



# Avaliação do Desempenho da Mistura de Resíduo de Construção Civil, Pó de Pedra e Cimento para fins de Pavimentação Rodoviária

Juliana Maria de Souza

Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, jmaria.eng@gmail.com

Rafaela Chagas Rudnick

Engenheira civil, UEM, Maringá, Brasil, rafaelacrudnick@gmail.com

Gleicy Loany de Alencar Cardoso

Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, pg56011@uem.br

Juliana Azoia Lukiantchuki

Professora Adjunta, UEM, Maringá, Brasil, jalukiantchuki@uem.br

**RESUMO:** A reutilização de resíduo de construção civil (RCC) e de pó de pedra (PP) como matéria-prima em alguns setores da indústria da construção é uma alternativa interessante para a destinação ambientalmente adequada e o aproveitamento do potencial desses materiais. O objetivo desse trabalho é caracterizar uma mistura composta por 50 % RCC , 50 % PP e um solo laterítico argiloso reforçado com cimento afim de analisar a viabilidade de utilização desse material como camada de pavimentos. As análises experimentais contemplaram a caracterização geotécnica, caracterização mecânica, por meio dos ensaios de resistência à compressão não confinada e ensaio de módulo de resiliência. Com base nos dados obtidos nos experimentos, foi realizada a avaliação do desempenho das misturas como camadas de base e sub-base através do Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos (MeDiNa). Os resultados indicam que a incorporação de cimento melhora as características geotécnicas das duas misturas, entretanto, essa melhoria é mais expressiva na mistura de resíduos. Com relação à aplicação das misturas em camadas de pavimentos, os resultados indicaram que, em vias com baixo volume de tráfego, as misturas reforçadas com cimento podem funcionar como materiais alternativos na execução de camadas de pavimentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduo de Construção Civil, Pó de Pedra, Solo Laterítico Argiloso, Cimento Portland, Pavimentação.

**ABSTRACT:** The reuse of construction waste (CW) and quarry dust (QD) as raw materials in certain sectors of the construction industry is an interesting alternative for environmentally appropriate disposal and for harnessing the potential of these materials. The objective of this study is to characterize a mixture composed of 50% CW, 50% QD, and a lateritic clayey soil reinforced with cement, in order to analyze the feasibility of using this material as a pavement layer. The experimental analyses included geotechnical characterization and mechanical characterization through unconfined compressive strength and resilient modulus tests. Based on the data obtained from the experiments, the performance of the mixtures as base and sub-base layers was evaluated using the National Pavement Design Method (MeDiNa). The results indicate that the incorporation of cement improves the geotechnical characteristics of both mixtures; however, this improvement is more significant in the waste material mixture. Regarding the application of the mixtures in pavement layers, the results indicated that, on roads with low traffic volumes, the cement-reinforced mixtures can function as alternative materials for the construction of pavement layers.

**KEYWORDS:** Construction Waste, Quarry Dust, Lateritic Clay Soil, Cement Reinforcement, Pavement Design.



## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é o responsável por proporcionar qualidade de vida e implementar a infraestrutura necessária para a realização das atividades cotidianas urbanas que colaboram diretamente com o desenvolvimento socioeconômico da maioria das nações. A consequência da implementação dessas estruturas é a geração dos resíduos de construção civil (RCC), que envolvem os materiais descartados em obras, reformas ou demolições, como concreto, tijolos, argamassas, cerâmicas, metais, solos, madeiras, pedaços de elementos estruturais, entre outros. De acordo com o Panorama de Resíduos Sólidos, em 2023 foram produzidas aproximadamente 81 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no Brasil, sendo que 55% desses resíduos é composto por RCC (ABREMA, 2024).

Outra atividade essencial para a indústria da construção é a exploração de jazidas para a produção de agregados, em que a elevada demanda ocasiona a geração do resíduo de pó de pedra (PP). Esse material, resultante da britagem das rochas e de baixo valor comercial, pode causar elevado impacto no meio ambiente ao ser disposto em pátios e se tornar um agente de degradação ambiental.

Tanto o RCC quanto o pó de pedra são materiais que se mostraram adequados à estabilização de solos, otimizando as propriedades geotécnicas dos materiais. A incorporação de RCC ao solo melhora a capacidade de carga do material, a resistência a trincas e fadigas, torna o material mais durável e é viável a substituição em até 50% do solo (Hidalgo et al., 2019; Lukiantchuki et al., 2019). Em misturas de solo cimento, o RCC contribui para o ganho de resistência e melhora os parâmetros de compactação (Reis et al., 2015). O pó de pedra contribui para o aumento da massa específica e diminuição da umidade para a compactação, além de diminuir a quantidade de cimento necessária para elevação da resistência da mistura (Mishra et al., 2019).

