

Mudanças Climáticas: Impactos em Obras de Infraestrutura e os Desafios para a Engenharia Geotécnica

Mariana Fantinel Cirolini

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

Paula Taiane Pascoal

Discente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, paulatpascoal@gmail.com

Magnos Baroni

Docente da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@gmail.com

RESUMO: Ao longo dos anos, eventos climáticos extremos têm se manifestado em uma frequência crescente. Como consequência, precipitações intensas e ondas de calor estão aumentando com o passar dos anos. O Brasil, devido à sua vasta extensão territorial e ao clima tropical, está diretamente suscetível aos impactos adversos das mudanças climáticas, incluindo inundações e temperaturas elevadas. No transcorrer de 2023, o país foi testemunha de uma onda de calor sem precedentes na região central, associada a enchentes e inundações, causando devastação em municípios do estado do Rio Grande do Sul. Os efeitos de tais eventos climáticos na infraestrutura rodoviária e na engenharia geotécnica tem sido multifacetados, abrangendo desde patologias na malha rodoviária até deslizamentos de encostas. Ademais, os desastres ambientais globais representam uma ameaça palpável à segurança da população, sendo de extrema importância mitigar os danos causados. Diante desse contexto, esta pesquisa objetivou realizar uma revisão sistemática abrangente sobre os impactos da mudança climática, com foco principal na infraestrutura rodoviária e nos eventos climáticos extremos ocorridos em novembro de 2023 no estado do Rio Grande do Sul.

PALAVRAS-CHAVE: Resiliência Climática, Infraestrutura Rodoviária, Precipitação, Eventos Extremos.

ABSTRACT: Over the years, extreme weather events have been occurring with increasing frequency. As a consequence, heavy precipitation and heatwaves are on the rise. Brazil, due to its vast territorial expanse and tropical climate, is directly susceptible to the adverse impacts of climate change, including floods and high temperatures. In the course of 2023, the country witnessed an unprecedented heatwave in the central region, accompanied by floods and inundations, causing devastation in municipalities of the state of Rio Grande do Sul. The effects of such weather events on road infrastructure and geotechnical engineering have been multifaceted, ranging from road network pathologies to landslides. Furthermore, global environmental disasters represent a palpable threat to public safety, making it extremely important to mitigate the damages. In this context, this research aims to conduct a comprehensive systematic review on the impacts of climate change, with a primary focus on road infrastructure and extreme weather events that occurred in November 2023 in the state of Rio Grande do Sul.

KEYWORDS: Climate Resilience, Road Infrastructure, Precipitation, Extreme Events.

1 INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos têm se tornado crescentes em todas as regiões ao redor do globo. Segundo o relatório da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2024), o ano de 2023 foi o mais quente já registrado nos últimos 174 anos, atingindo cerca de 1,45°C acima dos níveis pré-industriais. Com isso, fenômenos climáticos extremos estão cada vez mais recorrentes, como chuvas frequentes, secas mais duradouras, aumento dos níveis do mar e da temperatura. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas alerta que, à medida que as emissões de gases do efeito estufa e a degradação ambiental atribuída

às atividades humanas persistirem, é esperado que tal cenário se intensifique ao longo dos próximos anos (IPCC, 2023).

Com o aumento da frequência da ocorrência de eventos climáticos extremos, torna-se imprescindível planejar e construir infraestruturas resilientes, capazes de se adaptar às novas condições impostas pelo ambiente. Tipos diferentes de infraestrutura apresentam variados graus de susceptibilidade às mudanças climáticas. Entender e quantificar a grandeza de tais riscos é fundamental para planejar estratégias de adaptação eficazes, tendo em vista a segurança e bem estar da população (FORZIERIA et al., 2018). A resiliência de uma estrutura de engenharia consiste na capacidade de absorver e se recuperar de desastres, além de se adaptar às novas condições. Sendo assim, torna-se inadiável projetar e garantir infraestruturas resilientes aos desastres naturais, dos quais muitos são acentuados pelas mudanças climáticas (ARGYROUDIS et al., 2020).

