



Revista

PAVIMENTAÇÃO

Ano XVII - nº 52 - 2023 - www.abpv.org.br - www.revistapavimentacao.org.br - ISSN 1809-1865

**Análise técnica da incorporação
de resíduo de vidro em um
solo argiloso laterítico para
pavimentação rodoviária**



ABPv

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

SEDE

Rua Miguel Couto, nº 105,
Sobrelojas 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

Foto da CAPA:
Igor Alecsander

36ª DIRETORIA

Triênio 2023-2025

Diretora-Presidente

Engª. 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. Lélío Antônio Teixeira Brito

Diretor de Divulgação

Eng. Rafael Lopes Martins

CONSELHO FISCAL

Sócio Coletivo

Maccaferri América Latina
Nouryon Ltda.

Sócio Individual

Eng. Cristiano Costa Moreira
Eng. Oswaldo Tuchumantel Júnior



Sumário

- 5 48ª RAPv / 25º ENACOR / 4ª ExpoEnacorRAPv
RUMO À INFRAESTRUTURA DO FUTURO
FOZ DO IGUAÇU - 2023
- 11 ANÁLISE TÉCNICA DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM USO DE
ENZIMA PARA PAVIMENTAÇÃO
 - Poliana Tonieto Cittadella
 - Laura Maria Goretti da Motta
- 27 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE
RESÍDUO DE VIDRO EM UM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO PARA
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA
 - Yuri Flôr Henrique
 - Laura Maria Goretti da Motta
- 41 PAVIMENTAÇÃO FLEXÍVEL DE VIA: VALIDAÇÃO METODOLÓGICA
DE AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL EM VIA DE
ARAUCÁRIA-PR
 - Vitor Hugo Fernandes
 - Débora Mateus Pereira
 - Mateus Godoi Priotto
 - Lauri Anderson Lenz
 - Tharsila Maynardes Dallabona Fariniuk



A ABPv tem orgulho de lançar a 52ª edição da Revista Pavimentação, reafirmando seu papel histórico na promoção do desenvolvimento técnico e científico do setor. As contribuições aqui reunidas refletem a relevância da revista como espaço qualificado para a divulgação de estudos e soluções inovadoras, essenciais ao avanço da infraestrutura viária nacional. A comissão editorial manifesta sua alegria em entregar mais uma edição que consolida a tradição da ABPv e inspira profissionais, pesquisadores e estudantes em todo o Brasil.

**Lélio Antônio Teixeira Brito,
Georgina Libório Azevedo Braga,
Luciana Nogueira Dantas,
Cássio Alberto Teoro do Carmo,
João Vicente Falabella Fabrício e
Rafael Lopes Martins**

Editores da REVISTA PAVIMENTAÇÃO



Eventos



48ª RAPv / 25º ENACOR / 4ª ExpoEnacorRAPv

Rumo à Infraestrutura do Futuro

Foz do Iguaçu - 2023

Edição com foco em inovação



O ano de 2023 representou um marco relevante para o setor de infraestrutura de transportes no Brasil, com a realização simultânea da 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), do 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) e da 4ª ExpoEnacorRAPv.

Consolidado como o principal fórum técnico-científico da área, o evento foi promovido pela Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), em parceria com a Associação Brasileira dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem (ABDER), e contou com o apoio institucional do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR).

A edição foi realizada entre os dias 19 e 22 de setembro de 2023, na cidade de Foz do Iguaçu (PR), reunindo cerca de 1.800 participantes em um ambiente voltado ao debate de temas estratégicos, com ênfase na inovação e na modernização da infraestrutura de transportes no país.

Integrada à programação técnica, a 4ª ExpoEnacorRAPv reuniu empresas, instituições e profissionais do setor, que apresentaram soluções tecnológicas, inovações em materiais e equipamentos voltados à engenharia de pavimentos e à conservação rodoviária.

Objetivos e Temas Estratégicos

Com tradição de excelência técnica, a 48ª RAPv e o 25º ENACOR tiveram como objetivo principal o intercâmbio de conhecimentos sobre tendências, inovações tecnológicas, práticas de gestão, políticas públicas e estratégias de segurança aplicadas aos setores de pavimentação, ferrovias, aeroportos, projetos e gerenciamento de pavimentos, logística e segurança viária.

A edição de 2023 destacou, de forma especial, os seguintes temas estratégicos:

- Sustentabilidade aplicada à infraestrutura;
- Resiliência das redes viárias;
- Aplicação de tecnologias emergentes;
- Construção de soluções eficientes e seguras para a malha viária nacional.
- Entre os tópicos abordados em workshops e sessões técnicas, destacaram-se:
- Gestão de riscos aplicados ao manejo de pavimentos asfálticos;
- Qualidade dos materiais como fator essencial na durabilidade dos pavimentos rodoviários;
- Perspectivas e desafios da infraestrutura do futuro.

A programação técnica contou com :

- 26 palestras;
- 6 minicursos;
- 3 mesas-redondas;
- 127 trabalhos técnico-científicos e estudos de caso, provenientes de diversas regiões do Brasil;
- Visitas técnicas à Usina Hidrelétrica de Itaipu e à nova Ponte Internacional da Integração entre o Brasil e o Paraguai.

Reconhecimento Profissional

Um dos momentos mais aguardados da programação foi a cerimônia de entrega do Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom 2023, que homenageia profissionais com destacada contribuição ao setor de infraestrutura viária.



Profissionais homenageados:

- Eng.º Cássio Alberto Teoro do Carmo – HUESKER
- Eng.º Luis Alberto Herrmann do Nascimento – PETROBRAS
- Eng.º Paulo Sergio Peterlini – DNIT-PR

Foi também prestada uma homenagem especial à Secretária Glória Maria Reis Vaz de Oliveira, em reconhecimento à sua dedicação, profissionalismo e contribuição significativa ao desenvolvimento das atividades da ABPv.

Patrocinadores

O evento contou com o apoio das seguintes instituições e empresas:



Patrocinadores principais:

Itaipu Binacional, Petrobras, DNIT, Governo Federal, Marvitec, Mútua, Sinasc, Strata Engenharia, CBB Asfaltos, Greca Asfaltos, infraTest Testing Systems, Stratura Asfaltos, DM Reflective Material, Sider, Softplan, Traçado, Avery Dennison, Betunel, Bandeirantes Sinais Viários, Sinalisa Segurança Viária, Indutil Tintas, 3M, ACO, Base Forte, Betar, E-vias, Geobrugg, Grupo GTO, Huawei, Lisy Segurança Viária, Maccaferri, Owntec, Pavesys, Shempo, TPF Engenharia, SOSDOCS, Techonomast, Ramm Química, CREA-PR, Aminocap, HUESKER, Waybor, Renova Urb, MTS.

Apoios Institucionais:

- **Institucional Retrolux, Alphabond, Altanoroeste, SERPRO**
- **Institucional I:** Garcia Monteiro, Marangoni – Road Steel
- **Institucional II:** HT4 Tecnologia, Mastermind
- **Institucional III:** TINPAVI, IMB
- **Demais apoios:** ABCP, ABCR, ABEETRANS, ABNT, ABSeV, AEDER, The World Bank, DER-DF, IGS Brasil, UFRGS, Rodovias&Vias, Poeira Cast, Infra Urbana, Paving, DER-PR, DER-SE, DER-SP, Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu, Governo do Estado do Paraná e Foz do Iguaçu – Destino do Mundo.



Capacitação Online – ABPv 2023

Reforçando seu compromisso com o desenvolvimento técnico e a formação contínua dos profissionais do setor, a ABPv manteve, ao longo de 2023, uma robusta programação de **capacitações online**. Foram realizados os seguintes cursos:

- **Análise mecânica de pavimentos flexíveis** – 31/05/2023
- **Compactação de solos** – 20/06/2023
- **Gerência de pavimentos: uma visão baseada no HDM-4** – 25 e 26/07/2023
- **Deformação permanente de misturas asfálticas** – 22/08/2023
- **Gerência de pavimentos** – 03 e 04/10/2023
- **Reciclagem de pavimentos** – 21/11/2023



ANÁLISE TÉCNICA DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM USO DE ENZIMA PARA PAVIMENTAÇÃO

TECHNICAL ANALYSIS OF SOIL STABILIZATION WITH THE USE OF ENZYME IN PAVEMENT

Poliana Tonieto Cittadella¹
Laura Maria Goretti da Motta²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, poliana_tonieto@coc.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, laura@coc.ufrj.br

DOI: 10.21526/abpv.v52.1

RESUMO

A revolução econômica e tecnológica do século XX trouxe consigo, entre outras consequências, a necessidade de expansão dos meios de transporte. Com isso, surgiu também a necessidade de se buscar novas tecnologias custo-efetivas, social e ambientalmente menos impactantes que suportassem essa expansão. No campo da pavimentação, entre as novas tecnologias está a utilização de enzimas biocatalizadoras como alternativa para estabilização de solos. Esses produtos visam aumentar a resistência do material de subleito, ou para uso em camadas de base, sub-base ou mesmo na substituição de revestimento primário em estradas rurais. Este estudo teve como objetivo avaliar os resultados obtidos no processo de estabilização de um solo de três trechos experimentais implementados em 2021 em Guarapuava, região central do Paraná. Na execução, parte do solo foi tratada com um biocatalizador, que, em um segmento ficou como revestimento primário e nos outros dois, foi recoberto com concreto asfáltico. Um outro segmento da mesma via foi pavimentado sem o processo prévio de tratamento do solo. Para avaliar o desempenho do produto, foram realizadas avaliações estruturais das pistas executadas, com o uso da Viga Benkelman, além de ensaios laboratoriais de deformabilidade, utilizando a dosagem realizada no local de teste.

Palavras-chaves: Estabilização de Solos, biocatalizadores, aditivo enzimático.

ABSTRACT

The economic and technological revolution of the 20th century brought with it, among other consequences, the need to expand the means of transport. With this, the need also arose to seek new cost-effective, socially and environmentally less impacting technologies that would support this expansion. In the field of paving, among the new technologies is the use of biocatalyst enzymes as an alternative for soil stabilization. These products aim to increase the strength of the subgrade material, or for use in base courses, subbase or even in the replacement of primary coating on rural roads. This study aimed to evaluate the results obtained in the soil stabilization process of three experimental sections implemented in 2021 in Guarapuava, central region of Paraná. In the execution, part of the soil was treated with a biocatalyst, which, in one segment, was used as a primary coating and in the other two, it was covered with asphalt concrete. Another segment of the same road was paved without the previous soil treatment process. To evaluate the performance of the product, structural evaluations of the executed tracks were carried out, using the Benkelman Beam, in addition to laboratory tests of deformability, using the dosage performed at the test site.

Keywords: Soil Stabilization, biocatalysts, enzyme additive.

1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o principal meio de transporte no Brasil, seja para o deslocamento de pessoas ou para o transporte de cargas, exercendo um papel fundamental na economia e no desenvolvimento do país. Assim, torna-se fundamental manter, por longo tempo, o estado operacional dos pavimentos das rodovias para garantir níveis mínimos de conforto e segurança da via para os usuários.

Considerando a importância desse sistema modal na realidade brasileira, investir em melhorias dos projetos e seleção dos materiais de pavimentação, além das técnicas de conservação e aperfeiçoamento é fundamental. A apropriada destinação de recursos para a busca de novas tecnologias pode evitar a degradação estrutural dos pavimentos, melhorar as condições de tráfego, reduzir custos dos serviços de transporte além de preservar o bem-estar do usuário.

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021), de um total de 85,4 mil km de rodovias de gestão pública avaliados, 71,80% foram classificados como regular, ruim ou péssimo, apresentando problemas seja no pavimento, seja na geometria da via ou na sinalização.

Um dado importante é o custo operacional do transporte. Pavimentos inadequados implicam em maiores gastos com manutenção de veículos e maior consumo de combustível, acrescentando em média 30,9% ao custo final do transporte (CNT, 2021).

Em contraposição a esses aumentos dos custos dos usuários, nem sempre evidentes, do outro lado pesam os custos próprios da manutenção rodoviária. De acordo com a Confederação Nacional dos Transportes, em 2021 houve redução em 21,6% nos investimentos em rodovias brasileiras (CNT, 2021). Isso se deve em parte à escalada do preço do barril de petróleo, que no mesmo ano teve um acréscimo de 159%, associado a uma desvalorização da moeda brasileira frente ao dólar (ANP, 2021).

Por outro lado, o aumento progressivo dos custos atua como uma força impulsionadora na busca por novas tecnologias mais eficientes e mais baratas. Exemplo disso foi a criação do programa Proál-

cool em 1975. Idealizado pelo engenheiro e físico José Walter Bautista Vidal e instituído pelo então presidente Ernesto Geisel, o programa visou reduzir a dependência nacional do petróleo importado diante da crise de abastecimento que se instalava no mundo desde 1973. Paralelamente, o programa também serviu para amenizar a crise no setor sucroalcooleiro (Leite & Cortez, 2022). No cenário atual já se avista uma nova crise petrolífera. De um lado há um crescente aumento na demanda pela recuperação industrial pós-pandemia. De outro, a guerra entre Rússia e Ucrânia traz um panorama de incerteza e constantes ameaças de desabastecimento.

Esta pesquisa busca avaliar os resultados do processo de estabilização de solo feito com a aplicação de um produto recém chegado ao país, em trechos experimentais implementados em 2021 em Guarapuava, região central do Paraná. Na execução, parte do solo do trecho foi misturada com o biocatalizador *Eath Materials Catalyst* (EMC Squared®) com subsequente construção de revestimento em dois dos segmentos. A utilização desse tipo de catalisador figura entre as técnicas que propõem uma alternativa custo-efetiva e de menor impacto ecológico na pavimentação. Como controle para o estudo, um segmento da mesma via foi pavimentado sem o processo prévio de estabilização. A partir deste ponto, utiliza-se o termo “produto” para designar este material.

A pesquisa foi desenvolvida através da aferição e comparação de ensaios técnicos tanto em campo quanto em laboratório. Os ensaios compreenderam avaliações funcionais e estruturais (levantamento de defeitos e avaliação com viga Benkelman) e ensaios mecânicos laboratoriais para comparação do desempenho e perspectivas futuras.

A implantação dos segmentos experimentais foi realizada em 2021, embasada somente nos ensaios tradicionais possíveis de serem realizados na região da obra, como o ensaio CBR.

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados na COPPE/UFRJ.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estabilização de Solos

A estabilização dos materiais de pavimentação pode ser resumida como um conjunto de procedimentos que visa proporcionar maior durabilidade e desempenho das estruturas dos pavimentos. Esse processo pode ser dividido em métodos mecânicos que consistem na estabilização granulométrica e métodos físico-químicos por meio de incorporação de aditivos, ambos seguidos da compactação (Lovato, 2004).

De acordo com Oliveira (2010), na engenharia rodoviária, o procedimento de estabilização de solos tem grande importância e deve ser executado com controle tecnológico adequado para que garanta suportar as cargas dos veículos oriundos do tráfego.

As técnicas de estabilização modificam artificialmente o solo, visando melhorar sua capacidade de resistir a ações erosivas e aos esforços gerados pelo tráfego de veículo em situações adversas. De forma geral, buscam a melhoria das propriedades de resistência mecânica, compressibilidade e expansibilidade dos solos, resultando em materiais mais duráveis e menos permeáveis.

Cristelo (2001, *apud* Fristscher 2016), afirma que os métodos de estabilização podem ser agrupados de três maneiras:

- i) Estabilização mecânica: são realizadas correções na composição granulométrica buscando melhorar a organização das partículas constituintes no solo;
- ii) Estabilização física: são alteradas as propriedades do solo, modificando sua textura a partir da ação do calor, da eletricidade, entre outros;
- iii) Estabilização química: são utilizados aditivos, buscando modificar as propriedades do solo permanentemente.

2.2 Estabilização com emprego de aditivos orgânicos

Bioenzima é o termo utilizado para produtos biocatalizadores atuantes em sistemas vivos, e vem sendo utilizada na pavimentação como agente estabilizante para melhorar a densidade, cimentação entre as partículas, resistência à umidade, estabilidade e capacidade de suporte de cargas (BABY et.al., 2016 *apud* ALENCAR, et.al. 2019).

De acordo com Brazetti (1998), os aditivos orgânicos enzimáticos podem ser utilizados nas estradas de terra para minimizar a lama e a poeira, controle de erosão, melhoria de materiais usados em camadas de base e sub-base de estradas revestidas ou não, pátios de estacionamentos, parques e trilhas de caminhadas e vedação de buracos em estradas de terra.

Ravi Shankar et al (2009) utilizaram um outro produto enzimático em um solo laterítico na Índia e observaram melhorias parciais medidas nos índices físicos e no CBR. Com o mesmo produto, Sravan e Nagaraj (2015) obtiveram mudanças na resistência a compressão simples de blocos de solo estabilizados. Gupta et al (2017) avaliaram que somente solos muito argilosos apresentam bons resultados com o produto enzimático e a dosagem depende muito do tipo de solo, observando que o produto testado diminui os vazios e melhora a compactação do solo.

Para Kolhe e Dhatrak (2022), a estabilização do solo com a utilização de bioenzimas tem uma abordagem inovadora quando comparado com os métodos convencionais, visto que, com pequenas porcentagens do produto, é possível melhorar o comportamento de subleitos. Para que isso ocorra, é importante considerar alguns fatores responsáveis pela eficiência total do solo, tais como a quantidade do produto, o tipo do solo e as circunstâncias de campo.

Além dos produtos comerciais tradicionais já normatizados no mercado e usados na estabilização de solos como o cimento Portland, a cal hidratada e o betume, existe uma gama de produtos comerciais que são patenteados ao redor do mun-

do, com origem americana, sul-africana, argentina, suíça, uruguaia e brasileira, entre outras. Na Tabela 1 são apresentados alguns desses produtos utilizados com objetivo de estabilização do solo para

pavimentação, que buscam o aumento de rigidez do solo e sua impermeabilização. Este artigo foca somente em um, recentemente introduzido no país que é o EMC Squared.

Tabela 1: Relação de alguns produtos comerciais utilizados em solos, na pavimentação, com suas respectivas origens e fabricantes.

