



Impacto de Eventos Extremos no Desempenho de Pavimentos Rodoviários com Ênfase nas Camadas de Suporte em Solo Argiloso Laterítico Compactado

Luiz Henrique Ferrador Ben

Discente de Mestrado em Geotecnia e Pavimentação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, luizhfb@hotmail.com

Artur Garlet Baratto

Discente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, garletartur@gmail.com

Paula Taiane Pascoal

Pesquisadora de Pós-doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, paulatpascoal@gmail.com

Magnos Baroni

Docente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@ufsm.br

Luciano Pivoto Specht

Docente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, luspecht@ufsm.br

RESUMO: Eventos climáticos extremos expuseram a vulnerabilidade das infraestruturas rodoviárias, especialmente no desempenho de pavimentos com camadas de solos compactados. Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto da variação de umidade pós-compactação no subleito sobre a previsão do desempenho estrutural de pavimentos flexíveis. Foram realizadas simulações no software MeDiNa utilizando diferentes composições estruturais, adotando um solo LG' caracterizado em laboratório nas condições de umidade ótima e com incremento de +2% pós-compactação. As análises mostraram que o aumento da umidade reduziu em mais de 50% o módulo de resiliência do solo e comprometeu significativamente a capacidade de suporte. Estruturas com base granular espessa, sub-base adicional ou uso de solo-cimento demonstraram melhor desempenho frente à condição crítica, reduzindo consideravelmente o afundamento na trilha de roda. Os resultados alertam para a possibilidade de considerar a variabilidade hídrica nos critérios de dimensionamento e reforçam a necessidade de projetar estruturas mais resilientes, com atenção a materiais, espessuras e sistemas de drenagem.

PALAVRAS-CHAVE: MeDiNa, Módulo de Resiliência, Afundamento de Trilha de Roda, Previsão do desempenho.

ABSTRACT: Extreme weather events have exposed the vulnerability of road infrastructure, especially in the performance of pavements with compacted soil layers. This study aimed to evaluate the impact of post-compaction moisture variation in the subgrade on the predicted structural performance of flexible pavements. Simulations were performed using the MeDiNa software with different structural compositions, adopting a LG' soil characterized in the laboratory under optimum moisture and with a +2% post-compaction moisture increase. The analyses showed that the increase in moisture reduced the soil's resilient modulus by over 50% and significantly compromised its load-bearing capacity. Structures with thick granular bases, additional subbase layers, or cement-treated soil exhibited better performance under critical moisture conditions, significantly reducing rutting. The results highlight the need to consider moisture variability in pavement design criteria and reinforce the importance of designing more resilient structures, with attention to materials, layer thicknesses, and drainage systems.

KEYWORDS: MeDiNa, Resilient Modulus, Rutting, Performance Prediction.

1 INTRODUÇÃO

As enchentes que assolaram o estado do Rio Grande do Sul em 2024 representaram um dos eventos climáticos mais catastróficos da história recente do Brasil, com impactos devastadores em diversas esferas, incluindo a infraestrutura de transportes, quando intensas chuvas provocaram enchentes e inundações em 456 municípios, resultando em mais de 170 interrupções parciais ou totais em 79 rodovias (GOV, 2024). A magnitude e a persistência das inundações expuseram a vulnerabilidade das redes rodoviárias e urbanas, especialmente no que tange à integridade de seus pavimentos. Esses fenômenos extremos, cada vez mais frequentes, causam tempestades intensas, estiagens prolongadas e elevação do nível do mar, causando impactos diretos e significativos nas infraestruturas rodoviárias (KANDALADAI, JOHN, PATEL; 2023). Dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022) e análises de Sanches (2024) indicam que as regiões Sul e Sudeste vêm enfrentando episódios mais frequentes de chuvas intensas. Este cenário de calamidade natural ressalta a urgência de uma análise aprofundada sobre os efeitos da saturação hídrica prolongada nas camadas que compõem a estrutura dos pavimentos.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), a permanência das emissões de gases de efeito estufa e da degradação ambiental causada por atividades humanas tende a intensificar os impactos das mudanças climáticas nas próximas décadas. Diante desse panorama, marcado pela crescente ocorrência de eventos climáticos extremos, torna-se essencial o planejamento e a implementação de infraestruturas resilientes, capazes de responder às transformações impostas pelo meio ambiente. A avaliação precisa dos riscos envolvidos é etapa crucial para a elaboração de estratégias de adaptação eficazes, voltadas à proteção da população e à promoção de seu bem-estar (FORZIERI et al., 2018).

