



AValiação Mecânica do uso de Resíduos de Processo de Britagem de Pedreira em Camada de Reforço de Subleito de Pavimentos Asfálticos

Mechanical evaluation of the use of quarry crushing waste in the subgrade reinforcement layer of asphalt pavement

Marina Donato

Universidade Federal de São João del-Rei | Ouro Branco, Minas Gerais | donato@ufsj.edu.br

Fabiani Maria Dalla Rosa Barbosa

Universidade Federal de Mato Grosso | Várzea Grande, Mato Grosso | fabiani.barbosa@ufmt.br

Bruno Guida Gouveia

Universidade do Estado do Rio de Janeiro | Rio de Janeiro, Rio de Janeiro | bruno.gouveia@eng.uerj.br

João Pedro de Oliveira Alves Neto

Universidade Federal de Mato Grosso | Várzea Grande, Mato Grosso | joaopedrodeoliveiraalvesneto@gmail.com

Resumo

Este estudo avaliou o melhoramento mecânico proporcionado pela adição de resíduos de britagem de pedreira calcária combinados em solos saprolíticos na camada de reforço de subleito de pavimentos asfálticos. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica, analisando o solo saprolítico (classificado como A-2-4 pela TRB) e suas misturas com 20%, 35% e 50% de resíduos, denominadas M1, M2 e M3. Os resultados indicaram que, para uma mesma solicitação, o Cenário 1, com reforço contendo 20% de resíduo (I.S.C. = 17%), permitiu uma espessura total de 37 cm de pavimento, sendo a solução mais eficiente. Já no Cenário 3, com reforço contendo 50% de resíduo (I.S.C. = 6%), foi necessária uma espessura de 56 cm de pavimento, impactando negativamente a viabilidade técnica do projeto. Conclui-se que até 20% de resíduo pode ser adotado como solução sustentável e técnica viável para camadas de reforço.

Palavras-chave: Resíduos de britagem; Reforço de subleito; Pavimentação; CBR.

ABSTRACT

This study evaluated the mechanical improvement provided by the addition of limestone quarry crushing waste combined with saprolitic soils in the subgrade reinforcement layer of asphalt pavements. Physical and mechanical characterization tests were carried out, analyzing the saprolitic soil (classified as A-2-4 by TRB method) and its mixtures with 20%, 35% and 50% waste, called M1, M2 and M3. The results indicated that, for the same demand, Scenario 1, with reinforcement containing 20% waste (I.S.C. = 17%), allowed a total pavement thickness of 37 cm, making it the most efficient solution. In Scenario 3, with reinforcement containing 50% waste (I.S.C. = 6%), a thickness of 56 cm of pavement was required, negatively impacting the technical feasibility of the project. It can be concluded that up to 20% waste can be adopted as a sustainable and technically viable solution for reinforcement layers.

Keywords: Crushing waste; Subgrade reinforcement; Pavements; CBR.

1 INTRODUÇÃO

O melhoramento das camadas granulares, como sub-base e reforço de subleito, visa melhorar a resistência e expansibilidade dos solos, atendendo às exigências de pavimentação. Esse aprimoramento é feito por técnicas físicas, químicas ou físico-químicas, com o objetivo de otimizar o uso de recursos locais (Maragon, 1992; Macêdo, 2004). A construção de pavimentos asfálticos exige materiais com características específicas, principalmente nas camadas de sub-base, essenciais para a durabilidade da estrutura. Porém, a escassez de materiais adequados leva à busca por alternativas sustentáveis, como o uso de resíduos de britagem, que podem reduzir os impactos ambientais (Fernandes *et al.*, 2016). Este trabalho avalia a viabilidade técnica do uso de resíduos de britagem calcária em camadas de reforço de subleito, combinados com solos saprolíticos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em três cenários, mantendo constantes os materiais de revestimento asfáltico, base, sub-base e subleito, variando apenas o material de reforço de subleito. O solo para o subleito foi retirado do Campus da UFMT/CUVG, e o reforço foi feito com resíduo de britagem da pedreira Caieira Nossa Senhora da Guia. Foram testadas três misturas com diferentes porcentagens de resíduo (20%, 35% e 50%), denominadas M1, M2 e M3. Os materiais das camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base foram definidos com base em dados da SINFRA-MT (2020).

2.1 EXPOSIÇÃO DOS CENÁRIOS

Elaborou-se três cenários (Tabela 1), distinguindo-se principalmente pela variação dos materiais utilizados na camada de reforço de subleito. No total, testou-se três misturas com diferentes porcentagens de adição de resíduos provenientes da britagem.