Produto	Origem	Fabricante
Con-Aid ® / CBR Plus ®	África do Sul	Con-Aid
Permazyme ®	Estados Unidos da América	Substrata
Consolid C-444	Suíça	Consolid
Terrazyme ®	Estados Unidos da América	Nature Plus Inc.
Ecoroads ®	Estados Unidos da América	Terrafusion International Inc.
DS 328 ®	Brasil	Dynasolo Ind. e Comércio S/A
Ecolopavi	Brasil	Idesa Amazonia
EMC Squared ®	Estados Unidos da América	Stabilization Products

2.2.1 Earth Materials Catalyst (EMC Squared)

Este produto é de origem americana, e a sigla EMC Squared, significa Earth Materials Catalyst, que, em português, seria Catalizador de Materiais Terrosos. Squared quer dizer “ao quadrado”, querendo significar “catalizador muito mais eficaz”.

Segundo o fornecedor brasileiro (Base Forte) trata-se de um biocatalizador natural, não inflamável, não tóxico, não corrosivo, apresentando-se de forma líquida superconcentrado, com pH neutro e dito ecologicamente correto. É composto por enzimas advindas de processos de fermentação.

Segundo o fabricante, as enzimas compostas do produto atuam como agentes cimentantes e impermeabilizantes de partículas do solo. No momento que é adicionada diluída em água no solo, essas enzimas catalisam reações químicas gerando um micro-encapsulamento das partículas minerais do solo, unindo-as entre si, eliminando os “vazios”

com um ganho de CBR, evitando a deformação do pavimento, como representado esquematicamente na Figura 1.

Sampaio (2019) avaliou a utilização deste produto em dois solos da região de Viçosa (MG) para uso em estradas florestais, sem revestimento. Testou três concentrações (1, 2 e 3%) do produto e três tempos de cura ao ar livre (3, 7 e 12 dias). A solução de 2% é a recomendada pelo fornecedor. O solo 1 era predominantemente argiloso e o solo 2 predominantemente arenoso. A adição da solução enzimática em todas as concentrações utilizadas não alterou de forma significativa os resultados obtidos pelos ensaios de compactação nos dois solos nas energias de compactação utilizadas. Não houve ganho significativo de resistência à compressão simples em termos dos ensaios de laboratório.

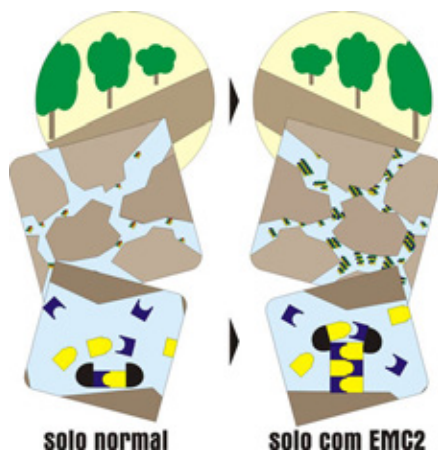


Figura 1: Esquema da ação do produto enzimático no solo.
(Fonte: Base Forte, 2022).

3. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O local escolhido pela Secretaria de Obras do município de Guarapuava – PR para a execução dos trechos experimentais foi a Estrada do Gaspareto, levando em consideração o tráfego gerado em períodos de colheita. O escoamento da safra no município ocorre em dois períodos no ano. A primeira e maior safra acontece no verão, entre os meses de fevereiro e março, decorrente da colheita da soja e do milho. Já a safra de inverno, acontece entre os meses de outubro e novembro, cujos principais cereais são o trigo e a cevada.

O tratamento do solo com o estabilizante químico nos trechos experimentais foi realizado entre os dias 21 e 24 de julho de 2021. Por questões burocráticas, a execução do revestimento asfáltico foi realizada somente na data de 27 de outubro de 2021.

A Figura 2 apresenta a relação dos trechos experimentais executados, com suas respectivas dimensões e espessuras.

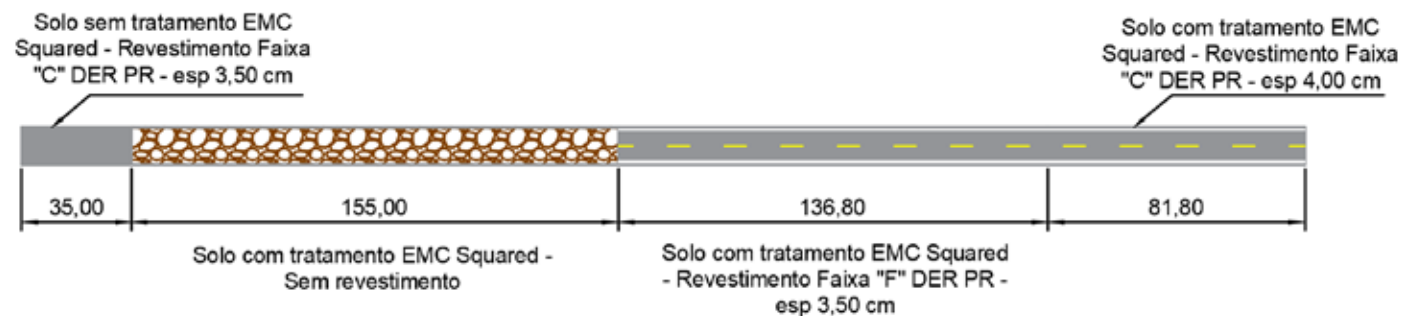


Figura 2: Esquema dos trechos experimentais executados nesta pesquisa.

A aplicação seguiu as orientações disponibilizadas pela empresa distribuidora do produto: dissolvido em água direto no caminhão tanque e, em seguida, aspergido no trecho a ser compactado. A taxa de aplicação recomendada pelo fabricante é

de um litro para cada 30 m³ do solo. Após finalizado o espargimento foi realizada a homogeneização do solo, na espessura de 30 cm seguido do processo de compactação do solo + produto.

A execução foi realizada pelo corpo técnico do município de Guarapuava, contando com o acompanhamento dos engenheiros da empresa fabricante.

Na Figura 3 são apresentadas fotografias dos trechos executados durante a construção, e na Fi-

gura 4, são apresentadas fotos datadas de julho de 2022, na qual, é possível observar que até essa data, não havia sido executado nenhum tipo de dispositivo de drenagem e pequenos defeitos já começam a aparecer, especialmente onde não tem revestimento asfáltico.



Figura 3: Fotografias da etapa construtiva dos segmentos experimentais.

(Fonte: Bembem, 2021).



a) Base sem tratamento e revestimento asfáltico com CBUQ faixa “C”.



b) Base tratada com o produto.



c) Base tratada com o produto e revestimento de CBUQ faixa “F”.



d) Base tratada com o produto e revestimento de CBUQ faixa “C”.

Figura 4: Relatório fotográfico dos trechos experimentais da Estrada do Gaspareto no mês de julho de 2022, um ano após a construção.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Solo e produto

Para a avaliação da eficácia do produto foram realizadas análises em campo e em laboratório.

Para comparação das propriedades do solo *in natura* com o solo com o tratamento com o produto, foram realizadas coletas de material no mesmo local da execução dos trechos experimentais, localizado no município de Guarapuava – PR, cujas coordenadas aproximadas são 25°23’23.6”S, 51°33’43.7”W.

O solo em questão, conforme pode ser visto na Figura 5, apresenta aspecto argiloso de tonalidade marrom, enquadrando-se como A7-5 da classificação de solos HRB, e, na classificação MCT, foi classificado como não laterítico, enquadrando-se como NG’.



Figura 5: Solo presente no horizonte do trecho experimental, sem destorroamento.

O produto utilizado no trecho experimental foi fabricado pela *Stabilization Products LLC*, da Califórnia - USA e distribuído no Brasil pela empresa Base Forte®.

Este produto, também conhecido como biocatalizador de partículas de solo, é fWornecido de forma líquida superconcentrado. De acordo com o fabricante é constituído por enzimas naturais obtidas através do processo de fermentação, usado para melhorar as propriedades dos solos, tais como aumento de densidade, cimentação dos grãos, re-

sistência à umidade e aumento da capacidade de suporte de cargas.

Em uma avaliação expedita de laboratório o produto indicou ter pH ácido, diferente do que informa o fabricante.

Num teste simples de laboratório, foi adicionado um pequeno percentual do produto a uma amostra de solo e houve grande formação de espuma quando agitado em uma proveta conforme indicam as fotos mostradas na Figura 6, que perduravam por muito tempo após a agitação. Isto indica que o produto parece se destinar a aumentar os vazios e evitar problemas de congelamento em regiões de clima frio.



Figura 6: Teste expedito de agitação de um solo com gotas do produto.

4.2 Avaliação do módulo de resiliência em laboratório e estrutural de campo

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência (DNIT 134/2018 – ME) a fim de verificar se houve ganho de rigidez com o uso do produto. Nos segmentos construídos em campo foram feitas medidas de avaliação estrutural com emprego da Viga Benkelman (DNER ME 024/94). Os resultados de módulo de resiliência e de deflexão estão apresentados no próximo item. A avaliação funcional também foi realizada, mas não será objeto deste artigo tendo em vista que poucos defeitos foram observados até o momento.

5. RESULTADOS

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos em três etapas de avaliação do produto: módulo de resiliência em laboratório, avaliação estrutural com uso de Viga Benkelman e a avaliação funcional em campo

5.1 Ensaio de Módulo de Resiliência

Para a determinação do módulo de resiliência do solo e solo + produto foi seguida a norma DNIT 134/2018-ME. Para a obtenção do módulo de resiliência calculam-se os valores pela relação:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência, expresso em MPa;
 σ_d é a tensão desvio que o corpo de prova será submetido, expressa em MPa;
 ϵ_r é a deformação recuperável, (mm/mm).

Os ensaios foram realizados de modo a reproduzir as mesmas condições executadas em campo sendo adotado apenas a dosagem convencional recomendada pelo fabricante, ou seja, a adição de 5% do produto na água distribuída para chegar à umidade ótima. Também foram realizados ensaios com o solo sem o tratamento com o estabilizante.

Os ensaios foram realizados com três teores de umidade distintos, um corpo de prova com teor abaixo da umidade ótima, um corpo de prova na umidade ótima e outro com teor um pouco acima da ótima. Assim foi possível a caracterização de variadas condições de campo, considerando que não foram realizadas in loco nenhum controle tecnológico durante a execução das obras, sendo a liberação dos segmentos feita de modo visual. A ordem de grandeza dos módulos, nas três situações, é pa-

recida.

Conforme se verifica nas Figuras 7 e 8, os valores de módulo de resiliência médios do solo puro e do solo + produto apresentam a mesma ordem de grandeza. Em termos de não linearidade, percebe-se que o produto tendeu a diminuir o expoente por idade de cura, tornando o material tratado com o produto menos sensível às tensões, mas sem ganho de rigidez. Também mostra que o solo e solo + produto tem influência tanto da tensão confinante quanto da tensão desvio, sendo melhor representado pelo modelo composto. Optou-se por indicar nas figuras os modelos em função da tensão desvio somente porque visualmente já mostra a semelhança entre os valores do MR. Isto explica os valores de deflexão não terem se alterado muito com o tempo no campo.

Os resultados do módulo de resiliência são apresentados na Tabela 2 para as condições de ensaio. Percebe-se que os módulos de resiliência do solo com o produto estão na mesma ordem de grandeza em relação ao solo puro.

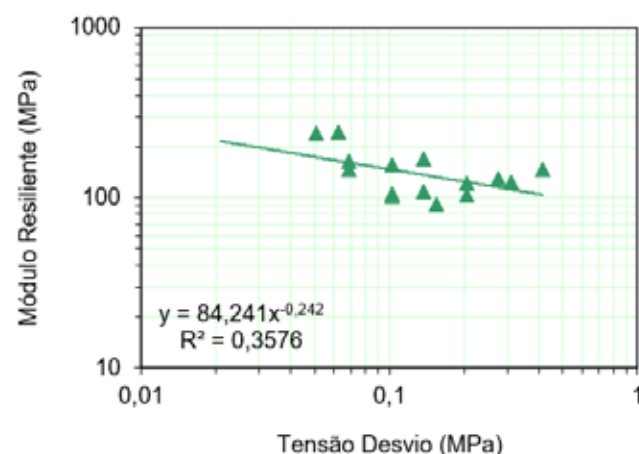
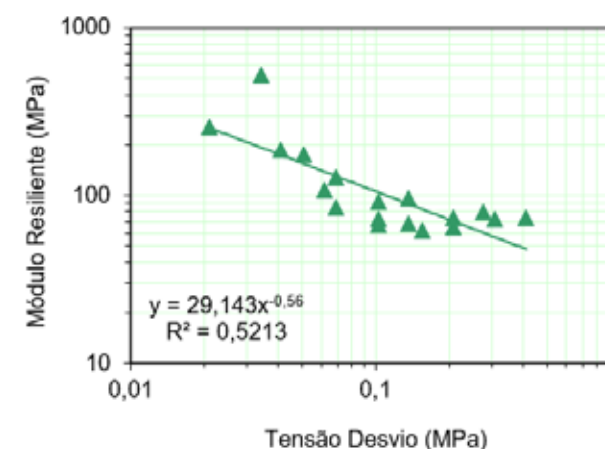
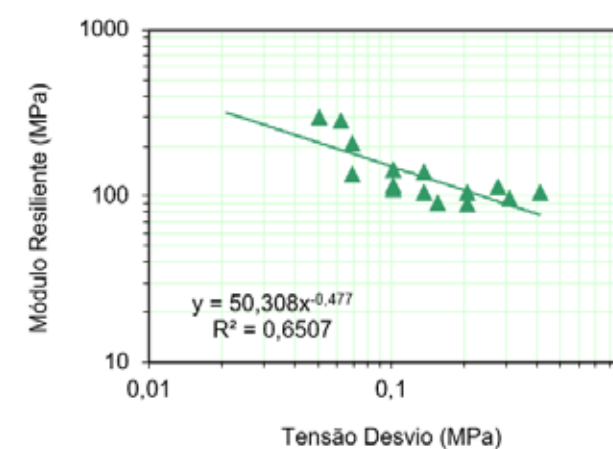


Figura 7: MR do solo puro na umidade ótima (MR médio = 143 MPa).



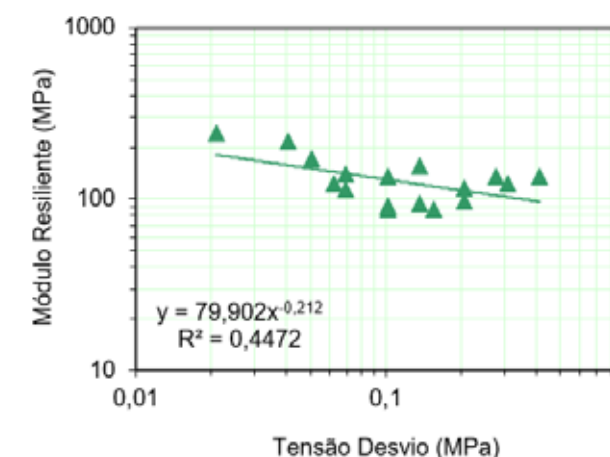
(a) Ensaio imediato após a compactação.

MR médio= 127 MPa



(b) Ensaio após 7 dias de cura.

MR médio= 143 MPa



(c) Ensaio após 12 dias de cura.

MR médio 133 MPa.

Figura 8: MR do solo + produto em três idades de cura.

Tabela 2: Parâmetros do modelo composto de MR para as amostras desta pesquisa.

Amostra	Umidade (%)	MR = k1 σ ₃ ^{k2}			MR = k1 σ _d ^{k2}		
		k1	k2	R ²	k1	k2	R ²
Solo (ramo seco)	27,0	38,97	- 0,549	0,448	52,97	- 0,558	0,553
Solo (umidade ótima)	29,5	110,14	- 0,082	0,070	84,24	- 0,242	0,358
Solo (ramo úmido)	31,7	95,20	- 0,081	0,094	82,52	- 0,169	0,320
Solo + produto	28,7	95,98	-0,100	0,114	79,90	- 0,212	0,114

5.2. Avaliação Estrutural – Viga Benkelman

O número “N” é um parâmetro necessário para o dimensionamento do pavimento como também para a obtenção da deflexão máxima admissível, sendo definido para o número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 tf, durante o período de vida útil do pavimento (DNIT, 2006).

Para caracterização do tráfego, foram realizadas contagens volumétricas classificatórias durante um período de 7 dias corridos por 24 horas, entre os dias 20 e 26 de junho de 2022. A determinação do número N_{8,2ton} foi realizada com base no Manual de Tráfego do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), metodologia USACE. O valor resultante foi de N = 2,37x10⁵ para 10 anos, compatível com estrada vicinal de tráfego sazonal.

Para obtenção dos resultados da deflexão do pavimento desse estudo, foi empregada uma viga Benkelman (Figura 9).



Figura 9: Execução do ensaio de viga Benkelman.

As leituras foram realizadas de 10 em 10 metros, porque os trechos são curtos, sendo intercalados entre a trilha de roda externa (T.R.E.) e, a trilha de roda interna (T.R.I.).

O valor da deflexão admissível (D_{adm}) depende dos materiais constituintes do revestimento e da base do pavimento, expressa em 0,01 mm, correspondente às deflexões medidas com a carga padrão de 80 kN, eixo simples de roda dupla, dado pela expressão a seguir:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 * \log N$$

Onde:

D_{adm} = deflexão admissível pelo pavimento existente, sendo considerado o tráfego que ele suportaria ao final de período de projeto estabelecido para efeito de análise;

N = número de solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf.

O valor da deflexão máxima admissível para este pavimento é de 115 (décimos de mm) para o

N previsto. Na Figura 10 são apresentados de forma resumida os resultados obtidos em campo por tipo de pavimento, considerando que estas medidas foram feitas em duas datas, com diferença de três meses entre elas. A primeira leitura ocorreu em 29 de junho de 2022 em um período seco, já a leitura realizada em 15 de setembro de 2022 ocorreu após um período chuvoso, a fim de verificar a impermeabilização dos segmentos.