Como discutido por Argyroudís et al. (2020), a resiliência das estruturas frente aos desastres naturais é um dos principais desafios da engenharia contemporânea. A exposição prolongada à água altera drasticamente as propriedades dos constituintes, levando a uma redução significativa de sua resistência e rigidez. Sendo assim, o solo compactado, material fundamental de camadas de base, sub-base e subleito, desempenha uma função importante na distribuição de cargas e na garantia da estabilidade estrutural. No entanto, sua capacidade de suporte e seu comportamento mecânico são diretamente dependentes de diversos fatores, sendo o teor de umidade um dos principais, principalmente, em caso de variação pós-compactação. Dessa forma, a infiltração de água nas camadas granulares e coesivas do pavimento pode resultar em perda de coesão, redução do atrito interno, aumento da pressão neutra e, conseqüentemente, diminuição drástica da capacidade de carga. Como observado por Dawson (2014), a presença de água em níveis acima do teor ótimo reduz a vida útil dos pavimentos, ocasionada por patologias que atingem desde o subleito rodoviário até o revestimento asfáltico, como as trincas por fadiga, afundamentos, panelas, e bombeamento de finos, todos possíveis indicativos de uma falha nas camadas de suporte subjacentes.

A variação de umidade tem um efeito muito significativo no módulo de resiliência do solo, especialmente em solos finos (como argilas e siltes). As normas brasileiras permitem um intervalo de variação de $\pm 2\%$ na umidade de compactação independentemente da natureza do material. Entretanto, essa variação pode causar prejuízos elevados no comportamento dos materiais. Assim, Guimarães (2009) e Bernucci (1995) sugerem que tal critério de aceitação deve ser revisado. A compreensão detalhada de como essas camadas de solo reagiram, se deterioraram e se comportam após o período de inundação, é determinante para o desenvolvimento de estratégias de recuperação e, mais importante, para a concepção de infraestruturas mais resilientes a futuros eventos hidrológicos extremos.

Em suma do exposto, a presente pesquisa visa investigar o comportamento de um pavimento em uma situação crítica, simulando danos que a umidade pode causar no desempenho da estrutura, comparando-a com o desempenho em uma situação estável. A relevância deste estudo consiste na necessidade de se quantificar danos causados pela saturação hídrica de solos de pavimentos, em especial, do subleito, e avaliar diferentes condições estruturais que poderiam ser aplicadas em dimensionamentos futuros, com ênfase na utilização de soluções que possam ser aplicadas localmente, como camadas granulares, inserção de outras camadas na estrutura, aumento da espessura das camadas de maior rigidez.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para compreender os impactos que a umidade pode causar na estrutura de pavimento, sob condições críticas em que o mesmo pode estar sujeito, foi simulado no software Medina, em condições ideais do subleito



e em condição do subleito com variação de umidade pós-compactação uma estrutura típica de via. Para tal, foi considerado um solo LG' no subleito, caracterizado por Pascoal (2024), com parâmetros de caracterização física, mecânica e de classificação apresentados na Tabela 1. Os ensaios de compactação foram realizados conforme os preceitos da normativa DNIT ME 443 (DNIT, 2023), através da energia de compactação intermediária. Os parâmetros de compactação nortearam a compactação das amostras submetidas à ensaios triaxiais de módulo de resiliência e deformação permanente. Para simular as variações de umidade pós-compactação, simulando condições adversas em campo, amostra compactadas na umidade ótima foram submetidas a trajetória de umedecimento ($W_{ót}+2\%$), por capilaridade e por aspersão, até atingir a massa desejada.