Tabela 1 - Características dos materiais que compuseram os pavimentos rodoviários.

Cenários	Revestimento	Imprimação	Base	Sub-base	RF	Subleito
Cenário 1	Concreto asfáltico – CAP 60/85 (SINFRA, 2019)	Imprimação com emulsão asfáltica (SINFRA, 2019)	BGS* (SINFRA, 2019)	Solo (SINFRA, 2019)	M 1	Solo 1
Cenário 2	Concreto asfáltico – CAP 60/85 (SINFRA, 2019)	Imprimação com emulsão asfáltica (SINFRA, 2019)	BGS* (SINFRA, 2019)	Solo (SINFRA, 2019)	M 2	Solo 1
Cenário 3	Concreto asfáltico – CAP 60/85 (SINFRA, 2019)	Imprimação com emulsão asfáltica (SINFRA, 2019)	BGS* (SINFRA, 2019)	Solo (SINFRA, 2019)	M 3	Solo 1

Nota: BGS: Brita Graduada Simples; RF: Reforço de Subleito.

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS MATERIAIS DAS CAMADAS DE SUBLEITO E SUB-BASE

A caracterização do “solo 1” foi realizada de acordo com as normas brasileiras vigentes. Foram realizados ensaios de sedimentação, segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018), para obtenção da curva granulométrica e identificação de concreções e caráter laterítico, limites de Atterberg: limite de liquidez, NBR 6459 (ABNT, 2017a) e limite de plasticidade, NBR 7180 (ABNT, 2025), para cálculo do índice de plasticidade; classificação do solo conforme TRB e distinção de solo laterítico pelo Método das Pastilhas (Fortes, Merighi e Zuppolini Neto, 2002); e ensaios de compactação, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2020), em energias normal e intermediária, com umidade higroscópica determinada por frigideira (2,0 % e 2,5 %, respectivamente), amostra preparada 24 h antes em cilindro grande (devido à retenção na peneira de 4,8 mm) e aferição da umidade por estufa durante o ensaio.

Ainda, realizou-se ensaios nas amostras do resíduo “bica corrida”, originário de Cuiabá-MT, com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas do Solo 1. Para isso, foram testadas diferentes dosagens de resíduo de britagem, com percentuais de 20%, 35% e 50%. Os ensaios tiveram como objetivo avaliar a influência dessas proporções de resíduo nas propriedades mecânicas das misturas, conforme os requisitos do método empírico estabelecido pelo DNIT (2006). Para os ensaios de CBR (*California Bearing Ratio*), foi seguida a NBR 9895 (ABNT, 2017b), com as amostras compactadas utilizando a energia normal.

2.3 DADOS DE PROJETO DE DIMENSIONAMENTO

A taxa de carregamento relativa ao número "N" foi estabelecida em 5×10^6 , um valor hipotético para avaliar o impacto do reforço do subleito no comportamento estrutural do pavimento. O dimensionamento considerou uma vida útil de 10 anos, garantindo que o pavimento dure esse período sem necessidade de substituição das camadas. Foi adotada uma estrada de pista simples, com largura de plataforma de 3,6 m e faixa de 7,2 m, sem acostamento. Essa especificação tem caráter acadêmico e não representa um projeto real.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MATERIAL DA CAMADA DE SUBLEITO – SOLO 1 E RESÍDUO DE PEDREIRA “BICA CORRIDA”

Os ensaios para determinação do limite de liquidez e do limite de plasticidade foram realizados conforme as normas NBR 6459 (ABNT, 2017a) e NBR 7180 (ABNT, 2025), respectivamente. A partir desses ensaios, foi calculado o índice de plasticidade do solo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