A partir do que foi apresentado, em um contexto ambientalmente adequado e diante das potencialidades dos resíduos, a mistura de RCC e pó de pedra pode constituir uma solução alternativa que colabore com a diminuição da exploração de jazidas de solos e do uso de cimento para reforço. Portanto, essa pesquisa tem como finalidade avaliar o comportamento geotécnico de uma mistura composta por RCC e PP reforçada com cimento, bem como analisar a viabilidade da sua utilização em estruturas de pavimentos. Como parâmetro comparativo, foram analisadas misturas de solo e cimento nas mesmas condições da mistura de resíduos.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais escolhidos para compor essa pesquisa foram o resíduo de construção civil, pó de pedra, solo laterítico e o cimento CP II – Z32. O aspecto visual dos materiais é apresentado na Figura 1.



Figura 1. Aspecto visual do RCC, PP e Solo.

O resíduo de construção civil foi fornecido pela Usina Nova Obra, localizada na cidade de Arapongas, no noroeste do estado do Paraná. O material escolhido é composto principalmente por elementos de concreto como restos de componentes estruturais, resíduos de concreteiras e pedaços de paredes com grande quantidade de argamassa. De acordo com informações da usina, o RCC coletado é composto por 30 a 35% de cerâmica, sendo o restante constituído por concreto. O processamento do RCC começa com a separação manual e peneiramento grosso, para retirada de materiais contaminantes ou descartados inadequadamente. Depois, o material é levado ao britador e automaticamente separado pela granulometria. Nessa pesquisa, o RCC utilizado possui granulometria inferior a 2 mm e foi seco até a umidade higroscópica.

2.0 2.5

O pó de pedra foi cedido pela EXTRACOM Mineração e Obras Ltda, localizada na cidade de Maringá, no noroeste do estado do Paraná. Esse material é originário dos derrames basálticos da Era Paleozóica que compõem 75% da Bacia do Paraná. De modo a promover uma homogeneização adequada com o RCC e permitir parâmetros de comparação adequados, a granulometria adotada para o pó de pedra também foi inferior a 2 mm.

O solo foi coletado na cidade de Maringá, no noroeste do estado do Paraná, no campus sede da Universidade Estadual de Maringá. A partir do ensaio MCT, o solo foi classificado como laterítico argiloso e como Latossolo Vermelho Distroférrego de acordo com a classificação da Embrapa.

O cimento usado nessa pesquisa foi o CP II – Z32 da Votoran. Optou-se por esse cimento pois sua composição conta com 6% a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático. Além disso, é um material que permite boa trabalhabilidade e confere certa impermeabilidade à mistura.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

Nessa pesquisa foram avaliadas duas misturas, em que a mistura de resíduos é a principal e a de solo foi utilizada como parâmetro comparativo, sendo elas:

- S: composta por solo natural;
- RCC-PP: composta por 50% RCC e 50% PP.

A Figura 2 mostra a curva granulométrica dos materiais puros e da mistura RCC\_PP.