Com o intuito de avaliar o impacto do incremento de umidade na camada de subleito, foram realizadas simulações utilizando o software MeDiNa. Essa ferramenta permite analisar o desempenho do pavimento frente a um determinado número de solicitações de carga, além de quantificar a contribuição individual de cada camada para o afundamento em trilha de roda ao final do período de projeto. Dado que o foco das análises é a influência da umidade no comportamento da camada de subleito, não foram considerados os critérios de ruptura preconizados pelo programa, sendo eles o afundamento de trilha de roda (ATR) igual a 10 mm e limite de 30% de área trincada. Assim simulações de desempenho estrutural foram elaboradas com o objetivo de representar condições de tráfego leve, típico de diversas estruturas rodoviárias que compõem a malha viária do estado do Rio Grande do Sul. Conforme destacado por Ceratti et al. (2015), tal condição pode ser representada por um número acumulado de repetições de carga (N) de $5,0 \text{ E}+06$ em um período de projeto de 10 anos.

Tabela 1. Caracterização física e mecânica do material (Pascoal, 2024)

Caracterização	SOLO	Caracterização	SOLO
% pedregulho (2,0 - 4,0 mm)	8	Limite de liquidez (%)	46
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	10	Limite de plasticidade (%)	26
% areia média (0,2 - 0,6 mm)	8	Índice de plasticidade (%)	20
% areia fina (0,06 - 0,2 mm)	18	Classificação AASHTO/TRB	A-7-6 (IG:3)
% silte (% μm - 0,06 mm)	20	Classificação SUCS	CL
Argila (%2 μm)	36	Classificação MCT (DNIT, 2023)	LG'
Massa específica real dos grãos (g/cm^3) (ABNT, 2016)	2,75	Ensaio de compactação (DNIT, 2023)	$c':2,45 \text{ d}':43,75 \text{ e}':0,79$ $W_{ót}: 20,1\%$ MEAS: $1685 \text{ kg}/\text{m}^3$

O revestimento considerado nas simulações corresponde a um concreto asfáltico do tipo Classe 2, disponível no banco de dados do MeDiNa, cuja espessura inicial adotada foi de 5 cm. Essa escolha atende às recomendações do Manual de Pavimentação do DNIT (2006), dado o N atuante nas simulações. Ainda, foi considerada uma camada de brita graduada, identificada como Gnaisse C5, material também presente no banco de dados do software MeDiNa, com espessura de 15 cm. Essas espessuras foram fixadas inicialmente a fim de identificar a contribuição do subleito na danificação da estrutura, ao comparar as condições nas quais pode estar sujeito. Se tratando do subleito, a camada em que se deu ênfase, considerando os danos que pode causar devido aos ventos extremos, considerou-se o solo LG' caracterizado por Pascoal (2024), com parâmetros de deformabilidade apresentados na Tabela 2, para condições de umidade ótima e de variação pós-compactação. A condição $W_{ót}+2\%$ simulam o acesso da umidade no solo compactado, dessa forma, demonstra um estado crítico que a camada terrosa pode estar sujeita em um evento extremo.

Tabela 2. Parâmetros de módulo de resiliência e deformação permanente (Pascoal, 2024)

Módulo de Resiliência	Condição		k1	k2	k3	R²	MR médio (MPa)
	Modelo Composto	Wót	816,745	0,528	-0,11	0,88	202
		Wót+2%	234,393	0,533	-0,319	0,76	98
Deformação Permanente	Condição		ψ1	ψ2	ψ3	ψ4	R²
	Guimarães (2009)	Wót	0,179	1,074	0,739	0,076	0,86
		Wót+2%	0,170	-1,021	2,233	0,108	0,98



Observa-se que há um decréscimo no módulo de resiliência de cerca de 51,5% da condição Wót para a variação de umidade pós-compactação Wót+2%. De acordo com Pascoal (2024), ao variar a umidade em +2% pós-compactação para três diferentes solos LG', o MR médio performou de 51% a 58% pior, enquanto em variação de +4% acima da ótima, o MR médio performou de 62% a 67% pior que na condição ótima. Em suma dessas análises, a condição Wót+2% foi considerada como crítica e utilizada nas simulações da presente pesquisa.