O Ministério dos Transportes juntamente com o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais propuseram o projeto AdaptaVias, que visa realizar um levantamento dos impactos e riscos das mudanças climáticas sobre a infraestrutura federal de transportes terrestres, tanto para rodovias quanto ferrovias, para as existentes e as projetadas. Esse projeto fornece informações essenciais para tomadas de decisões relacionadas à adaptação aos impactos provocados pela mudança do clima. Tal projeto elucida alguns impactos à infraestrutura rodoviária, com destaque a maior sensibilidade do ligante asfáltico e deformação plástica do pavimento devido às altas temperaturas; a diminuição da vida útil do pavimento; sobrecarga dos sistemas de drenagem; deslocamento de massa de solo e alteração nos níveis de umidade do solo em casos de precipitação intensa (GOV, 2023).

Ademais, uma das principais consequências das alterações climáticas é o aumento das temperaturas na superfície terrestre. As elevadas temperaturas e ondas de calor podem afetar as camadas betuminosas do pavimento, incluindo a camada asfáltica e a camada de base ligada, uma vez que tais camadas possuem comportamento viscoso, podendo apresentar resposta elástica e plástica às cargas e temperaturas e impactando na capacidade de resistir às deformações (QIAO, 2015; FACCIN, 2018).

No Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas AR6 Climate Change (2021) é demonstrado um incremento das temperaturas no Brasil nos últimos 60 anos, fazendo uma projeção que sugere a mesma tendência de crescimento para o futuro. Apesar da grande importância das temperaturas na pavimentação, os atuais métodos de dimensionamento de pavimentos e seleção de materiais no Brasil não levam em consideração a temperatura. Schuster et al. (2022) elucidaram esse fato, demonstrando que no novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), o ensaio de fadiga e rigidez para misturas asfálticas considera apenas a temperatura fixa de 25°C para ensaios laboratoriais de caracterização. Dessa forma, acende um alerta para o desenvolvimento de novas metodologias capazes de considerar as amplitudes de temperatura em projetos de pavimentos.

Paralelamente a isso, entre os anos de 1995 e 2014, o Brasil registrou mais de oito mil casos de danos às infraestruturas rodoviárias motivados por fatores climáticos, somando um prejuízo de R\$ 26,9 bilhões ao país (WORLD BANK, 2016). As alterações climáticas geram custos adicionais de manutenção, recuperação e construção de rodovias que acabam sendo danificados eventualmente por alguma consequência das alterações climáticas. Devido à isso, é necessário adotar uma visão de longo prazo no planejamento de transportes.

Avaliar os efeitos das mudanças climáticas na infraestrutura é uma tarefa desafiadora, uma vez que às metodologias científicas ainda estão em desenvolvimento. Um dos problemas centrais na busca por soluções para os efeitos das alterações climáticas que atingem a área de infraestrutura de transportes está relacionado a dificuldade de entender os desafios do clima, uma vez que são de longo prazo e não lineares (ARGYROUDIS et al., 2021). Sendo assim, torna-se necessário gerir de maneira eficaz e eficiente os potenciais impactos destes eventos meteorológicos a fim de garantir que a rede de transportes possa suportar tais impactos (NATIONAL HIGHWAYS, 2023).

Com o aumento exponencial de eventos climáticos extremos, é de extrema importância projetar obras geotécnicas que resistam às tais interperies, a fim de garantir bom comportamento ao longo da vida útil e principalmente a segurança da população. Tendo em vista tais mudanças do clima, em junho de 2023, a National Highways do Reino Unido (2023), publicou um relatório de adaptação das leis climáticas destacando o risco para ativos geotécnicos resultantes de precipitações extremas. Tal relatório também ressaltou alguns efeitos climáticos que devem ser levados em consideração em projetos geotécnicos, tais como: aumento do nível do mar; surgimento de tempestades; vento de alta velocidade; diminuição da umidade do solo;

congelamento e descongelamento do solo.

O Brasil, por apresentar uma vasta extensão territorial e clima tropical, está suscetível aos impactos das alterações climáticas, como inundações e temperaturas elevadas. Em 2023, o país experimentou uma onda de enchentes e inundações na região sul do território nacional, além de um calor sem precedentes na região central. Conforme reportado pelo Portal do Estado do Rio Grande do Sul, mais de 130 municípios foram impactados pelas precipitações intensas ocorridas no mês de novembro de 2023 (BRASIL DE FATO RS, 2023). Os efeitos desses eventos climáticos na infraestrutura são diversos, incluindo deslizamento de encostas e inundações de rodovias e ferrovias.