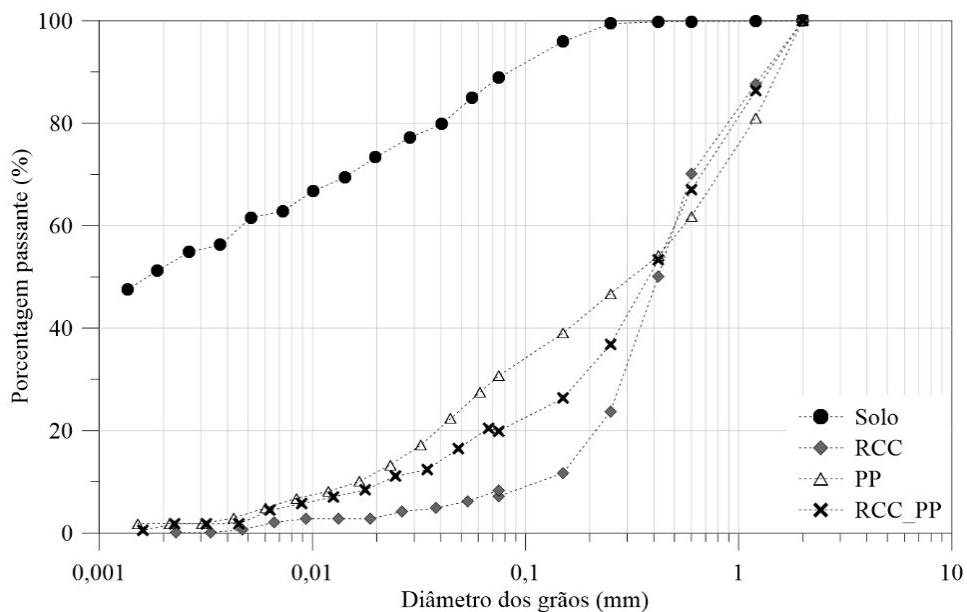


Figura 2. Curvas granulométricas dos materiais puros e da mistura RCC\_PP

Essas misturas foram analisadas com a incorporação dos seguintes teores de cimento: 0%, 4%, 6% e 8%. Todas as misturas foram preparadas em termos de massa seca. A Tabela 1 apresenta todas as misturas avaliadas e sua composição.

O ensaio de compactação foi realizado utilizando a energia normal afim de estabelecer os parâmetros de compactação, massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo, que seriam utilizados na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência. Nas curvas de compactação apresentadas na Figura 3 é possível observar que a adição de cimento eleva os valores de massa específica das misturas e diminui o teor de umidade. Quando se compara os valores médios de teor de umidade e massa específica seca máxima das misturas RCC\_PP com relação à S, há uma diminuição de 121,4% do teor de umidade ótimo e uma elevação de 24,7% da massa específica seca máxima.

A preparação das misturas para moldagem dos corpos de prova foi feita em termos de massa seca, sendo considerada a umidade higroscópica do material para fins de moldagem. Os corpos de prova tinham formato cilíndrico, com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Foram moldados utilizando o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima obtidos através das curvas de compactação. Os corpos de prova foram moldados em cinco camadas e com grau de compactação mínimo de 95%.

Tabela 1. Misturas RCC-PP e S

Mistura	Solo (%)	RCC (%)	PP (%)	Cimento (%)
RCC-PP	0	50	50	0
RCC-PP-4	0	48	48	4
RCC-PP-6	0	47	47	6
RCC-PP-8	0	46	46	8
S	100	0	0	0
S-4	96	0	0	4
S-6	94	0	0	6
S-8	92	0	0	8

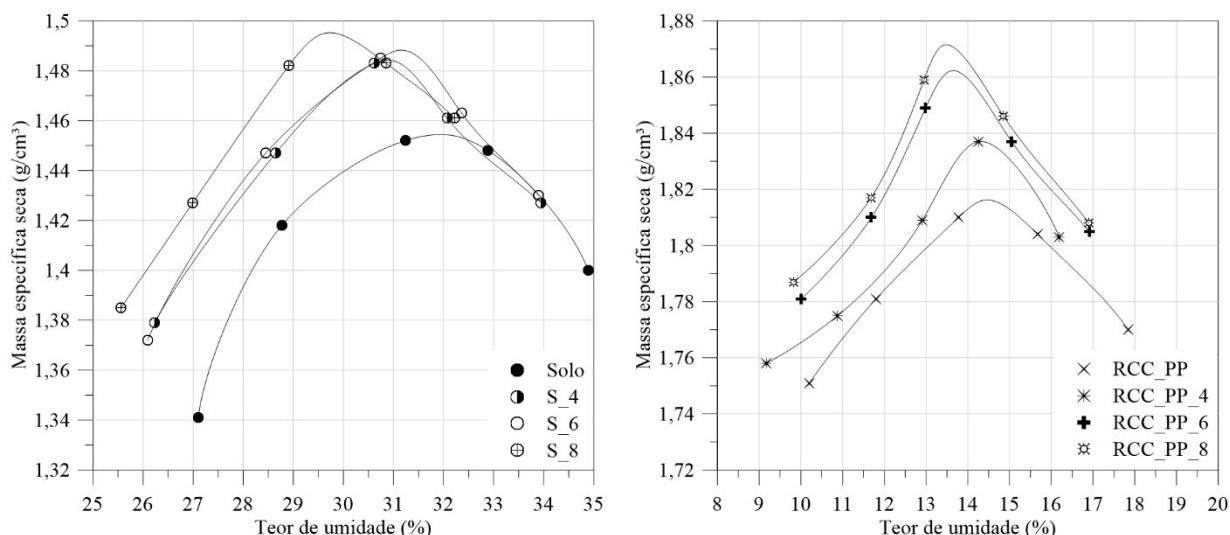


Figura 3. Curvas de compactação das misturas cimentícias de solo (esquerda) e RCC\_PP (direita)