Para a apresentação dos resultados optou-se por realizar a média dos valores de T.R.I. e T.R.E. em cada segmento. Foi observado nos trechos experimentais valores mais elevados nas T.R.E. quando comparadas com as T.R.I. Essas diferenças podem ser explicadas de duas maneiras: a primeira, na fase de construção, onde geralmente o controle de compactação é melhor na parte interna da pista do que na parte externa. A segunda é de que a pista não possui acostamento nem dispositivos de drenagem, facilitando a possível entrada de água nas bordas, resultando em valores maiores de deflexão na trilha externa.

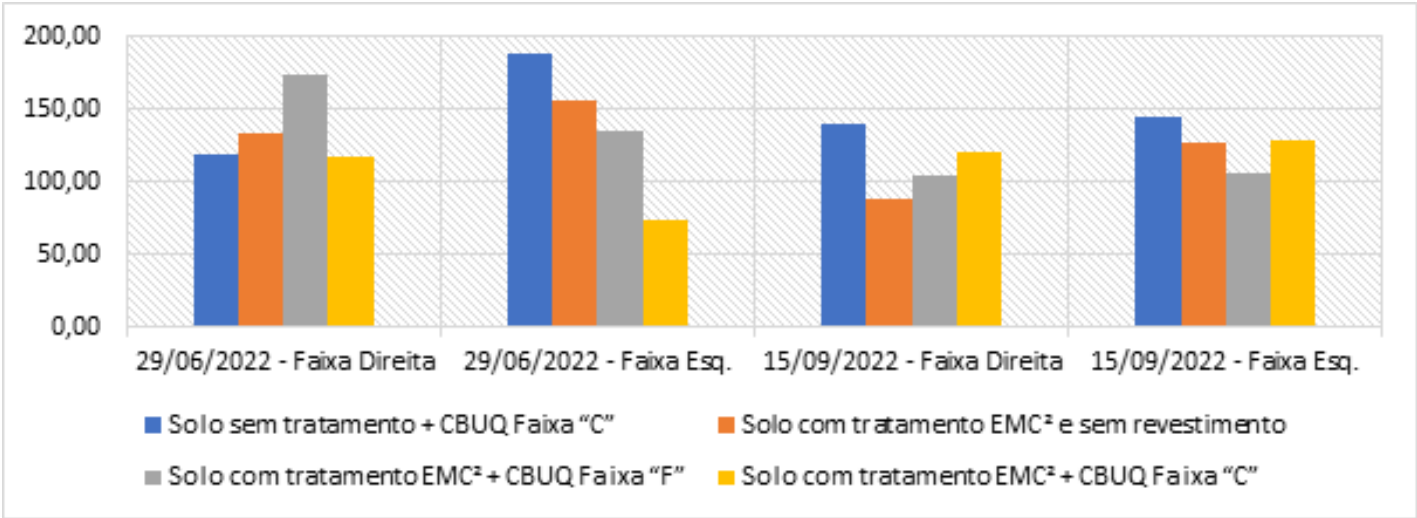


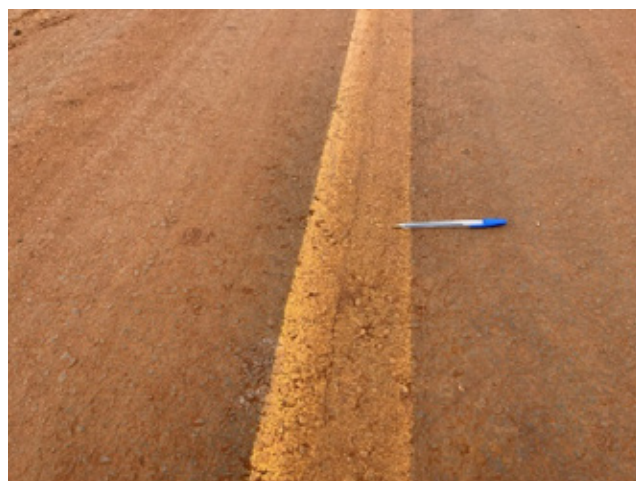
Figura 10: Resumo dos resultados de deflexão obtidos por segmento.

Para a avaliação das condições funcionais, foi realizado o levantamento visual da condição de superfície do pavimento, conforme o procedimento DNIT 006/2003-PRO, buscando identificar os defeitos existentes. Como ainda são poucos os defeitos existentes, o Índice de gravidade Global (IGG) ainda são baixos. Na Figura 11 mostram-se alguns

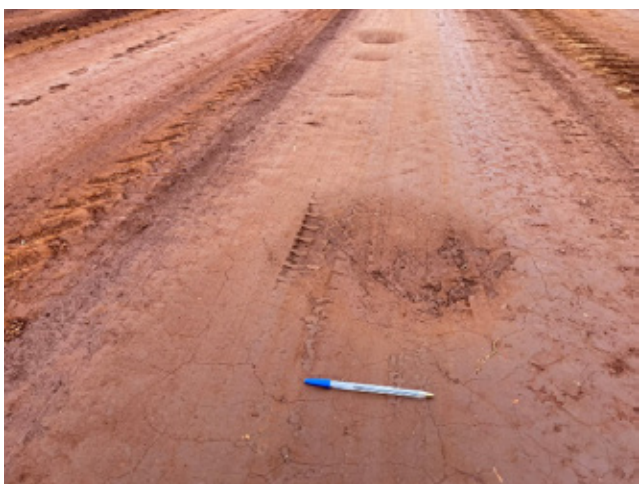
dos principais defeitos observados nos segmentos experimentais. Considerando que os segmentos foram construídos a pouco tempo e o tráfego é baixo, era esperado que os defeitos ainda fossem inexistentes ou incipientes caso as soluções adotadas para os pavimentos fossem adequadas.



(a) Trinca transversal curta. Pista com revestimento CBUQ Faixa F.



(a) Trinca longitudinal longa. Pista com revestimento CBUQ Faixa F.



(a) Pequenas panelas e trincas em bloco. Solo com tratamento.



(a) Desgaste e trilhas de roda. Solo com tratamento.

Figura 11: Alguns defeitos observados nos segmentos experimentais construídos nesta pesquisa.

6. CONCLUSÃO

A descoberta de novas técnicas na área de pavimentação é sempre muito valiosa, visto que ainda se tem no Brasil milhares de quilômetros a serem pavimentados. Por conta disso, incentivos à utilização de novos produtos sempre devem ser feitos, no entanto lembrando que a formação dos solos tropicais difere de locais de clima temperado ou frio. Em termos de estabilizantes químicos, nem sempre há sucesso quando utilizados 'por vezes sem estudos prévios ou mesmo sem controle adequado no campo. Ensaio de módulo de resiliência são mais adequados do que o ensaio CBR para avaliar os materiais de pavimentação, especialmente os estabilizados quimicamente. A busca de menor impacto ambiental também é um critério a ser considerado.

Nesta pesquisa, foram constatados resultados semelhantes na condição do solo puro e do solo com a adição do produto, seja através da análise em campo, como também, em laboratório. Assim, não é possível afirmar que houve estabilização química para este tipo de solo, já que o ganho de rigidez foi pequeno ao se considerar o desempenho em campo após alguns meses, com ligeiro decréscimo das deflexões

Do mesmo modo, os resultados apresentados na pesquisa realizada por Chen et.al. (2001), foram semelhantes, em que, os autores realizam comparativos entre o material tratado e não tratado, na qual, também não observaram aumentos de rigidez com o uso do mesmo produto.

Quanto aos defeitos já observados, é possível que evoluam no segmento sem revestimento mais rapidamente a partir de novas temporadas de chuvas. Nos segmentos com revestimento asfáltico há proteção à entrada de água o que favorece a durabilidade do pavimento. É necessário avaliar se, para este volume baixo de tráfego, o custo de aplicar o produto e ainda fazer o concreto asfáltico se justificaria caso o desempenho do trecho ao longo dos 10 anos previstos continue adequado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, I. S.; FERREIRA, E. A.; SEVALHO, E. S. Uso de Enzimas para Estabilização de Solos. Revista Interscientia, Vol. 7, N. 01, Pág 102 a 114. Jan a Jun 2019.

BASE FORTE. EMC Squared: Pavimentação Econômica. Brasil, 2022. Disponível em: <www.baseforte.net/producto.html> Acesso dia 12 de julho de 2022.

BRAZETTI, R. Considerações sobre a influência de distintos aditivos orgânicos nas características micromorfológicas, mineralógicas, físicas, mecânicas e hidráulicas de um solo laterítico. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). São Paulo, 1998.

BRAZETTI, R.; CASAGRANDE, M. D. T.; SILVA, B. de A. e. Enzimas para estabilização de solos: uma suspeita fundamentada. 19ª Reunião de Pavimentação Urbana. Cuiabá – MT. Julho de 2013.

CHEN, D. H.; BILYEU, J.; MURPHY, M. Transportation Research Board - TRB. Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Alabama, 2001.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. Pesquisa CNT de rodovias 2021: Relatório gerencial. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2021.

FRTSCHER, S. V. Estabilização de Solo Residual de Lajeado com adição de cimento e cinza de casca de arroz. Graduação em Engenharia Civil. Centro Universitário Univates. Lajeado, 2016.

GUPTAA, A, SAXENA, V et al. Review Paper on Soil Stabilization by Terrazyme. Int. Journal of Engineering Research and Application. ISSN: 2248-9622, Vol. 7, Issue 4, (Part - 6) April 2017, pp.54-57

KOLHE, P. V.; DHATRAK, A. I.; Unconfined compressive strength of bio-enzymatic treated expansive (BC) soil. Materials Today: Proceedings, 2022.

LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B. O etanol: Combustível no Brasil. Disponível em: < agencia.cnptia.embra-

pa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0w-tedt3xdrmtk.pdf>; Acesso em 09 de junho de 2022.

LOVATO, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. 2004. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

OLIVEIRA, E. Emprego da Cal na Estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: Estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

RAVI SHANKAR, A. U, HARSHA KUMAR RAI e MITHANTHAYA R. I. Bio-enzyme stabilized lateritic soil as a highway material. Journal of the Indian Roads Congress, 2009.

SAMPAIO, I, S. Estabilização enzimática de solo para pavimento de estradas florestais. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa.



O QUE A ABPv OFERECE AOS ASSOCIADOS

Entidade técnico-cultural sem fins lucrativos fundada em 1959 no Rio de Janeiro, a ABPv tem por missão promover a preservação, a manutenção, o aprimoramento cultural e o desenvolvimento da técnica de pavimentação no Brasil.

- Divulgação da cultura e técnica da pavimentação através do ensino (treinamentos e cursos), publicações periódicas, seminários, eventos e palestras.
- Promoção da melhoria do ensino da pavimentação.
- Promoção de ações, estudos, convênios técnicos-científicos e projetos para solução de problemas que dificultem o aperfeiçoamento das técnicas de pavimentação.
- Intercâmbio de conhecimentos entre técnicos e entidades nacionais e estrangeiras no que se refere às normas, pesquisas, projetos, convênios e literatura especializada.
- Apoio às organizações congêneres que tenham os mesmos objetivos que a ABPv.
- Realização de eventos periódicos para divulgação e discussão de trabalhos técnicos-científicos, workshops e mini-cursos.
- Estímulo à participação dos seus sócios nos trabalhos de pavimentação.
- Preservação do registro da memória da pavimentação do País.
- Realização de eventos periódicos para a divulgação e discussão de trabalhos técnicos-científicos.

Entre as atividades educacionais e culturais da ABPv destacam-se, além dos cursos de capacitação profissional, dois grandes eventos de nível nacional: a RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO; e a RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA. Realiza também a EXPOPAVIMENTAÇÃO, uma exposição de produtos e serviços da área de engenharia de pavimentação.



ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO EM UM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO PARA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS OF THE INCORPORATION OF GLASS WASTE IN A LATERITIC CLAY SOIL FOR ROAD PAVING

Yuri Flôr Henrique¹

Laura Maria Goretti da Motta²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE-UFRJ. yuri.henrique@coc.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE-UFRJ. laura@coc.ufrj.br

DOI: 10.21526/abpv.v52.2

RESUMO

Soluções que proporcionam o reuso de materiais e a adequada disposição de resíduos na pavimentação reduzem impactos ao meio ambiente, sendo ecológicas e sustentáveis. Esta pesquisa buscou, por meio de ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente, mostrar a viabilidade da reutilização de resíduo de vidro nas camadas de base de pavimentos com revestimento asfáltico incorporado à um solo argiloso laterítico sob duas condições granulométricas: como filer e como material retido entre as peneiras Nº 100 e Nº 200 (#100-200), com adição de um ativador alcalino que foi a cal de carbureto. Os resultados mostraram que os materiais em conjunto foram capazes de melhorar consideravelmente o módulo de resiliência do solo. Todas as misturas elaboradas obtiveram também redução da deformação permanente, chegando a níveis que se pôde considerar como estabilizadas, com deformação permanente quase zero. Assim, foi viável a incorporação de resíduo de vidro moído em pó (filer e #100-200) com adição de ativador alcalino (cal de carbureto) ao solo estudado, tornando-o adequado à pavimentação.

Palavras-chaves: Vidro triturado, vidro em pó filer, reciclagem, pavimentação, cal de carbureto

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da malha rodoviária, bem como a renovação dos trechos existentes, colocam a pavimentação em posição de elevada importância. Projetos sustentáveis que considerem as novas tecnologias de construção e dimensionamento, com reaproveitamento de materiais das vias existentes ou com incorporação de resíduos aos materiais de pavimentação tradicionais, além das pesquisas que visam diminuir o surgimento de defeitos e garantir sua vida de projeto, sempre ao menor custo, terão destaque no cenário nacional.

ABIVIDRO (2021), cita o fato de o vidro ser 100% reciclável, ou seja, ele pode ser usado e posteriormente utilizado como matéria-prima na fabricação de novos vidros infinitas vezes sem perda de qualidade ou pureza do produto. Apesar disso, informativo disponível no portal de *internet* do Compromisso Empresarial para Reciclagem mostra o seguinte so-

ABSTRACT

Solutions that allow the reuse of materials and the proper disposal of residues in paving reduce impacts on the environment, while being ecological and sustainable. This research sought, through resilience modulus and permanent deformation tests, to show the viability of reusing glass waste in the base layers of pavements with asphalt coating incorporated into a lateritic clayey soil under two granulometric conditions: as filler and as material retained between No. 100 and No. 200 sieves (#100-200), with the addition of an alkaline activator which was carbide lime. The results showed that the materials together were able to considerably improve the soil resilience modulus. All mixtures elaborated also obtained a reduction in permanent deformation, reaching levels that could be considered as stabilized, with almost zero permanent deformation. Thus, it was feasible to incorporate powdered ground glass residue (filler and #100-200) with the addition of alkaline activator (carbide lime) to the studied soil, making it suitable for paving.

Keywords: Glass cullet, ground glass residue (filler), recycling, paving, carbide lime

bre a taxa de reciclagem do vidro: *Entre 1994 e 2011, o índice de reciclagem do vidro subiu de 33% para 47%, para “atividade industrial do vidro” em geral, ou seja, vidro plano, de embalagens, especiais-técnico e doméstico* (CEMPRE, 2022).

Com esta taxa de reciclagem de 47%, mais da metade dos resíduos de vidros são destinados aos aterros sanitários ou ainda, despejados no meio ambiente de forma inadequada. Assim, fica evidente o quanto esse percentual de reciclagem precisa avançar no Brasil. A pavimentação pode ser uma aliada da reciclagem. Se resíduos de vidro puderem ser incorporados aos seus materiais comumente usados, além dos benefícios ambientais da disposição correta do resíduo, que aumentaria a taxa de reciclagem do vidro, poderia proporcionar benefícios econômicos dada a redução do volume de material natural explorado em jazidas e a possível melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos solos onde forem incorporados os vidros.

Com isso, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica da incorporação de resíduo de vidro em um solo argiloso laterítico para emprego em camadas de sub-base ou base de pavimento rodoviário composto por revestimento flexível, buscando não comprometer as propriedades do material natural e sim melhorá-las.

Nesse sentido de melhoria, pesquisas de autores como AFONSO (2019) e SCHEUERMANN FILHO (2019) mostraram que dada sua composição química e estrutura amorfa, o vidro moído possui atividade pozolânica se finamente moído (< 0,075mm), podendo assim, ser um material com capacidade de estabilização físico-química de solos. Ainda de acordo com os referidos autores, para que as reações pozolânicas ocorram é preciso que o meio seja em solução alcalina, assim, a cal de carbureto, rica em hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), surge como ativador alcalino, podendo ser alternativa à cal hidratada (advinda da hidratação da cal virgem) e ao cimento Portland.

Dessa forma, foram analisados o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP) de misturas elaboradas com o solo e resíduo de vidro em pó fino (passante na peneira Nº 200) com adição de cal carbureto em busca, principalmente, dos benefícios da estabilização físico-química do solo. A influência do tempo de cura das misturas foi avaliada em duas idades: 28 e 90 dias de cura. A influência da umidade de cura também foi avaliada por meio de corpos de provas elaborados em diferentes umidades, próximas da umidade ótima de cada mistura. Para verificar a influência do ativador alcalino utilizado, foram analisadas misturas

sem adição de cal carbureto, ou seja, somente solo + vidro em pó (passante na peneira Nº 200). Também foram analisadas misturas do solo e resíduo de vidro passante na peneira Nº 100 e retido na peneira Nº 200 com adição de cal carbureto visando avaliar a influência da dimensão das partículas de pó de vidro nos parâmetros MR e DP. O teor de cal de carbureto adicionado em cada mistura foi definido pelo método do pH. Este método permite obter o teor de cal necessário para elevar o pH da mistura para 12,4.

2. MATERIAIS E METÓDOS

2.1. Materiais

O solo utilizado (Figura 1 (a)) é um solo argiloso laterítico, classificado pela metodologia MCT como LG' e é o mesmo solo utilizado em pesquisa anterior conduzida por SANCHEZ (2021) para incorporação de resíduo de vidro triturado com uma granulometria mais graúda.