Conforme demonstrado no projeto AdaptaVias (2021), as principais ameaças climáticas que causam danos a infraestrutura de transportes terrestres no Brasil estão relacionadas ao aumento da temperatura, da precipitação e a intensidade dos ventos. Diante do supracitado, o presente trabalho tem como objetivo compilar informações relevantes acerca do tema resiliência climática. Desta forma, buscou-se a partir de uma revisão na literatura e sistemática, compreender a importância de atentar-se para as mudanças climáticas e os efeitos destas em obras de engenharia. Além disso, busca-se identificar os impactos das mudanças climáticas em obras geotécnicas e de infraestrutura rodoviária, com ênfase nos eventos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul em 2023.

2 METODOLOGIA

Devido ao fato de resiliência climática ser uma temática que vem sendo discutida nos últimos anos, embora pouco abordada cientificamente, o presente artigo é estruturado na forma de revisão da literatura, apontando pontos de causa e efeitos das mudanças climáticas, em especial nas estruturas de pavimentos. O intuito principal desta pesquisa é compartilhar os conhecimentos e conclusões acerca de eventos climáticos extremos que vem ocorrendo no Brasil, com ênfase no estado do Rio Grande do Sul. Desta forma, um dos objetivos foi realizar uma análise da série histórica de precipitações e temperaturas no estado, tal como elucidar as consequências do aumento dos níveis de chuva e ondas de calor para diferentes municípios do estado do Rio Grande do Sul, com destaque aos desastres ocorridos em novembro de 2023. Foram realizados levantamento de dados sobre precipitação, temperatura média, máxima e mínima entre os anos de 1961 e 2020 e 2023 em nove cidades do estado, com base nos registros disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024).

Além disso, foram compiladas as principais conclusões e considerações realizadas por diferentes frentes de pesquisa, em relação aos impactos gerados na infraestrutura rodoviária. Assim, expõem-se as principais consequências das alterações climáticas nos pavimentos. Nesse sentido, discute-se acerca dos efeitos das ondas de calor assim como do aumento da frequência de precipitações intensas e ocorrência de eventos extremos na região sul do país. Sendo assim, a principal contribuição do presente artigo, é a ampla discussão acerca dessa temática tão relevante e, ainda, pouco discutida. Ainda, é o produto inicial de um projeto que se inicia no meio acadêmico.

3 HISTÓRICO DE CHUVAS, SECAS E TEMPERATURAS NO RS

As ameaças causadas pelas mudanças climáticas podem causar sérios danos à infraestrutura rodoviária e à segurança do usuário. Uma das principais ameaças aos pavimentos são as precipitações intensas que podem ser indicadas de algumas maneiras, tais como: máxima precipitação anual em um dia; precipitação pluviométrica em 24 horas relevante; elevação da precipitação máxima anual; precipitação extrema acima de 50 mm por dia; precipitação máxima em 5 dias consecutivos; precipitação máxima mensal; precipitação total anual. Além disso, outra ameaça que gera danos ao pavimento são as ondas de calor, que podem ser indicadas por temperatura máxima anual, elevação da temperatura máxima anual, temperatura do ar no inverno, temperatura do ar no verão e temperatura média diária.

O ano de 2023 foi marcado pelo El Niño, o fenômeno que provoca no Sul do país um inverno mais quente e primavera mais chuvosa (GRIMM e ACEITUNO, 2015). Tal evento, trouxe diversas consequências para o estado do Rio Grande do Sul, como períodos prolongados de chuvas e inundações. Somente no mês de novembro, as chuvas causaram estragos em 138 municípios, deixando mais de 10 mil pessoas desabrigadas (BRASIL DE FATO RS, 2023).

O estado do Rio Grande do Sul apresenta estações bem definidas, com um verão quente e seco, e com invernos chuvosos e frios. Entre os anos 1961 e 1990, a média anual de precipitação no estado foi de 1554 mm, ao passo que entre 1991 e 2020 a média anual foi de 1665 mm, representando um incremento de 7,14% a mais que nas décadas anteriores, segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024). Em relação à temperatura média, entre os anos de 1961 e 1990, a média anual foi de 18,1°C, enquanto entre os anos de 1991 e 2020, a média anual foi de 23,3°C, resultando em um aumento de 5,2°C na temperatura média do estado.

