DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-RAP-CIMENTO POR MEIO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL (MEDINA)

Auanny Alícia Alves da Silva[1], Diego José Araújo Viégas[2], John Kennedy Guedes Rodrigues[3]; Lídia Pereira Amaro[4]; Chrysttyan Thalles Ribeiro Félix[5]; Ana Maria Gonçalves Duarte[6]

[1]*Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil (auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br)*
[2] *Doutorando em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco(UPE), Recife, Brasil*
3 Doutor em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo (USP), Sõ Paulo, Brasil
[4]*Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil*
[5]*Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil*
[5]*Professora PhD da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil*

Resumo: Este estudo avalia o desempenho mecânico de misturas solo-RAP-cimento via método MeDiNa, com foco na resistência à fadiga e na resiliência estrutural. Foram analisadas dosagens com 30% e 45% de RAP, a partir dos parâmetros k_1 e k_2 e da proposição de um índice de resiliência (IR). Os resultados indicam desempenho estrutural equivalente, porém maior estabilidade mecânica para a mistura com 45% de RAP, evidenciando menor sensibilidade às variações de carga e maior potencial sustentável.

Palavras-chave: Infraestrutura; Desempenho mecânico; Resiliência estrutural; Camadas de pavimentação; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária desempenha papel direto e estratégico no desenvolvimento socioeconômico de um país, influenciando a mobilidade, a competitividade logística e o crescimento regional (Brasil, 2024; Campos Neto et al., 2015). No entanto, as atividades de expansão e manutenção dessa infraestrutura estão associadas a elevados custos ambientais, sobretudo em função do consumo intensivo de recursos naturais não renováveis e da geração de resíduos (Endale et al., 2022; Mariyappan et al., 2023).

A incorporação de materiais reciclados, incluindo o próprio resíduo proveniente da fresagem de pavimentos degradados – o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) –, visa trazer maior custo-benefício e consequentemente otimizar o desempenho do modal rodoviário brasileiro (Tarsi et al., 2020).

Na atualidade, o Brasil atravessa uma transição tecnológica no dimensionamento de pavimentos, migrando de abordagens empíricas, baseadas no índice de suporte Califórnia (CBR), para metodologias mecanístico-empíricas, representadas pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

Tal mudança impõe a necessidade de compreender o comportamento dos materiais não apenas em termos de resistência estática, mas principalmente sob solicitações cíclicas, considerando parâmetros como o Módulo de Resiliência (MR) e o desempenho à fadiga ao longo da vida útil da estrutura (Beninca e Santos, 2024; DNIT, 2020; Lima et al., 2023b).

A fadiga em pavimentos corresponde ao processo de deterioração progressiva das propriedades mecânicas dos materiais em função da aplicação repetida de cargas, principalmente associadas ao tráfego veicular. Esse fenômeno resulta na formação e propagação de microfissuras, perda de coesão e acúmulo de deformações, levando à redução da capacidade estrutural ao longo do tempo.

Nesse cenário, a estabilização de solos com cimento e RAP demonstra-se como uma solução promissora para a construção das camadas estruturais de novos

pavimentos. Enquanto o cimento promove o aumento da rigidez por meio de reações de cimentação, o RAP atua como um agregado reciclado que melhora a distribuição granulométrica e reduz a sensibilidade à umidade (Alhaji et al., 2019; Amadi et al., 2025; Lima et al., 2023a).

Alhaji et al. (2019) indicam que os valores de CBR de 22% podem se elevar para 118% em mistura solo-RAP-cimento. E, adicionalmente, misturas com 60% de RAP e 3% de cimento alcançaram resistência à compressão simples até 22 vezes superior ao solo natural (Lima et al., 2023a). Contudo, o aumento da rigidez associado à cimentação pode induzir uma maior fragilidade, elevando a suscetibilidade ao trincamento por fadiga (Suksan et al., 2024).

Nesse contexto, emerge o conceito de resiliência estrutural em pavimentos, que transcende a análise tradicional baseada apenas na rigidez ou resistência máxima dos materiais. Ela pode ser entendida como a capacidade da estrutura em manter seu desempenho funcional ao longo do tempo, mesmo diante de incertezas operacionais, como variações de tráfego, sobrecargas e condições ambientais adversas.

Diferentemente das abordagens empíricas clássicas, que priorizam a capacidade resistente imediata, o raciocínio mecanístico-empírico busca materiais que apresentem comportamento previsível e estável sob carregamentos cíclicos, evitando falhas abruptas.