O vidro utilizado foi, em sua maior parte, composto por garrafas de cerveja de cor verde de 330ml (Figura 1 (b)), e em menor quantidade, garrafas de aguardente na cor transparente de 965ml (Figura 1 (c)). Ele foi proveniente de uma lanchonete situada em Nova Iguaçu, RJ. Observa-se que no local não existe coleta seletiva pública de resíduos sólidos urbanos. Com isso, o destino natural das garrafas coletadas para esta pesquisa é o aterro sanitário de Nova Iguaçu, uma vez que estas garrafas são consideradas descartáveis, ou seja, sem recolhimento pela empresa de bebidas após vazias.

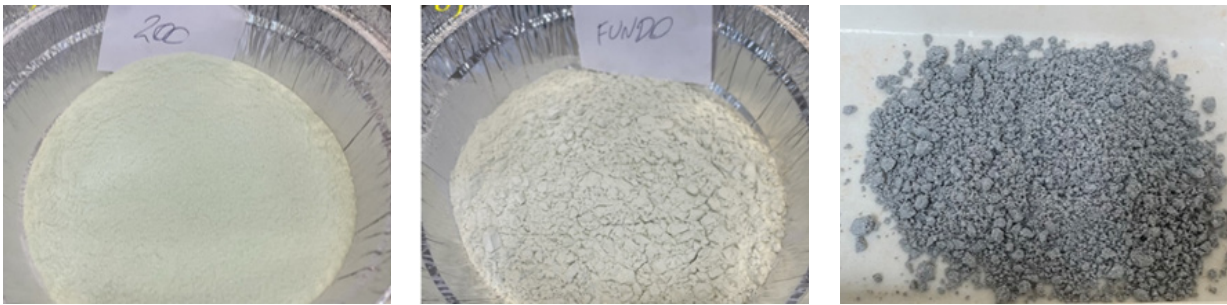


Figura 1: Solo argiloso laterítico desta pesquisa e as garrafas de vidro utilizadas.

As garrafas passaram por processo manual de lavagem e retirada dos rótulos. Após secagem ao ar, as garrafas foram quebradas manualmente, dentro de sacos de plástico, com marteladas até atingirem dimensões para passarem na entrada do britador de laboratório do tipo mandíbula. A britagem produz desde partículas finas como fíler a partículas mais graúdas como pequenos cacos de vidro. Assim, todo o material britado foi peneirado, sendo separado para uso o material: #100-200 (retido en-

tre as peneiras N° 100 – 0,15 mm e N° 200 – 0,075 mm) (Figura 2 (a)); e fíler (passante na peneira N° 200 – 0,075 mm) (Figura 2 (b)).

A cal de carbureto (Figura 2 (c)) foi obtida em uma empresa localizada no estado de São Paulo que utiliza a cal de carbureto oriunda de plantas industriais de produção do gás acetileno para, juntamente com outros materiais, produzir e comercializar estabilizante de solo.



(a) Vidro #100-200 (b) Vidro fíler (c) Cal de carbureto

Figura 2: Vidro moído e a cal de carbureto desta pesquisa.

A Tabela 1 a seguir resume as combinações de solo, vidro moído em pó e cal de carbureto analisadas nesta pesquisa por meio de ensaios de MR e DP. Observa-se que os teores de cal de carbureto apresentados na referida tabela são da cal com sua umidade natural (aproximadamente 50% de umidade) em relação ao peso de solo seco e foram definidos pelo método do pH (conforme DNIT 419/2019-ME). Em utilização em campo, a cal será aplicada com sua umidade natural, assim, torna-se conveniente apresentar os teores de incorporação deste material conforme produzido, armazenado e utilizado.

É importante mencionar que em pesquisas como de BILONDI *et al.* (2018), WINTER (2018) e SCHEUERMANN FILHO (2019) percebe-se que a ocorrência das reações pozolânicas depende, dentre outros fatores, do tempo e da temperatura de cura das amostras com resíduo de vidro e cal de carbureto, sendo que quanto maior o tempo da amostra submetida a temperaturas mais elevadas (pelo menos 40°C) mais reações pozolânicas ocorrem. Dado os custos energéticos para executar pavimentações em campo com aquecimento dos materiais, esta pesquisa não realizou cura das

amostras em temperatura elevada, sendo utilizada a temperatura da câmara úmida do laboratório de mecânica dos solos, 24°C.

Tabela 1: Combinações de solo, *fíler* de vidro, vidro #100-200 e cal de carbureto

Material
Solo puro
Solo + 10% fíler de vidro + 2,5% cal de carbureto
Solo + 20% fíler de vidro + 2,0% cal de carbureto
Solo + 30% fíler de vidro + 1,5% cal de carbureto
Solo + 4,5% de cal de carbureto
Solo + 10% vidro #100-200 + 2,5% cal de carbureto
Solo + 20% vidro #100-200 + 2,0% cal de carbureto
Solo + 30% vidro #100-200 + 1,5% cal de carbureto
Solo + 10% fíler de vidro
Solo + 20% fíler de vidro
Solo + 30% fíler de vidro

2.2 Ensaios realizados

Os ensaios de caracterização física, geotécnica e mecânica do solo puro foram conduzidos por SANCHEZ (2021), tendo em vista que o solo da presente pesquisa é o mesmo solo utilizado pela referida autora. Apenas foi repetida nesta pesquisa a análise granulométrica convencional por peneiramento e sedimentação, de acordo com a NBR 7181:2016. Assim, SANCHEZ (2021) realizou os ensaios de massa específica dos grãos conforme NBR 6458:2016, de determinação dos limites de Atterberg, sendo o limite de liquidez (LL) conforme NBR 6459:2016, o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP) conforme NBR 7180:2016. SANCHEZ (2021) também apresentou a classificação MCT do solo, determinou por meio do ensaio de compactação com energia intermediária do ensaio Proctor a umidade ótima (w_{ot}) e a massa específica aparente máxima do solo seco (MEAS), conforme DNER-ME 162/94 e o Módulo de Resiliência (MR) (DNIT 134/2018-ME) e deformação permanente (DP) (DNIT 179/2018-IE) na umidade ótima (w_{ot}).

As combinações das misturas de solo com vidro moído e a cal de carbureto, após terem o teor da cal mínimo necessário definido pelo método do pH (DNIT 419/2019-ME) (Figura 3 (a)), foram submetidas aos ensaios de compactação com energia intermediária do ensaio Proctor a para determinar w_{ot} e MEAS de cada mistura, conforme DNER-ME 162/94. Em seguida foram produzidos os corpos de prova (CP) para os ensaios de MR e DP (Figura 3 (b)). Os ensaios de MR (DNIT 134/2018-ME) e DP (DNIT 179/2018-IE) foram conduzidos em diferentes umidades (w), próximas da w_{ot} . Os CP foram moldados em diferentes umidades com a finalidade de verificar a influência da umidade (w) no parâmetro MR. O MR foi realizado em duas idades de cura diferentes: 28 e 90 dias de cura, fim de verificar a evolução deste parâmetro. A DP foi analisada aos 28 dias de cura para o maior par de tensões normativo ($s_3 = 120$ kPa; $s_d = 360$ kPa). Em misturas estabilizadas espera-se que não existam deformação permanente, ou que seja muito pequena, da ordem de no máximo 2,5% (5 mm, em 200 mm da altura do corpo de prova). Dessa forma, é conveniente ensaiar a DP somente no maior par de tensões, o qual

produziria a maior deformação permanente dentre os demais pares de tensões normativos. Observa-se que nas misturas de “solo + fíler de vidro” a DP foi avaliada aos 90 dias de cura devido a maior demora para ocorrência das reações pozolânicas nestas sem o ativador alcalino.



(a) Método do pH



(b) Corpos de prova

Figura 3: Método do pH e os corpos de prova elaborados, protegidos e embalados com plástico, prontos para cura em câmara úmida e posterior ensaios de MR e DP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 (a) a seguir apresenta graficamente a variação da umidade ótima em função do teor de adição de fíler de vidro nas misturas, com e sem cal de carbureto. A Figura 4 (b) a seguir apresenta graficamente a variação da MEAS em função do teor

de fíler de vidro nas misturas, com e sem cal de carbureto. Com os resultados verifica-se que a cal de carbureto aumenta w_{ot} e reduz MEAS. Já o fíler de vidro reduz a w_{ot} e aumenta MEAS. Quando presentes tanto o fíler de vidro quanto a cal de carbureto, devido aos seus efeitos antagônicos, w_{ot} e MEAS devem ser vistos caso a caso conforme os teores de adição de cada material.

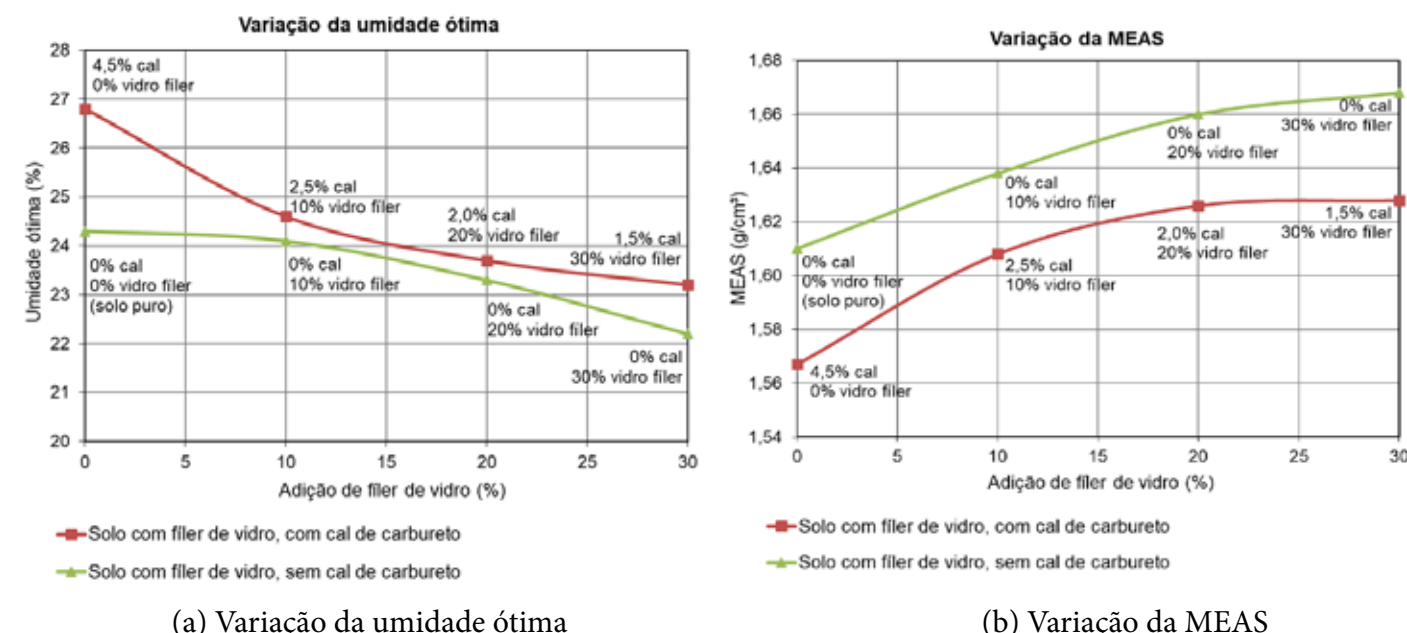


Figura 4: Variação da umidade ótima e da MEAS em função do teor de adição de fíler de vidro nas misturas, com e sem cal de carbureto.

A Figura 5 a seguir permite visualizar os ajustes do MR para as misturas de “solo + fíler de vidro + cal de carbureto” nos diversos teores de incorporação e a Figura 6 permite comparar o MR médio aos 28 e 90 dias de cura destas misturas nas suas w_{ot} . Já a Figura 7 a seguir permite visualizar os ajustes

do MR para as misturas de “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto” e a Figura 8 permite comparar o MR médio aos 28 e 90 dias de cura nas suas w_{ot} . Os resultados para as misturas de “solo + fíler de vidro” podem ser consultados em Henrique (2023).

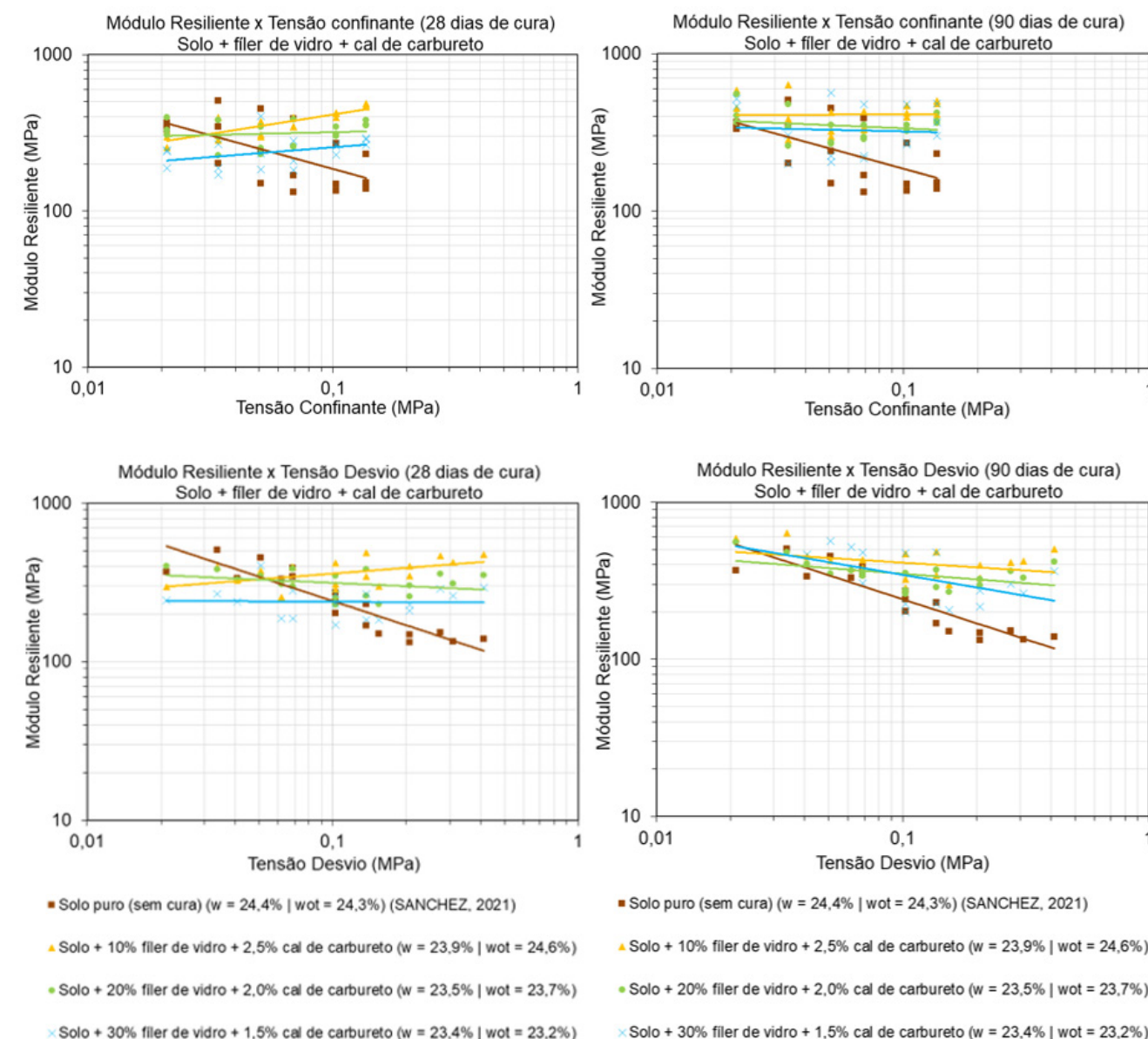


Figura 5: Ajustes do MR aos 28 e 90 dias de cura das misturas de “solo + fíler de vidro + cal de carbureto” na w_{ot} em função da tensão confinante e da tensão desviadora.

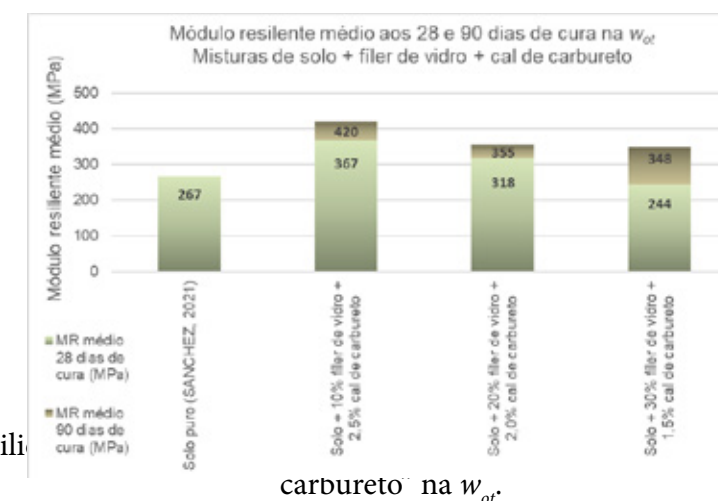


Figura 6: Módulo resili... carbureto na w_{ot} .