A fim de entender de maneira mais precisa a intensidade dos eventos ocorridos no estado, foram analisados dados de precipitação e temperatura no estado do Rio Grande do Sul entre os anos de 1961 e 2020 e no ano de 2023 com ênfase no mês de novembro, data em que ocorreram fortes enchentes ao redor do estado a partir dos dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram analisadas informações fornecidas pelas estações meteorológicas presentes em nove cidades gaúchas distintas, sendo elas: Santa Maria, Porto Alegre, Rio Grande, Santana do Livramento, Passo Fundo, Bento Gonçalves, Bagé, Uruguaiiana e Torres.

Com base nesses dados, apresentam-se na Figura 1, o compilado das precipitações e temperaturas anual e no mês de novembro de 2023, sendo possível analisar as relações entre precipitação anual e no mês de novembro para cada cidade apresentada. Com base nos dados de precipitação, fica constatado que a média da precipitação anual para o ano de 2023 no estado foi de 1840 mm, apresentando uma média mensal de 153 mm, enquanto entre os anos de 1961 e 2020 a média de precipitação anual de 1610 mm e média mensal de 134 mm, resultando em um aumento de 12,20%. Em relação ao mês de novembro de 2023, a média de precipitação foi de 278,91 mm, já a média de novembro entre os anos de 1961 e 2020 foi de 76 mm. Em 2023, o município que apresentou maior média mensal de precipitação foi de 226 mm em Passo Fundo, em paralelo, o que apresentou a menor média foi Uruguaiiana com 103 mm mensais.

No que tange às temperaturas, entre os anos de 1961 e 1990 a média anual de temperatura foi de 18,1°C, enquanto entre os anos de 1991 e 2020 a média foi de 23,5°C, representando um aumento de 5,4°C na média das temperaturas. Nota-se que a média de temperatura no mês de novembro não se altera muito em cada cidade, sendo a mais alta no município de Uruguaiiana, com 22,8°C e a mais baixa na cidade Bento Gonçalves com 19,4°C.

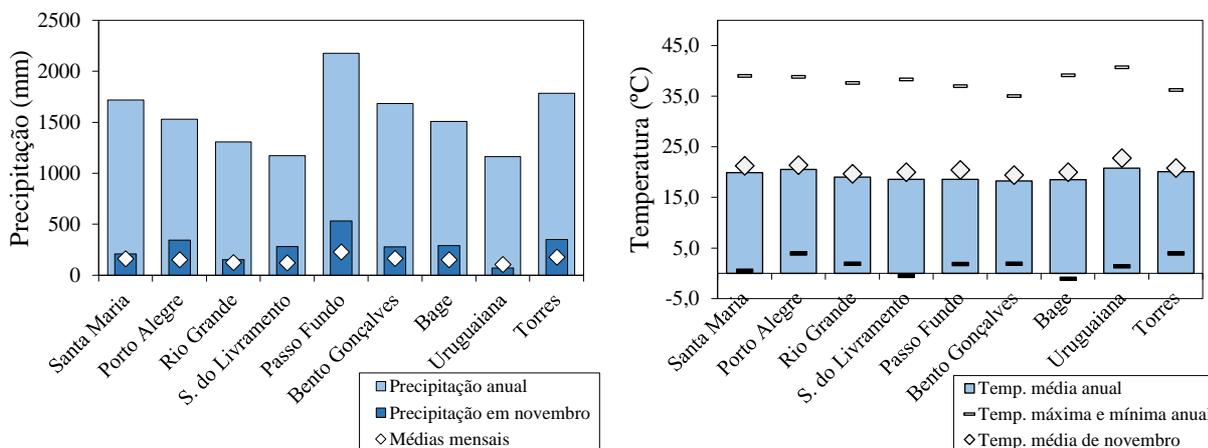


Figura 1. Séries históricas de precipitação e temperatura no estado do Rio Grande do Sul no ano de 2023.

4 INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA

Devido ao aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos, a vida útil da infraestrutura rodoviária pode ser reduzida. O aumento na temperatura da superfície terrestre tal como o incremento de eventos com precipitações elevadas vêm gerando um desgaste nos pavimentos em todo o território nacional. Tais impactos podem ser vistos pelo surgimento de patologias, desde o subleito rodoviário até o revestimento asfáltico.