#### 4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE PELO MÉTODO MEDINA

O ensaio de resistência à compressão não confinada foi realizado em uma prensa manual, com uma célula de carga de 20 kN e dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) com deslocamento máximo de 5 mm que foram posicionados no prato metálico da prensa, visto que o conjunto foi considerado rígido. As amostras foram ensaiadas após os tempos de cura de 7, 14, 21 e 28 dias. Para cada análise foram preparados quatro corpos de prova, que eram mantidos em uma caixa térmica em câmara úmida para evitar interferências durante o processo de cura. Os corpos de prova eram pesados e colocados em imersão 24 horas antes a ruptura, visando a saturação e diminuição dos efeitos de sucção. Antes do ensaio, os corpos de prova eram retirados da imersão, superficialmente secos e novamente pesados para verificação da absorção. As misturas sem cimento foram mantidas nas mesmas condições de conservação, entretanto a ruptura foi realizada apenas para 7 dias e os corpos de prova não ficaram em imersão.

O ensaio triaxial cíclico foi executado conforme a norma AASHTO T 307-99-UL no equipamento da marca DYNAPAVE com o objetivo de determinar o módulo de resiliência das misturas. As condições de moldagem, acondicionamento e preparo antes do ensaio foram as mesmas do ensaio de resistência. Nesse ensaio foram avaliadas apenas as misturas com teor de cimento de 6% e os resultados obtidos foram usados para a avaliação do desempenho das camadas do pavimento.

O comportamento das misturas S\_6 e RCC\_PP\_6 como camadas em estruturas de pavimentos foram verificadas pelo método MeDina, que permite o dimensionamento de um pavimento novo a partir de uma estrutura padrão. Se avaliou o emprego dessas misturas como base ou sub-base de um trecho de uma rodovia nacional, considerando as seguintes hipóteses (Figura 4):

- Hipótese 1: Subleito, sub-base e revestimento asfálticos mantidos, alterando o material da base para S\_6 e RCC\_PP\_6;

- Hipótese 2: Subleito, base e revestimento asfálticos mantidos, alterando o material da sub-base para S\_6 e RCC\_PP\_6.

Foi analisado o trecho do km 9 ao km 20 da BR-222-CE, trecho Fortaleza-Sobral, localizado no estado do Ceará. Esse trecho é considerado uma via principal do tipo Sistema Arterial Primário, com volume de tráfego de 521 veículos por dia. As informações desse trecho foram baseadas nos dados adotados por Pitangui (2019). Para a análise da BR-222-CE se considerou uma camada de revestimento asfáltico com módulo de resiliência de 4000 MPa e 50 mm de espessura, base de material granular do tipo solo brita de 150 mm, sub-base de solo areno-siltoso não laterítico de 300 mm de espessura e subleito formado por solo areno argiloso.