A avaliação da resposta à fadiga torna-se de grande relevância pois permite compreender não apenas quando o material falha, mas como ele evolui até a ruptura. Assim, a incorporação do RAP deve ser analisada não apenas sob a ótica da rigidez, mas principalmente quanto à sua contribuição para adaptabilidade frente às variabilidades inerentes ao tráfego real.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico e a resistência à fadiga de misturas solo-RAP-cimento, por meio do método mecanístico-empírico MeDiNa, analisando a influência dos parâmetros k_1 e k_2 e propondo um índice de resiliência (IR) para comparação da sensibilidade às tensões aplicadas.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo empregado nesta pesquisa foi coletado no município de Cabo de Santo Agostinho no estado de Pernambuco. A curva granulométrica, apresentada na Figura 1, evidencia a predominância da fração areia associada à presença de finos.

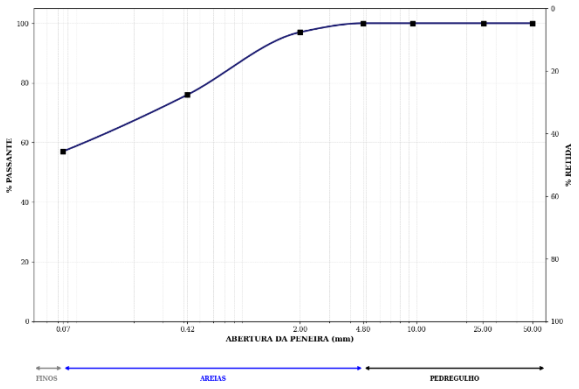


Figura 1. Curva granulométrica do solo natural.

De acordo com a metodologia MCT, o material é classificado como solo laterítico arenoso (LA'). Suas principais características físicas estão sintetizadas na Tabela 1, a partir dos ensaios de granulometria por peneiramento e limites de Atterberg.

Tabela 1. Caracterização física do solo natural.

Propriedade	Dado obtido
Limite de liquidez (LL)	37,9%
Limite de plasticidade (LP)	14,1%
Fração de areia	51,2%

Como material reciclado, utilizou-se o RAP proveniente de fresagem na rodovia federal BR-230 na Paraíba. E, para a estabilização química, selecionou-se o cimento Portland Pozolânico (CP IV-32), escolhido por seu baixo calor de hidratação, o que auxilia na redução de fissuras iniciais em solos tropicais.

As misturas foram compostas por solo natural e teores variáveis de RAP nas proporções de 0%, 30% e 45% em relação à massa do solo (Figura 2). O teor de cimento foi fixado em 2% para todas as dosagens. A preparação seguiu etapas de secagem ao ar, destorroamento, homogeneização e quarteamento.



Figura 2. Materiais utilizados (solo e RAP).

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram moldados em formato cilíndrico, com dimensões padronizadas de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura (Figura 3).



Figura 3. Aspecto final dos corpos de prova.

O processo de compactação na energia Proctor Intermediário foi conduzido conforme os parâmetros estabelecidos pela normativa DNIT-ME 164.

Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a um período de cura de sete dias em câmara úmida, sob condições controladas de temperatura (23 °C ± 2 °C) e umidade relativa superior a 95%, conforme preconizado pelas normas técnicas. Esse procedimento tem como finalidade garantir o desenvolvimento inicial das propriedades mecânicas do material, condição essencial para a realização dos ensaios de fadiga.

Concluído o período de cura, as amostras foram retiradas da câmara e inspecionadas quanto à regularidade dimensional, integridade superficial e eventual presença de fissuras. Na sequência, procedeu-se à pesagem e ao preparo dos corpos de prova para o correto posicionamento no equipamento de ensaio de compressão diametral (Figura 4).



Figura 4. Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão diametral em prensa universal.

Para validar a aplicação prática das misturas, realizou-se a modelagem mecanístico-empírica no software MeDiNa. O método opera a partir de duas etapas complementares. A primeira consiste na análise mecanística, na qual são calculadas as respostas estruturais do pavimento – tensões, deformações e deslocamentos – por meio da teoria da elasticidade aplicada a sistemas multicamadas. A segunda etapa corresponde à análise empírica, na qual essas respostas são convertidas em danos acumulados, como trincamento por fadiga e deformação permanente, por meio de funções de transferência calibradas para as condições brasileiras.