A ocorrência sazonal de exposição a diferentes condições de temperatura e saturação, acaba perturbando o equilíbrio das camadas do pavimento e causando impactos à infraestrutura rodoviária. O

aumento das temperaturas médias trás preocupações com a integridade, em especial do revestimento asfáltico, uma vez que elevadas temperaturas podem gerar danos como deflexões elevadas e transversais (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; DAWSON, 2014; DAWSON et al., 2016; SONG et al., 2018).. Tal impacto ambiental gera prejuízos bilionários para o Brasil, sendo necessário, por exemplo o estudo para uma melhor seleção de ligantes asfálticos devido à variante climática (SCHUSTER, 2022). Diversas investigações têm analisado como as mudanças climáticas afetam a escolha de ligantes asfálticos, utilizando modelos de projeção da temperatura do ar para os anos seguintes. Estudos conduzidos por Viola e Celauro (2015) na Itália, Underwood et al. (2017) nos Estados Unidos, e Swarna et al. (2021) no Canadá, observaram variações nos níveis de desempenho esperados para os ligantes, evidenciando a persistência do impacto climático sobre os materiais asfálticos nos próximos anos.

De maneira análoga, os solos compactados presentes em aterros rodoviários, estão expostos a uma série de mudanças, resultadas da interação solo-atmosfera. Muitas vezes, tais interações se agravam frente a eventos de precipitação, umidade relativa do ar e alterações na temperatura da superfície (WALKER et al., 2023). Outrossim, é imprescindível investigar o comportamento hidromecânico do subleito do pavimento frente as mudanças climáticas. Às variações das condições tendem a modificar a umidade nos pavimentos seja pelas águas provenientes do lençol freático, capilaridade, infiltração lateral pelas bordas, infiltração vertical ou por percolação, como demonstrado na Figura 2.

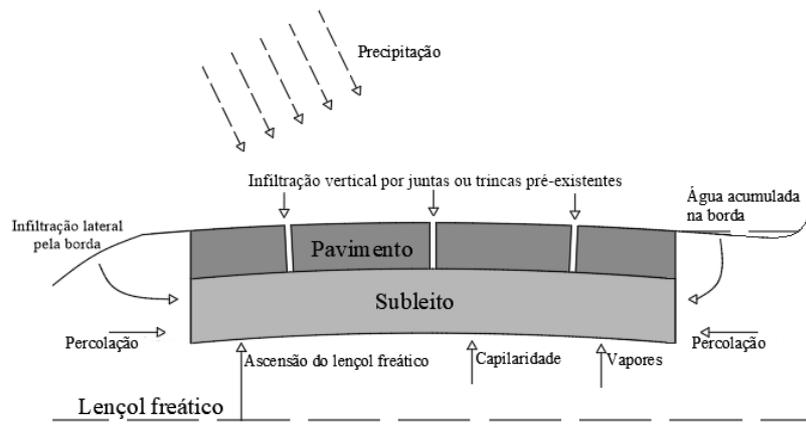


Figura 2. Acesso da água na estrutura de pavimentos (CUSTÓDIO et al., 2021).

Quando a capacidade de infiltração do solo é menor que a intensidade das chuvas, ocorre o escoamento ou alagamento do subleito até que o mesmo atinja a saturação. Após esse ponto, a água da chuva continuará a penetrar no subleito de maneira contínua. Quando cessada a chuva, a profundidade máxima de infiltração que a água precipitada pode penetrar é descrita como zona de perturbação, ou seja, a profundidade atingida pela água da chuva (JING, 2023). Com a alteração de umidade do subleito e sem a presença de um sistema de drenagem eficiente, há uma variação no módulo de resiliência e na deformação permanente do material constituinte, podendo resultar em defeitos na estrutura do pavimento, como trincamento por fadiga e afundamento de trilho de roda (ATR).

O aumento na ocorrência de precipitações intensas pode gerar possíveis impactos à infraestrutura rodoviária, como o aumento de inundações em rodovias pavimentadas e não pavimentadas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; DAWSON et al., 2016), diminuição da vida útil do pavimento causado por danos prematuros nos materiais e estrutura (MNDawe et al., 2015; DAWSON, 2014; RATTANACHOT et al., 2015), sobrecarga na drenagem do pavimento (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS et al. 2009; DAWSON, 2014; WORLD BANK, 2017) e erosão das camadas do pavimento (NEMRY E DEMIREL, 2012; DAWSON et al., 2016).