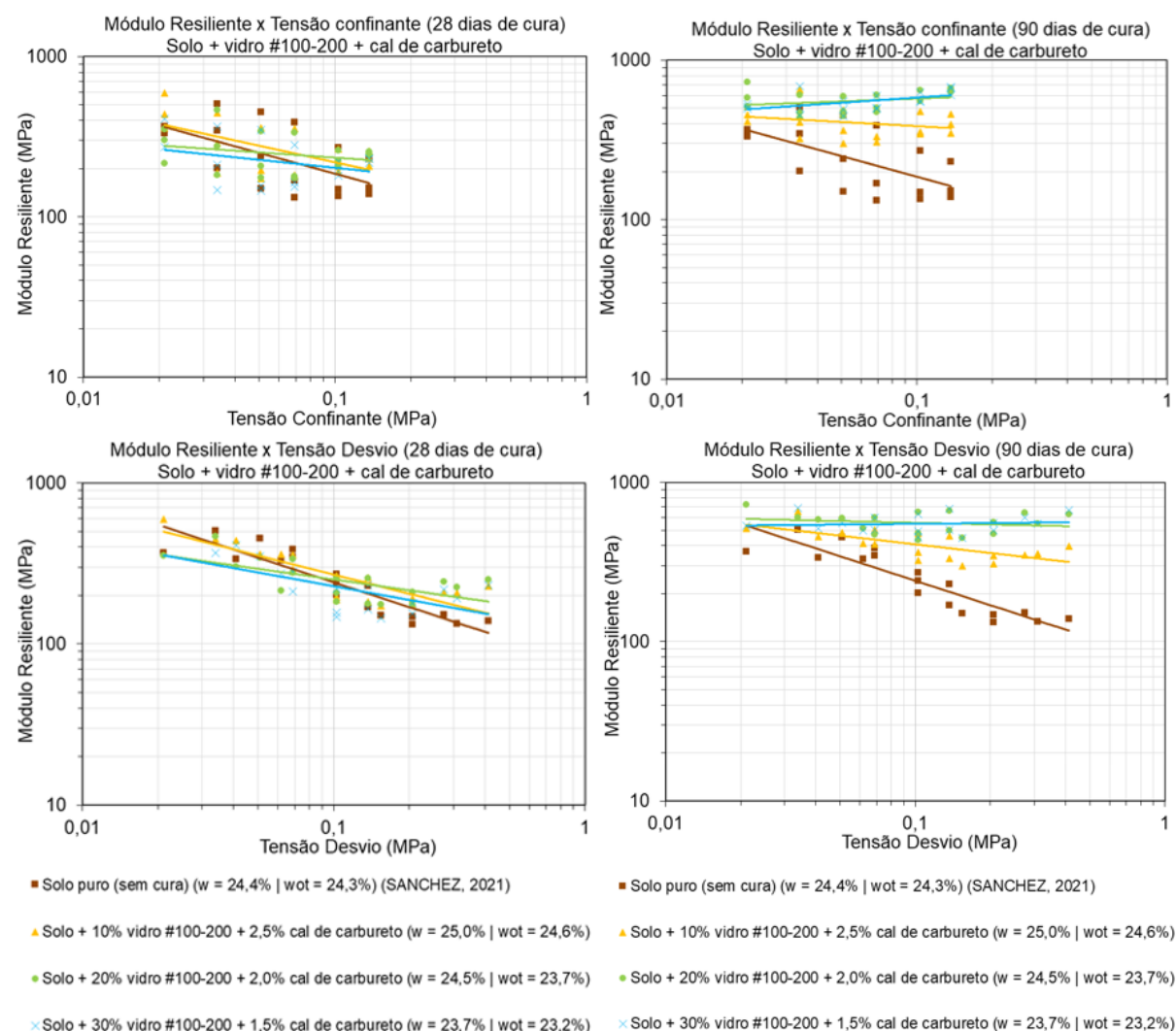


Figura 7: Ajustes do MR aos 28 e 90 dias de cura das misturas de “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto” na w_{ot} em função da tensão confinante e da tensão desviadora.

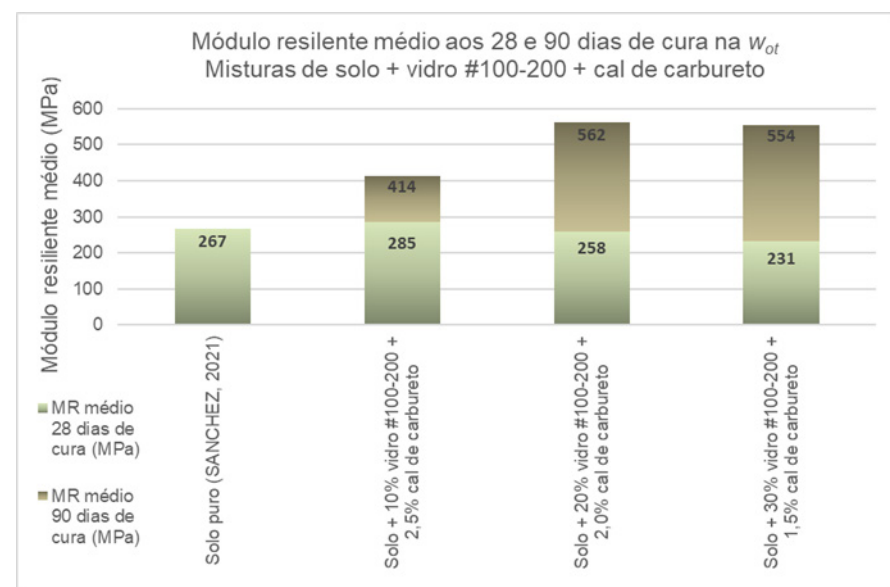


Figura 8: Módulo resiliente médio aos 28 e 90 dias de cura das misturas de “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto” na w_{ot} .

A Figura 9 a seguir apresenta gráfico com a deformação permanente acumulada em função do número de ciclos de aplicação de carga (N) e a Figura 10 apresenta gráfico com a taxa de acréscimo da deformação permanente acumulada em função da deformação permanente vertical acumulada (mm) para o “solo puro”, misturas elaboradas com “solo + cal de carbureto”, “solo + filer de vidro + cal de carbureto”, “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto e solo + filer de vidro” no par de tensões ($s_3 = 120$ kPa; $s_d = 360$ kPa).

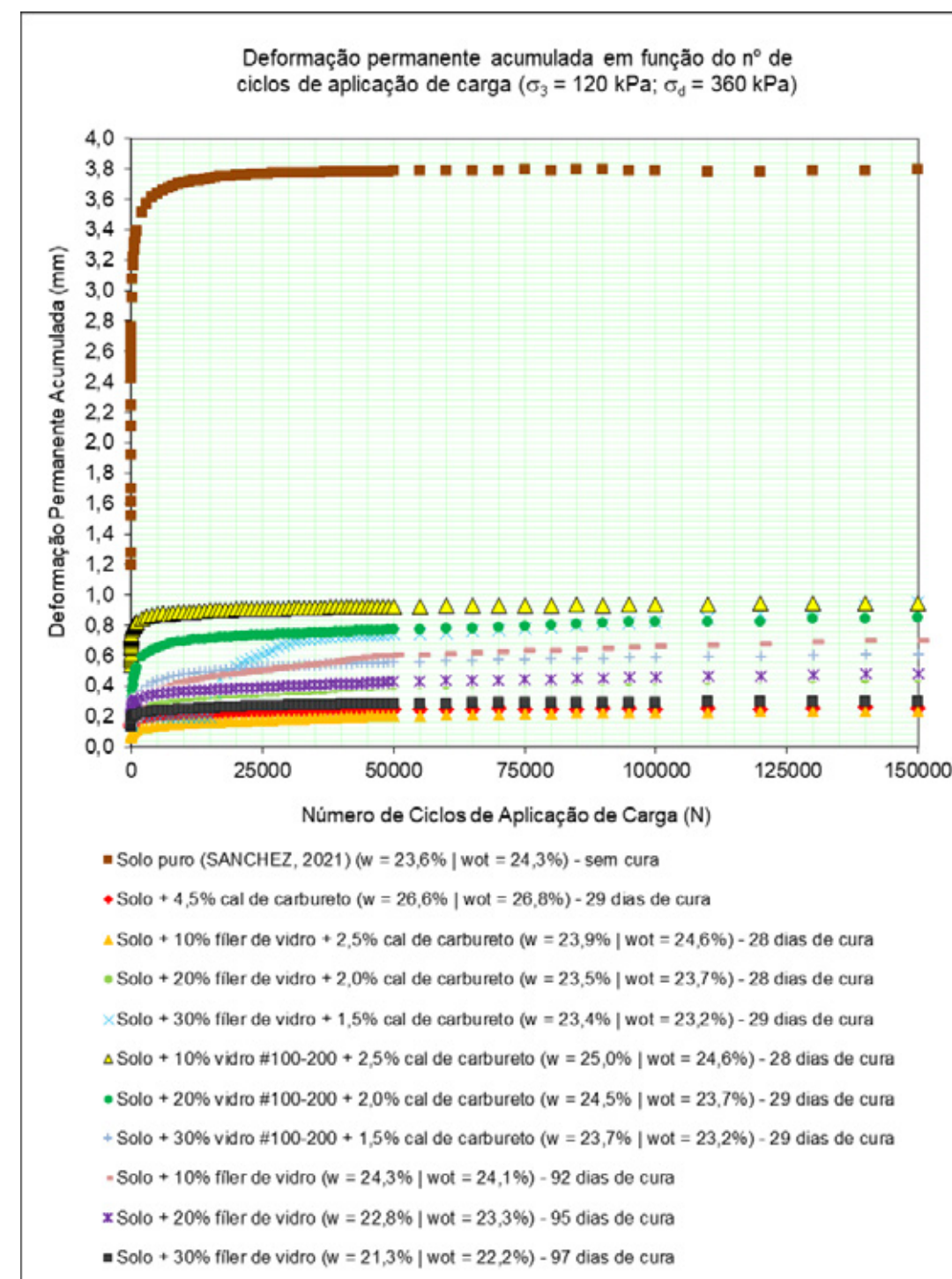


Figura 9: Deformação permanente acumulada em função do número de ciclos de aplicação do par de tensões ($s_3 = 120$ kPa; $s_d = 360$ kPa) para: solo puro, misturas elaboradas com solo + cal de carbureto, solo + filer de vidro + cal de carbureto, solo + vidro #100-200 + cal de carbureto e solo + filer de vidro.

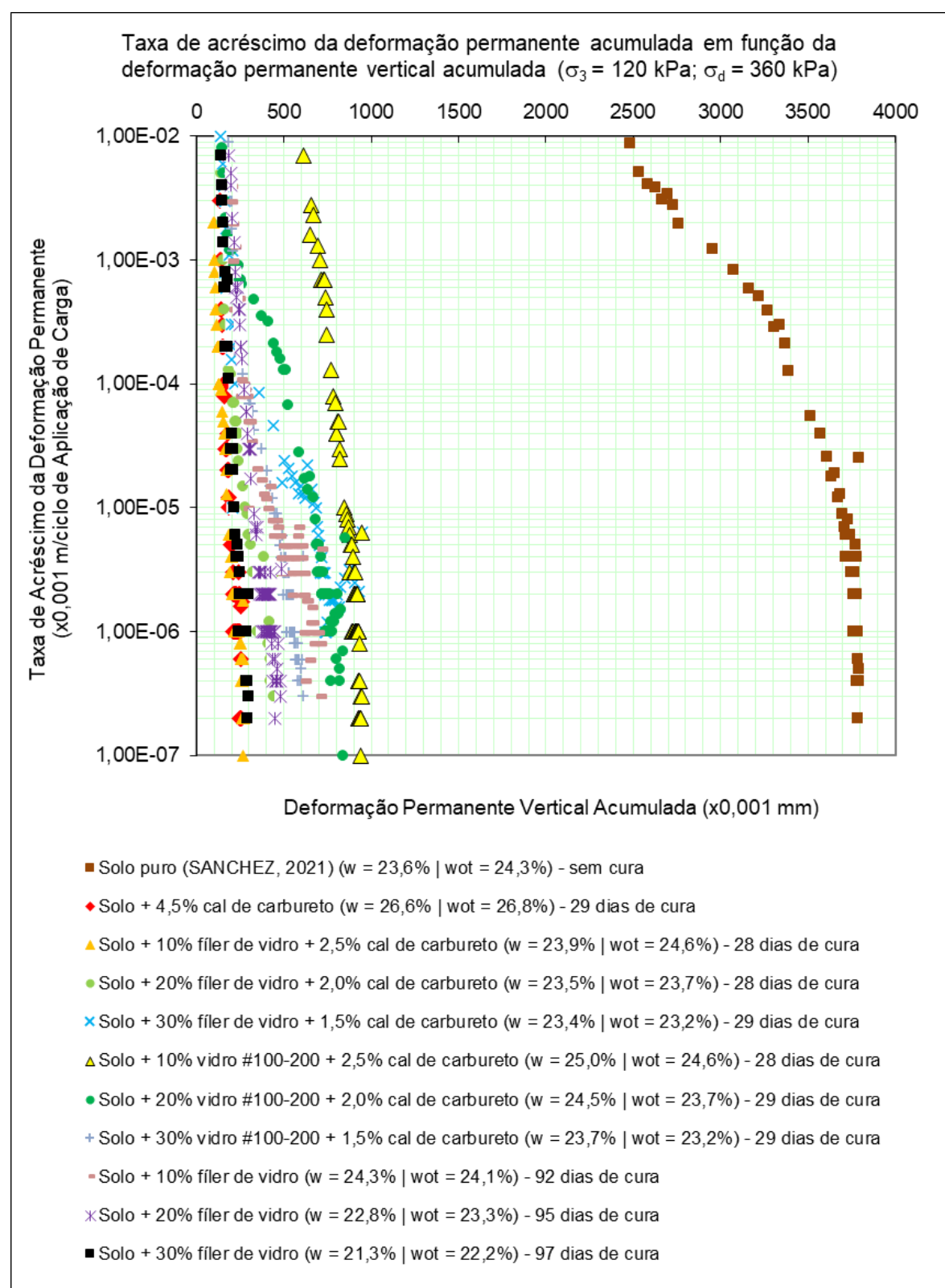


Figura 10: Taxa de acréscimo da deformação permanente acumulada em função da deformação permanente vertical acumulada no par de tensões ($\sigma_3 = 120$ kPa; $\sigma_d = 360$ kPa) para: solo puro, misturas elaboradas com solo + cal de carbureto, solo + filer de vidro + cal de carbureto, solo + vidro #100-200 + cal de carbureto e solo + filer de vidro.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5, tem-se que aos 28 dias de cura as retas ajustadas para os MR das misturas possuem inclinação positiva, ao contrário do solo puro que possui inclinação negativa. Já aos 90 dias de cura, as misturas apresentam retas de ajuste para o MR mais horizontais, que é típico de materiais estabilizados física e quimicamente. Essa tendência a horizontalidade é mais evidenciada, tanto para o ajuste para a tensão confinante quanto para o ajuste para a tensão desvio, no menor teor de filer de vidro estudado: mistura de “solo + 10% filer de vidro + 2,5% cal de carbureto”. Materiais em que as retas de ajustes de MR, tanto para a tensão confinante quanto para a tensão desviadora são mais horizontais, melhor o material será do ponto de vista que o MR não depende muito de variações nas tensões. Esse comportamento é típico de materiais física e quimicamente estabilizados. Com isso, a capacidade resiliente será melhor quanto maior for o valor do MR médio, independente das solicitações.

Assim, conforme valores de MR médio da Figura 6 e os resultados de DP constantes nas Figuras 9 e 10, tem-se que quanto menor o teor de filer de vidro (e consequentemente maior o teor de cal de carbureto) nas misturas de “solo + filer de vidro + cal de carbureto” na w_{ot} , maior será o módulo resiliente, nas duas idades, e menor será a deformação permanente acumulada ao final de 150 mil ciclos de aplicação de carga aos 28 dias de cura.

Já para o vidro #100-200, os resultados apresentados na Figuras 7 evidenciam que com 28 dias de cura a mistura de “solo + 10% vidro #100-200 + 2,5% cal de carbureto” possui melhor resultado de MR dentre os teores estudados. Já aos 90 dias de cura, as misturas apresentam retas de ajuste para o MR mais horizontais (nos teores de 20% e 30% vidro #100-200), evidenciando a ocorrência de estabilização físico-química nestas misturas. Essa tendência a horizontalidade é mais evidenciada, tanto para o ajuste para a tensão confinante quanto para o ajuste para a tensão desvio, nos maiores teores de filer de vidro estudados.

Dessa forma, os valores de MR médio da Figura 8 e os resultados de DP constantes nas Figuras 9 e 10 mostram que quanto maior o teor de vidro #100-200 (e consequentemente menor o teor de cal de carbureto) nas misturas de “solo + vidro #100-200

+ cal de carbureto” na w_{ot} , menor será o módulo resiliente aos 28 dias, maior será o módulo resiliente aos 90 dias de cura e menor será a deformação permanente acumulada ao final de 150 mil ciclos aos 28 dias de cura.

Com relação ao tempo de cura, todas as misturas elaboradas na w_{ot} tiveram aumento do MR aos 90 dias em relação ao obtido em 28 dias de cura. As misturas de “solo + filer de vidro” e de “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto” foram as que mais obtiveram ganhos de MR aos 90 dias em relação ao obtido com 28 dias. As misturas de “solo + filer de vidro” tiveram as reações pozolânicas mais lentas devido à ausência do ativador alcalino, já as misturas de “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto” foi devido a dimensão das partículas de pó de vidro (#100-200), que são ligeiramente maiores que o filer de vidro de vidro, fazendo com que as reações sejam mais lentas. Detalhes e gráficos evolutivos podem ser vistos em Henrique (2023).

Quanto a influência da dimensão das partículas de vidro verificou-se que com 28 dias de cura as misturas de “solo + filer de vidro + cal de carbureto” possuem melhores resultados de MR, indicando que as reações pozolânicas ocorrem mais rapidamente na granulometria filer. Com 90 dias de cura as misturas de “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto” melhoraram os resultados de MR.

Com os resultados obtidos, não só partículas de vidro com dimensões menores que 0,075mm tem atividade pozolânica, o vidro menor que 0,15mm também possui essa atividade conforme os resultados de MR e DP das misturas de solo + vidro #100-200 + cal de carbureto mostraram, porém, as reações pozolânicas ocorrem de uma forma mais lenta, sendo preciso maior tempo de cura (90 dias) para que se tenham ganhos no MR e redução da DP.

Assim, as duas granulometrias de vidro moído em pó, quando em conjunto com a cal de carbureto, são capazes de melhorar consideravelmente o MR do solo (267 MPa). Aos 90 dias o destaque é para a granulometria de vidro #100-200 tendo em vista que chegou a níveis de MR mais elevados [414 MPa (10% vidro), 562 MPa (20% vidro) e 554 MPa (30% vidro)] que os obtidos pela granulometria em filer [420 MPa (10% vidro), 355 MPa (20% vidro) e 348 MPa (30% vidro)].

