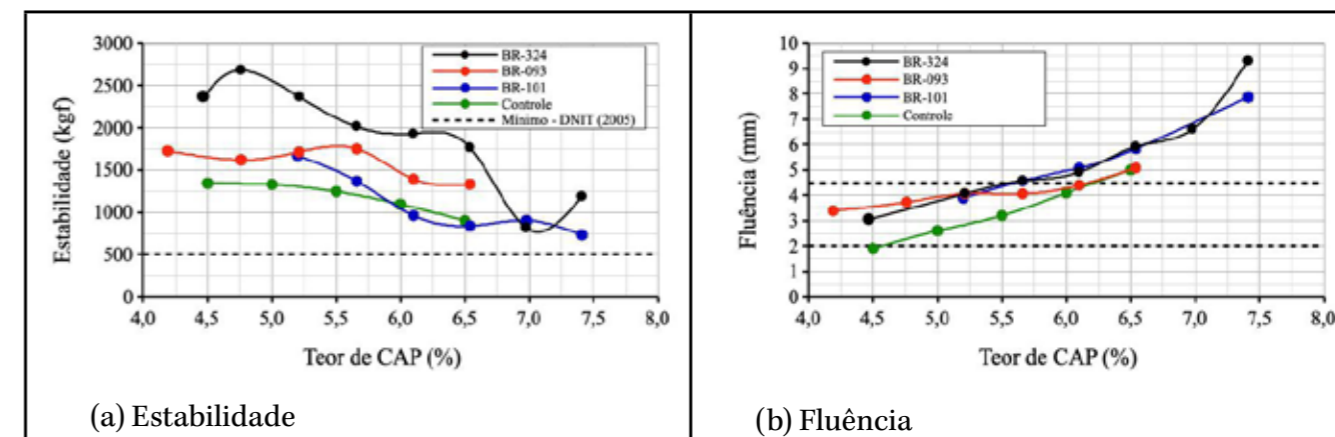


Figura 5: Estabilidade e fluência Marshall das misturas recicladas.

4. CONCLUSÃO

A avaliação do uso RAP de diferentes origens em misturas asfálticas recicladas demonstrou que a idade do resíduo influencia na dosagem e, principalmente, no consumo de CAP novo para viabilização da mistura para utilização como camada de revestimento de rodovias de tráfego pesado ($N > 5 \times 10^6$). Para RAPs mais antigos o uso de agentes rejuvenescedores pode ser uma alternativa interessante na medida em que este aditivo desempenhará o papel de rejuvenescer o ligante envelhecido do RAP, minimizando a necessidade de CAP novo. As dosagens realizadas com os RAPs da BR-342 e BA-093 demonstraram isso, onde ambos apresentaram comportamentos similares até a adição de 2,5% de CAP novo, aproximadamente, mas somente foi possível melhorar a performance da mistura contendo RAP da BR-324 com o aumento do CAP novo para algo em torno de 3%. Por outro lado, a mistura com o RAP da BR-101 mostrou que a juventude do ligante contribuiu para que essa mistura apresentasse o melhor desempenho entre as três misturas testadas e com baixa demanda por CAP novo. Por fim, cabe destacar que a técnica da reciclagem a quente utilizando resíduo de mistura asfáltica envelhecida já é uma realidade, proporcionando atualmente ganhos financeiros e ambientais intangíveis, principalmente nos trechos de rodovias sob concessão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida-Costa, A., Benta, A., “Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2308-2317, Jan. 2016.

Anuário CNT do Transporte: ESTATÍSTICAS CONSOLIDADAS 2019, <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/inicial>. Acesso em 12/05/2020.

Bolina da Cunha, C., Budny, J., Klamt, R. A., Centofante, R., Baroni, M., “Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado”, *Revista Matéria*, vol. 23, n. 3, Out. 2018.

_____. DNER-ME 4, Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994a.

_____. DNIT-ES 33, Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

_____. DNER-ME 43, Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall, RJ, Brasil, 1995.

_____. DNER-ME 53, Mistura betuminosa – porcentagem de betume, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994b.

_____. DNER-ME 81, Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998a.

_____. DNER-ME 83, Agregados – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998b.

_____. DNER-ME 84, Agregado miúdo – determinação da densidade real, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998c.

_____. DNIT-ES 95, Cimentos asfálticos de petróleo, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006a.

_____. DNER-ME 117, Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994c.

_____. DNIT-ME 131, Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010a.

_____. DNER-ME 148, Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994d.

_____. DNIT-ME 155, Material asfáltico – Determinação da penetração, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010b.

_____. DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR – 720: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro. 310 p. 2006b.

Gaspar, M. S., Vasconcelos, K. L., Lopes, M. M., Bernucci, L. L. B., “Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling”, *Revista Transportes*, vol. 28, n. 2, pp. 87–99, Abr. 2020.

Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I., Zaumanis, M., “Hot Mix Asphalt With High RAP Content”, *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 676-684, 2015.

Lizárraga, J. M., Ramírez, A., Díaz, P., Marcobal, J. R., Gallego, J., “Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation”, *Construction and Building Materials*, vol. 170, pp. 433–445, Mai. 2018.

Moghaddam, T. B., Baaj, H., “The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 805–816, Jul. 2017.

Raposeiras, A., Movilla, D., Vargas, A., Bilbao, R., Cifuentes, C., “Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction evaluation of Marshall stiffness, indirect tensile stress and resilient modulus in asphalt mixes with reclaimed asphalt pavement and copper slag”, *Renewable and Sustainable Energy Review Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 32, n. 1, pp. 15–24, Abr. 2017.

Segundo, I. G. R., Branco, V. T. F. C., Vasconcelos, K. L., Holanda, A. S., “Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado”, *Revista Transportes*, vol. 24, n. 4, pp. 85-94, Nov. 2016.

Unger Filho, W., Klinsky, L. M. G., Motta, R., Bernucci, L. L. B., “Cold Recycled Asphalt Mixture using 100% RAP with Emulsified Asphalt-Recycling Agent as a New Pavement Base Course”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Abr. 2020.

Xie, Z., Asce, S. M., Tran, N., Julian, G., Taylor, A., Blackburn, L. D., “Performance of Asphalt Mixtures with High Recycled Contents Using Rejuvenators and Warm-Mix Additive: Field and Lab Experiments”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, n. 10, Jul. 2016.

Como surgiu a ABPv

Há 63 anos a Associação Brasileira de Pavimentação está presente no cenário da infraestrutura de transportes do Brasil, promovendo a divulgação, o debate e o ensino da engenharia de pavimentação.

Sua história tem início numa época de grande entusiasmo de desenvolvimento rodoviário no país, os anos 50, quando o governo se dirigiu à realização de algumas rodovias importantes econômica e estrategicamente, e à melhoria de outras já existentes. A essa época, já era determinante que seriam utilizadas as técnicas da pavimentação para a garantia da qualidade das novas estradas e sua manutenção.

Nesse contexto, o engenheiro Mario Kabalem Restom, divagava com seus colegas de canteiros de serviços das obras rodoviárias sobre os benefícios que a engenharia nacional teria com a criação de uma associação em torno da pavimentação. Notadamente, seria o locus para sedimentar e aprofundar em estudos o que se observava no campo e debater novos ensaios e normas técnicas.

Da mesma ideia compartilhavam profissionais pioneiros da pavimentação no Brasil, como o engenheiro químico Pontes Corrêa, engenheiro Aldenor Campos e engenheiro Murillo Lopes de Souza.

Kabalem, então com espírito determinado, foi a mola propulsora da criação em 15 de setembro de 1959 da Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, na cidade do Rio de Janeiro. A ata de fundação foi assinada pelos engenheiros Saul Birman, Aldenor Ribeiro Campos, Jacques de Medina, Francisco Bolívar Lobo Carneiro, Paulo Alvim Monteiro de Castro, Manuel Ribeiro Alves Filho, Décio Nascentes da Silva, Fernando Fonseca Martins, Washington Juarez de Brito e pelo próprio Kabalem. Concretizava-se assim o ideal compartilhado com o químico Pontes Corrêa, que faleceu antes de ver seu sonho realizado.

Vale mencionar que já em 1951 a comunidade científica rejubilou-se com a criação do Conselho Nacional de Pesquisas, onde no seu âmbito, passou a funcionar, em 1957, o renomado Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, que foi muito importante na trajetória da ABPv.

No ano seguinte a sua criação, a ABPv realizou a primeira Reunião Anual de Pavimentação – RAPv. Nessa ocasião foi instituído pela Equipe Editora/Revista Construção, do engenheiro Aldenor Ribeiro Campos, o Prêmio Pontes Corrêa. A honra era destinada àqueles profissionais que contribuíam com relevância e destaque para a engenharia de pavimentação nacional. E posteriormente, o Prêmio Pontes Corrêa tornou-se a maior honraria concedida pela ABPv.

Com o avanço dos estudos e desenvolvimento da infraestrutura do país, a pavimentação se estendeu também para os modais ferroviário, portuário e aeroportuário.

Ao longo desses 63 anos a ABPv vem realizando periodicamente a Reunião Anual de Pavimentação – RAPv, e a Reunião de Pavimentação Urbana – RPU, dois importantes eventos nacionais do setor. São publicados periodicamente boletins informativos, livros, anais e a Revista PAVIMENTAÇÃO, uma referência em seu seguimento.

A área acadêmica que desenvolve pesquisas sobre mecânica de pavimentos, materiais, desempenho funcional e sistemas de gerência, muito deve à ABPv pelas oportunidades oferecidas de divulgação e discussão de seus trabalhos produzidos em monografias, dissertações e teses de pós-graduação.

O meio empresarial, no que tem de mais esclarecido, reconhece o papel que associações como a ABPv representam para o prestígio da Engenharia brasileira. Por isso, registram-se apoios financeiros para reuniões técnicas, publicações em geral e premiações.

E finalmente o setor governamental como prefeituras, Departamentos Estaduais (DERs) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) têm na ABPv um grande suporte através dos congressos, cursos e palestras para atualização de novos métodos e tecnologias mundialmente aplicadas.

Portanto, a ABPv é agente e testemunha de todos os esforços da engenharia nacional de pavimentação.

1ª Diretoria da ABPv. A partir da esquerda: Eng. Paulo Alvim Monteiro de Castro, Eng. Saul Birman, Eng. Mario Kabalem Restom, Eng. Jacques de Medina, Eng. Aldenor Ribeiro Campos, Eng. Manoel Ribeiro Alves Filho e Eng. Francisco Bolivar Lobo Carneiro



ESTUDO DO EFEITO DO EXCESSO DE CARGAS EM DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO UTILIZANDO O MEDINA

STUDY OF THE EFFECT OF EXCESS LOADS ON DIFFERENT ASPHALT PAVEMENT STRUCTURES USING MEDINA

Shana Leal Balzan¹
Gracieli Bordin Colpo²

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande (PUCRS), shanalealbalzan@gmail.com

²Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande (PUCRS), gracieli.colpo@pucrs.br

DOI: 10.21526/abpv.v51.2

RESUMO

O desempenho das rodovias é influenciado por diversos fatores, dentre eles a capacidade de suporte da estrutura e o aumento do tráfego pesado. A prática de exceder a carga por eixos dos veículos é uma atividade muito comum no Brasil e, conseqüentemente, é um dos maiores responsáveis pela redução da vida útil dos pavimentos. Os sistemas de pesagens têm como função monitorar este comportamento. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo analisar como o excesso de carga afeta o desempenho dos pavimentos, utilizando relatórios técnicos que apresentavam dados de tráfego coletados pelo sistema de pesagem em movimento (Weigh-In-Motion), instalado na rodovia BR-290. A verificação foi realizada através do programa computacional MeDiNa, baseado na metodologia mecanística-empírica, pelo qual avaliou os danos causados na estrutura em função da fadiga e da deformação permanente do pavimento. Em conjunto, foi averiguado como a consideração desta prática influencia o projeto de dimensionamento dos pavimentos flexíveis. A análise relatou que as estruturas utilizadas, originalmente mensuradas por um método empírico, apresentaram danos prematuros, para todas as estruturas e condições de tráfego avaliados. Além disso, foi constatado que o aumento da carga eleva a percentagem de área trincada e a deformação permanente do pavimento, conjuntamente afetando o dimensionamento das estruturas.