Outro fator gerado pela alta nos níveis de precipitação são deslocamentos de massa de solo que ocorrem de maneira mais frequente (EVANS et al., 2009; NEMRY E DEMIREL, 2012; RATTANACHOT et al., 2015; DNIT, 2017). A exemplo disso, devida às intensas chuvas ocorridas em novembro de 2023 no estado do Rio Grande do Sul, cerca de 70 pontos de estradas ficaram bloqueadas, parte delas por problemas geotécnicos como deslizamento de encosta, queda de barreira, pista submersa e erosão do asfalto. Algumas dessas rodovias

que sofreram algum tipo de dano causado pelo auto volume de precipitação foram a BR 116, BR 290, BR 153 e a BR 470. Em paralelo a isso, no município de Gramado ocorreu um deslizamento de encosta resultando no desmoronamento de um edifício. Segundo a avaliação técnica pós-desastre do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM, 2023), o que ocorreu neste caso foi um processo de rastejo do solo, ou seja, movimentos lentos e gravitacionais de massa, podendo ser contínuos ou pulsantes e que se agravam com precipitações intensas.

Conforme explícito na Figura 1, as precipitações médias no estado do Rio Grande do Sul vêm crescendo, com isso, fica evidente a necessidade de ter no pavimento camadas capazes de minimizar os possíveis danos gerados pelas chuvas e eventos extremos. Desta forma, a execução correta das camadas terrosas, associado ao uso de dispositivos de drenagem eficientes, tendem a ser uma alternativa viável. Ainda, conforme Sagrilo (2024), em regiões sujeitas a inundações, é importante a implementação de uma camada de material que possua uma distribuição granulométrica aberta no pavimento, como brita graduada simples e macadame seco, a fim de obter uma contutividade hidráulica maior, auxiliando na drenagem da rodovia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de uma vasta investigação sistemática, foi possível analisar a importância de compreender as dimensões e consequências das mudanças climáticas para a infraestrutura rodoviária e obras geotécnicas. Com o presente estudo, evidenciou-se os impactos gerados ao pavimento e infraestrutura geotécnica causados pelos altos níveis de precipitação e pela influência da temperatura. No que tange a revisão que fora realizado, foi verificado que, embora seja uma temática extremamente relevante, ainda carece de pesquisas e de divulgação científica, principalmente no Brasil.

No que diz respeito às chuvas intensas, salienta-se a diminuição da vida útil da rodovia por consequência, principalmente, da sobrecarga nas camadas drenantes do pavimento. Paralelamente a isso, gera-se um aumento do grau de saturação do solo de subleito rodoviário podendo causar patologias no pavimento, como afundamento de trilha de roda e trincamento por fadiga. No que tange o aumento da temperatura média e ondas de calor mais frequentes, fica notório que a principal consequência de temperaturas mais altas é no revestimento asfáltico, uma vez que quando elevada sua temperatura há alterações nas propriedades viscoelásticas do material e danos como deflexões elevadas, com isso, gerando prejuízos bilionários. Esse prejuízo são para as vias existentes e também refletirão aos novos projetos, enquanto a temperatura não for um critério de projeto.

Fica explícita as consequências das alterações climáticas para a população a partir do estudo dos desastres ocorridos em municípios do estado do Rio Grande do Sul, no mês de novembro de 2023. Com as precipitações intensas ocorridas em tal período no estado gaúcho, as consequências para os moradores e para os usuários das vias foram diversas, como inundações, desmoronamentos e bloqueios devido aos problemas com erosão do solo e queda de barreiras. Destaca-se, também, o desabamento de um edifício residencial no município de Gramado/RS devido aos altos índices pluviométricos da região que causaram saturação do solo e, por consequência, ocorreu o processo de rastejo do solo. Com isso, urge a necessidade de fomentar pesquisas relacionadas às consequências geradas pelas mudanças climáticas na infraestrutura de transporte e em obras geotécnicas, a fim de garantir, principalmente, segurança a população. Ressalta-se que, o presente artigo, foi fruto da etapa inicial de um projeto que está em desenvolvimento dentro da Universidade Federal de Santa Maria, em que tem como objetivo, trazer novas soluções e disseminar o conhecimento na engenharia geotécnica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, DNIT, Owntec Soluções em Engenharia e a UFSM pelo incentivo e fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argyroudis S. A., et al. (2020), *Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: Case study on transport assets*, Science of the Total Environment, volume 714.