Quanto a DP, todas as misturas elaboradas obtiveram redução da deformação permanente acumuladas até 150 mil ciclos de carga aplicada pelo par de tensões ($s_3 = 120$ kPa; $s_4 = 360$ kPa). Ao final de 150 mil ciclos, a deformação permanente acumulada do solo puro foi de 3,8 mm e todas as misturas obtiveram deformações inferiores a 1,0 mm, conforme esperado para misturas estabilizadas física e quimicamente. A maior redução observada foi na mistura de solo + 10% filer de vidro + 2,5% cal de carbureto (0,237 mm ou 94% de redução em relação ao solo puro) e a menor redução observada foi na mistura de solo + 30% filer de vidro + 1,5% cal de carbureto (0,952 mm ou 75% de redução em relação ao solo puro).

De forma geral as misturas elaboradas em suas w_{ot} apresentaram deformações permanentes acumuladas muito baixas, próximas de zero, com os materiais estando em acomodamento plástico (comportamento tipo “A”), e com isso, não irão contribuir para afundamentos no pavimento.

Quanto ao ativador alcalino, a cal de carbureto se mostrou eficaz e essencial no que tange a proporcionar a ocorrência das reações pozolânicas do filer de vidro e do vidro #100-200 nas suas misturas ao solo, levando a melhora do MR e redução da DP. Aos 90 dias de cura as melhores misturas na w_{ot} foram:

- 1º - solo + 20% vidro #100-200 + 2,0% carbureto;
- 2º - solo + 30% vidro #100-200 + 1,5% cal de carbureto;
- 3º - solo + 4,5% cal de carbureto;
- 4º - solo + 10% vidro #100-200 + 2,5% cal de carbureto; e
- 5º - solo + 10% filer de vidro + 2,5% cal de carbureto.

As misturas de “solo + 4,5% cal de carbureto”, de “solo + filer de vidro + cal de carbureto” e de “solo + vidro #100-200 + cal de carbureto”, nos teores escolhidos como os que proporcionam os melhores resultados, puderam compor camadas de sub-base e de base (com e sem a presença de sub-base argilosa) de um projeto de pavimento hipotético estudado no *software* MeDiNa, apresentando área trinca-

da menor que 30% e ATR menor que 13mm ao final da vida útil de projeto (10 anos).

Com os parâmetros de MR obtidos aos 90 dias, os destaques foram para as misturas de “solo + 20% vidro #100-200 + 2,0% cal de carbureto” e de “solo + 30% vidro #100-200 + 1,5% cal de carbureto” que quando utilizadas como base permitiram que o revestimento asfáltico pudesse ser reduzido de 10,0 cm para uma espessura da ordem de 7,5 cm nas simulações realizadas, com e sem a presença de sub-base argilosa. Maiores detalhes do dimensionamento podem ser consultados em Henrique (2023).

Resultados obtidos para misturas elaboradas com w diferente das suas respectiva w_{ot} , bem como a influência da umidade de cura das misturas, podem ser visualizados em Henrique (2023).

CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos está confirmada a adequabilidade técnica da incorporação de resíduo de vidro moído em pó (filer e #100-200) com adição de ativador alcalino (cal de carbureto). O resíduo de vidro juntamente com a cal de carbureto não prejudicou os parâmetros de resistência do solo puro, pelo contrário, melhorou o MR e reduziu a DP nas idades de cura estudadas.

Assim, a destinação do resíduo de vidro sob a forma moída em pó com o ativador alcalino adotado pode ser realizada nos pavimentos, proporcionando redução de volume de material natural (solo) explorado em jazidas, o descarte ambientalmente correto do resíduo, podendo reduzir custos da obra e ainda, melhora das propriedades do material natural por meio de sua estabilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, A. C., 2019. *Análise do desempenho mecânico de uma mistura de solo argiloso e resíduo de vidro*. Trabalho de conclusão de curso, UFU, Uberlândia, MG, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO - ABIVIDRO (2021) Porque o vidro é a melhor opção para reciclar. e-book em volume único do portal de internet: É Puro, é vidro da ABI-VIDRO, 27 p., maio de 2021, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <http://epuroevidro.com/conhecimento/>. Acesso em 08 de janeiro de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2016) NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2016) NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2016) NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2016) NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Brasil.

BILONDI, M. P.; TOUFIGH, M. M.; TOUFIGH, V., 2018. *Experimental investigation of using a recycle glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils*. Construction and Building Materials 170, 302-313.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE (2020) Taxas de reciclagem. Portal de internet do CEMPRE. Disponível em: <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>. Acesso em 09 de janeiro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994) DNER-ME 162/94: Solos - ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas - Método de ensaio. Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT (2018) 134/2018-ME: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT (2018) 179/2018-IE: Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio. Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT (2019b) 419/2019-ME: Pavimentação - Solo-Cal - Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo - Método de Ensaio. Brasil.

HENRIQUE, Y. F., 2023. *Análise de viabilidade técnica da incorporação de resíduo de vidro em um solo argiloso laterítico para pavimentação rodoviária*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANCHEZ, P. N., 2021. Avaliação da viabilidade de emprego de vidro moído como melhorador das características mecânicas de um solo argiloso. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SCHEUERMANN FILHO, H. C., 2019. *Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto*. Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

WINTER, D., 2018. *Resistência, rigidez e durabilidade de solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Como surgiu a ABPv

Há 64 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 64 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 Bolívar Lobo Carneiro



PAVIMENTAÇÃO FLEXÍVEL DE VIA: VALIDAÇÃO METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL EM VIA DE ARAUCÁRIA-PR

*FLEXIBLE ROAD PAVING:
METHODOLOGICAL VALIDATION
OF FUNCTIONAL AND STRUCTURAL
EVALUATION ON A ROAD IN
ARAUCÁRIA, PARANÁ*

Vitor Hugo Fernandes¹
Débora Mateus Pereira²
Mateus Godoi Priotto³
Lauri Anderson Lenz⁴
Tharsila Maynardes Dallabona Fariniuk⁵

¹ Engenheiro Civil pela Unifacear. Email: vitorfernandes58@hotmail.com

² Engenheira Civil pela Unifacear. Email: debora.mateus.p@gmail.com

³ Engenheiro Civil pela Unifacear. Email: mateusgpriotto@gmail.com

⁴ Mestre em Engenharia da Construção Civil. Arquiteto, Engenheiro Civil, Coordenador dos cursos de Arquitetura, Engenharia Civil e Engenharia de Produção da Unifacear - Araucária. Doutorando em Engenharia Mecânica pela PUCPR. Email: lauri.lenz@unifacear.edu.br

⁵ Arquiteta, Mestre e Doutora em Gestão Urbana pela PUCPR. Estágio pós-doutoral em Planejamento Urbano e Regional. Especialista em Inovação e Tecnologias para Educação pela UTFPR e em História da Arquitetura pela FAMEESP. Professora de cursos de graduação e pós-graduação. Professora da Unifacear. Email: tharsilamd@gmail.com

RESUMO

No Brasil, o sistema rodoviário é o maior responsável pelo transporte de mercadorias e passageiros, sendo o modal em que historicamente há mais investimentos. Porém, muitas vezes os problemas estruturais e de deterioração na pavimentação implicam diretamente na qualidade da mobilidade e na efetividade dos meios de transporte enquanto mecanismos de produção e desenvolvimento, principalmente onde inexiste práticas regulares de monitoramento e acompanhamento dos desempenhos desses pavimentos. Essa pesquisa parte da demanda de avaliação da pavimentação de vias em Araucária-PR, em consideração à quantidade de recursos aplicados no setor recentemente. É objetivo do presente estudo caracterizar as condições funcionais e estruturais de uma estrada rural no município, no sentido de servir como amostragem e testagem do processo de avaliação. Para isso, foram realizados os ensaios de Valor de Serventia Atual e de viga Benkelman. Como resultado, observou-se uma boa classificação quanto ao padrão de conforto ao rolamento e quanto à qualidade estrutural do trecho estudado. A partir dos resultados obtidos conclui-se que o pavimento está cumprindo a sua vida útil projetada, atendendo as necessidades de quem ali trafega. O método empregado foi validado e é potencialmente relevante para a averiguação de outros trechos, pois mostrou-se eficiente na verificação de diversos parâmetros.

Palavras-chave: pavimento rodoviário, avaliação de desempenho de pavimento, avaliação funcional de pavimento, avaliação estrutural de pavimento.

ABSTRACT

In Brazil the road system is the major responsible for products and passengers' transportation, so it is the modal in which historically there were more investments. However, most of the time structural issues on paving systems implies directly in the quality of mobility and the effectiveness of the means of transport as mechanisms of production and development, especially where there are no regular practices for monitoring the performance of these ones. This research is based on the demand for the elaboration of an evaluation procedure for the paving of roads in Araucária-PR, considering the amount of works and resources applied in the sector recently, and the need to value them. The objective of the present study is to characterize the functional and structural conditions of a rural road in the municipality, in order to serve as a sampling and testing of the evaluation process. For this, we carried out a Current Useful Value and a Benkelman test. As a result, we identify a good classification considering the rolling comfort pattern and structural quality in this section. We concluded that the pavement is fulfilling its projected useful life, meeting the needs of those who travel there. We validated the method as potentially relevant for the investigation of other sections, as it proved to be efficient in the verification of several parameters.

Keywords: Road paving, paving performance evaluation, paving functional evaluation, paving structural evaluation.

1. INTRODUÇÃO

Um dos mais significativos desafios da gestão municipal diz respeito à boa administração dos parâmetros de mobilidade no território. As vias, conforme Lynch (2011) são o canal natural de mobilidade e direcionamento das pessoas e contribuem para a legibilidade do espaço. Além disso - sob efeito do tráfego e das intempéries - como qualquer outra estrutura urbana se desgastam ao longo do tempo, tendo sua vida útil diminuída, e consequentemente necessitando de manutenção.

A precariedade na qualidade das vias pode ocasionar acidentes, limitar a velocidade de tráfego, prejudicar o fluxo e, consequentemente, aumentar os custos operacionais de transporte, inflando os preços de deslocamento e transporte para o consumidor final (Souza, 2015). Uma avaliação correta das condições funcionais e estruturais das vias favorecem a escolha do processo de recuperação do pavimento, definindo com maior assertividade as melhores medidas corretivas, a fim de evitar o surgimento ou agravamento de novos defeitos de superfície. Como consequência desse processo continuado, ocorre a potencial redução de custos para recuperação e prolongamento da vida útil do pavimento (Souza, 2020).

De modo geral, os procedimentos adotados pela maioria dos órgãos públicos brasileiros para conservação do pavimentos rodoviários incluem manutenção baseada em recapeamentos e fechamento de fissuras e buracos. Isso toma especial importância quando se considera que, no Brasil, o sistema rodoviário estrutura 65% do transporte de mercadorias e 95% do transporte de passageiros, conforme pesquisa CNT de Rodovias do ano de 2021 (CNT, 2021). É um contexto de significativo dispêndio de recursos e realização de obras no modal rodoviário, principalmente se comparado aos outros modais. Entretanto, observa-se que é comum em rodovias do país o aparecimento de manifestações patológicas em virtude da falta de manutenções preventivas, oriundas da inexistência de monitoramento e acompanhamento do desempenho das obras de pavimentação ao longo dos anos, o que

vem na contramão de tamanho aporte de investimentos (Souza, 2015). O estudo CNT aponta, ainda, que a atual malha rodoviária brasileira é composta por cerca de 1.721.000 km, dos quais apenas 12,5% representam rodovias pavimentadas. Entre essas, quase 70% representam estradas estaduais, municipais e transitórias. Guerini (2017) indica que existe uma ausência de manutenção da ordem de 30% das vias pavimentadas. Além disso, o montante da malha sem pavimentação é bastante expressivo, o que somado a outras demandas por infraestrutura e às desigualdades socio territoriais implica na não-otimização de deslocamentos – viagens mais longas para desvios ou busca por ligações mais diretas (CNT, 2021).

Esses parâmetros adquirem especial importância nos contextos metropolitanos, considerando o adensamento populacional presente nessas regiões e o papel que as condições de mobilidade exercem na economia e vida em sociedade. Em termos regionais, Pero e Stefanelli (2015) apontam que nas regiões Sudeste e Sul do Brasil não somente as regiões metropolitanas são mais adensadas que em outras partes do país, como também concentram maior Renda Per Capita (em média 77% maior do que em outras regiões) e maior motorização, o que incide diretamente sobre os parâmetros de infraestrutura de acessibilidade e mobilidade.

A região metropolitana de Curitiba está entre as dez mais importantes do país em termos de concentração de riqueza, sendo responsável por 42% do PIB do Paraná (Lima; Bidarra, 2019). O município de Araucária exerce significativo papel nesse processo, por abrigar uma das mais importantes zonas industriais do estado, criada nos anos 1970, que trouxe ao município gêneros de produção até então inexistentes da região e que contribuiu significativamente para o desenvolvimento local. Isso ressignificou o conceito de periferia urbana e criou novas centralidades para além da capital (Silva, 2006). Além disso, Araucária é o segundo município da região metropolitana com maior previsão de dinâmica populacional até 2040 (depois da capital), com expectativa de crescimento de mais de 2 pontos percentuais ao ano, sendo superado apenas

pelo município de São José dos Pinhais - ao qual também faz divisa (IPARDES, 2018).

No município de Araucária-PR observou-se nos últimos anos um investimento significativo nas obras de pavimentação de vias e estradas – da ordem de 100 milhões de reais na metade da última década, alocados em mais de 150km de extensão de revestimento asfáltico, segundo a Prefeitura Municipal (2020). Ainda segundo a prefeitura, sob o ponto de vista econômico, as estradas rurais pavimentadas significam a otimização de serviço para os produtores do interior, com a melhoria na acessibilidade no escoamento dos produtos.

De acordo com Soncim (2011), os modelos de indicadores que avaliam o desempenho dos pavimentos viários devem retratar, da melhor maneira possível, as condições do seu estado atual. Nesse processo, deve-se levar em consideração as características de tráfego, capacidade de suporte do subleito, tipos de materiais empregados na construção, além das técnicas empregadas na execução. Além disso, em consideração à questão da mobilidade nas regiões metropolitanas, é importante que políticas públicas sejam desenvolvidas para gerar incrementos no setor de transporte de um modo geral e no incentivo ao desenvolvimento (Pero; Stefaneli, 2015). Desse modo, em consideração ao recorte apresentado, é importante a realização de estudos que avaliem se essas vias atendem os quesitos como segurança, conforto e mobilidade, necessários para satisfazer as demandas de quem ali trafega. Isto é, a ideia de gerenciar e avaliar essas obras tem como objetivo garantir a boa condição do pavimento e uma maior vida útil para que não prejudique a agilidade do transporte de produtos, e assegurando a economia deste nicho ativa, no que tange aos deslocamentos.

Essa pesquisa parte da demanda de elaboração de um procedimento de avaliação da pavimentação de vias em Araucária-PR, em consideração à quantidade de obras e recursos aplicados no setor recentemente, e à necessidade de valorização dos mesmos. É objetivo do presente estudo caracterizar as condições funcionais e estruturais de uma estrada rural no município, no sentido de servir como testagem do processo de avaliação, e também:

- i. Medir as deflexões e o índice do valor de Serventia Atual do pavimento, no dado recorte, como um dos critérios de avaliação;
- ii. Examinar se os parâmetros estabelecidos em projeto foram antigos;
- iii. Averiguar a necessidade da manutenção ou reconstrução do pavimento.

A investigação se caracteriza como exploratória, e parte da consideração da avaliação de parâmetros estruturais e patológicos, com base no critério de Valor de Serventia Atual do trecho analisado, sobre os quais foram feitas medições e inferências nos últimos meses de 2021, as quais constam nos resultados apresentados nesse documento.

2. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: AVALIAÇÃO E DESEMPENHO FUNCIONAL

A pavimentação denominada flexível é aquela em que elevada capacidade de deformação elástica, ou seja, quando removidas as solicitações atuantes sobre o corpo, o pavimento retorna ao seu estado inicial e dessa maneira consegue distribuir as parcelas de cargas oriundas do tráfego de forma equivalente para as camadas inferiores (DNIT, 2006).

A seção transversal típica deste pavimento, conforme apresentado na figura 1, constitui-se das seguintes camadas: revestimento asfáltico (1), base (2), sub-base (3) e reforço do subleito (4). A regularização do subleito (5) não é considerada, de fato, uma camada, pois a mesma apresenta espessura variável ao longo da seção. Logo, toda a deformação elástica causada pelo carregamento solicitado é destinada ao subleito (6), caracterizado como a fundação do pavimento (souza, 2015).

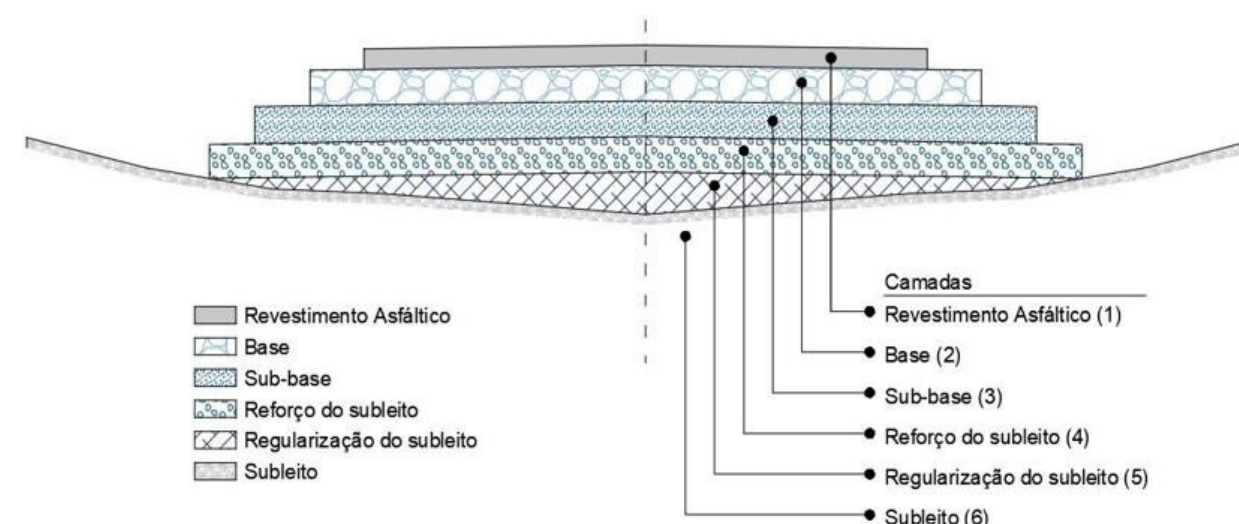


Figura 1: Seção transversal típica do pavimento flexível
Fonte: Os autores (2021), com base em Souza (2015).