Palavras-chaves:

Efeitos da sobrecarga,
MeDiNa,
Pavimento flexível,
Weigh-In-Motion.

ABSTRACT

The performance of highways is influenced by multiple factors, including the structure's load capacity and the heavy traffic demand. The overload in vehicle's axles is a very common practice in Brazil, being one of the major factors affecting the extent of pavement's service life. Therefore, the load monitoring plays an important role on pavement management, aiming to control this practice. The objective of this study is to analyze the effect of overload on the pavement performance, by using traffic data presented by technical reports and collected by Weigh-In-Motion systems installed on the BR-290 highway. The cracking and permanent deformation performance were evaluated, through the software MeDiNa, which uses mechanistic-empirical models. Together, it was investigated how the consideration of this practice influences the design of flexible pavements. Results indicate that the analyzed structures, which were originally designed using empirical methods, present premature distresses, for all the structures and traffic conditions. Moreover, it was found that the increase in the axle loads increases considerably the cracked area and the cumulative permanent deformation, also affecting the design of structure.

Keywords:

*Effect of overload,
MeDiNa,
Flexible pavements,
Weigh-In-Motion.*

1. INTRODUÇÃO

O setor de transportes é fundamental para o desenvolvimento social e econômico dos países. A qualidade em que são realizadas a mobilização e a acessibilidade de pessoas e mercadorias, influencia o crescimento dos demais setores. No Brasil, o principal modal utilizado é o rodoviário, formado em sua maioria por rodovias de pavimento asfáltico.

O desempenho das rodovias depende do correto dimensionamento, baseado na escolha dos materiais, no estudo do tráfego, nas condições climáticas da região, da eficiência da execução e das técnicas de manutenção previstas durante a vida útil da via. Entretanto, segundo Motta (1991) e Franco (2007), o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006) encontra-se desatualizado por apresentar uma metodologia empírica, pela qual considera parâmetros médios e coeficientes de correlação fundamentados em observações em campo, baseados em tipos específicos de materiais e de condições climáticas, normalmente diferentes das utilizadas no projeto. Além disso, o dimensionamento foi estruturado considerando os danos de deformação no subleito, não contemplando os efeitos de fadiga causados pelas tensões cíclicas dos veículos. Este efeito só foi introduzido posteriormente, através da consideração do número de repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas (número N).

A fadiga e o afundamento da trilha de roda são os principais danos encontrados nas estruturas de pavimentos asfálticos, geralmente gerados pela ação do tráfego (Ceratti, 1991). A deterioração por fadiga está relacionada com a solicitação sucessiva do tráfego. Este fenômeno causa a alteração da estrutura interna, resultando nas perdas das características originais dos materiais que compõem as camadas do pavimento (Di Benedetto et al., 2004; Colpo, 2019). Já o afundamento da trilha de roda é uma deformação permanente causada na camada de revestimento asfáltico ou em suas camadas inferiores. A deformação decorre do intenso tráfego, da elevada temperatura e da sobrecarga dos veículos comerciais (Balbo, 2007; Preussler, 1983).

As deficiências encontradas nos pavimen-

tos asfálticos estão associadas a diversos fatores, dentre eles a capacidade de suporte e o aumento do tráfego de veículos pesados. Segundo Brito e Bock (2013), Bock (2016) e Chaves; Bernucci e Bittencourt (2016), nos últimos anos, os sistemas de pesagens rodoviárias mostraram um aumento na movimentação de cargas acima dos limites estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Conforme Brito (2015), dados coletados na rodovia BR-290 no Rio Grande do Sul, no trecho entre as cidades de Gravataí e Santo Antônio da Patrulha, mostraram que cerca de 13% dos veículos circulam com cargas acima dos limites legais permitidos, chegando a um percentual de sobrecarga de até 44% em relação às cargas máximas legais (CML). Dessa forma, gera uma maior solicitação da estrutura do pavimento, não prevista no dimensionamento. Albano (2005) mostrou que o excesso de 20% sobre a CML reduz o ciclo de vida de um pavimento delgado em até 80%.

Neste contexto, o presente artigo foi baseado no estudo realizado por Balzan (2019), tendo como objetivo analisar o efeito do excesso de cargas em pavimentos asfálticos, através de dados coletados pelo sistema de pesagem dinâmica localizado na BR-290, no trecho Porto Alegre – Osório. Para atender o objetivo proposto, foi utilizado o programa MeDiNa para simular o efeito do dano em diferentes estruturas de pavimentos devido às variações de carga dos veículos. Além disso, através de duas estruturas foi possível verificar como a consideração das cargas reais afeta o dimensionamento dos pavimentos. Para isso, foi escolhida a estrutura que apresentou o melhor desempenho ao trincamento e deformação permanente e a própria estrutura da BR-290.

Este trabalho teve como delimitação a utilização de trabalhos acadêmicos e relatórios técnicos de rodovias federais, onde há sistemas de pesagem, disponibilizados no site da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Também foram consideradas oito estruturas de pavimento existentes, encontradas nas rodovias brasileiras, para analisar e comparar o efeito do excesso de cargas, considerando o tráfego com cargas máximas legais (CML) e com cargas reais, coletadas pelo sistema de pesagem.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste item são apresentados tópicos fundamentais para o melhor entendimento do trabalho, tais como caracterização do tráfego para o dimensionamento dos pavimentos, os sistemas de fiscalização de pesagens de veículos e o método de dimensionamento nacional (MeDiNa), o qual está sendo avaliado pelo DNIT como proposta de novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil.

2.1 Características do tráfego

O tráfego rodoviário é representado pelos diversos meios de transporte que circulam pela via, pelo qual os veículos comerciais apresentam ênfase por influenciarem diretamente no dimensionamento do pavimento. Estes veículos são classificados conforme o número, distribuição e combinação dos eixos.

Segundo o manual de Quadro de Fabricantes de Veículos – QFV (2012) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), os eixos de carga podem ser isolados, chamados de eixos simples, ou composto, denominados de eixos tandem. Em conjunto, há a diferenciação quanto a quantidade de pneumáticos por eixo de rodagem, podendo ser simples, duplo ou triplo. Dessa forma, os eixos levados em consideração no método de dimensionamento de pavimentos são eixo simples de rodas simples (ESRS), eixo simples de rodas duplas (ESRD), eixo tandem duplo (ETD) e eixo tandem triplo (ETT).

Os veículos que circulam nas rodovias devem respeitar o limite máximo de Peso Bruto Total (PBT) ou Peso Bruto Total Combinado (PBTC), estabelecido pela Resolução nº 210 (CONTRAN, 2006), o qual varia conforme a quantidade e o tipo de eixo, juntamente com comprimento total. A tabela 1 apresenta as cargas máximas legais, por classificação de eixo, definidas pela resolução.

Tabela 1: Cargas Máximas Legais (CML) por Tipo de Eixo.

Tipo de eixo	Carga Máxima (tf)
ESRS	6,0
ESRD	10,0
ETD	17,0
ETT	25,5

2.2 Sistemas de pesagens

A determinação dos fatores de equivalência de carga, fundamental na definição do número de repetição do eixo-padrão, depende da solicitação das cargas dos eixos dos veículos comerciais que trafegam pelas rodovias. Com a necessidade de obter valores realísticos, ao invés de adotar as cargas máximas legais previstas na lei, são implantados postos de fiscalização e controle de pesagens (Balbo, 2007).

Segundo Fontenele (2011) os equipamentos de pesagens são instalados nos pavimentos e contemplam software de contagem capaz de armazenar informações relacionadas aos veículos e as unidades de pesagens. Estes equipamentos permitem a entrada de dados referentes aos postos, horário de passagem, classificação e placa dos veículos, peso por eixo, peso bruto total (PBT), valor da sobrecarga e valor da autuação. Os sistemas de pesagens podem ser operados de forma estática ou dinâmica.

2.2.1 Pesagem Estática

A fiscalização dos postos de pesagens estáticas ocorre através da seleção de veículos comerciais suspeitos por um agente fiscal, pelo qual são desviados para fora da pista, passando por uma balança seletiva com baixa velocidade. Caso seja identificado excesso de carga, os veículos são encaminhados para uma balança de precisão onde devem permanecer parados (Albano, 2005).

A pesagem estática é a mais utilizada no Brasil, encontrada nas principais rodovias federais do país. O sistema exige elevada participação de pessoas, necessárias desde a pré-seleção do tráfego até a emissão da notificação de multa. Ademais, quando há seleção de vários veículos comerciais para fis-

calização, ocorre a saturação da área de pesagem, permitindo que veículos sobrecarregados possam passar. Logo, a eficiência desse tipo de pesagem é baixa (Bock, 2016).

2.2.2 Pesagem Dinâmica

A pesagem dinâmica, também conhecida como pesagem em movimento (Weigh-In-Motion – WIM), é realizada com a velocidade de operação da via, não interferindo o fluxo. Segundo DNIT/UFSC (2007) este sistema proporciona dados de peso bruto total (PBT) e carga por eixo, levando em conta a velocidade e a classificação do tráfego.

O sistema de pesagem dinâmica é dividido em baixa (LS-WIM) e alta velocidade (HS-WIM). O sistema de baixa velocidade é realizado através do direcionamento de todo o tráfego pesado para uma balança dinâmica, com velocidade de passagem entre 5 a 15 km/h, que identifica e encaminha os veículos suspeitos de sobrecarga, através de sinais de trânsito, para uma balança estática ou de baixa velocidade. Caso seja detectada a irregularidade da carga, o veículo é retido no local até que seja notificado a penalidade por um agente e, em casos específicos, seja realizado o descarregamento do excesso da carga (Brito e Bock, 2013).

O sistema de alta velocidade contempla sensores instalados no pavimento ou sob pontes, possibilitando a pesagem automática de todos os veículos, sem influenciar o fluxo da rodovia. Caso seja confirmado o excesso de carga, o veículo é identificado por meio de análise de imagens e incluído no cadastro de infratores, emitindo a multa automaticamente (Brito e Bock, 2013). No Brasil, este sistema ainda é pouco utilizado, sendo encontrado em rodovias federais como BR-290, BR-101 e no trecho experimental da BR-381, realizando a pesagem e identificação dos veículos (Leandro et al., 2015; Bosso, 2018).

Segundo Brito (2015), o sistema HS-WIM apresenta diversas vantagens, como o monitoramento de toda a frota e o baixo custo de implantação, comparado com os postos de pesagens. Entretanto, ele apresenta algumas limitações quanto ao ciclo de vida dos sensores, expostos ao tráfego de cargas, e a precisão do sistema, influenciado pela calibração.

2.3 MeDiNa: método de dimensionamento nacional

O programa MeDiNa, que está em fase de análise pelo DNIT como proposta para ser o novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil, apresenta uma metodologia mecanística-empírica (Franco, 2007). A ferramenta leva em consideração análises mecânicas, como os módulos de resiliência, de fadiga e deformação permanente obtidas por meio de ensaios laboratoriais, e empíricas, desenvolvidas a partir de observações em campo, para validar a estrutura do pavimento. Dessa forma, possibilita um dimensionamento mais realístico, fundamentado em informações do tráfego, das características dos materiais e das condições ambientais.

O MeDiNa permite realizar o dimensionamento do pavimento por meio de dados de entrada e de algoritmos capazes de contabilizar a espessura de camadas necessárias para o projeto. Também possibilita a verificação de dados e estruturas definidas por projetistas, informando a vida útil do pavimento. Nas duas análises, o programa avalia os danos causados em função de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admissível no topo do subleito (Franco, 2007; Franco e Motta, 2018).

3. METODOLOGIA

Para a análise do efeito do excesso de carga no pavimento foram utilizados dados classificatórios e volumétricos de veículos coletados pelo sistema de pesagem em movimento (WIM) da rodovia BR-290, apresentados em uma pesquisa desenvolvida por Brito (2015) para a Concessionária da Rodovia Osório – Porto Alegre S/A (Concepa), que administra a rodovia. A coleta dos dados foi realizada no km 72+420, sentido Porto Alegre – Osório, durante 6 dias, entre 24/03/2014 e 29/03/2014.