- “Chuvas deixam quatro mortos e mais de 10 mil desabrigados no Rio Grande do Sul” (2023). Disponível em < <https://www.brasildefatores.com.br/2023/11/20/chuvas-deixam-quatro-mortos-e-mais-de-10-mil-desabrigados-no-rio-grande-do-sul> >. Acessado em 09 mar. 2024.
- Custódio, D. A. S., et. al. (2021). Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v.12 –n.2, p. 2-10.
- Dawson A. (2014). Anticipating and responding to pavement performance as climate changes. *Green Energy and Technology*. p. 127-157.
- Dawson A., et. al. (2016). UK climate change risk assessment evidence report: chapter 4, Infrastructure.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2017). Atlas do Plano de Adaptação de Rodovias Federais (PARF).
- Evans, C., Tsolakis, D., & Naude, C. (2009). Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations. *Engineering, Environmental Science*.
- Faccin C. (2018), *Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM, 22-26 p.
- Forzieri G., et. al. (2018), Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. Geotechnical Climate Change Adaptation Plan (2023). National Highways, junho 2023 volume 2, p. 6-22.
- Grimm A. M. e Aceituno P. (2015) Estudio de la influencia de enso sobre el clima de América del Sul realizado durante década de 1980, Revista Brasileira de Meteorologia, volume 30 n.4, 351-357 p.
- Instituto Nacional de Meteorologia (2024). Disponível em < <https://portal.inmet.gov.br/normais> >. Acessado em 10 mar. 2024.
- Jing P., et. al. (2023). Hydraulic behavior of Sandy subgrade under extreme rainfall in Alashan, China. *Transportation Geotechnics* 42, p. 2-4.
- Mndawe, M. B., Ndambuki, J. M., Kupolati, W. K., Badejo, A. A., & Dunbar, R. (2015). Assessment of the effects of climate change on the performance of pavement subgrade. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 7(2), 111–115.
- Nações Unidas Brasil (2024). Disponível em < <https://brasil.un.org/pt-br/257750-onu-confirma-que-2023-bate-recorde-de-temperatura-global> >. Acessado em 12 mar. 2024.
- National Research Council (2008). Potential impacts of climate change on U.S. transportation: Special report 290. *The National Academies Press*, Washington, DC.
- Nemry, F. & Demirel, H. (2012). Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructures. *Luxembourg: Publications Office*.
- Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (2023). Mudança do Clima 2023, Relatório Síntese. Disponível em: < https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- Projeto AdaptaVias (2024). Disponível em: < <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias> >. Acesso em: 04 abr. 2024.
- Qiao Y. (2015) *Flexible Pavements and Climate Change: Impact of climate change on the performance, maintenance, and life-cycle costs of flexible pavements*. Doctor of Philosophy.
- Rattanachot, W., Wang, Y., Chong, D., & Suwansawas, S. (2015). Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. *Transport Policy*, 41, 159–166.
- Serviço Geológico do Brasil, Programa Gestão de Riscos e Desastres, Mapeamentos Geológicos-geotécnicos voltados para a prevenção de desastres (2023). Avaliação Técnica Pós-Desastre, Gramado RS. P. 14-17
- Shuster S. L., et. al. (2022). Impacto das mudanças climáticas na seleção de ligantes asfálticos no Brasil considerando o grau de desempenho (PG). Rio Oil e Gas Expo And Conference 2022, Rio de Janeiro.

- Swarna S. T., Hossain K., Pandya H., Metha Y. A. (2021). Assessing climate change impact on asphalt binder grade selection and its implications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2675, p. 1-10.
- Underwood B. S., Guido Z., Gudipudi P.P, Feinberg Y. (2017). Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. *Nature Climate Change*, 7, p. 704-707.
- Viola F., Celauro C. (2015). Effect of climate change on asphalt binder selection for road construction in Italy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 37, p. 40-47.
- Walker C., Heitor A., Clarke B. G. (2023). Impact of drying-wetting cycles on the small strain behaviour of compacted clay, *Transportation Geotechnics* 42.
- World Bank (2017). Climate and Disaster Risk Screening - Sector Screening Guidance note Transportation sector. Disponível em < https://climatescreeningtools.worldbank.org/sites/default/files/guidance_note/TRANSPORTATION_Guidance_Note.pdf > acessado em 9 abr. 2024
- World Meteorological Organization (2023). Disponível em < <https://wmo.int/media/news/climate-change-indicators-reached-record-levels-2023-wmo> >. Acessado em 22 mar. 2024.