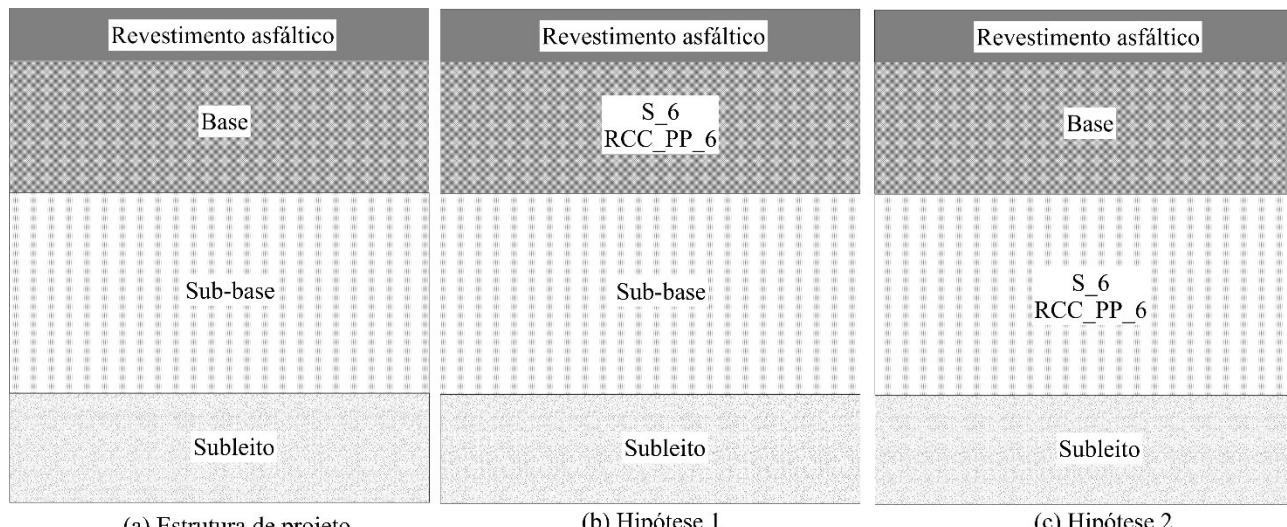


Figura 4. Estrutura de projeto (a) e hipóteses analisadas pelo método MeDina (b) e (c)

## 5 RESULTADOS

Os valores obtidos no ensaio de RCS são apresentados na Figura 5. A Figura 6 mostra esses valores normalizados, em que se trabalhou com a relação do valor de RCS de cada amostra cimentícia dividido pelo valor de RCS da amostra sem cimento.

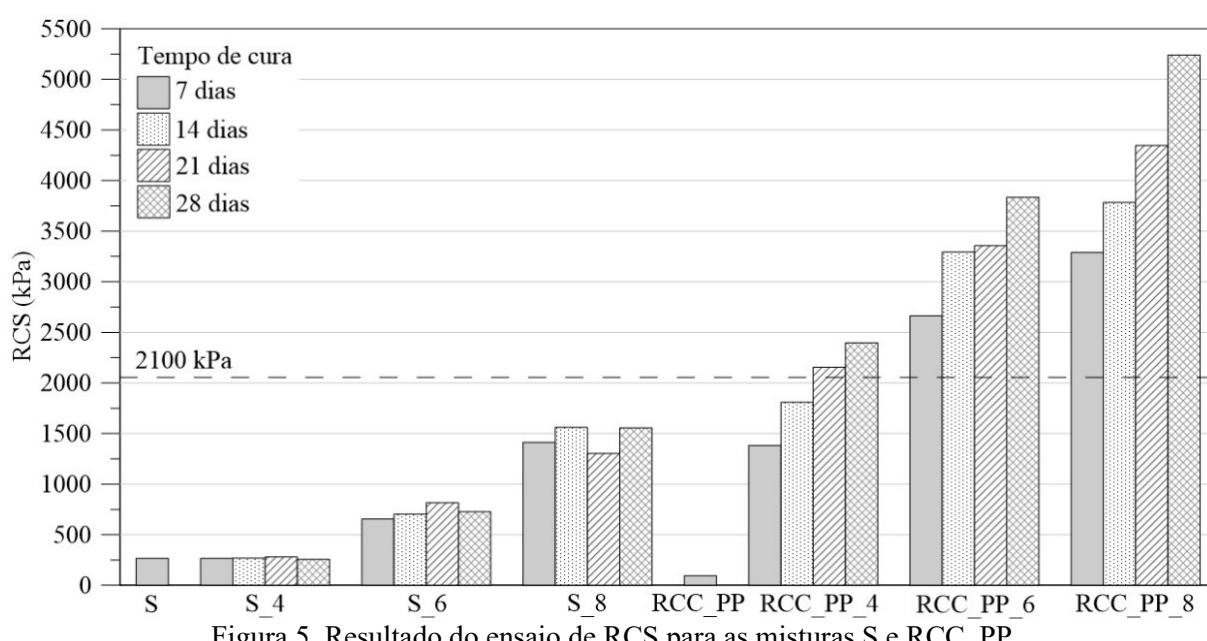


Figura 5. Resultado do ensaio de RCS para as misturas S e RCC\_PP

A incorporação de cimento colabora com o aumento da resistência à compressão em praticamente todas as misturas avaliadas. Entretanto, a adição de 4% de cimento ao solo não melhora a RCS, visto que a grande quantidade de argila presente no solo exige uma quantidade maior de cimento para o desenvolvimento da resistência, como indica Bryan (1988). Nas misturas cimentícias de solo com teores de 6% e 8% ocorre um aumento da resistência, visto que a umidade em cerca de 30% colabora com as reações de hidratação do cimento. Em contrapartida, a variação do tempo de cura não é um fator relevante no desenvolvimento da RCS nas misturas de solo com cimento, podendo ser observado tanto no gráfico dos valores de RCS quanto no de RCS normalizada.