Na pesquisa realizada por Brito (2015), a partir da coleta de dados pelo sistema WIM, foi determinado o número N considerando duas formas de carregamento: uma fundamentada no cenário ideal, considerando a carga máxima legal (CML) de cada eixo; e outra baseada no cenário real. A con-

cepção do segundo cenário baseia nos dados coletados pelo sistema de pesagem, pelo qual constata uma percentagem da frota que trafegava com cargas inferiores a CML, 87% do tráfego, e outra

com sobrecarga, equivalente a 13%. A configuração dos valores das cargas por eixo foi elaborada a partir da média verificada em cada uma das situações, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Configuração das cargas reais conforme o tipo de eixo.

Cenário real	Classificação dos eixos			
	ESRS	ESRD	ETD	ETT
Cargas médias inferiores a CML (87% do tráfego)	4,22 t	7,40 t	14,97 t	22,46 t
Sobrecarga (13% do tráfego)	7,08 t	12,20 t	24,55 t	35,32 t

A pesquisa realizada por Brito (2015) considerou as equações dos fatores de equivalência de carga (FEC) da United States Army Corps of Engineers (USACE), além de um período de projeto de 15 anos

e uma taxa de crescimento de 2,67% ao ano. Dessa forma, foram calculados os números N acumulados de cada cenário, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Número N acumulado para cada cenário de carregamento.

Cenário ideal	Cenário real
2,77E+08	3,25E+08

Para avaliar o desempenho do pavimento em relação à sobrecarga foi utilizado o programa MeDiNa, versão 1.1.5, onde foram inseridas e analisadas a própria estrutura da BR-290 (Brito, 2015) e outras sete estruturas de referência encontradas em rodovias brasileiras, tais como BR-116 (Specht, 2012), BR-381 (Chaves; Bernucci e Bittencourt, 2016) e RS-509 (Bueno, 2019). As propriedades utilizadas dos materiais empregados em cada camada, tais como módulo e coeficiente de Poisson, foram as disponibilizadas no banco de dados já existentes no MeDiNa. Dessa forma, a base de dados do software utilizada para a camada de concreto asfáltico

com ligante modificado por polímero (AMP 60/85) possui a classe 2 para fadiga. Para a representação do concreto asfáltico com asfalto modificado por borracha (AB8) também se optou por usar a classe 2 de fadiga, disponível no programa. Já os concretos asfálticos com CAP 50/70 e CAP 30/45, apresentam classes de fadiga 1 e 2, respectivamente. A Tabela 4 apresenta as estruturas analisadas e suas composições, constituídas por camadas de concreto asfáltico, brita graduada simples (BGS), macadame seco e areia.

Tabela 4: Estruturas analisadas neste trabalho.

Estrutura	Materiais	Espessura (cm)	Módulo (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Referência
A	CA – AMP 60/85	6,0	3184	0,30	Brito (2015)
	CA – CAP 50/70	8,0	8289	0,30	
	BGS	20,0	259	0,35	
	Macadame seco	22,0	311	0,35	
	Subleito	Infinito	189	0,45	
B	CA – AMP 60/85	10,0	3184	0,30	Specht (2012)
	BGS	15,0	259	0,35	
	Macadame seco	30,0	311	0,35	
	Subleito	Infinito	189	0,45	
C	CA – CAP 30/45	12,0	9000	0,30	Chaves; Bernucci e Bittencourt (2016)
	BGS	25,0	259	0,35	
	Macadame seco	30,0	311	0,35	
	Subleito	Infinito	189	0,45	
D	CA – CAP 30/45	12,0	9000	0,30	Chaves; Bernucci e Bittencourt (2016)
	BGTC	25,0	Sigmoidal	0,25	
	Macadame seco	30,0	311	0,35	
	Subleito	Infinito	189	0,45	
E	CA – CAP 30/45	16,0	9000	0,30	Klinsky; Faria e Barella (2015)
	BGS	12,0	259	0,35	
	BGTC	20,0	Sigmoidal	0,25	
	Macadame seco	20,0	311	0,35	
	Subleito	Infinito	189	0,45	
F	CA – AMP 60/85	8,0	3184	0,30	Brito e Bock (2013)
	BGS	15,0	259	0,35	
	Macadame seco	30,0	311	0,35	
	Areia	60,0	123	0,45	
	Subleito	Infinito	189	0,45	
G	CA – CAP 50/70	11,0	8289	0,30	Santos (2016)
	CA – AB8	6,1	4980	0,30	
	BGS	18,0	259	0,35	
	Macadame seco	20,0	311	0,35	
H	CA – AB8	10,0	4980	0,30	Bueno (2019)
	BGS	15,0	259	0,35	
	Macadame seco	18,0	311	0,35	
	Subleito	Infinito	189	0,45	

Para cada estrutura e situação de carregamento, foi realizada a simulação no software MeDiNa considerando a evolução do trincamento (AT) e do afundamento da trilha de roda (ATR). Salienta-se que a percentagem de área trincada considerada como critério de aceitação no programa para esse tipo de rodovia, classificada como sistema arterial principal, foi de no máximo 30% e o afundamento da trilha de roda de 10 mm (Franco e Motta, 2018).

Após as avaliações das estruturas foram selecionadas duas estruturas para realizar o dimensionamento através do MeDiNa para cada cenário de carregamento. O objetivo foi mostrar como a metodologia mecanística-empírica e o excesso de carga influenciam nas espessuras das camadas de um pavimento. Para isso, foi escolhida a estrutura que apresentou o melhor desempenho quanto ao trincamento e deformação permanente (estrutura D) e a própria estrutura da BR-290 (estrutura A).

4. RESULTADOS

As simulações no programa MeDiNa foram realizadas através da entrada de dados das estruturas

juntamente com os dados do tráfego. Para cada estrutura de análise foram selecionados os materiais para cada camada, inserido o número N, o período do projeto, a projeção de crescimento da frota e o tipo da rodovia, adotada como sistema arterial principal. Assim, realizou-se a avaliação de cada estrutura para os dois cenários de carregamento, cenário ideal (CI) e real com 13% do tráfego com sobrecarga (CR). Para uma melhor compreensão, os resultados das simulações foram separados por dano causado nas estruturas, área trincada e afundamento da trilha de roda.

4.1 Área trincada (AT)

As percentagens de área trincada ao final do período de projeto de 15 anos são apresentadas na Tabela 5. Percebe-se que para a maioria das estruturas a AT já estava comprometida desde o primeiro ano, atingindo 99,00% da capacidade, para os dois cenários de carregamento. A estrutura D foi a única que obteve resultados diferentes, com 77,92% de AT no cenário ideal e 92,15% no real, dessa forma, apresentou um coeficiente de variação de 8,37% entre os valores.

Tabela 5: Valores de AT no final do período de projeto.

Estrutura	AT (%)		Média dos valores (%)	Desvio padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
	Cenário ideal	Cenário real			
A	99,00	99,00	99,00	0,00	0,00
B	99,00	99,00	99,00	0,00	0,00
C	99,00	99,00	99,00	0,00	0,00
D	77,92	92,15	85,04	0,07	8,37
E	99,00	99,00	99,00	0,00	0,00
F	99,00	99,00	99,00	0,00	0,00
G	99,00	99,00	99,00	0,00	0,00
H	99,00	99,00	99,00	0,00	0,00

A evolução anual da área trincada das estruturas para cada cenário de carregamento é ilustrada na Figura 1. Verificou-se que a estrutura D, composta por material cimentício, apresentou uma evolução de trincamento mais lenta que as demais. Além disso, é possível perceber que nesta estrutura o cenário de carregamento real tem uma ascensão maior do que o ideal, onde foram consideradas as

CML, chegando a uma diferença de 14,24% de AT ao longo dos anos. Nascimento e Albuquerque (2018), Andrade et al.(2015) e Andrade (2017) mostraram que, nos pavimentos com base de BGTC, a evolução de fadiga e ATR é menor comparada aos materiais granulares, devido à alta rigidez e baixa deformação do material.

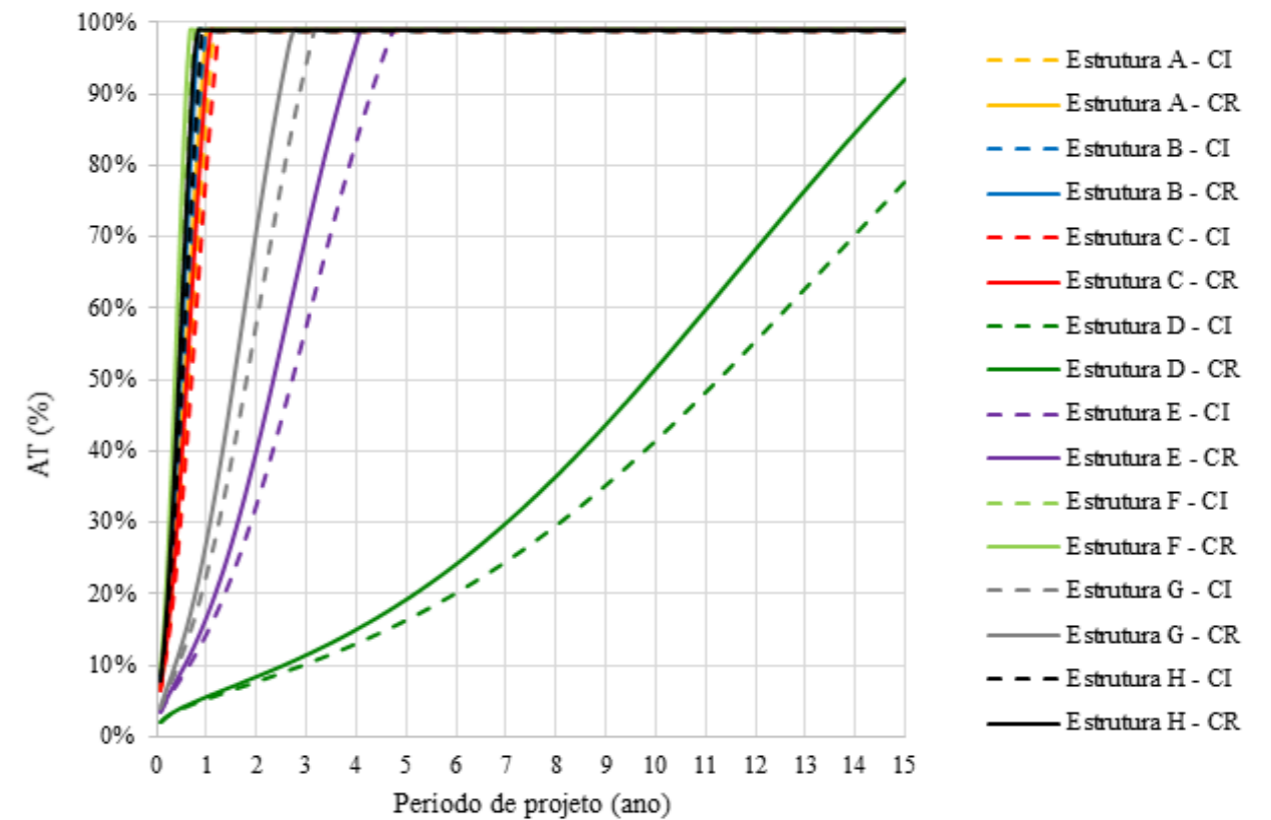


Figura 1: Evolução anual da AT das estruturas para cada cenário de carregamento.

Foi possível analisar que apesar das diferentes composições, todas estruturas apresentaram um desempenho inferior ao desejado, o que causou o comprometimento nos primeiros anos de vida, com exceção da estrutura

D, que atingiu a percentagem admissível no sétimo ano de projeto no cenário real. Dessa forma, o critério de avaliação do programa MeDiNa de 30% de área trincada não foi atingido pelas estruturas.

4.2 Afundamento da trilha de roda (ATR)

As simulações das estruturas considerando o afundamento da trilha permitiram verifi-

car a variação da deformação permanente em função do excesso de carga do tráfego. A Tabela 6 apresenta o ATR das estruturas ao final do período de projeto de 15 anos em cada cenário de carregamento.

Tabela 6: Valores de ATR no final do período de projeto.