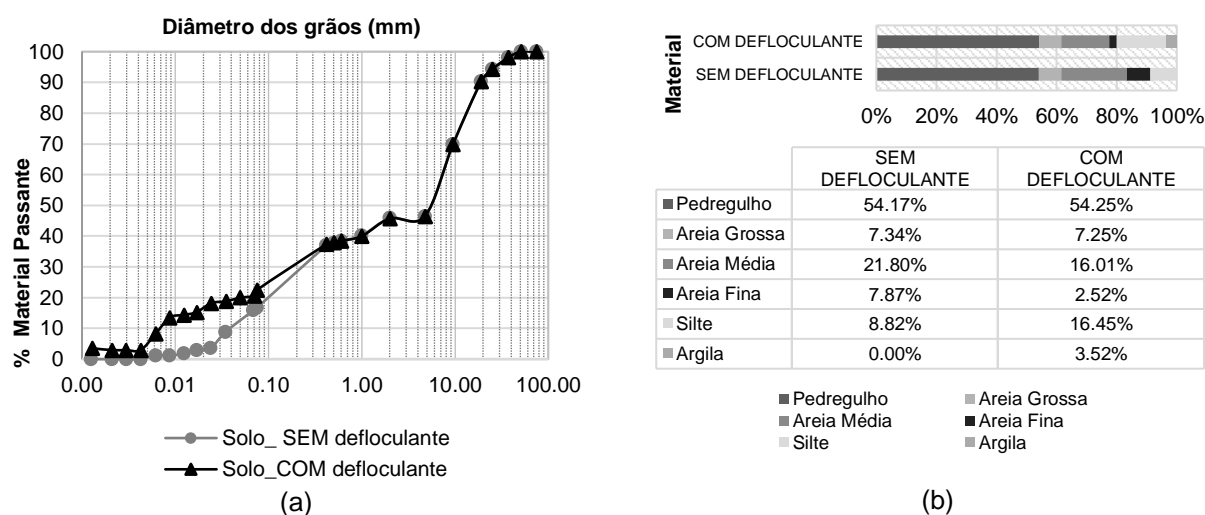
Tabela 2 – Índices de Atterberg dos materiais.

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo 1	26	18	8
Resíduo	23	19	4

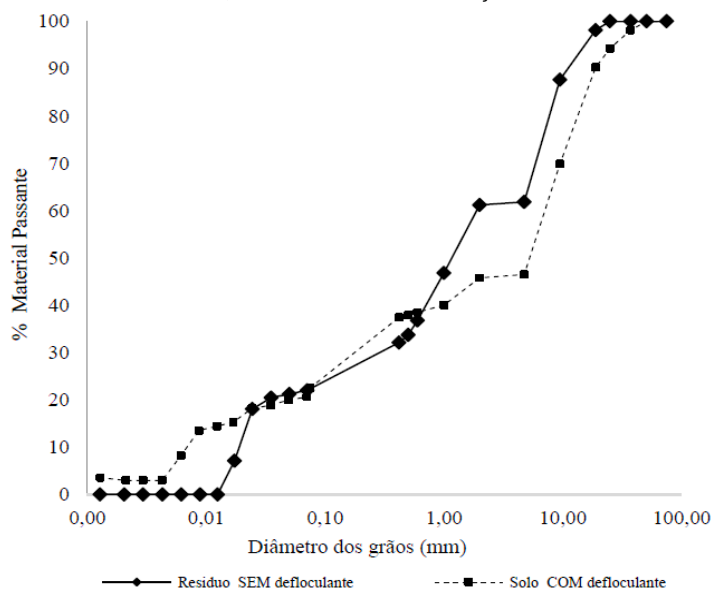
Nota: LL: Limite de Liquidez; LP: Limite de Plasticidade; IP: Índice de Plasticidade.

De acordo com a classificação do *Transportation Research Board* (TRB), o solo foi categorizado como A-2-4, com base em sua distribuição granulométrica, considerando a porcentagem de partículas que passam pelas peneiras nº 200 e nº 40. Conforme as diretrizes do DNIT (2006), esse grupo engloba solos com até 35% de material passante na peneira nº 200 e uma menor quantidade retida na peneira nº 40. Em relação, a análise granulométrica seguiu a NBR 7181 (ABNT, 2018), empregando peneiramento e sedimentação com hexametáfosfato de sódio como defloculante e agitação mecânica para dispersão das partículas finas, e, dada a variabilidade dos solos saprolíticos, também realizou-se o ensaio sem defloculante e sem dispersão mecânica, conforme recomendado por Burgos e Conciani (2023), evidenciando curvas granulométricas semelhantes que confirmam a baixa resistência à dispersão e o caráter de material saprolítico jovem.

Figura 1: granulometria: a) curva granulométrica do solo, com e sem defloculante; e b) frações de partículas que atravessaram as peneiras.



A adoção de ambas as metodologias permitiu não apenas a validação dos resultados obtidos segundo a norma técnica, mas também a caracterização mais acurada da estrutura física natural do solo, aspecto relevante para a avaliação de seu desempenho em aplicações geotécnicas, como camadas de reforço de subleito. Em relação à "bica corrida", 61% do material passa pela peneira de 2,0 mm, evidenciando uma quantidade considerável de finos, conforme a NBR 6502 (ABNT, 2022).