No caso da mistura RCC\_PP, a adição de apenas 4% de cimento representou um ganho considerável de resistência quando comparada à mistura pura. O aumento dos teores de cimento refletiu na otimização da resistência, que também se elevou para maiores períodos de cura. A integração do cimento à mistura de resíduos resulta no início do processo de coesão dessa mistura arenosa, potencializando o efeito de autocimentação e permitindo que as partículas cimentícias do RCC reajam com o silicato do pó de pedra.

Quando comparada ao solo cimento, a mistura cimentícia de RCC\_PP apresenta incremento médio de RCS de 625%, 353% e 186% para os teores de 4%, 6% e 8% de cimento, respectivamente. Como a mistura de resíduos apresenta comportamento arenoso, o teor de umidade ótimo é menor e a massa específica seca máxima é maior. Se comparada ao solo cimento, haverá uma redução do índice de vazios e do fator água/cimento, resultando em um maior desenvolvimento de resistência devido ao melhor empacotamento dos grãos e melhor hidratação do cimento.

De acordo com a norma ABNT NBR 15115/2004, materiais estabilizados granulometricamente com adição de cimento devem apresentar resistência à compressão não confinada mínima de 2100 kPa após os primeiros 7 dias de cura. Dessa forma, apenas as misturas RCC\_PP com 6% e 8% de cimento atendem a essa especificação e poderiam ser usados como agregados reciclados em camadas de pavimentos.

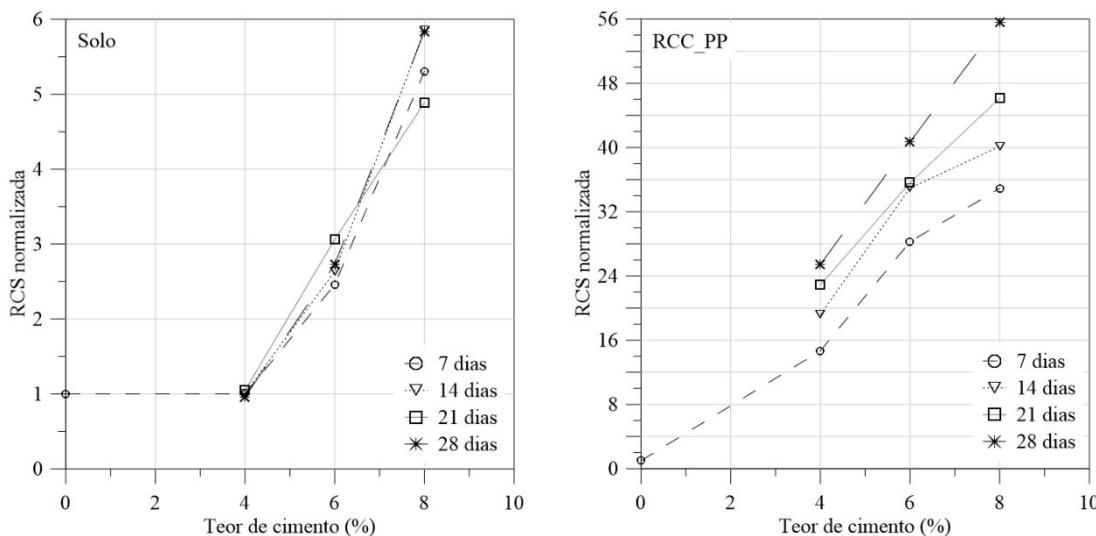


Figura 6. Valores normalizados de RCS para as misturas de S e RCC\_PP

Os valores de módulo de resiliência (MR), apresentados na Figura 7, indicam um comportamento inversamente proporcional à tensão desviatória para todas as misturas avaliadas. Os maiores valores de MR foram obtidos para uma confinante de 12,4 kPa, sendo que a mistura cimentícia de RCC\_PP apresentou melhor comportamento que o solo cimento. Apesar do melhor desempenho, o resíduo de construção civil possui uma grande quantidade de calcita em sua composição e a compactação e aplicação de carregamentos cíclicos pode acarretar a quebra de grãos do material e diminuir o valor de MR, como avaliado por Silva et al. (2021). A partir da tensão desviatória de 37,3 kPa, os valores de MR não apresentam variação significante e são semelhantes para todas as misturas avaliadas.

Após a avaliação das camadas do pavimento através do método MeDina, foram obtidos os resultados apresentados nos gráficos da Figura 8. Nas análises foram considerados os limites estabelecidos pelo software de 30% de fissuração máxima, 13 mm para o máximo afundamento de roda e deflexão máxima de 0,01 mm ao final do período de projeto (Franco e Motta, 2020).