Estrutura	ATR (mm)		Média dos valores (mm)	Desvio padrão (mm)	Coeficiente de variação (%)
	Cenário ideal	Cenário real			
A	5,77	5,84	5,81	0,04	0,60
B	8,09	8,18	8,14	0,04	0,55
C	6,23	6,31	6,27	0,04	0,64
D	1,59	1,61	1,60	0,01	0,63
E	2,90	2,93	2,92	0,02	0,51
F	12,61	12,74	12,68	0,06	0,51
G	4,19	4,24	4,22	0,02	0,59
H	6,96	7,04	7,00	0,04	0,57

Para todas as estruturas o cenário real apresentou uma deformação permanente maior que o cenário ideal. Percebe-se que as estruturas D e E, com composição de BGTC em uma das camadas, foram as que apresentaram os melhores desempenhos, porém é possível analisar que a estrutura D apresentou uma variação menor entre os valores finais. Nota-se também que a variação entre os ATR nas estruturas A e G, que apresentam dois tipos di-

ferentes de concreto asfáltico na composição do revestimento, foi semelhante.

A evolução anual do afundamento da trilha de roda para cada cenário de carregamento é ilustrada na Figura 2. O contraste entre o cenário real e ideal é maior conforme o desempenho da estrutura, como é verificado no caso da estrutura F, que apresentou um desvio padrão equivalente a 0,065.

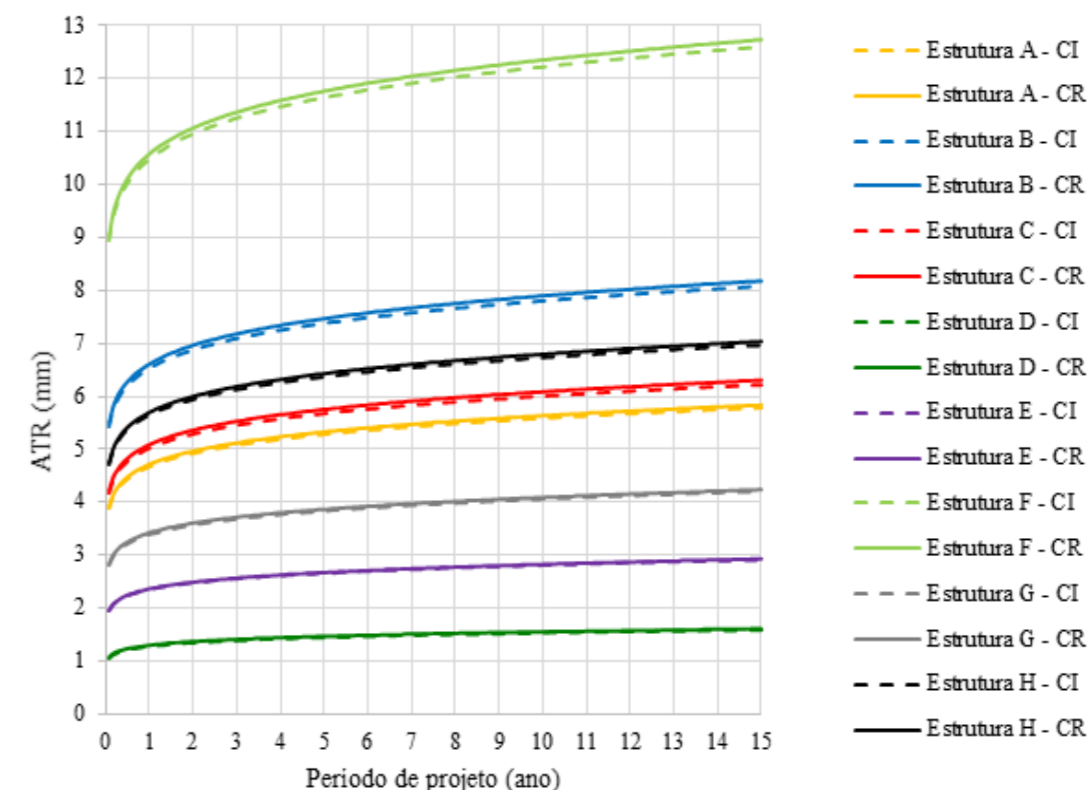


Figura 2: Evolução anual da ATR das estruturas para cada cenário de carregamento.

A estrutura F, com menor espessura de revestimento asfáltico, não atingiu o critério de avaliação do programa de 10 mm, tanto para o cenário ideal quanto o real. Entretanto, foi possível verificar que as demais estruturas apresentaram um bom desempenho quanto a deformação permanente.

Com o intuito de demonstrar como a sobrecarga influencia o dimensionamento das estruturas foram realizadas duas simulações: considerando a composição da estrutura D, que obteve o melhor desempenho quanto a AT e ao ATR, e estrutura A, própria da BR-290. A Tabela 7 mostra o dimensionamento da estrutura D.

4.3. Dimensionamento das estruturas pelo MeDiNa

Tabela 7: Dimensionamento da estrutura D para cada cenário de carregamento.

Materiais da Estrutura D	Espessuras (cm)		
	Espessura real	Dimensionamento para o cenário ideal	Dimensionamento para o cenário real
CA – CAP 30/45	12,0	14,7	16,3
BGTC	25,0	30,0	30,0
Macadame seco	30,0	30,0	30,0
Subleito	Infinito	Infinito	Infinito

A estrutura D já apresentava um bom desempenho quanto ao ATR, portanto o principal objetivo do dimensionamento era fazer com que atingisse o critério de avaliação da AT. Tanto para o cenário ideal quanto o real, foi verificado que se a base de BGTC tivesse um acréscimo de 5 cm, os valores de revestimento asfáltico não seriam muito elevados. Dessa forma, comparando os dois cenários pode-se perceber uma diferença de 1,6 cm, o que mostra como o excesso de carga influencia no dimensiona-

mento das estruturas.

O dimensionamento da estrutura A é apresentado na Tabela 8. Esta estrutura também já apresentava um ATR inferior a 10 mm, porém a AT estava comprometida logo no primeiro ano de vida útil do pavimento. Dessa forma, o dimensionamento para cada cenário de carregamento gerou espessuras superiores em comparação com a estrutura D.

Tabela 8: Dimensionamento da estrutura A para cada cenário de carregamento

Materiais da Estrutura A	Espessuras (cm)		
	Espessura real	Dimensionamento para o cenário ideal	Dimensionamento para o cenário real
CA – AMP 60/85	6,0	13,9	14,8
CA – CAP 50/70	8,0	20,0	20,0
BGS	20,0	20,0	20,0
Macadame seco	22,0	22,0	22,0
Subleito	Infinito	Infinito	Infinito

O alto volume de tráfego da rodovia impactou no dimensionamento das camadas. O aumento das espessuras das camadas de base e sub-base não foi o suficiente para melhorar o desempenho da estrutura quanto ao trincamento, em função da concepção estrutural não ser a mais adequada para o tráfego muito elevado. Assim, a solução adotada foi aumentar as espessuras dos concretos asfálticos, o que causou um valor incomum para essas camadas. Mesmo assim, foi possível analisar a diferença entre os dois cenários de carregamento, obtendo uma variação de 3,14%. Outra solução que poderia ser considerada seria a substituição da base de BGS para BGTC, por apresentar rigidez elevada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prática de exceder a carga máxima legal dos eixos dos veículos vem afetando e reduzindo a vida útil das rodovias brasileiras. Com o objetivo de analisar como esta prática afeta o desempenho dos pavimentos, foi realizado um estudo através do programa computacional MeDiNa, pelo qual se realiza análises em função da metodologia mecanística-empírica, onde foi possível avaliar os danos causados em função da fadiga e da deformação plástica do pavimento, além de dimensionar estruturas e verificar como as sobrecargas influenciam nas espessuras das camadas. Com isso, foram utilizados dados de tráfego coletados pelo sistema de pesagem em movimento (Weigh-In-Motion), instalado na BR-290.

As análises adotaram, para a composição das estruturas, materiais próprios do banco de dados do MeDiNa, os quais não foram realizados ensaios

propriamente. Também foi considerado um período de projeto de 15 anos. Dessa forma, as estruturas analisadas apresentaram elevada evolução do trincamento por fadiga, em função de não terem sido dimensionadas através do método mecanístico-empírico e pelas estruturas de referência não terem sido propostas para este tráfego. Assim, mesmo com as cargas máximas legais (CML), as estruturas apresentaram elevada fadiga. Conforme o critério de aceitação do programa, as estruturas não estariam em conformidade, quanto à fadiga, no entanto em relação a deformação permanente somente uma estrutura (F) não atendeu ao valor de até 10 mm. Entretanto, foi possível demonstrar que o aumento de carga nas rodovias influencia no desempenho do pavimento, tanto para o afundamento da trilha de roda quanto para a área trincada.

O dimensionamento das estruturas A e D no programa MeDiNa demonstrou que, em função da qualidade dos materiais adotados nas análises, o excesso de carga no pavimento gera uma diferença nas espessuras das camadas. Assim, foi possível verificar que a consideração dos dados reais de tráfego influencia o dimensionamento das estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBANO, J. F. (2005) *Efeitos dos Excessos de Carga sobre a Durabilidade dos Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ANDRADE, L. R. (2017) *Comparação do Comportamento de Pavimentos Asfálticos com Camadas de Base Granular, Tratada com Cimento e com Estabilizantes Asfálticos para Tráfego Muito Pesado*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANDRADE, L. R.; A. K. KUCHIISHI; I. S. BESSA; K. L. VASCONCELOS; L. L. B. BERNUCCI; I. A. BEJA E J. M. CHAVES (2015) Comportamento mecânico de camadas de bases granular e tratada com cimento em rodovia de tráfego muito pesado. *Anais*

do XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Ouro Preto, p. 148 – 159.

BALBO, J. T. (2007) *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*. Ed. Oficina de Textos, São Paulo.

BALZAN, S. L. (2019) *Análise do efeito de excesso de cargas na estrutura do pavimento flexível através do MEDINA*. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BOCK, A. L. (2016) *Pesagem em Movimento de Cargas Atuantes em Rodovias e seu Impacto no Desempenho de Pavimentos da Rede Temática de Asfalto*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BOSSO, M. (2018) *Uso da Tecnologia Weigh-in-Motion para a Caracterização do Tráfego Rodoviário e do Excesso de Carga em Veículos Comerciais*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

BRITO, L. A. T. (2015) *Uso da Tecnologia de Weigh-in-Motion (WIM) para Avaliação de Desempenho de Pavimentos Asfálticos da BR 290/RS – Freeway*. Porto Alegre.

BRITO, L. A. T. E A. L. BOCK (2013) *Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais Rodantes na BR-290/RS, através do Uso da Técnica Weigh-in-Motion (WIM)*. Porto Alegre.

BUENO, L. D. (2019) *Contribuição para a Previsão Empírico-Mecanicista da Irregularidade Longitudinal e seus Desdobramentos Econômicos em Pavimentos Asfálticos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CERATTI, J. A. P. (1991) *Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CHAVES, J. M.; L. BERNUCCI E T. BITTEN-COURT (2016) *Desenvolvimento do Modelo de De-*

terioração de Pavimentos Asfálticos com Uso de Instrumentação e Sistema Weigh in Motion. São Paulo.

COLPO, G. B. (2019) *Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas: Ensaio Laboratoriais e Instrumentação in situ*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito (2006) *Resolução Nº 210*, p. 7, Brasília.

DI BENEDETTO, H.; C. DE LA ROCHE; H. BAAJ; A. PRONK E R. LUNDSTRÖM (2004) Fatigue of Bituminous Mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, n. 1, p. 202 – 216.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2006) *Manual de Pavimentação*. Publicação IPR – 719 (3ª ed), Rio de Janeiro.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2012) *Quadro de Fabricantes de Veículos*, Brasília.

DNIT/UFSC (2007) *Sistemas de Pesagem em Movimento – (WIM)*. Convênio TT-102/2007 Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – Universidade Federal de Santa Catarina.

FONTENELE, H. B. (2011) *Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FRANCO, F. A. C. P. (2007) *Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FRANCO, F. A. C. P. E L. M. G. MOTTA (2018) *Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecânico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos*. Convênio UFRJ/DNIT.