A partir dessa relação, o modelo estima a evolução do dano ao longo do tempo, resultando na previsão da área trincada (AT). De forma complementar, o método também avalia o afundamento de trilha de roda (ATR), parâmetro relacionado à deformação permanente acumulada nas camadas do pavimento ao longo das solicitações repetidas de carga.

No presente estudo, adotou-se como critérios de desempenho o limite normativo de 30% para a AT ao final do período de projeto e 10 mm para o ATR.

Dessa forma, o uso do MeDiNa possibilita uma avaliação integrada do desempenho estrutural, incorporando tanto os parâmetros laboratoriais quanto às condições reais de carregamento, permitindo análises mais consistentes quanto à durabilidade e à confiabilidade das misturas estudadas.

A estrutura simulada, apresentada na Figura 5, consistiu em um revestimento asfáltico (CBUQ) de 10 cm, base de 15 cm (com as propriedades obtidas nos ensaios) e subleito padrão.



Figura 5. Esquematização das camadas de pavimentação sob carga de tráfego.

A avaliação da fadiga baseia-se na relação entre o número de ciclos até a ruptura (N_f), conforme apresentado na Equação 1.

$$N_f = k_1 \times \sigma^{-k_2} \quad (1)$$

Essa análise é realizada por meio de ensaios de compressão diametral sob tensão controlada, que permitem estabelecer relações entre o número de ciclos até a ruptura (N_f) e os níveis de tensão aplicados (σ). A partir dessas relações, são obtidos os parâmetros k_1 e k_2, utilizados na modelagem.

O parâmetro k_1 está associado ao potencial global de vida de fadiga do material, indicando sua capacidade de suportar repetições de carga. Já o parâmetro k_2

representa a sensibilidade do material ao aumento das tensões, sendo diretamente relacionado à taxa de degradação da vida útil.

Valores menos negativos de k_2 indicam maior estabilidade, evidenciando menor sensibilidade às variações de carregamento e maior capacidade de adaptação a condições reais de operação.

As simulações consideraram uma vida de projeto de 10 anos e foi avaliada para o cenário de tráfego moderado (N=10^6). Os critérios de desempenho adotados foram o limite de 30% de área trincada (AT) e 10 mm de afundamento de trilha de roda (ATR).

Com o objetivo de sintetizar o comportamento das misturas quanto à sensibilidade às tensões aplicadas, propõe-se um índice simplificado de resiliência (IR), definido na Equação 2.

$$IR = \frac{log\,(k_1)}{|k_2|} \qquad (2)$$

A formulação foi definida de modo que seja possível considerar tanto a capacidade inicial do material de resistir à fadiga quanto sua sensibilidade às tensões aplicadas, permitindo comparação adimensional entre misturas.

Valores mais elevados de IR indicam menor sensibilidade às variações de tensão. Por outro lado, menores valores refletem maior suscetibilidade à redução da vida de fadiga com o aumento das tensões aplicadas.

Ressalta-se que o IR proposto possui caráter comparativo, sendo aplicado exclusivamente para análise relativa entre as misturas estudadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de fadiga foram obtidos a partir dos resultados do ensaio de compressão diametral sob carregamento repetido, considerando diferentes níveis de tensão normalizados pela resistência à tração (%RT). Para cada nível de carregamento, determinou-se o número de ciclos até a ruptura (N_f), conforme apresentado na Figura 6.

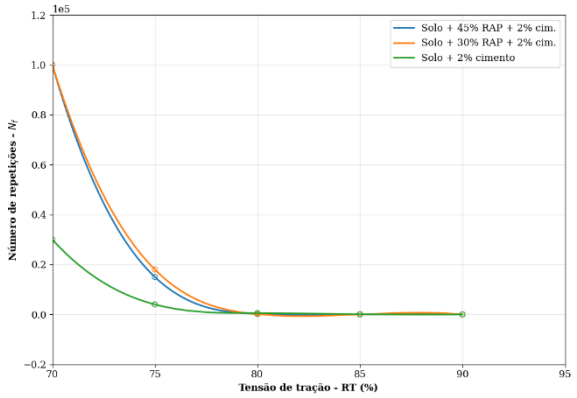


Figura 6. Curvas características de fadiga.

Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de fadiga por meio de regressão linear após transformação logarítmica, relacionando N_f e RT. Os pontos sem ocorrência de ruptura (*run-out*) foram desconsiderados no ajuste, devido à impossibilidade de aplicação da transformação logarítmica.