Ainda de acordo com Souza (2015), entre todas as camadas especificadas na figura 1, a de maior relevância no ponto de vista estrutural é a camada de base, a qual tem por função receber os esforços de tensões do tráfego (P) e distribuí-los (p) para as camadas subsequentes de sub-base e/ou de reforço do subleito, como demonstra a figura 2.

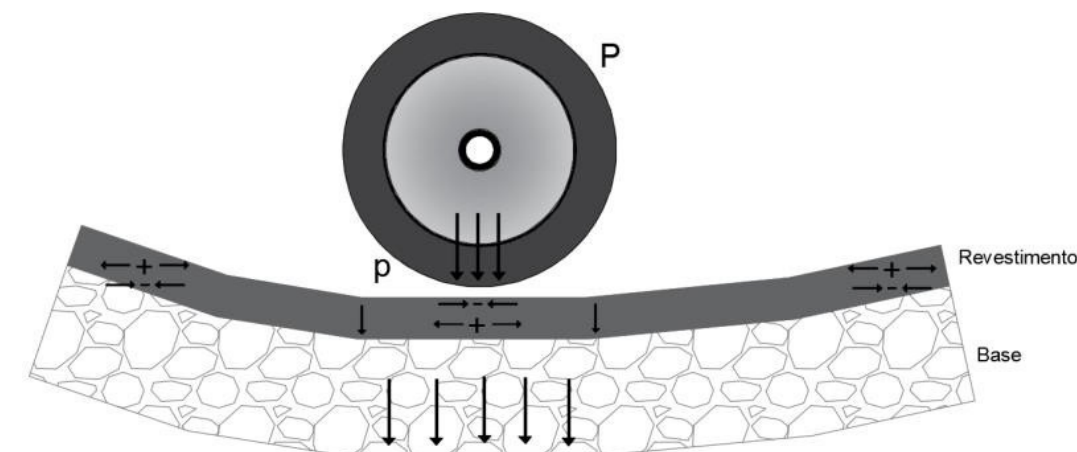


Figura 2: Distribuição de carregamento nos pavimentos flexíveis
Fonte: os autores, adaptado de Balbo (2007).

Portanto, conforme Senço (2007) os carregamentos encaminhados à base, provenientes do tráfego, são transmitidas às camadas inferiores, com suas características descritas no quadro 1, as quais recebem esses esforços e até certo limite não levam ao rompimento da estrutura.

Quadro 1: características das camadas associadas ao pavimento flexível

CAMADAS	DESCRIÇÃO	FONTE
Revest. asfáltico (1)	Conhecido também como capa de rolamento, é a camadaimpermeável onde recebe diretamente a carga derivada da ação de rolamento dos veículos, na qual oferece comodidade, conforto, segurança e resistência contra o desgaste, gerando maior durabilidade a estrutura.	(Senço, 2007)
Base (2)	É a camada responsável por absorver e transmitir o esforço do carregamento gerado pelo tráfego, para as camadas subsequentes. É preenchida normalmente por brita graduada ou bica corrida.	(DNIT, 2006)
Sub-base (3)	Camada localizada abaixo da base, com a finalidade de complementar a mesma. Quando não é possível construir a base apoiada sobre o reforço ou regularização, torna-se necessário a execução dessa camada “intermediária”. O preenchimento érealizado geralmente com material granular - saibro - e deve ter características tecnológicas inferiores à camada da base.	(Senço, 2007)
Reforço do Subleito (4)	Camada de espessura constante, ou seja, sem variações na sua altura, por conta da regularização do subleito, abaixo. Geralmente, as propriedades geotécnicas desta camada são inferiores em relaçãoa camada superior e deve apresentar maior resistência em comparação ao material encontrado no subleito.	(Balbo, 2007)
Regulariz. do Subleito (5)	Conhecida também como “regula”, é posta acima do leito com o intuito de mol-dá-la de maneira transversal e longitudinal, de acordo com as especificações de projeto. Ela, de fato, não é caracterizada como uma camada, por não possuir uma espessura uniforme.	(DNIT, 2006)
Subleito (6)	Terreno de fundação do pavimento, conhecido também como primitivo, mostra as cotas iniciais para se tornar referência na leiturasdas futuras camadas dimensionadas. Após a conformação dessa área por meios de serviços de terraplenagem, essa superfície se adequa ao greide projetado e ao seu perfil transversal, onde se dará início a execução das camadas superiores.	(DNIT, 2006) (Senço, 2007).

Fonte: os autores (2021)

De acordo com Soncim (2011), um pavimento é executado com propósito de resistir às solicitações impostas pelo tráfego e ao ambiente no qual está inserido, ao longo de um período chamado vida útil, ou vida de serviço, definido em projeto. As deteriorações começam a danificar o sistema depois de uma série de avarias causadas pelas solicitações de cargas originadas pelos eixos dos veículos, isto é, pela transferência de solicitações geradas pelo

tráfego. Logo, os pavimentos são obras concebidas apenas para durarem por um certo limite de tempo, ou seja, inicia-se com uma condição ótima e ao passar dos anos e em decorrência do tráfego, atinge-se valores baixos de serventia gerando assim, a necessidade de manutenção para elevar novamente os níveis de serventia (Kern, 2017).

Segundo Kern (2017), o desempenho do pavimento depende de múltiplos fatores e pode-se usar uma série de indicadores para quantificar a condição funcional, os quais fornecem dados classificatórios relativos à qualidade de rolamento e à severidade dos diversos tipos de degradação e condição estrutural. A avaliação de desempenho de pavimentos normalmente é realizada a partir de dados obtidos em campo, por meio de indicadores selecionados que quantificam os parâmetros de deterioração, desgaste e bacias (deformações) causadas pela deflexão oriundas do tráfego (Albuquerque, 2007). Realizando-se o estudo dessas condições, percebe-se se o pavimento atende ou não o nível de serventia ideal, acima de 3 ou entre 2 e 3, que é o período aconselhável para eventuais manutenções, como demonstra a fig.3.

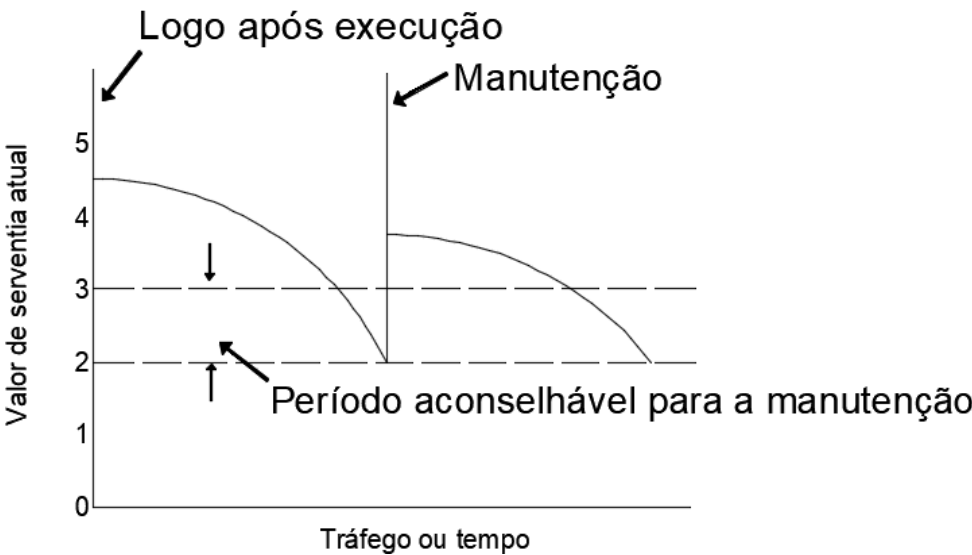


Figura 3: nível de serventia esperável
Fonte: Os autores, adaptado de Bernucci *et al.*, (2008).

A realização da avaliação funcional dos pavimento representa analisar a superfície e conforto ao rolamento, no sentido de averiguar o estado atual em que se encontra a via, (Guerini, 2017). Um dos mais utilizados métodos é o Valor de Serventia, índice concebido por Carey e Irick na década de 1960 para as pistas experimentais da AASHO - American Association of State Highway Officials, hoje denominada AASHTO, American Association of State Highwayand Transportation Officials (AASHTO, 1993).

O Valor de Serventia Atual (VSA) é uma avaliação de escala numérica com parâmetros de variam de 0 a 5 (péssimo a excelente, respectivamente – ver

quadro 3) dada pela média dos avaliadores a serem definidos, para o conforto de rolamento de um veículo trafegando em um determinado trecho. Em geral, o valor inicia-se de forma elevada quando se encontra condições ótimas de execução, mas ao passar do tempo e das depreciações impostas pelo tráfego, tende a diminuir, demandando, portanto, a restauração do pavimento (Guerini, 2017). Esta escala é composta por cinco níveis de serventia, conforme consta no quadro 2, de acordo coma norma DNIT 009/2003-PRO: Avaliação Subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento. A equação que determina o processo avaliativo é dada por:

Equação 1 – Avaliação VSA
$$VSA = \Sigma X/n$$

Sendo:

- VSA = Valor de Serventia Atual.
- X = Notas de Serventia Atual de cada membro avaliador do grupo.
- n = Número de avaliadores do grupo.

Quadro 2 – níveis de serventia.

Padrão de conforto ao rolamento	Avaliação (notas)
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

Fonte: Os autores, adaptado de DNIT (2003).

2.1. Avaliação estrutural e deflexão

A avaliação estrutural de pavimentos é fundamental para descrever o comportamento mecânico das estruturas e verificar suas condições de integridade dos materiais que a constituem. Segundo o DNIT (2006), define-se avaliação estrutural como a medição da capacidade do pavimento em manter sua plenitude por meio da análise das medidas de deslocamentos verticais recuperáveis da superfície quando submetido a determinado esforço, isto é, quando uma carga é aplicada em um ponto específico do pavimento, todas as camadas fletem devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento.

Essa deformação, medida em centésimos de milímetros, é conhecida como deflexão e varia ao longo da vida útil do pavimento, desde a sua construção, sempre aumentando ao passar do tempo (Borges, 2001). Portanto, essas deformações podem ser calculadas através de equações, fornecidas

pela norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT 133/2010 - ME: Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman - Método de ensaio DNER-ME 024/94: Pavimento - Determinação das deflexões pela viga Benkelman e analisadas através da norma DNER - PRO 011/79 - Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis, ambas apresentadas no capítulo de Metodologia.

A viga Benkelman é o equipamento mais utilizado no Brasil para obtenção das medidas de deflexão (Macêdo, 2003). Esse equipamento é composto por uma parte fixa apoiada no pavimento por meio de pés reguláveis e uma viga móvel, ficando a ponta de prova em contato com o pavimento, e a outra ponta ativando um extensômetro com precisão de centésimos de milímetro, conforme ilustrado na figura 4. Além disso, o modelo é equipado com um vibrador que tem a função de eliminar a inércia inicial das partes móveis evitar eventuais inibições do ponteiro do extensômetro (Borges, 2001).

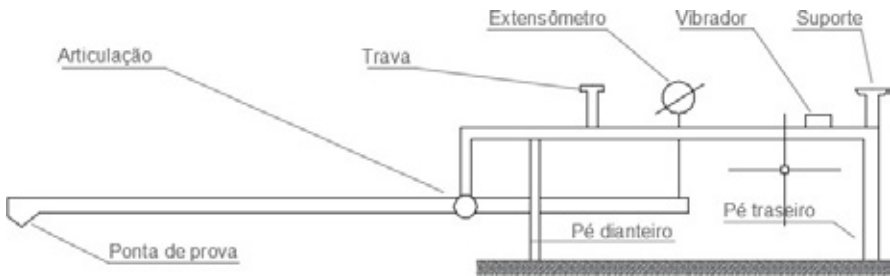


Figura 4: esquema ilustrativo da viga Benkelman
Fonte: Os autores, adaptado de DNIT(2010).

Assim, de acordo com Borges (2001), pavimentos que apresentam deflexões baixas e valores de

raios de curvaturas elevados demonstram uma boa condição estrutural.

3. MÉTODO

A figura 5 apresenta um fluxograma que mostra as avaliações realizadas na presente pesquisa, as quais conduziram os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados.



Figura 5: Fluxograma do sistema de gerenciamento utilizado
Fonte: Os autores (2021)

O objeto do presente estudo foi um trecho de 1 km, na Avenida São Casemiro, localizado na área rural do município de Araucária, na Região Metropolitana de Curitiba, conforme ilustrado na figura 6. Essa via possui extensão total de 4,8 km e foi pavimentada entre 2018 e 2019. Os ensaios foram executados entre os meses de agosto e outubro de 2021.

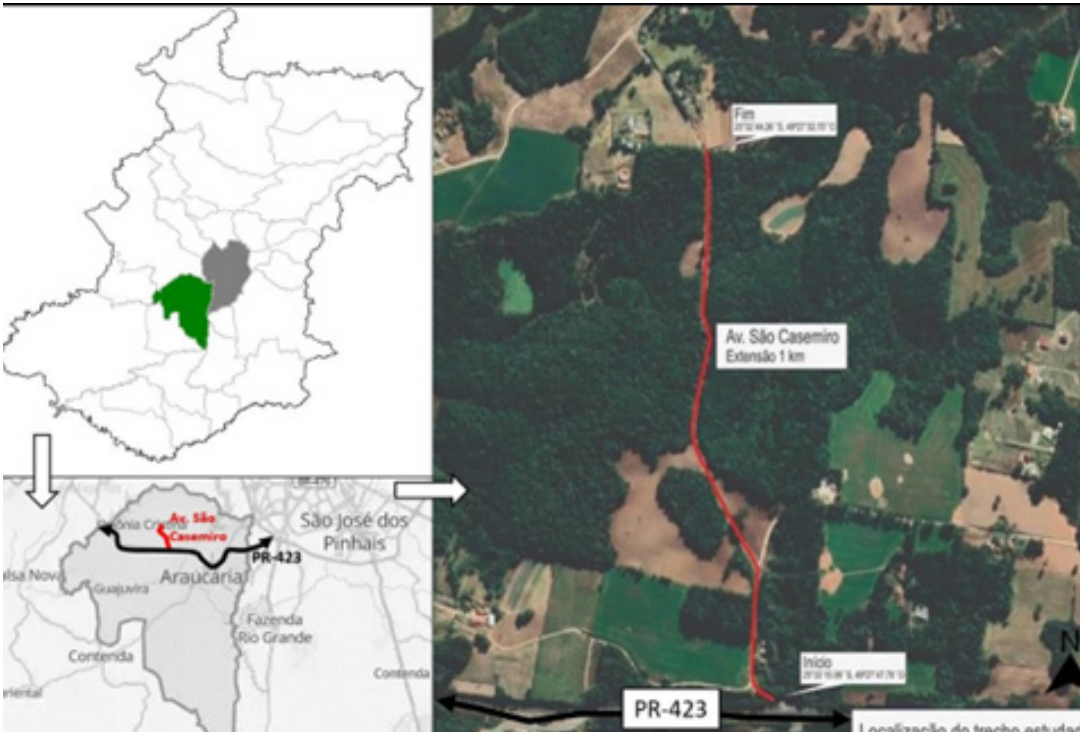


Figura 6: Avenida São Casemiro, Araucária-PR
Fonte: Adaptado pelos autores de Google Maps (2021).

No trecho em questão, foram realizadas as seguintes avaliações do pavimento:

- Avaliação do Nível de Serventia, de acordo com a norma DNIT 009/2003 -PRO;
- Avaliação Estrutural do Pavimento, através da norma DNER - PRO 011/79 - Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis, sendo necessário a realização do ensaio de viga Benkelman, de acordo com a norma DNIT 133/2010 - ME: Pavimentação asfáltica - Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da vigaBenkelman - Método de ensaio e DNER-ME 024/94: Pavimento - Determinação das deflexões pela viga Benkelman.

Para a Avaliação do Nível de Serventia, a norma

recomenda a sua execução com no mínimo 2 equipes compostas por 5 membros. Entretanto, por limitações do próprio grupo de pesquisa e de recursos humanos, e considerando o caráter de amostragem desta pesquisa, essa avaliação foi conduzida por 3 pessoas em dias distintos. As notas obtidas de cada avaliador foram registradas em ficha de avaliação conforme modelo presente na figura 7. O avaliador obrigatoriamente utilizou uma ficha técnica de avaliação para cada um dos trechos estudados.

Os resultados do VSA foram obtidos através da EQUAÇÃO VSA descrita na equação 1. O nível de serventia foi avaliado individualmente a cada 100m, com a finalidade de proporcionar as possíveis soluções para cada um desses subtrechos, com base na ficha abaixo:

AVALIADOR:					
RUA:					
DATA:			FICHA RESUMO - PARÂMETRO DE SERVENTIA PARA CADA TRECHO		
EST	LADO	INDICADOR	TRECHO	AVALIAÇÃO	OBSERVAÇÃO
1+0,00		PADRÃO	VSA (100m)		
		NOTA			
2+0,00		PADRÃO	VSA (200m)		
		NOTA			
3+0,00		PADRÃO	VSA (300m)		
		NOTA			
4+0,00		PADRÃO	VSA (400m)		
		NOTA			
5+0,00		PADRÃO	VSA (500m)		
		NOTA			
6+0,00		PADRÃO	VSA (600m)		
		NOTA			
7+0,00		PADRÃO	VSA (700m)		
		NOTA			
8+0,00		PADRÃO	VSA (800m)		
		NOTA			
9+0,00		PADRÃO	VSA (900m)		
		NOTA			
10+0,00		PADRÃO	VSA (1000m)		
		NOTA			

Figura 7: Ficha de avaliação utilizada para medição do VSA
Fonte: elaborado pelos autores (2021)

A avaliação conforme ensaio de viga Benkelman foi respaldada nas normas: a) DNIT 133/2010 - ME: Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman – Método de ensaio; b) DNER-ME 024/94: Pavimento - Determinação das deflexões pela viga Benkelman; e c) DNER - PRO 011/79 - Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis. Os dados obtidos também alimentaram planilha própria.