KLINSKY, L. M. G.; V. C. FARIA E R. BARELLA (2015) Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas a partir de dois Métodos de Ensaio com Diferentes Tipos de Asfalto.

LEANDRO, R. P.; I. A. BEJA; I. S. BESSA; L. R.

DE ANDRADE; K. L. VASCONCELOS; L. L. B. BERNUCCI; T. BITTENCOURT; A. R. BORGES; A. P. C. NETO; H. A. FLORENCIO; D. B. DE MORAIS E J. M. CHAVES (2015) Desenvolvimento do Modelo de Deterioração de Pavimentos Asfálticos com uso de Instrumentação e Sistema Weigh In Motion. *Revista ANTT*, v. 7, n. 2, 12 p.

MOTTA, L. M. G. (1991) *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critérios de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, R. S. E F. S. ALBUQUERQUE (2018) Estudo de Desempenho à Fadiga de Base Cimentada tipo BGTC na BR-101/SE. *Revista Transportes*, v. 26, n. 1, p. 157 – 171.

PREUSSLER, E. S. (1983) *Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

SANTOS, A. S. (2016) *Segmentos Monitorados de Araranguá: Construção e Previsão de Desempenho do Revestimento em Camadas Singulares e Integradas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SPECHT, L. P. (2012) Avaliação de Alternativas de Pavimentação da Duplicação da BR 116 – Trecho CONCEPA.



ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE ENSAIO DE CAIXA UTILIZANDO DORMENTE DE POLÍMERO

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF BOX TEST USING POLYMERIC RAILWAY SLEEPER

Thatyane M. Gonçalves¹
 Laura M. G. da Motta²
 Aldo M. W. Machado³
 Luiz F. M. da Silva⁴
 Gino C. Vizcarra⁵

¹COPPE/UFRJ, thatyane.goncalves@coc.ufrj.br
²COPPE/UFRJ, laura@coc.ufrj.br
³Instituto Militar de Engenharia, aldo.machado@braskem.com
⁴COPPE/UFRJ, muniz@munizspada.com.br
⁵Pontifícia Universidade Católica – PUC-RJ, ginocalderon@hotmail.com

DOI: 10.21526/abpv.v51.3

RESUMO

A compreensão do desempenho da infraestrutura da via permanente tem sido colocada como requisito chave para possibilitar o aumento das cargas/eixo das composições que trafegam nas vias e ampliar a vida útil deste meio de transporte. Novas alternativas de elementos estruturais e progressos nos procedimentos de dimensionamento de ferrovias e avaliação das linhas existentes precisam fazer parte da prática no atual cenário brasileiro. A abordagem no estado da arte da mecânica dos pavimentos ferroviários é a interpretação da via como um sistema em camadas, no qual para a avaliação dos esforços são comumente utilizados modelos numéricos. A representatividade da modelagem numérica tridimensional utilizando elementos finitos no software MIDAS GTS NX é avaliada comparando seus resultados com dados medidos em ensaio de grande porte em laboratório realizados para certificação de um novo dormente, do tipo polimérico, que está sendo introduzido à indústria ferroviária nacional. Os resultados do modelo numérico apresentaram boa convergência com os dados medidos no modelo físico em laboratório.

Palavras-chaves:

Ferrovia,
Análise Numérica,
Midas gts nx,
Dormente Polimérico.

ABSTRACT

The evaluation of railway pavements performance has become a key tool for increasing the allowable load in railway tracks, enhancing their life span and strengthening railways as viable options for future projects. New structural elements alternatives, the progress of dimensioning issues of new railroads, and the evaluation of the already existing ones, are practices that need to be part of the Brazilian scenery nowadays. The approach in the state of the art of the mechanics of railway pavements it is the interpretation of the track as a layered system, in which for the evaluation of the efforts it is usually used numerical models. The representativeness of the tridimensional numerical model using finite elements in the software MIDAS GTS NX is evaluated by comparing its results with measurement in large scale lab tests, carried out to certify a new polymeric railway sleeper. The results indicate a good agreement between a physical model and numerical model.

Keywords:

Railway,
Numerical Analysis,
Midas gts nx,
Polymeric Sleeper.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a melhoria dos meios de transporte no Brasil é um grande desafio, sobretudo quando se considera a produção elevada de minério e grãos, que deve continuar a ascender nas próximas décadas. As ferrovias são o meio de transporte terrestre mais eficiente e ecológico, especialmente para as cargas deste tipo e, além disso, sua manutenção e operacionalidade adequadas afetam diretamente a economia do País com a receita pública que o Brasil recebe com a exportação destes commodities. Tais observações denotam a importância do progresso nos procedimentos de dimensionamento de ferrovias novas e de critérios de avaliação estrutural das linhas existentes.

Uma abordagem da Mecânica dos Pavimentos para avaliação tensão-deformação é a interpretação da via como um sistema em camadas, na qual seus componentes (trilho, dormente, lastro, sublastro e subleito) são verificados, sob a influência dos carregamentos oriundos do tráfego dos trens, e mensuradas suas contribuições individuais ao conjunto. Nessa abordagem de avaliação dos esforços são comumente utilizados modelos numéricos que buscam reproduzir o efeito da passagem da composição no pavimento ferroviário, incorporados em uma gama diversificada de programas disponíveis para a comunidade técnica.

No caso do domínio ferroviário, para avaliação de tensões e deformações, destacam-se os programas GEOTRACK e FERROVIA (RODRIGUES, 1993) que foram inicialmente empregados no Brasil, em pesquisas e também em projetos. Mais recentemente foi desenvolvido o software SYSTRAIN (NASCI-MENTO *et al.*, 2016), e começam a ser customizados programas de uso mais abrangente de outras áreas da engenharia, como o ABAQUS (RANGEL, 2017), PLAXIS (SHAHIN & INDRARATNA, 2006) e o MIDAS GTS NX, apresentado neste artigo.

O objetivo deste artigo é apresentar a potencialidade e representatividade da modelagem numérica nas avaliações ferroviárias, utilizando o Programa MIDAS e uma aplicação deste, comparando-se seus resultados com um experimento realizado em um modelo físico de grande porte utilizado para certificar um novo tipo de dormente em implementação no mercado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os modelos em camadas lançam mão da teoria da elasticidade de meios estratificados para avaliar mais representativamente, a contribuição individual para as respostas do conjunto da estrutura às cargas aplicadas pelos trens, incluindo a estimativa das tensões e deformações atuantes em cada elemento do pavimento ferroviário. Neste modelo, o subleito possui profundidade infinita, as camadas se estendem horizontalmente até infinito e não há deslizamento nas interfaces dos estratos. Além disso, cada camada apresenta, individualmente, um módulo de resiliência e um coeficiente de Poisson (SELIG E WATERS, 1994).

Softwares específicos de análises numéricas têm grande potencial de prever o comportamento do pavimento, levando em consideração as características de cada elemento e suas respectivas solicitações. O Método dos Elementos Finitos (MEF), que constitui a base teórica da maior parte dos softwares, realiza uma análise do comportamento mecânico da via, obtida com aplicações da modelagem do sistema físico em partes discretas e modelos constitutivos que representam cada uma das camadas e elementos que compõem o pavimento ferroviário, conforme indica a Figura 1 (PROFILLIDIS, 2014; ROSA, 2019).

O MIDAS GTS NX é um software de análise em elementos finitos, específico para modelagens geotécnicas, desenvolvido pela empresa MIDASoft desde o ano de 1989. Este software admite a elaboração de estruturas 1D, 2D, 3D, molas e elementos de contato. O programa tem a vantagem de simular as condições dos solos *in situ*, considerando as tensões iniciais no solo e a não linearidade de comportamento dos materiais, possibilitando a utilização de diferentes modelos constitutivos.

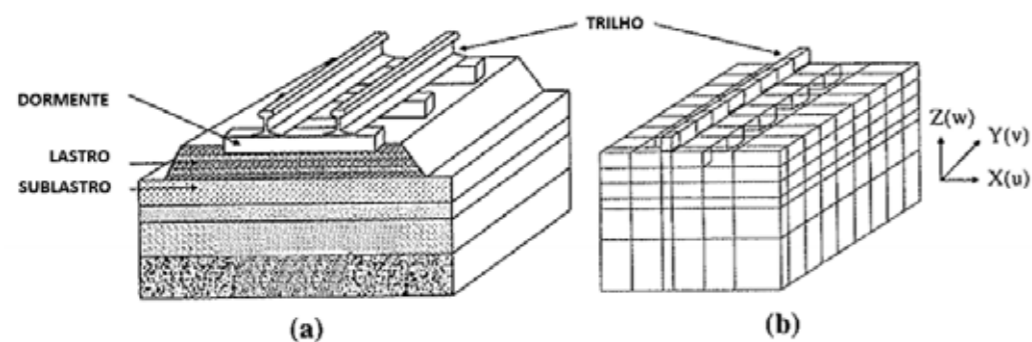


Figura 1: (a) sistema do pavimento ferroviário e (b) simetria da via em MEF (Adaptado de PRO-FILLIDIS, 2014).

No âmbito ferroviário, SOWMIYA *et al.* (2010) utilizaram o programa MIDAS GTS para prever o deslocamento e a tensão vertical ao longo da estrutura de um pavimento ferroviário. Os resultados obtidos foram comparados com outros

modelos numéricos - MULTA, PSA e ILLITRACK, conforme ilustra a Figura 2. Outras avaliações ferroviárias utilizando o software MIDAS podem ser observadas em LIU LIU *et al.* (2019) e SAYEED & SHAHIN (2018).

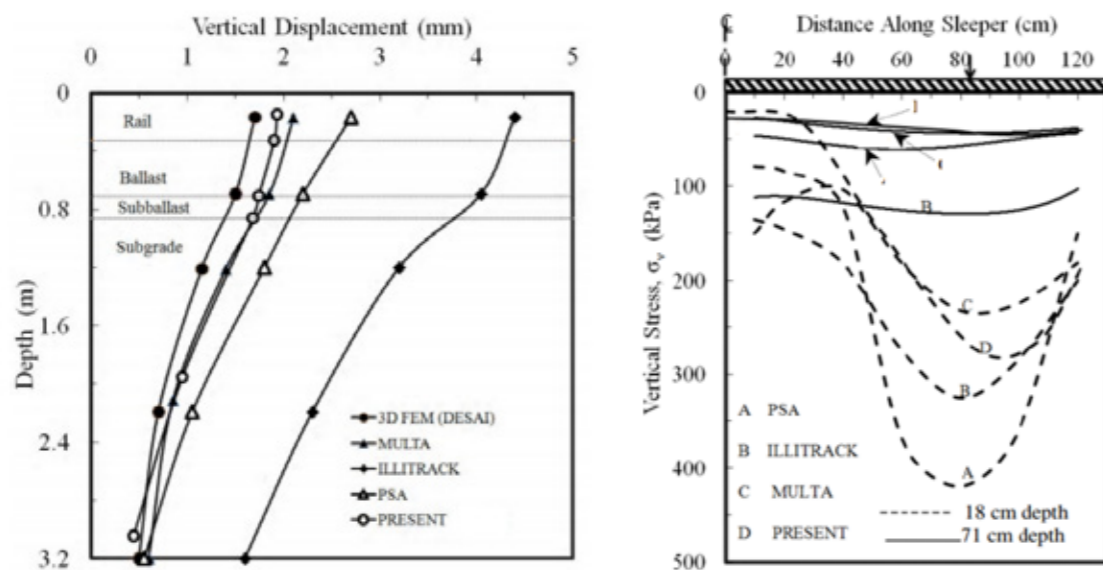


Figura 2: (a) Resultados comparativos do deslocamento abaixo do trilho e (b) tensão vertical prevista ao longo do dormente com a profundidade (SOWMIYA *et al.*, 2010).

3. METODOLOGIA

Atualmente, encontra-se em implementação no mercado ferroviário nacional um dormente polimérico especialmente desenvolvido como uma alternativa aos modelos convencionais existentes. O dormente é formado por uma capa de polietileno com fibra de vidro, blocos de apoio em polieti-

leno de alta densidade e apresenta uma geometria inovadora, conforme apresentado na Figura 3. Para avaliação do comportamento do protótipo durante seu desenvolvimento, além dos ensaios químicos e de verificação estrutural da peça, foram realizados ensaios laboratoriais em um modelo físico, nomeado como 'ensaios de caixa de lastro', e conduzida a implementação de um campo experimental instrumentado em uma via real.