Após a definição da estrutura inicial de análise, verificações da área trincada e afundamento de trilha de roda considerando o subleito nas condições Wót e Wót+2%, foram propostas alternativas estruturais com o objetivo de aprimorar o desempenho do pavimento diante da condição crítica do subleito. O objetivo dessas simulações foi compreender o impacto que o aumento das espessuras, troca de materiais constituintes e a ação isolada ou combinada, pode impactar na previsão do desempenho, para projetos futuros considerando a mitigação de danos em eventos climáticos extremos.

Essas alternativas envolveram simulações para previsão do comportamento de estruturas distintas, considerando o aumento da espessura de camadas, a inserção de camadas de material e a substituição do material empregado na base. Com essas modificações, objetivou-se verificar o impacto que cada camada poderia proporcionar para mitigar um evento extremo, quando projetada a estrutura visando resiliência. As modificações buscaram identificar soluções com desempenho predominantemente favorável quanto ao afundamento na trilha de roda. A Tabela 3 apresenta as estruturas consideradas nas simulações, com ênfase nas referências (REF) de análise e suas variantes, bem como o arranjo de camadas, espessura do revestimento e condição de umidade do subleito. Com exceção do material do subleito, as demais camadas foram compostas por matérias pertencentes ao banco de dados do software MeDiNa.

Tabela 3. Estruturas avaliadas no Medina

Estrutura	Revestimento (Classe 2)	Base* (Gnaiss C5)	Sub-base (Gnaiss C1)	Subleito
REF 1	5 cm	Granular (15 cm)	-	Wót
REF 1 EX				Wót+2%
EST 1	5 cm	Granular (20 cm)	-	Wót
EST 1 EX				Wót+2%
EST 2	5 cm	Granular (40 cm)	-	Wót
EST 2 EX				Wót+2%
EST 3	5 cm	Granular (15 cm)	Granular (20 cm)	Wót
EST 3 EX				Wót+2%
EST 4	5 cm	Granular (15 cm)	Granular (40 cm)	Wót
EST 4 EX				Wót+2%
EST 5	5 cm	Solo Cimento* (15 cm)	Granular (20 cm)	Wót
EST 5 EX				Wót+2%
REF 2	7,5 cm	Granular (15 cm)	-	Wót
REF 2 EX				Wót+2%
EST 1	7,5 cm	Granular (20 cm)	-	Wót
EST 1 EX				Wót+2%
EST 2	7,5 cm	Granular (40 cm)	-	Wót
EST 2 EX				Wót+2%
EST 3	7,5 cm	Granular (15 cm)	Granular (20 cm)	Wót
EST 3 EX				Wót+2%
EST 4	7,5 cm	Granular (15 cm)	Granular (40 cm)	Wót
EST 4 EX				Wót+2%
EST 5	7,5 cm	Solo Cimento* (15 cm)	Granular (20 cm)	Wót
EST 5 EX				Wót+2%

*Mistura 1 CD (Ceratti, 1991)

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A partir das simulações realizadas, foi possível observar o impacto da variação do teor de umidade do subleito sobre o desempenho estrutural das diferentes configurações de pavimento, conforme demonstrado na Tabela 4. As estruturas de referência, compostas por 5 cm (REF 1) e 7,5 cm (REF 2) de concreto asfáltico sobre base granular de 15 cm, evidenciaram sensível aumento do afundamento na trilha de roda quando



submetidas à condição crítica de umidade ($W_{ót}+2\%$). A estrutura REF 1 apresentou um aumento expressivo da deformação no subleito, de 1,03 mm para 19,42 mm, enquanto a estrutura REF 2 registou variação de 0,82 mm para 12,26 mm, indicando que mesmo o aumento do revestimento não foi suficiente para conter os efeitos da elevação da umidade.