Os coeficientes do modelo foram obtidos a partir da equação da reta ajustada, em que o parâmetro k_2 corresponde ao coeficiente angular e k_1 ao antilogaritmo do intercepto.

A comparação dos parâmetros de fadiga entre estas duas misturas revela o cerne da resiliência estrutural defendida neste trabalho (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros de fadiga das misturas.

Mistura	k_1	k_2
Solo + 30% RAP	18,27	- 18,96
Solo + 45% RAP	16,46	- 16,40

A mistura de 30% de RAP possui um potencial de vida global levemente superior devido ao k_1, mas com uma sensibilidade à tensão mais acentuada (k_2).

Embora a mistura com 45% tenha um potencial de ciclos inicial menor de 16,46, ela se destacou como a mais resiliente de toda a pesquisa, apresentando o parâmetro k2 menos negativo. Essa diferença é importante, pois um valor de k2 menos negativo significa que a curva de fadiga é mais estável.

Logo, a mistura de 30% sofre uma queda mais brusca de durabilidade diante de um aumento de carga (sobrecarga de tráfego), enquanto a mistura de 45% de RAP mantém seu desempenho de forma mais previsível, adaptando-se melhor às “disrupções” do tráfego real.

Com base nos parâmetros de fadiga apresentados, calculou-se o IR com o objetivo de integrar os efeitos da fadiga. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Índice de resiliência proposto.

Mistura	IR
Solo + 30% RAP	0,0666
Solo + 45% RAP	0,0741

Essa diferença, embora numericamente discreta, é mecanicamente significativa, pois indica que a mistura com maior teor de RAP possui uma combinação mais favorável entre capacidade de suporte de ciclos e estabilidade frente a variações de tensão.

Em termos práticos, isso implica que essa dosagem apresenta menor taxa de degradação da vida de fadiga quando submetida a incrementos de carregamento.

A evolução da AT ao longo do período de projeto é apresentada na Figura 7, permitindo a comparação direta do desempenho sob carregamento cíclico.

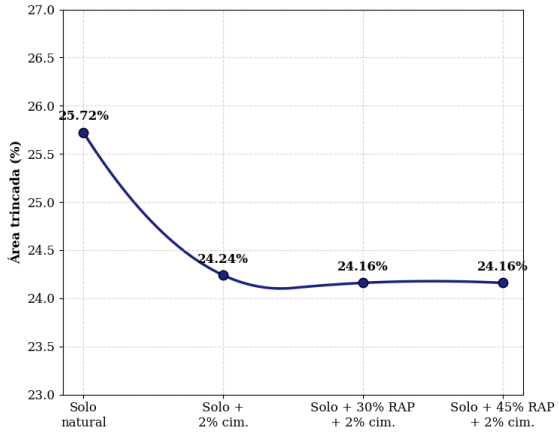


Figura 7. Tendência de área trincada das misturas.

Pode-se observar que ambas as dosagens apresentam comportamento coincidente ao longo dos 120 meses analisados, indicando desempenho estrutural equivalente sob as condições simuladas.

Ao final do período de projeto, com resultados absolutos significativamente inferiores ao limite normativo de 30%, o que se evidencia é a adequação de ambas as misturas do ponto de vista de durabilidade à fadiga.

O desempenho apresentado sugere que, embora existam diferenças nos parâmetros de fadiga, tais variações não se refletem de forma expressiva na resposta estrutural global dentro do horizonte de análise considerado.

De forma complementar, a Figura 8 apresenta a evolução do ATR para as mesmas condições de carregamento.

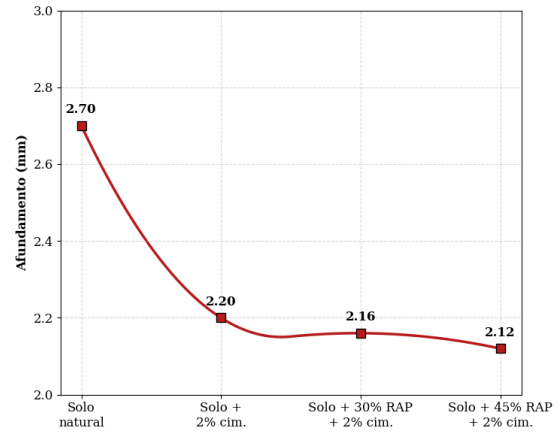


Figura 8. Tendência de afundamento das misturas.