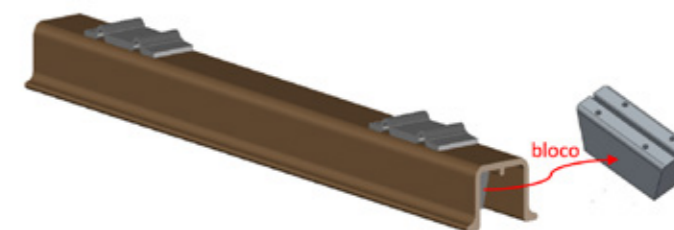


Figura 3: Geometria do dormente polimérico e bloco (Adaptado de MUNIZ & SPADA, 2019).

Neste artigo é simulado numericamente o ensaio da caixa de lastro, cujo objetivo foi avaliar o desempenho estrutural do dormente, sob condições de contorno controladas, em situação aproximada a da via férrea real. As medidas de laboratório foram usadas para a calibração do modelo numérico e validação da metodologia aplicada de elementos finitos que compõe o software MIDAS.

O modelo da caixa de lastro foi produzido no laboratório LAEDE, em São Paulo, e compreende um dormente polimérico centrado em uma caixa de paredes metálicas que formam um elemento de

1,15 m de profundidade e 4,1 m² de área (0,82 m x 5,00 m). O pavimento ferroviário foi simulado por uma camada de 25 cm de subleito, 20 cm de sublastro e 54 cm de lastro total, conforme apresentado na Figura 4. A carga de ensaio aplicada foi de 200 kN (trata-se de um valor apreciável considerando-se que 30 a 40% da carga por eixo da composição solicita o dormente mais carregado), com frequência de 4 Hz, até completar 3 milhões de ciclos, com padrão de pulsos segundo apresentado na Figura 5. A força foi aplicada no centro de uma viga de distribuição de esforços sobre os trilhos.

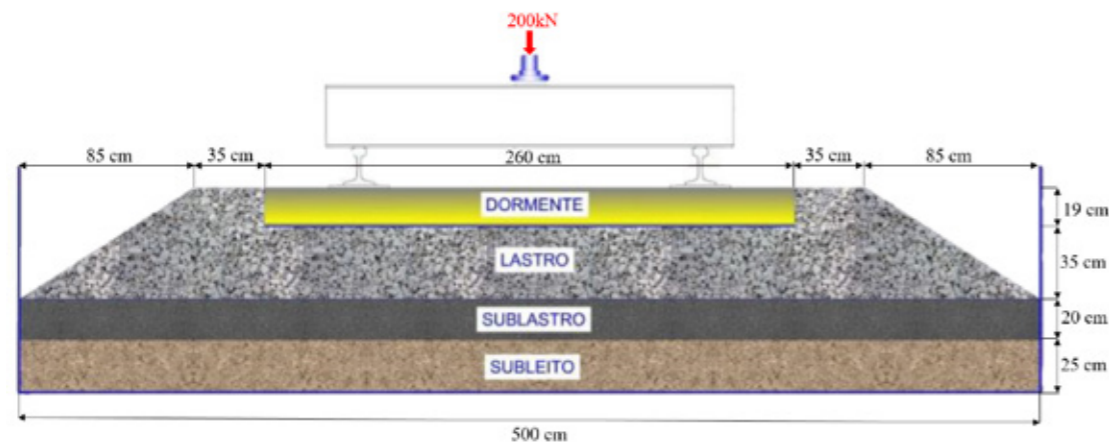


Figura 4: Geometria do ensaio da caixa de lastro (RE-1412-ED-003, 2017).

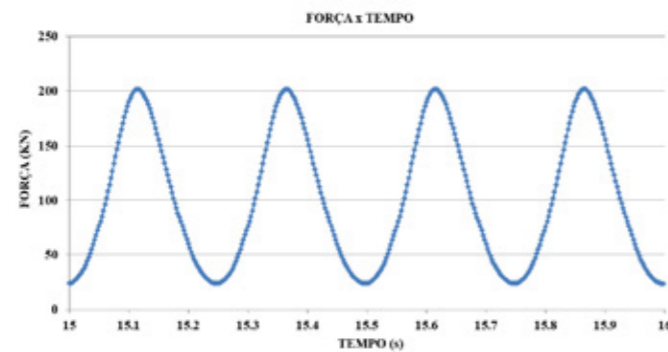


Figura 5: Força aplicada no tempo (RE-1412-ED-004, 2017).

O subleito composto por solo areno-argiloso com pouca presença de silte foi espalhado na caixa metálica e densificado com compactador de solo a percussão até a espessura acabada de 25 cm. O sublastro foi constituído por bica corrida com granulometria de mais de 50% do material superior a 4,76 mm. A camada foi compactada com placa vibratória até alcançar 20 cm de espessura. A camada de lastro foi implantada com uma altura total de 54 cm (35 cm abaixo da base do dormente, conforme apresentado na Figura 4); a granulometria do material atendeu aos requisitos de lastro-padrão tipo A (ABNT NBR 5564: 2014). O material foi compactado com placa vibratória, até atingir a altura da base do dormente. A geometria final da caixa de teste é apresentada na Figura 6.



Figura 6: Caixa finalizada para execução do ensaio (RE-1412-ED-003, 2017).

A estruturação do modelo físico é referida como aproximada da via férrea real, em vista da caixa estar apoiada sobre a laje de piso do laboratório, configurando uma proximidade da fronteira rígida, diferente das condições reais usuais da via permanente ferroviária, predominantemente sobre um semiespaço constituído por subleitos terrosos.

A instrumentação foi composta por 8 *strain gages* localados no topo e na lateral do dormente com a finalidade de medir as deformações do protótipo, e 4 LVTDs (*Linear Variable Differential Transformer*) distribuídos ao lado do apoio e no boleto dos trilhos para verificação dos deslocamentos, conforme apresenta a Figura 7.

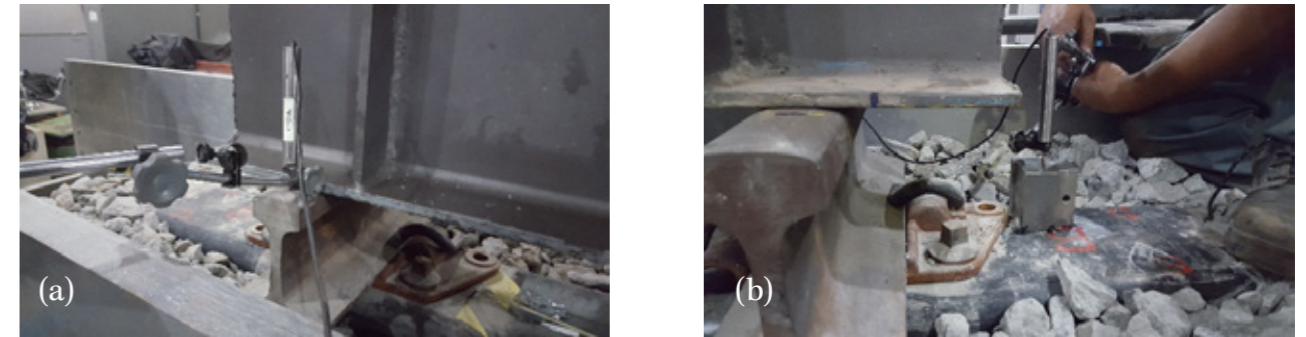


Figura 7: Transdutores de verificação de deslocamento no trilho (a) e no dormente (b) (RE-1412-ED-003, 2017).

Após a realização do experimento, foram procedidos ensaios geotécnicos para certificação das propriedades de deformabilidade dos materiais componentes do modelo físico. Nas camadas de sublastro e subleito foram realizados ensaios de DCP (*Dynamic Cone Penetration*) em três posições da caixa, ensaios de frasco de areia em dois pontos de cada camada e ensaios de granulometria na pro-

fundidade da camada de sublastro e de subleito.

A modelagem do ensaio de caixa foi realizada no programa Midas GTS NX 2019 V2.1. O primeiro passo para a elaboração do modelo iniciou-se pelo desenho da geometria de cada componente em escala real, conforme apresentado na Figura 8.

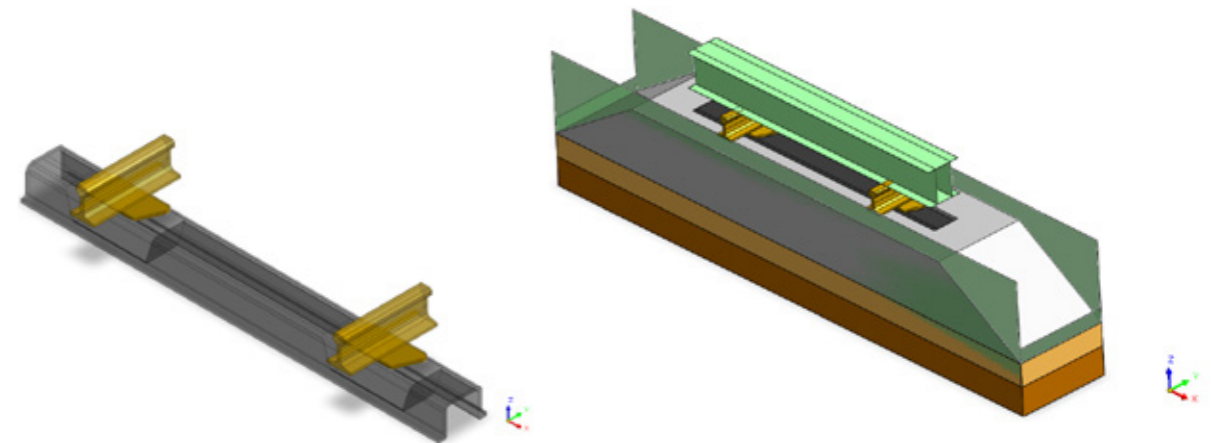


Figura 8: Elementos da superestrutura e modelo completo da caixa simulado no MIDAS.

Para o desenvolvimento do modelo algumas simplificações foram adotadas, tais como: os efeitos de fluência e viscosidade não foram considerados e os comportamentos dos materiais de todos os elementos foram tidos como isotrópicos e homogêneos. Também não se levou em consideração o efeito do contato entre as camadas, uma vez que não se dispunha de parâmetros representativos para tal consideração e estimar os dados iria incorporar mais incertezas à modelagem. Nas simulações optou-se por se utilizar a lei constitutiva de Mohr-Coulomb para as camadas geotécnicas e propriedades elástico-lineares para o dormente e para o trilho, tendo em vista que tais elementos em ferrovias encontram-se longe das tensões de escoamento.

Para definição do modelo final realizaram-se 12 simulações numéricas, considerando-se os diferentes resultados obtidos em cada ensaio DCP para definição de um cenário e 4 simulações para cada cenário, variando-se o lastro com módulos de 150 MPa, 200 MPa, 250 MPa e 300 MPa, tendo em vista que este não foi obtido diretamente por ensaios

laboratoriais. A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros de cada análise. Os valores de coesão e ângulo de atrito foram adotados com base em valores da literatura para os diversos materiais.

No caso da malha foram utilizados elementos do tipo híbrido (tetraédricos e hexaédricos), ensinando, assim, melhor qualidade da malha em componentes de geometrias mais complexas, como é o caso dos trilhos, placas e dormentes. Buscando-se otimizar o esforço computacional, optou-se por se considerar o efeito da caixa nas condições de contorno impostas ao invés de se considerar como um elemento a ser calculado no modelo. O deslocamento vertical e horizontal foi impedido na base do modelo. Na região do ombro do lastro e nas faces longitudinais à via o deslocamento foi impedido no sentido perpendicular aos respectivos lados. Na Figura 9 estão representadas a malha e as condições de contorno adotadas. A força, considerada simplificada como instantânea, aplicada no vão central da viga foi de 200 kN, além do peso próprio de cada elemento.