No momento do ensaio, a temperatura da pista se apresentou significativamente distinta dos 25°C - valor de referência utilizado nos ensaios de caracterização de rigidez em misturas asfálticas no Brasil. Dessa maneira, se fez necessária a correção das deflexões de leitura através da equação 2 abaixo, conforme adaptação proposta pelo DER-SP (2006) e fundamentada no ábaco desenvolvido pela AASHTO (1993).

Equação 2 – Correção de deflexões

$$D = \frac{Dp}{((\frac{h_{ca}}{1000}) * (T - 25)) + 1}$$

Sendo:
D = deflexão corrigida para a temperatura de 25 °C (0,01 mm);
Dp = deflexão medida na pista (0,01 mm);
hca = espessura da camada asfáltica (cm);
T = temperatura da superfície do pavimento no momento do ensaio (°C).

Além desses dados, foram empregados os valores de estimativa de tráfego e a espessura do pavimento em 5 cm, conforme indicações no relatório de projeto de pavimentação do objeto abordado. Os resultados obtidos foram analisados com base no

quadro 3, para a determinação das possíveis medidas corretivas. Para este estudo, as medidas de deflexões se deram a cada 100 metros para cada lado da faixa de pista, sob um trecho de 1.000 metros.

Quadro 3 – Critérios para avaliação estrutural

Hipótese	Dados deflectométricos obtidos	Qualidade estrutural	Necessidade de estudos complement.	Critério para cálculo de reforço	Medidas corretivas
I	$Dp \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	NÃO		Apenas correções de superfície
II	$Dp \geq D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $Dp \leq 3 D_{adm}$ REGULAR Se $Dp > 3 D_{adm}$ MÁ	NÃO SIM	Deflectométrico Deflectométrico e Resistência	Reforço Reforço ou Reconstrução
III	$Dp \leq D_{adm}$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$R < 100$ $Dp > D_{adm}$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou
V	$R < 100$	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas ($IGG > 180$)	SIM	Resistência	Reconstrução

Fonte: Adaptado pelos autores de DNER-PRO 011/79 (1979).

4. RESULTADOS

4.1. Avaliação do nível de serventia

Conforme abordado no item anterior, os avaliadores percorreram o trecho com os formulários e assim as notas foram atribuídas pelo processo da avaliação. O quadro 3 mostra os resultados da avaliação de serventia do pavimento para cada trecho por avaliador.

Quadro 3 – resultado avaliação de serventia do pavimento.

trecho	Avaliador nº 01		Avaliador nº 02		Avaliador nº 03		média para cada trecho
	ld	le	ld	le	ld	le	
01	4	4	4,5	4,5	4	4	4,17
02	4	4	3,5	4,5	4	4,5	4,08
03	4	3	3,7	4,2	4,5	4	3,90
04	4	3	4,5	3,7	4	4	3,87
05	4	4	4,3	3,4	4	4	3,95
06	4	4	4,7	3,5	3	3	3,70
07	3	4	3,9	4	3	4	3,67
08	3	4	4,7	4	3	3	3,62
09	3	4	4,7	4	4	3	3,82
10	4	4	4,2	4	4	4	4,07
média final do trecho total							3,88

Fonte: os autores (2021).

Quanto ao percentual relativo à serventia do pavimento, o trecho estudado apresentou 32% da via com umaqualidade funcional EXCELENTE e 68% em uma qualidade BOA. Percebeu-se que a redução de uma categoria para outra foi devido ao fato de esses trechos apresentarem emendas transversais que provocam ondulações, causando um desconforto a quem trafega nessa via. Essas emendas são frequentemente realizadas na junção da execução da capa asfáltica.

A partir da análise visual do pavimento, anotadas na ficha de análise do VSA, foi possível perceber com maior clareza que mesmo os trechos qualificados em condição BOA e EXCELENTE - para o parâmetro anterior - apresentou algumas manifestações patológicas recorrentes, apresentadas através do gráfico da figura 8.

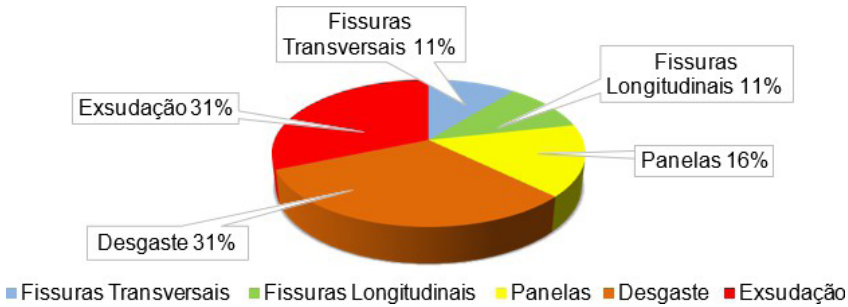


Figura 8: Manifestações patológicas do trecho, conforme avaliação
Fonte: os autores (2021).

Dentre as manifestações patológicas identificadas, os desgastes e as exsudações representam, cada um, 31% dos defeitos. A razão provável para a ocorrência do desgaste, demonstrado na figura 9, são a insuficiência de compactação da massa asfáltica nessa região ou até mesmo possíveis falhas de aderência do material ligante com o agregado. Acausa da ausência de aderência deve-se a presença de água

aprisionada em vazios do revestimento ocasionando o descolamento do ligante. Já para a exsudação, identificada em trechos pontuais e caracterizada pelas manchas escuras na superfície (figura 9), a causa mais provável desse fenômeno deve-se a adição em excesso do ligante betuminoso na massa asfáltica ou na elevada taxa de imprimação.



Figura 9: Patologias encontradas na superfície da pista / Lado esquerdo - desgaste; lado direito - exsudação
Fonte: os autores (2021).

Ademais, outras manifestações patológicas observadas foram as painelas localizadas no bordo da pista, representando 16% das patologias registradas. A sua ocorrência deve-se possivelmente à desagregação da massa asfáltica por falha na compactação,

uma vez que a cavidade existente na pista não atingiu a camada da base. Houve apenas um desgaste ou até mesmo segregação originando uma pequena cavidadeao bordo da pista, como visto na figura 10.



Figura 10: Patologias encontradas na superfície da pista
Lado esquerdo) Painela; lado direito Fissuras Transversais e Horizontais
Fonte: os autores (2021).

Com relação às fissuras, percebe-se a ocorrência de tipologias tanto longitudinais quanto transversais, constatadas na figura 10, localizadas ao centro da pista e nas laterais das faixas de pintura amarela – o que representa 11% das patologias, cada uma. A causa provável deste fenômeno deve-se ao envelhecimento do ligante asfáltico, a reação química indesejada entre o material de pintura das faixas e a massa asfáltica, repetição de deformações elásticas excessivas ou recalques diferenciais originados pela má compactação das camadas inferiores.

Por meio dos resultados obtidos através da média aritmética do valor se serventia descrita na equação 2, conclui-se que o pavimento analisado obteve uma nota final de 3,88 e pode ser classificada a partir da figura 7 com um padrão de conforto ao rolamentocomo BOM. Salienta-se que foi percebido que o pavimento apresenta escoriações pontuais devido às intempéries, porém sem maiores problemas na qualidade do rolamento.

Quadro 4 – Estudo de tráfego atualizado

Anos	N Inicial Estimado	Estimativa de Crescimento Estimado	N Inicial Estimado Restante / Ano
1	1,97E+06	1,97E+06	1,97E+05
2	2,06E+06	9,83E+04	2,95E+05
3	2,17E+06	1,03E+05	3,00E+05
4	2,28E+06	1,08E+05	3,05E+05
5	2,39E+06	1,14E+05	3,10E+05
6	2,51E+06	1,19E+05	3,16E+05
7	2,63E+06	1,25E+05	3,22E+05
8	2,77E+06	1,32E+05	3,28E+05
9	2,90E+06	1,38E+05	3,35E+05
10	3,05E+06	1,45E+05	3,42E+05
N Inicial Estimado Restante para 8 Anos			2,56E+06

Fonte: os autores (2021).

Sendo assim, conforme a DNER – PRO 011/79 - Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis, cal-

4.2. Avaliação estrutural

Por meio dos dados utilizados para a elaboração do projeto de pavimentação da região, disponíveis no diário oficial do município de Araucária, constatou-se que o pavimento ali existente foi projetado para um número N de $3,05 \times 10^6$, que representa a quantidade de repetições dos eixos veiculares equivalentes ao padrão rodoviário de 8,2 tf, pelo método USACE (determinado em projeto), e uma taxa e crescimento de 5% ao ano, para uma vida útil de 10 anos e com deflexão admissível de 73×10^{-2} mm.

O período de tempo entre o cálculo do N do projeto e a entrega da obra de pavimentação foi de 2 anos. Por conta disso, faz-se necessário a atualização das previsões de passagem de carga e um novo N de tráfego. Os novos valores de N estão no quadro 4.

cula-se a deflexão admissível para o $N = 2,56 \times 10^6$, obtendo uma deflexão de 76×10^{-2} mm.

4.3. Ensaios de Viga Benkelman

As medidas obtidas no ensaio com Viga Benkelman foram também anotadas em ficha específica. Associado a isso, calculou-se o raio da curvatu-

ra, conforme normas DNER-ME 024/94: Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman e DNER – PRO011/79 – Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis. O quadro 5 apresenta os principais dados da análise deflectométrica do pavimento, tal como sua deflexão média, o desvio padrão e a deflexão característica.

Quadro 5 - Resumo deflexão e raio de curvatura – trecho 01

	Deflexão	Raio De Curvatura
Média	54	83
Desvio Padrão	16	26
Deflexão Característica (10^{-2} mm)	70	-
Raio De Curvatura Característica (m)	-	109

Fonte: os autores (2021).

Para demonstrar a deflexão do pavimento ao longo da sua extensão, elaborou-se um gráfico apresentando a comparação entre a deflexão admissível (Dadm) e a deflexão de projeto (Dp), representado na figura 11. O gráfico ilustra os resultados dos cál-

culos de deflexões por distância. A linha verde, que possui um valor constante, representa a deflexão admissível do pavimento. As linhas azul e vermelha apresentam as deflexões reais medidas nas estações de estudo do pavimento.

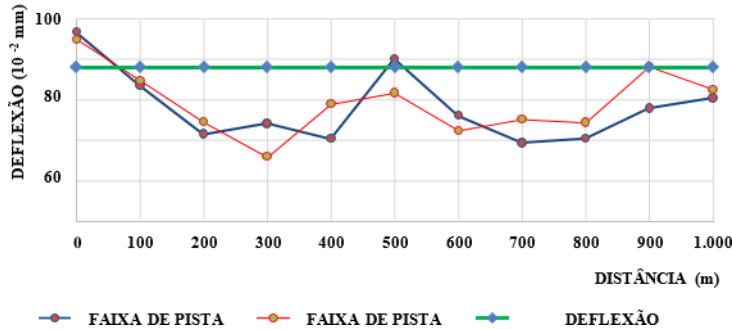


Figura 11: Gráfico de deflexão com viga Benkelman

Fonte: os autores (2021).

Nota-se, a partir da figura 11, que dois pontos apresentam resultados superiores a deflexão admissível e raios de curvatura abaixo de 100 m, localizados nas estacas 0 LDE/ LEI e estaca 5 LEE. No entanto, em geral , para o trecho estudado foi obtido uma deflexão característica de 70×10^{-2} mm e raio de curvatura 109 m. Comparando esses dados aos critérios de avaliação estrutural e à deflexão admissível de 76×10^{-2} mm, deduz-se que o trecho estudado encontra-se com uma boa qualidade estrutural e sem necessidade de reforços estruturais,

enquadrando na hipótese 1 da tabela de critérios de avaliação estrutural de pavimentos (DNER- PRO, 1979).

Observa-se, ainda, que os dois pontos que não atenderam aos parâmetros não são representativos quando considerado o trecho, sendo que o da estaca 5 LEE apresenta valor de deflexão 5,4% superior ao máximo permitido e à estaca 0 está localizada na junção do pavimento degradado com o novo pavimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa, enquanto caráter amostral de testagem, visou a caracterização das condições funcionais e estruturais de uma estrada rural do município de Araucária-PR, em consideração à medição de deflexões do pavimento, Valor de Serventia Atual e averiguação da necessidade da manutenção ou reconstrução do pavimento.

A partir do exposto, pontuou-se que o pavimento abordado está cumprindo com as determinações de projeto, em consideração a sua vida útil projetada. A análise através do Valor de Serventia Atual permitiu avaliar as suas condições quanto aos seus critérios funcionais, qualificando como BOM quanto ao padrão de conforto ao rolamento. Já o ensaio de viga Benkelman constatou que a condição estrutural do pavimento no trecho abordado encontra-se com uma condição estrutural boa e sem necessidade de reforços estruturais. Através dos dados obtidos, conclui-se que, para o momento de avaliação, o pavimento não necessita de intervenção

corretiva em seu trecho. A apresentação de escoreiações pontuais provavelmente se devem às intempéries, porém sem maiores problemas na qualidade de rolamento.

É importante mencionar que o pavimento tem apenas dois anos de abertura ao tráfego, e faz-se necessário monitoramento continuado das suas condições funcionais e estruturais para avaliar o desempenho, principalmente na região onde se constatou o aparecimento das manifestações patológicas e nas regiões com as deflexões superiores ao máximo admitido.

Em relação ao investimento realizado pelo município em infraestrutura viária na área rural, pode-se dizer que há potencial melhoria da acessibilidade da população, facilitando o acesso a estradas e postos rurais – especialmente no que diz respeito ao fator agregado para a economia local, uma vez que grande parte do abastecimento alimentício na região origina-se na produção agrícola local que demanda boas condições de transporte e mobilidade. A consequência direta desse processo é a otimização de dispêndios com manutenção dos veículos comerciais, impactando diretamente na economia

do agronegócio e indiretamente na qualidade de vida de produtores, consumidores e residentes.

Considerando o caráter amostral dessa investigação, esse estudo limita-se aos resultados e conclusões estabelecidos para o trecho em questão, não podendo ser generalizado para situações semelhantes e exigindo, portanto, avaliações específicas e repetidas em cada caso. Se reconhece, no entanto, que o método empregado foi validado e é potencialmente relevante para a averiguação de outros trechos, pois mostrou-se eficiente na verificação de diversos parâmetros. Nesse sentido, estudos futuros podem ser realizados para ampliar o espectro de validação da metodologia em outros trechos de condições similares de tráfego, a fim de mapear os parâmetros das obras realizadas, ou ainda, comparando avaliações em trechos com condições discrepantes de contexto e de mobilidade.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, F. S. Sistema de Gerência de Pavimento para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro (Tese de Doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION

OFFICIALS. Guide for Design of Pavement Structures. 1ed. Washington (EUA), 1993.

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.G.M.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2008.

BORGES, C. B. S. Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FWD em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina (Dissertação de Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2001.

CNT – CONF. NACIONAL DE TRANSPORTES: Pesquisa CNT de Rodovias. 2021.

DER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO

011/79: Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 1979. 16 p.

DER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME

024/94: Determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. 6 p.

DER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER/SP. IPDE-

P00/003: Avaliação funcional e estrutural de pavimento. São Paulo, 2006.

DNIT – DEPTO. NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 009/2003 -

PRO: Avaliação sub. da superfície de pav. Flex. e semirrígidos. Rio de Janeiro: IPR, 2003.

DNIT – DEPTO. NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Pavimentação. 3.ed - Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).

DNIT – DEPTO. NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 133/2010 -

ME: Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

GUERINI, J. F. Proposta de Implantação de Sistema de Gerência de Pavimentos para a Ilha do Fundão. 2017. 126 f. (Monografia de graduação) Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

IPARDES. Proj. da população total dos municípios do PR para o período 2016-2030. 2018.

KERN, C. Análise de Desempenho de Pavimentos da rede temática de asfalto no Rio Grandedo Sul: A Avaliação de um Pavimento Submetido à Oscilação do Lençol Freático (Dissertação de Mestrado) Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2017

LIMA, J. F. DE, & BIDARRA, B. S. Concentração e desigualdade na Região Metropolitana de Curitiba. Revista Brasileira De Gestão Urbana, 11, 2019.

LYNCH, K. A imagem da cidade. 3ª ed. São Paulo: Martins Fontes, 2011.

MACÊDO, F. N. Retro análise de Bacias de Deflexão Reais e Teóricas Obtidas por Métodos Estáticos e Dinâmicos (Dissertação). UNB, 2003.

PERO, V.; STEFANELLI, V. A questão da mobilidade urbana nas metrópoles brasileiras.

Revista de Economia Contemporânea [online]. 2015, v. 19, n. 3, pp. 366-402.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ARAUCÁRIA. Interior de Araucária está ganhando cara nova com asfaltos. Portal do cidadão. Publicado em 31 de julho de 2020.

SENÇO, W., 1929 - Manual de técnicas de pavimentação: volume 1 / Wlastermiller de Senço.

- 2.ed. ampl. — São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, M. N.da. Indústria e produção do espaço urbano em Araucária. Raega: o espaço geográfico em Análise, [S.l.], v.12, 2006.

SONCIM, S. P. Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Desempenho de Pavimentos Asfálticos com base em dados da Rede de Rodovias do estado da Bahia (Tese de Doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, USP, São Carlos, 2011.

SOUSA, H. J. M. Análise Patológica da Pav. Asfáltica no Trecho da Avenida Beira Rio à Margem da BR-153 na Cidade de Gurupi-T (Monografia). (UNIRG), Gurupi - TO, 2020.

SOUZA, P. M. Proposta de Implementação do Sistema de Gerência de Pavimentos para a cidade do Rio de Janeiro. (Monografia de graduação). UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

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.