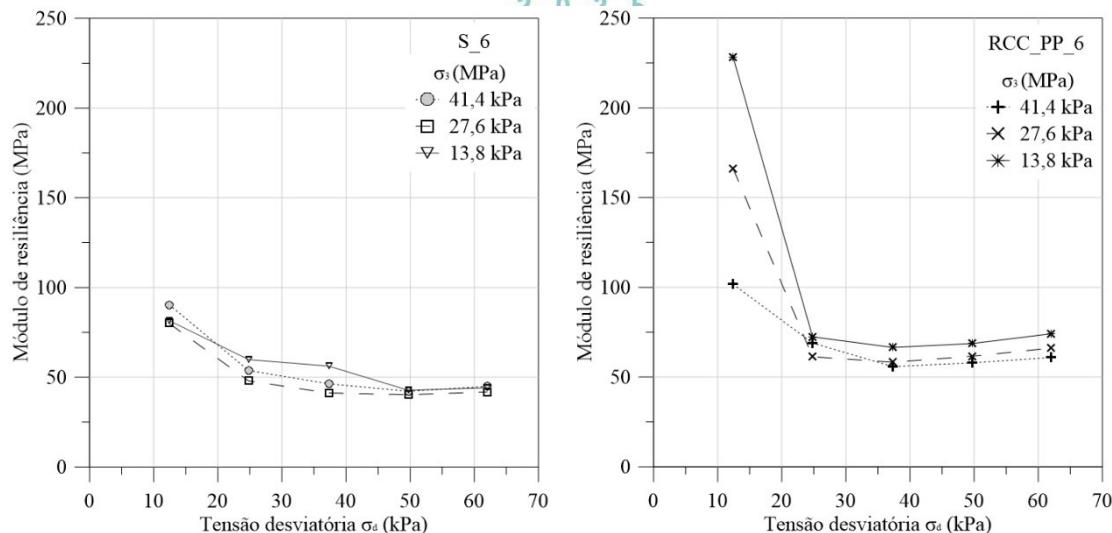


Figura 7. Valores de módulo de resiliência para as misturas de S\_6 e RCC\_PP\_6

A BR-222-CE possui volume de tráfego diário de 521 veículos por dia. Na hipótese 1, a camada de base foi substituída por uma camada de S\_6 e RCC\_PP\_6 com 25 cm de espessura. As duas misturas ultrapassam a fissuração limite, em que S\_6 chega aos 30 % aos 70 meses e RCC\_PP\_6 aos 116 meses, praticamente atendendo o período de projeto. O afundamento de roda se mostrou menor que o de material de projeto e dentro do limite de 13 mm. Para a hipótese 2, em que as misturas são utilizadas na camada de sub-base, os materiais apresentaram comportamento adequado dentro dos limites estabelecidos pelo programa, mantendo ainda comportamento melhor que o material de projeto para o afundamento de roda.

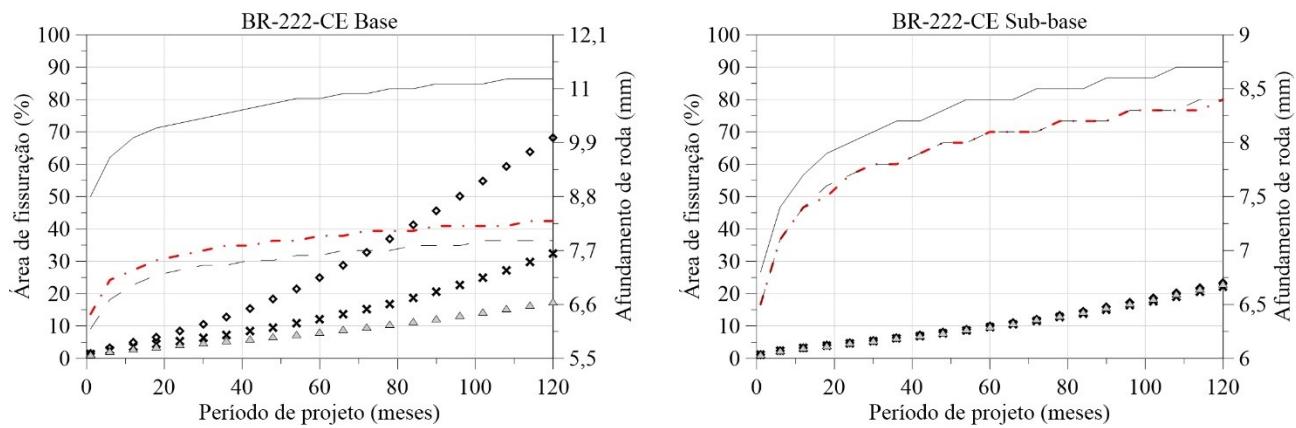


Figura 8. Afundamento de roda e área de fissuração para as misturas de S\_6 e RCC\_PP\_6 no trecho da BR-222-CE