Verifica-se que os valores de deformação permanente também são praticamente idênticos entre as misturas, mantendo-se estáveis ao longo do tempo e atingindo aproximadamente 2,2 mm ao final do período de projeto. Esse resultado encontra-se muito abaixo do limite admissível de 10 mm, indicando que nenhuma das composições apresenta suscetibilidade significativa à deformação plástica.

Em conjunto, os resultados apresentados nas Figuras 5 e 6 demonstram que, sob a ótica dos critérios normativos tradicionais, ambas as misturas apresentam desempenho satisfatório e equivalente.

No entanto, essa similaridade reforça a necessidade de análises complementares para diferenciar a resposta mecânica, especialmente no que se refere à sua capacidade de adaptação frente a variações de carregamento ao longo da vida útil.

Portanto, as simulações no software MeDiNa para um horizonte de 10 anos demonstram que ambas as misturas apresentam desempenho estrutural satisfatório ao longo do período de projeto. No entanto, a equivalência nos valores de área trincada e afundamento não implica comportamento mecânico idêntico.

A diferença observada no parâmetro de sensibilidade à fadiga (k_2) entre as misturas pode ser interpretada à luz dos mecanismos físico-mecânicos que governam a interação entre solo, RAP e cimento.

O melhoramento da mistura está associado ao papel do material fresado como agente dissipador de tensões.

Do ponto de vista micromecânico (Figura 9), a presença do ligante asfáltico residual no RAP contribui para a formação de zonas de contato mais deformáveis entre as partículas, favorecendo a redistribuição de tensões internas.

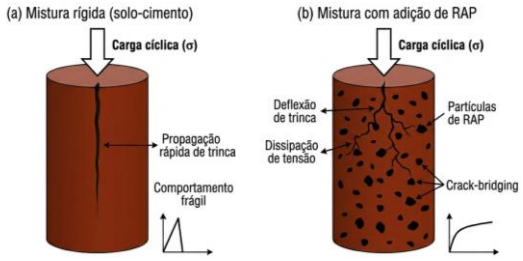


Figura 9. Representação esquemática do comportamento sob carga cíclica.

Esse efeito da Figura 9 demonstra a redução das concentrações localizadas de tensão, que normalmente atuam como pontos de início de fissuração em materiais mais rígidos.

Adicionalmente, a heterogeneidade introduzida pela mistura de solo, cimento e RAP pode atuar de forma benéfica, promovendo múltiplos caminhos de dissipação de energia, o que retarda a propagação de

fissuras. Isso é esperado em materiais compósitos, nos quais a combinação de fases com diferentes propriedades mecânicas resulta em desempenhos mais robustos.

O RAP não atua apenas como agregado granular, mas como um componente viscoelástico devido à presença de ligante asfáltico residual. Esse aspecto confere à mistura a capacidade de acomodar microdeformações sob carregamentos cíclicos.

Em sistemas estabilizados apenas com solo-cimento, o sistema promove ganho de rigidez por meio das reações de hidratação, formando produtos cimentantes que aumentam a resistência inicial do material. Entretanto, esse ganho está associado a uma redução da capacidade de deformação, podendo induzir comportamento frágil sob condições de sobrecarga.

No entanto, a incorporação de RAP promove a formação de uma matriz híbrida, na qual partículas revestidas por ligante permitem redistribuição de tensões e retardam a propagação de microfissuras. Assim, existe um equilíbrio entre rigidez e ductilidade que deve ser considerado no dimensionamento.

CONCLUSÃO

A investigação desenvolvida permitiu validar a eficácia da mistura solo-RAP-cimento como uma solução promissora para a pavimentação, demonstrando que a aplicação do material fresado não apenas amplia a sustentabilidade, mas otimiza o desempenho estrutural por meio da interação entre rigidez, ductilidade e dissipação de energia.

Sob a ótica da fadiga, a mistura de 45% de RAP consolidou-se como a solução mais resiliente do estudo. Seu parâmetro $k2$ (-16,40) foi o menos negativo entre todos os materiais avaliados, indicando uma menor sensibilidade ao aumento da tensão aplicada.

Na prática, isso significa que esta dosagem oferece uma curva de degradação mais suave e estável, garantindo que a infraestrutura suporte variações inesperadas e disrupções no carregamento do tráfego sem sofrer falhas bruscas ou prematuras.

A utilização do índice de resiliência proposto permitiu evidenciar diferenças que não são captadas diretamente pelos critérios normativos de desempenho, como área trincada e afundamento, demonstrando a importância de abordagens complementares na avaliação de materiais para pavimentação.