Nas alternativas em que se promoveu o aumento da espessura da base granular, como nas estruturas EST 1 e EST 2, houve uma redução nas deformações do subleito em relação à estrutura de referência. Com ênfase na estrutura EST 2, que apresentava 40 cm de material granular na base, em que as deformações no subleito para a condição crítica foram substancialmente reduzidas mesmo sem o acréscimo de espessura no revestimento, se tornando uma alternativa eficiente e, possivelmente, financeiramente viável.

A inclusão de uma sub-base granular foi outro fator que contribuiu para o desempenho da estrutura. A configuração EST 4, em que foi inserida uma sub-base com espessura de 40 cm, apresentou melhorias comportamento do subleito quando submetido a condições extremas de umidade. A estrutura EST 4 EX, por exemplo, destacou-se por apresentar uma das menores deformações no subleito sob condição crítica ($W_{ót}+2\%$), com valor de 3,4 mm, evidenciando a efetividade da redistribuição de tensões proporcionada pela presença da sub-base.

Tabela 4. Previsão de desempenho das estruturas simuladas com as variações de condição do subleito

	Revestimento	Subleito	AT (%)	ATR (mm)
REF 1	5 cm	$W_{ót}$	69,48	3,19
REF EX		$W_{ót}+2\%$	94,62	21,38
REF 2	7,5 cm	$W_{ót}$	47,23	2,81
REF EX		$W_{ót}+2\%$	67,68	13,93
EST 1	5 cm	$W_{ót}$	57,22	3,87
EST 1 EX		$W_{ót}+2\%$	73,55	16,06
EST 1	7,5 cm	$W_{ót}$	41,03	3,44
EST 1 EX		$W_{ót}+2\%$	54,8	11,71
EST 2	5 cm	$W_{ót}$	39,74	6,61
EST 2 EX		$W_{ót}+2\%$	42,14	9,02
EST 2	7,5 cm	$W_{ót}$	29,03	5,78
EST 2 EX		$W_{ót}+2\%$	31,54	7,74
EST 3	5 cm	$W_{ót}$	64,20	5,73
EST 3 EX		$W_{ót}+2\%$	76,43	14,77
EST 3	7,5 cm	$W_{ót}$	45,08	5,12
EST 3 EX		$W_{ót}+2\%$	56,18	11,26
EST 4	5 cm	$W_{ót}$	56,12	7,71
EST 4 EX		$W_{ót}+2\%$	59,31	10,12
EST 4	7,5 cm	$W_{ót}$	39,28	6,99
EST 4 EX		$W_{ót}+2\%$	42,61	8,84
EST 5	5 cm	$W_{ót}$	32,10	3,22
EST 5 EX		$W_{ót}+2\%$	38,79	10,18
EST 5	7,5 cm	$W_{ót}$	29,66	3,00
EST 5 EX		$W_{ót}+2\%$	36,66	8,24

Outro aspecto relevante observado foi a substituição da base granular por uma mistura solo-cimento (Mistura 1 CD), conforme proposto nas estruturas EST 5 e EST 5 EX. Essa modificação resultou em melhoria no desempenho estrutural, performando de forma satisfatória mesmo com o subleito em condição de umidade extrema. Tal comportamento é atribuído à maior rigidez da camada estabilizada, que atenua a tensão transmitida às camadas inferiores. A Figura 1 apresenta um compilado das contribuições em termos de ATR identificado em cada camada para o período final de projeto.

Mesmo que as simulações tenham sido realizadas sem considerar os critérios de ruptura adotados pelo software MeDiNa, ainda é possível, com a devida cautela, identificar tendências de comportamento nas diferentes estruturas avaliadas. Observa-se que, à medida que são incorporadas camadas de materiais granulares, as patologias previstas pelos critérios de ruptura tendem a reduzir de forma significativa. No caso específico da área trincada, ainda que esse critério esteja fortemente associado ao fenômeno de fadiga, o qual não foi contemplado neste estudo, pode-se utilizá-lo como um indicador indireto da rigidez estrutural do

pavimento. Dessa forma, o desempenho satisfatório ou insatisfatório das demais camadas constituintes exerce influência significativa sobre esses valores.