Entretanto, para as duas hipóteses, a deflexão do pavimento foi superior a 0,01 mm tanto para o material original quanto para as misturas cimentícias de solo e resíduos. Isso indica que o volume de tráfego do trecho é considerado alto para o pavimento e seria necessário a substituição do material das camadas ou o aumento do número de camadas da estrutura do pavimento.

## 6 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foram avaliadas as propriedades geotécnicas das misturas de RCC e pó de pedra e de solo laterítico reforçadas com cimento e a possibilidade de aplicação dessas misturas em camadas de pavimentos. Os resultados indicaram que as misturas cimentícias de RCC\_PP apresentam desenvolvimento de resistência superior em relação às misturas de solo cimento, sendo que apenas as misturas RCC\_PP\_6 e



RCC\_PP\_8 apresentam a resistência mínima determinada por norma para uso do material em pavimento aos 7 dias de cura.

A mistura RCC\_PP\_6 apresentou valores de módulo de resiliência mais altos que S\_6 para os menores valores de tensão desviatória. Porém, o aumento da tensão desviatória diminui os valores de MR em ambas misturas, convergindo para valores próximos. Outro ponto destacado é a possibilidade de quebra dos grãos do RCC, o que ocasionaria uma diminuição nos valores do módulo de resiliência, como já analisado em outros trabalhos.

Por fim, a possibilidade de se utilizar as misturas estudadas como base ou sub-base em dois trechos de pavimentos rodoviários foi analisada e os resultados indicaram que os requisitos de fissuração e afundamento de rodas são obedecidos apenas como sub-base do trecho da BR-222-CE, que tem baixo volume de tráfego. Entretanto, a estrutura rodoviária estudada indica uma deflexão de pavimento superior a 0,01 mm, mostrando que os materiais de projeto e as misturas alternativas desse trabalho não satisfazem os requisitos mínimos para utilização na estrutura de pavimento proposta.

## AGRADECIMENTOS

À UEM por permitir o uso de suas instalações e laboratórios para o desenvolvimento dessa pesquisa. Aos técnicos pela colaboração na realização do ensaios. E à CAPES pelo financiamento proporcionado que colaborou para os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of the State Highway Transportation Officials. (2012). *AASHTO T 307-99-UL: Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. Washington, D.C.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 15115. *Aggregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos*. Rio de Janeiro.
- ABREMA (2024). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. Associação Brasileira de Empresas de Resíduos e Meio Ambiente. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf>.
- Bryan, A. J. (1988). Criteria for the Suitability of Soil for Cement Stabilization. *Building & Environment* 23 (4): 309–319. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90037-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90037-6).
- Franco, F. A. C. P. Motta, L. M. G. (2020). *MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de Utilização*. Versão 1.1.4. Rio de Janeiro.
- Hidalgo, C. Carvajal, G. Muñoz, F. (2019). Laboratory evaluation of finely milled brick debris as soil stabilizer. *Sustainability*, 11, 967.
- Lukiantchuki, J. A. Oliveira, J. R. M. S. Almeida, M. S. S. Silva, T. B. Guideli, L. C. (2019). *Construction and demolition waste (CDW) used in reinforced soil mixtures for pavement applications*. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE). ISBN 978-9935-9436-1-3.
- Mishra, S. Sachdeva, S. N. Manocha, R. (2019). Subgrade soil stabilization using stone dust and coarse aggregate: a cost-effective approach. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5:20.
- Pitanguí, L. C. (2019). *Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico empírico MeDiNa*. Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília, Brasília.
- Reis, J. H. C. Silva, S. S. Ildefonso, J. S. Yshiba, J. K. (2015). Evaluation of soil, cement and construction and demolition waste (CDW) mixtures for use in road pavement base and sub-base applications. *Key Engineering Materials*, vol. 634. p. 247-255.
- Silva, T. B., Correia, N. S., Kuhn, V. O. (2021). Effect of Compaction Energy on Grain Breakage of CDW, Local Soil and Soil-CDW Mixtures. *International Journal of Geotechnical Engineering* 16 (2): 165–175. <https://doi.org/10.1080/19386362.2021.1932311>