Do ponto de vista da economia circular, a substituição de 45% da massa do solo por material reciclado maximiza o reaproveitamento de resíduos asfálticos sem comprometer a longevidade da obra. Simulações no software MeDiNa para um horizonte de 10 anos sob tráfego moderado mostraram que ambas as dosagens (30% e 45%) atingem exatamente o mesmo índice de 24,16% de área trincada.

Logo, a utilização do MeDiNa, aliada à interpretação dos parâmetros de fadiga, possibilita uma análise mais abrangente do desempenho, incorporando não apenas critérios de aceitação normativa, mas também aspectos relacionados à robustez e à gestão de incertezas.

Portanto, a utilização de teores mais elevados de RAP prova ser uma alternativa economicamente e ambientalmente atrativa, mantendo o pavimento dentro dos limites normativos de desempenho ao longo de sua vida útil.

Mais do que maximizar parâmetros isolados de resistência, essa composição demonstrou maior capacidade de adaptação às incertezas do tráfego real, garantindo um comportamento mais previsível e menos suscetível a falhas abruptas.

Dessa forma, a adoção de misturas solo-RAP-cimento com maiores teores de material reciclado não apenas contribui para a sustentabilidade da infraestrutura rodoviária, mas também promove soluções mais robustas, alinhadas às exigências do dimensionamento mecanístico-empírico moderno.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em especial ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada para a realização dos ensaios e análises desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

ALHAJI, M. M.; ALHASSAN, M.; ADEJUMO, T. W.; UMAR, A. T. Laboratory and field evaluation of a-6 lateritic soil treated with reclaimed asphalt pavement and ordinary portland cement. International Journal of GEOMATE, v. 17, n. 63, 1 nov. 2019.

AMADI, A. A.; KOLO, S. S.; YUSUF, A.; EZE, F. E.; SALIHU, U. Stabilization characteristics of cemented lateritic soil produced with selected cement types. CEMENT, v. 19, p. 100136, mar. 2025.

BENINCA, G. P.; DOS SANTOS, A. G. Fatigue cracking prediction of cobblestone interlayer pavement using non-destructive testing and mechanistic-empirical analyses. Transportes, v. 32, n. 3, p. e3022, 30 out. 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Estudo sobre o impacto das obras de infraestrutura no desenvolvimento socioeconômico local e no mercado de trabalho. Elaboração: Fundação Getúlio Vargas. Brasília, DF: DNIT/IPR, nov. 2024. 143 p. (Relatório de Pesquisa IPR RP – 005). DOI: 10.70859/IPR-RP-005/2024.

CAMPOS NETO, C. A. S.; CONCEIÇÃO, J. C. P. R.; ROMMINGER, A. E.. Impacto da infraestrutura de transportes sobre o desenvolvimento e a produtividade no Brasil. In: DE NEGRI, F.; CAVALCANTE, L. R. (org.). Produtividade no Brasil: desempenho e determinantes. Brasília: ABDI: IPEA, 2015. v. 2, cap. 13, p. 331-360.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 164/2013-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Manual de Utilização do programa MeDiNa. IPR, Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2020, 78p.

ENDALE, A. A.; GHATAORA, G. S.; BURROW, M. P. N. Asphalt Pavement Cold Recycling and Basic Characteristics of RAP Materials and Their Application. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 16, n. 1, 28 jan. 2022.

LIMA, D.; ARRIETA-BALDOVINO, J.; IZZO, R. L. S. Sustainable Use of Recycled Asphalt Pavement in Soil Stabilization. Civil Engineering Journal, v. 9, n. 9, p. 2315–2329, 1 set. 2023a.

LIMA, L. B. F. DE; SILVA, J. P. S.; REZENDE, L. R. DE. Investigation of Resilient Modulus and Permanent Deformation of Tropical Soil with Reclaimed Asphalt Pavement. Transportation Geotechnics, v. 43, e101103, 3 set. 2023b.

MARIYAPPAN, R.; PALAMMAL, J. S.; BALU, S. Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review. Environmental Science and Pollution Research, 23 fev. 2023.

SUKSAN, A.; HORPIBULSUK, S.; MOBKRATHOK, M.; CHINKULKIJIWAT, A. Drained Shear Response of Cement-Stabilized Recycled Asphalt Pavement–Lateritic Soil Blends. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, v. 10, n. 1, 17 jan. 2024.