De forma geral, as análises indicam que o incremento de umidade no subleito provoca aumento das deformações apresentadas pelas camadas do subleito, especialmente em estruturas esbeltas. A adoção de camadas de materiais granulares espessas, incremento de camadas estabilizadas e, sobretudo, o aumento na espessura de revestimento demonstraram ser estratégias eficientes para mitigar os efeitos adversos dessa condição, contribuindo para maior robustez estrutural frente a cenários críticos de umidade. Com base na recente recorrência em eventos climáticos que submetem as estruturas a variações abruptas de umidade, se tem um indicativo referente a necessidade de adequar os materiais e espessuras empregados nas camadas de pavimentos rodoviários, bem como intensificar os esforços relativos a dispositivos de drenagem eficientes, garantindo um bom desempenho estrutural mesmo frente a condições críticas.

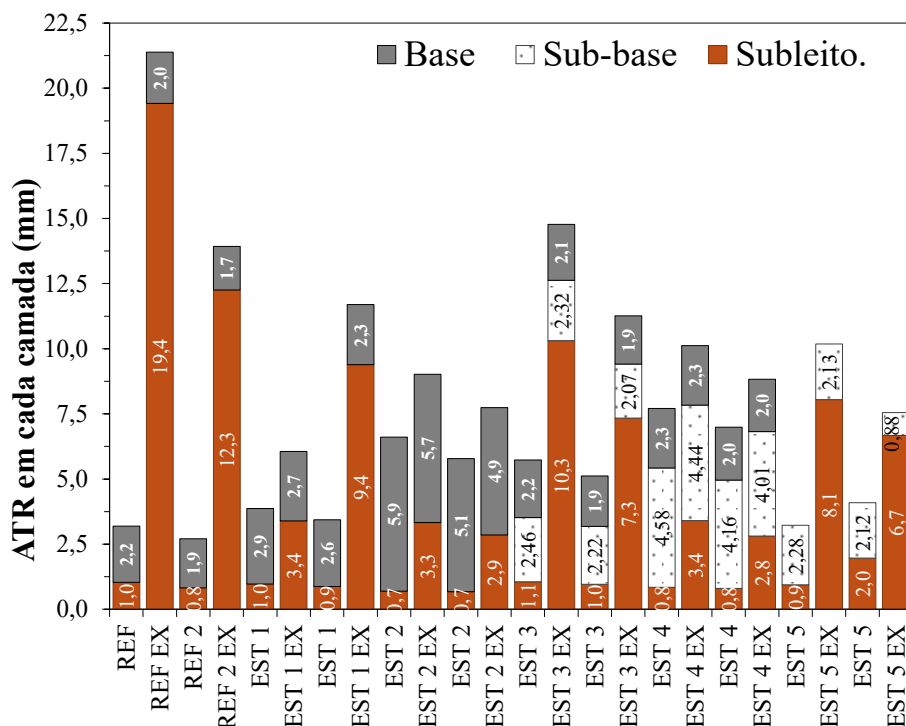


Figura 1. Contribuição em ATR por camada para cada estrutura avaliada

As alterações climáticas geram custos adicionais de manutenção, recuperação e construção de rodovias que acabam sendo danificados por consequência das alterações climáticas. Devido a isso e a inúmeros casos recentes e recorrentes, urge a necessidade de adotar uma visão a longo prazo no planejamento da infraestrutura rodoviária.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da pesquisa e simulações realizadas verificou-se, de forma inequívoca, que o excesso de umidade em camadas de pavimentos flexíveis compromete severamente a capacidade de suporte e rigidez, resultando em previsão de desempenho desfavoráveis. As simulações realizadas visaram replicar as condições de eventos climáticos extremos, como o ocorrido no Rio Grande do Sul em 2024, e evidenciaram a vulnerabilidade das camadas terrosas em casos de contato com umidade excessiva.