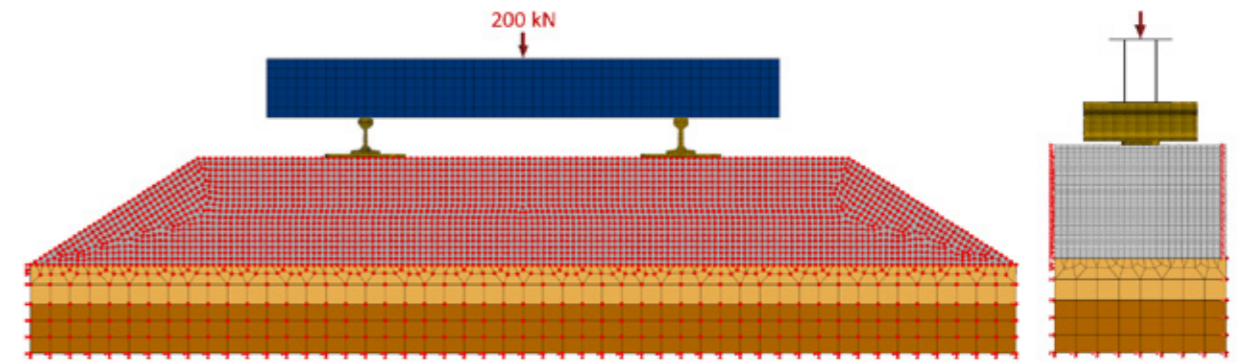


Figura 9: Condições de contorno e modelo da caixa de ensaio.

4. RESULTADOS

A avaliação do protótipo em laboratório foi realizada sob os efeitos de carga dinâmica, considerando aplicação de até 3.000.000 de ciclos de carga. Como o modelo numérico desenvolvido é estático, para fins de comparação, poderia ser adotado os valores obtidos nos primeiros ciclos do ensaio; no entanto, a caracterização dos materiais e respectivos ensaios foram executados após a realização do número total de ciclos, sendo, portanto, mais representativo do estado ao qual o material se apresentava quando da aplicação do maior número de ciclos de carga. Por essa razão, para fins de comparação com os resultados do ensaio de caixa com o modelo MEF obtidos com o MIDAS, optou-se por utilizar os resultados referentes aos 3.000.000 ciclos de carga. E, como no caso do modelo numérico não foram con-

siderados efeitos de assimetria ou heterogeneidade do material, a validação do modelo foi traçada considerando-se a simetria do mesmo comparada aos resultados de deslocamento obtidos tanto no lado A quanto no lado B do ensaio da caixa.

A Tabela 2 apresenta o comparativo dos resultados obtidos nas análises numéricas com os deslocamentos totais máximos obtidos pico-a-pico durante o ciclo de carga em laboratório, que apresentou desvio padrão inferior a 1,2% nos 4 pulsos de carregamentos do ciclo de 3.000.000. As diferenças obtidas entre o deslocamento do ensaio da caixa e do modelo numérico para o trilho e para a região da extremidade da placa de apoio, na face superior do dormente, em ambos os lados do protótipo (A e B) foram inferiores a 26% e 14%, respectivamente, resultados coerentes e convergentes com os valores reais medidos em laboratório.

Tabela 1: Parâmetros de entrada das simulações numéricas da caixa.

Modelos	Camada	γ (kN/m ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coesão (kPa)	ϕ	n
Cenário 1	Lastro	14,3	150/200/250/300	0,2*	45°	0.35
	Sublastro 1	20,0	24	0,2*	30°	0.35
	Sublastro 2	20,0	47	0,2*	33°	0.35
	Subleito	16,5	52	10	30°	0.40
Cenário 2	Lastro	14,3	150/200/250/300	0,2*	45°	0.35
	Sublastro 1	20,0	20	0,2*	30°	0.35
	Sublastro 2	20,0	52	0,2*	33°	0.35
	Subleito	16,5	58	10	30°	0.40
Cenário 2	Lastro	14,3	150/200/250/300	0,2*	45°	0.35
	Sublastro 1	20,0	20	0,2*	30°	0.35
	Sublastro 2	20,0	52	0,2*	33°	0.35
	Subleito	16,5	64	10	30°	0.40

*valor pequeno em substituição ao 0 kPa para evitar erro numérico no programa.

Tabela 2: Resumo das diferenças de deslocamentos entre o ensaio e modelos por MEF.

Modelo	Módulo do lastro	Trilhos			Região da placa de apoio			
		Medições em laboratório	MEF (mm)	Diferença A e B (%)	Medições em laboratório	MEF (mm)	Diferença A (%)	Diferença B (%)
Cenário 1	150 MPa	Lado A: 2,11 mm	1.83	13.27	Lado A: 1,57 mm	1.75	11.46	2.94
	200 MPa	Lado B: 2,11 mm	1.71	18.96	Lado B: 1,70 mm	1.63	3.82	4.12
	250 MPa	Lado A: 2,11 mm	1.62	23.22	Lado B: 1,70 mm	1.53	2.55	10.00
	300 MPa	Lado B: 2,11 mm	1.57	25.59	Lado A: 1,70 mm	1.48	5.73	12.94
Cenário 2	150 MPa	Lado A: 2,11 mm	1.86	11.85	Lado A: 1,57 mm	1.78	13.38	4.71
	200 MPa	Lado B: 2,11 mm	1.74	17.54	Lado B: 1,70 mm	1.66	5.73	2.35
	250 MPa	Lado A: 2,11 mm	1.66	21.33	Lado B: 1,70 mm	1.57	0.00	7.65
	300 MPa	Lado B: 2,11 mm	1.60	24.17	Lado A: 1,70 mm	1.51	3.82	11.18
Cenário 3	150 MPa	Lado A: 2,11 mm	1.83	13.27	Lado A: 1,57 mm	1.76	12.10	3.53
	200 MPa	Lado B: 2,11 mm	1.70	19.43	Lado B: 1,70 mm	1.62	3.18	4.71
	250 MPa	Lado A: 2,11 mm	1.63	22.75	Lado B: 1,70 mm	1.54	1.91	9.41
	300 MPa	Lado B: 2,11 mm	1.57	25.59	Lado A: 1,70 mm	1.49	5.10	12.35

Para uma análise mais aprofundada da simulação e dos resultados obtidos elegeu-se o modelo referente ao Cenário 2 e lastro de 200 MPa de módulo de resiliência devido à maior convergência dos resultados numéricos, levando-se em conta os deslocamentos totais no trilho e nos apoios em ambos

os lados. Na Figura 10 é possível observar-se o gradiente de deslocamento no eixo longitudinal de simetria da caixa. Conforme já se esperava, os maiores deslocamentos estão direcionados na região de apoio do dormente.

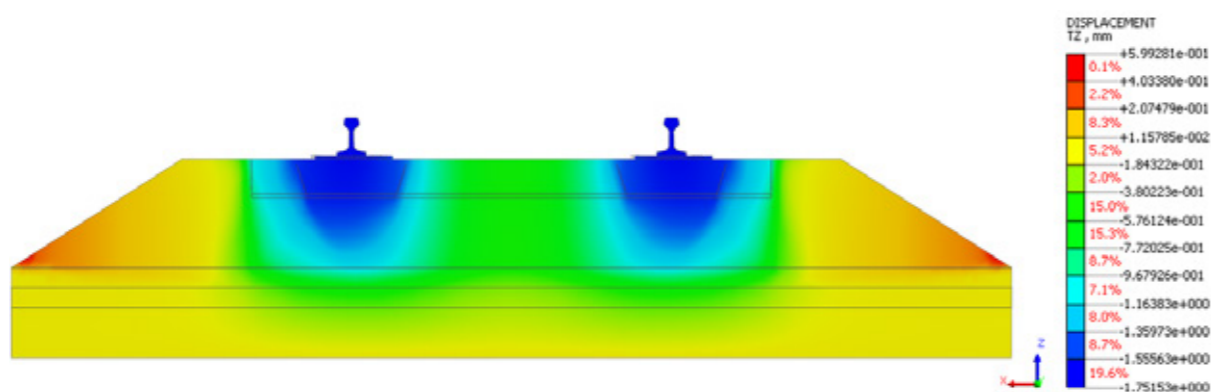


Figura 10: Gradiente de deslocamento vertical no eixo longitudinal de simetria do modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório.

A tensão de contato dormente-lastro varia de 484 a 265 kPa na região do bloco de apoio do dormente e de 44 a 164 kPa na região entre apoios, onde o contato da capa do dormente se dá diretamente com o lastro, sendo a menor medida na porção central. Ao longo da profundidade das camadas, no meio do bloco, a tensão varia de 352 kPa no lastro até 115 kPa na fronteira rígida da caixa. Os valores de tensão obtidos no modelo numérico sugerem que o protótipo não apresenta suscetibilidade ao fenômeno de *center bound*, ou seja, não há concentração elevada de tensões na região central que suscite danos à estrutura do dormente, e que

a distribuição de esforços ocorre majoritariamente na projeção dos blocos. A Figura 11 ilustra graficamente estes resultados descritos.

Por meio do modelo numérico também foi possível avaliar-se a distribuição de tensões no topo do sublastro e do subleito, sendo que os valores máximos obtidos para essas camadas foram de 173 kPa e 138 kPa, respectivamente. Os primeiros 10 cm de sublastro, correspondente ao sublastro 1, dissipam 21 kPa até o topo do sublastro 2; este último, em seus 10 cm de camada, dissipou 14 kPa até o topo do subleito. Os resultados estão apresentados na Figura 12 e na Figura 13.

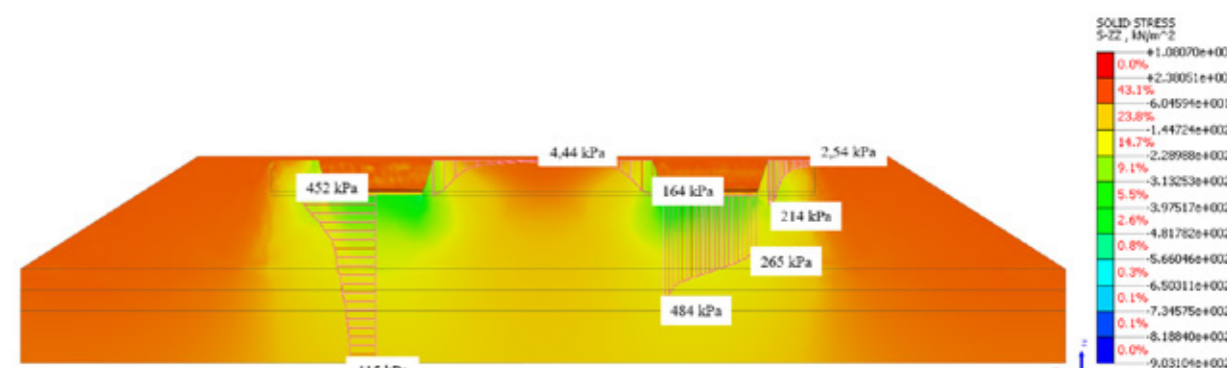


Figura 11: Gradiente de tensão vertical no eixo longitudinal de simetria do modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório.

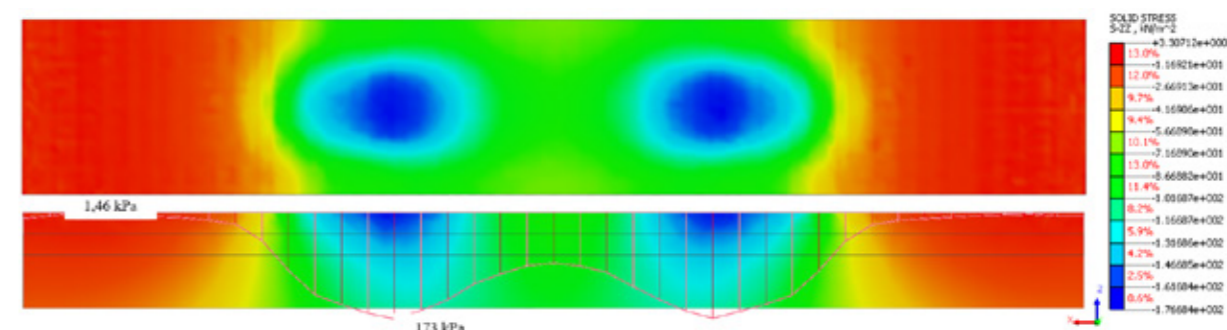


Figura 12: Gradiente de tensão vertical no topo da camada do sublastro do modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório, em planta e perfil.