Os resultados obtidos com as diferentes configurações de pavimento, especialmente aquelas que incorporaram o aumento da espessura da base granular e a inclusão de sub-base granular, apontam para soluções eficazes na mitigação dos efeitos adversos da umidade. A substituição da base granular por uma mistura solo-cimento também se mostrou promissora, destacando a importância de materiais estabilizados para atenuar as tensões transmitidas às camadas inferiores. Contudo, há ressalvas no uso de misturas solo-cimento, pois ainda é necessário investigar o comportamento desses materiais quando expostos a condições adversas de



2025

umidade. Essas conclusões são cruciais quando objetiva-se planejar e projetos futuros que visem a resiliência das infraestruturas rodoviárias frente às mudanças climáticas.

Embora as diretrizes de projeto e construção de pavimentos não incorporem a variabilidade da umidade e a resiliência como fatores críticos, indica-se em casos em que há recorrência, considerar esses agravantes ao dimensionamento de um pavimento novo ou ao projeto de reforço/reabilitação. Além da otimização das camadas estruturais, a intensificação dos esforços em dispositivos de drenagem eficientes é fundamental para garantir o bom desempenho estrutural mesmo em condições críticas. A recorrência de eventos climáticos extremos exige uma visão de longo prazo no planejamento de pavimentos, considerando os custos adicionais de manutenção, recuperação e construção de rodovias danificadas. A adaptação e a inovação são essenciais para assegurar a durabilidade e a segurança das vias, protegendo a população e promovendo o bem-estar em um cenário de crescente instabilidade climática.

Por fim, a presente pesquisa forneceu uma percepção prática e baseada em simulações sobre o comportamento de pavimentos em condições extremas de umidade, para o desenvolvimento de infraestruturas rodoviárias mais duráveis e seguras, capazes de suportar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e eventos extremos, minimizando custos de manutenção e garantindo a continuidade do transporte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) pelo suporte aos pesquisadores, e a Owntec Soluções em Engenharia pela parceria com o GEOMA e GEPPASV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argyroudis, S. A. et al. (2020) Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multihazard environment: Case study on transport assets. *Science of the Total Environment*, v. 714.
- Bernucci, L. L. B. (1995) *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo/ USP, 237 p.
- Ceratti, J. A. P., Bernucci, L. B., Soares, J. B. (2015) Utilização de ligantes asfálticos em serviço de pavimentação. Rio de Janeiro, ABEDA. 1ª edição.
- Dawson, A. (2014) Anticipating and responding to pavement performance as climate changes. *Green Energy and Technology*, p. 127-157.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). Publicação IPR 719: Manual de Pavimentação. 3ª ed. Rio de Janeiro, 274p.
- Forzieri G., et. al. (2018) Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe.
- Governo do estado do Rio Grande do Sul (2024). Disponível em <<https://www.estado.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/relatorio-sisperdas-evento-enchentes-em-maio-2024.pdf>>. Acessado em 10 Mar. 2025.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. 2009. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Relatórios anuais de precipitações. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em 10 março 2024.
- Instituto Nacional de Infraestrutura de Transportes (INMET). Relatórios anuais de precipitações. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Sixth Assessment Report: Climate Change 2023 - Synthesis Report. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 17 jul. 2025.



2 0 2 5

- Kandalai, S., John, N. J.; Patel, A. (2023) Efeitos das mudanças climáticas em infraestruturas geotécnicas - estado da arte. Environmental Science and Pollution Research.
- Pascoal, P. T. (2024) *Deformabilidade de subleitos de trechos monitorados da BR-116/RS considerando variações de umidade em laboratório e campo*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- Sanches, L. A. (2024) *Análise da Recuperação da Infraestrutura Viária do Rio Grande do Sul Após Eventos Climáticos Extremos*. Trabalho de Conclusão de Curso. 10p. Trabalho de conclusão de curso, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul/ PUCRS, 10p.