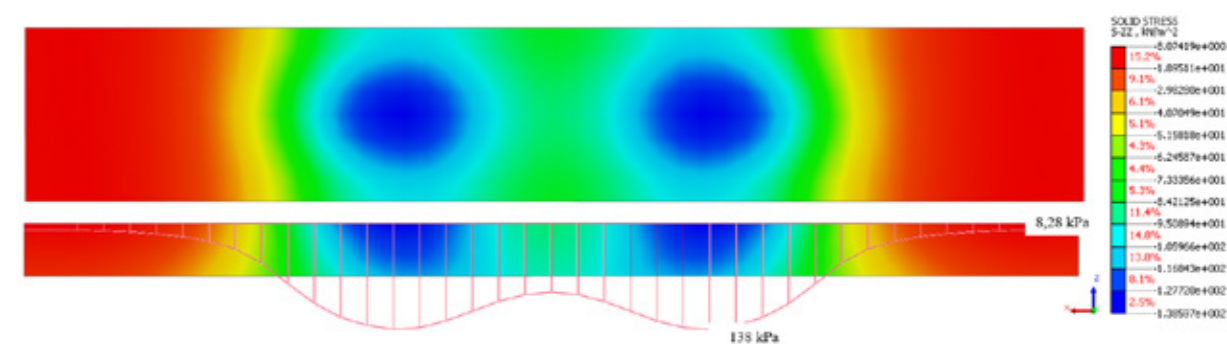


Figura 13: Gradiente de tensão vertical no topo da camada do subleito do modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório, em planta e perfil.

Uma dissipação maior entre as duas regiões de sublastro (camada 1 e 2), ambas com mesma espessura, é justificada pela diferença dos parâmetros adotados para cada material. O sublastro 1 apresenta 20 MPa de módulo estimado enquanto o sublastro 2 mostra uma rigidez mais elevada, com

52 MPa de módulo de resiliência estimado. A Figura 14 ilustra que a maior dissipação da primeira camada do sublastro está associada a uma deformação mais elevada nesta região por se tratar de uma camada de menor rigidez.

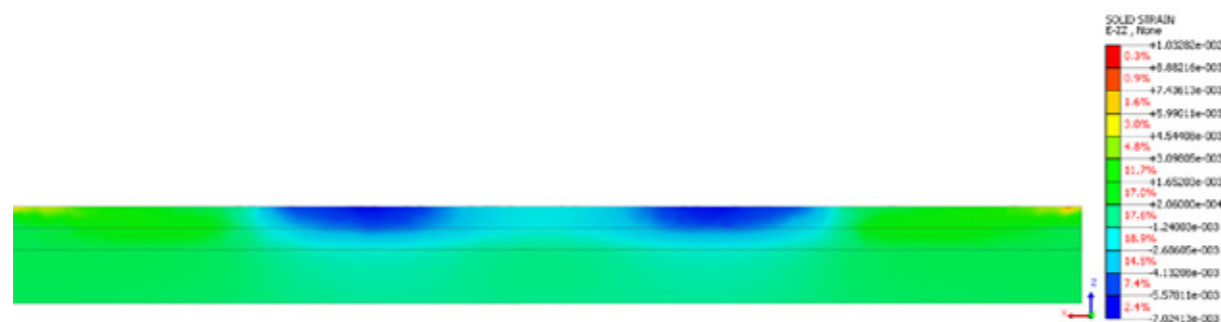


Figura 14: Gradiente de deformação vertical nas camadas sublastro 1, sublastro 2 e subleito do modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório.

A deformação volumétrica registrada variou de -0,26% a 0,43% nas camadas geotécnicas do modelo numérico, sendo a maior deformação registrada nas camadas de sublastro, conforme

apresentado na Figura 14. A simulação também permitiu observar que a deformação cisalhante se mantém inferior a 2% em todo o modelo, conforme Figura 16.

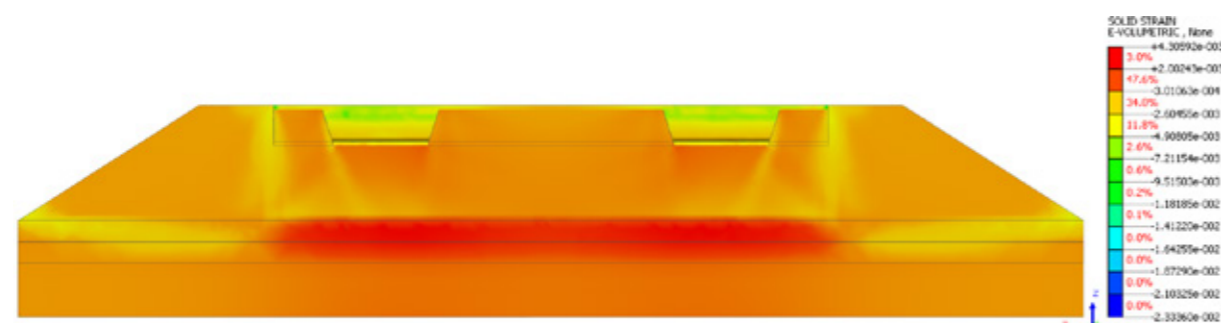


Figura 15: Gradiente de deformação volumétrica do modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório.

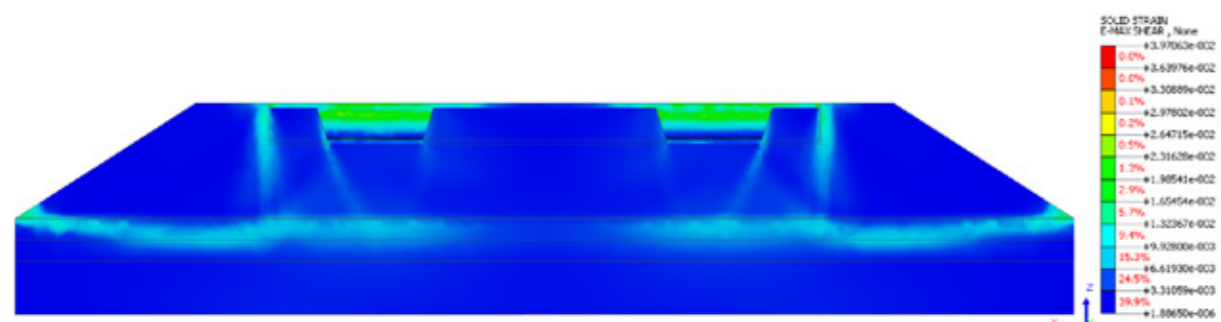


Figura 16: Gradiente de deformação cisalhante do modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório.

A camada de lastro tem como função resistir aos esforços verticais, minimizar as cargas dinâmicas e amortecer as vibrações e, por essa razão, é a camada que absorve as maiores tensões e, conseqüentemente, onde está a maior concentração de plastificação do material, conforme registrado no modelo e exposto na Figura 17.



Figura 17: Zonas de plastificação modelo 3D de análise numérica do experimento na caixa em laboratório.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dada a boa convergência de valores de deslocamento obtidas pela reprodução numérica do modelo físico apresentado, considera-se que o modelo numérico utilizado foi satisfatoriamente calibrado para análise de tensão-deformação da via considerando carregamentos estáticos e para os modelos constitutivos avaliados.

As tensões mais elevadas na simulação do dormente polimérico se apresentam em decorrência dos apoios, que funcionam de maneira semelhante ao de um dormente bi-bloco. No entanto, em todas as simulações as tensões não ultrapassaram a recomendação da AREMA (2010) para tensões no lastro, largamente utilizada na prática ferroviária, cujo limite recomendado é 586 kPa. As deformações volumétricas e cisalhantes identificadas no modelo são baixas e, a priori, não comprometem o funcionamento e a vida útil do pavimento. E, apesar da plastificação ocorrida na camada de lastro, o ensaio de laboratório indicou um deslocamento permanente inferior à 0,90mm após os 3.000.000 ciclos. Os resultados observados nas simulações indicam que o protótipo do dormente polimérico avaliado tem um comportamento dentro dos limi-

tes esperados e é uma alternativa aos modelos existentes no mercado.

Um aspecto relevante a ser mencionado é a proximidade das fronteiras rígidas no ensaio e nos modelos simulados. As restrições impostas pela parede rígida e pelo piso inferior a caixa, podem ter sido fatores condicionantes para o aumento dos valores de tensão obtidos no modelo numérico. A consideração de espessuras maiores de subleito ou implantação de uma camada menos rígida de contato entre o piso e o fundo da caixa, como o elastômero, poderiam, possivelmente, ajudar a contornar essa questão.

Agradecimentos

Os autores agradecem à BRASKEM e à MUNIZ & SPADA pela disponibilização dos dados dos ensaios de laboratório ao MIDASoft pela disponibilização da licença do Programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5564:2011 (2014). Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, versão corrigida.

AREMA (2010). American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association.

LIU LIU, SHEN, Q., ZHAO, Y. (2019). Correlation Between Railway Subgrade Settlement and Shield Tunneling Construction. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2019, Issue 5.

MUNIZ & SPADA (2019). Base de dados de Projetos. Projeto de Dormente Polimérico. Muniz & Spada Engenheiros Consultores, Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, G. C.; GUIMARÃES, A. C. R.; SILVA FILHO, J. C. (2016). SysTrain.

PROFILLIDIS, V. A. (2014). Railway management and engineering, 4ª edição. Burlington: Ashgate, 517 p.

RANGEL, G. W. A (2017). Um Método para a Estimativa da Deflexão do Pavimento Ferroviário Lastreado. Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RE-1412-ED-003, 2017, Ensaios Mecânicos em Dormentes Poliméricos. Relatório do Laboratório de Acústica e Ensaios Dinâmicos e Estáticos (LAEDE), São Paulo.

RE-1412-ED-004, 2017, Ensaios no Modelo Físico de Ferrovia (caixa de lastro). Relatório do Laboratório de Acústica e Ensaios Dinâmicos e Estáticos (LAEDE), São Paulo.

RODRIGUES, R. M. (1993). Análise Estrutural da Via Permanente Ferroviária. Dynatest, São Paulo. 38 p.

ROSA, A. F. (2019). Efeito da Granulometria e da Litologia no Comportamento de Lastros Ferroviários em Laboratório e por Análise Computacional. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SAYEED, A., SHAHIN, M. A. (2018). Investigation into Some Design Aspects of Ballasted Railway Track Foundations using Numerical Modelling. Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18), Budapest.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. London: Thomas Telford, 450 p.

SHAHIN, M. A.; INDRARATNA, B. (2006). Parametric Study on the Resilient Response of Ballasted Railway Track Substructure Using Numerical Modeling. Geotrans, American Society of Civil Engineers (ASCE).

SOWMIYA, L.S.; SHAHU, J.T.; GUPTA, K.K. (2010). Three-Dimensional Finite Element Analysis of Railway Track. Indian Geotechnical Conference, December 16–18.

Engenharia de PAVIMENTAÇÃO

A Revista PAVIMENTAÇÃO é um periódico técnico-científico editado e publicado pela ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação, desde 2006. Atualmente, é disponibilizada exclusivamente no formato eletrônico através dos sites:

- www.abpv.org.br
- www.revistapavimentacao.org.br

MISSÃO DA ABPv

A ABPv tem como missão promover e incentivar o estudo, a pesquisa e a divulgação de temas relacionados à área da engenharia rodoviária, aeroportuária e ferroviária.

ARTIGOS TÉCNICOS

Na Revista PAVIMENTAÇÃO são veiculados artigos científicos, ensaios e estudos de caso de caráter exclusivamente técnico, inéditos, com temáticas pertinentes.

Os trabalhos enviados para publicação são encaminhados ao Comitê Técnico Científico da ABPv, onde serão submetidos a rigorosos critérios de avaliação, garantindo segurança e credibilidade aos conteúdos disponibilizados aos leitores.