Figura 2: Curvas granulométricas do resíduo, com ensaio de sedimentação realizado com o sem o uso de defloculante.

3.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO MATERIAL DO SOLO 1

Após a ruptura dos corpos de prova do solo *in natura* ("solo 1"), os dados obtidos por meio da prensa possibilitaram a análise dos valores de Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.) e da expansão do material. Os resultados detalhados encontram-se na Tabela 3. Assim, para a camada de subleito, adotou-se um I.S.C. de 11%, permitindo avaliar o impacto do dimensionamento nas demais camadas.

Tabela 3 - CBR e expansão do Solo 1 para camada de subleito.

Amostra	Material	Tipo do material	CBR (%)	Expansão (%)
1	Solo 1	A-2-4	11	0,2

3.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE SOLOS MELHORADOS COM RESÍDUOS DE PROCESSO DE BRITAGEM DE PEDREIRA

Foram realizados ensaios de CBR utilizando diferentes composições do solo 1, incluindo misturas com 20%, 35% e 50% de resíduo. Os resultados dos valores de expansão e I.S.C. estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 – CBR e expansão das amostras.

Mistura	Material	Expansão (%)	CBR (%)
Solo 1 com 20% de resíduo	M1	0,20	17
Solo 1 com 35% de resíduo	M2	0,08	11
Solo 1 com 50% de resíduo	M3	0,10	6

A resistência mais elevada do material M1 pode ser atribuída à proporção equilibrada entre o solo e o resíduo, que favorece uma melhor compactação e maior capacidade de suporte, além da possível contribuição das propriedades físicas e granulométricas do resíduo de "bica corrida". Por outro lado, o material com o menor valor de I.S.C. é o Solo 1 com 50% de resíduo (M3), apresentando apenas 6%, sugere uma resistência relativamente baixa, o que pode ser preocupante para sua utilização em camadas de reforço de subleito, uma vez que o excesso de resíduo pode comprometer a coesão e a estabilidade do material.

3.4 DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS – MÉTODO EMPÍRICO

Os materiais selecionados foram avaliados conforme as especificações do DNIT (2006). Os materiais M1, M2 e M3, embora não atendam aos critérios para as camadas de base e sub-base, foram avaliados para o reforço de subleito, uma vez que suas características podem ser aproveitadas dentro dos limites do Manual de Pavimentação do DNIT. Ressalta-se que M1 e M2 não atende aos requisitos mínimos, mesmo assim, a

pesquisa prosseguiu com a análise desses materiais para avaliar seu comportamento mecânico na camada de reforço do subleito (Tabela 5).

Tabela 5 – Dados das camadas do pavimento – cenário 1, 2 e 3.

Camada	Mistura	Material	CBR (%)	Expansão (%)	Coefficiente Estrutural
Cenário 1					
CBUQ	CAP 60/85	-	-	-	2,0
Imprimação	CM - 30	-	-	-	-
Base	-	BGS	80	-	1,0
Sub-base	-	-	20	-	1,0
Reforço de Subleito	Solo 1 com 20% de resíduo	M1	17	0,10	1,0
Subleito	Solo	Solo 1	11	0,2	-
Cenário 2					
CBUQ	CAP 60/85	-	-	-	2,0
Imprimação	CM - 30	-	-	-	-
Base	-	BGS	80	-	1,0
Sub-base	-	-	20	-	1,0
Reforço de Subleito	Solo 1 com 35% de resíduo	M2	11	0,08	1,0
Subleito	Solo	Solo 1	11	0,2	-
Cenário 3					
CBUQ	CAP 60/85	-	-	-	2,0
Imprimação	CM - 30	-	-	-	-
Base	-	BGS	80	-	1,0
Sub-base	-	-	20	-	1,0
Reforço de Subleito	Solo 1 com 50% de resíduo	M3	6	0,10	1,0
Subleito	Solo	Solo 1	11	0,2	-

A Tabela 6 apresenta as espessuras totais projetadas de cada cenário, com base nos materiais propostos, e os valores de CBR desses materiais.

Tabela 6 – Espessuras de projeto para cada camada – cenários 1, 2 e 3 (em centímetros).

Cenários	Espessura total do pavimento	Espessuras				
		Revestimento	Base	Sub-base	RF	Subleito
1	37	5	17	10	10	∞
2	39	5	17	12	10	∞
3	56	5	17	29	10	∞

Nota: RF: Reforço de subleito.

No Cenário 1, com a mistura M1 (20% de resíduo), obteve-se o maior I.S.C. (17%), permitindo a adoção de uma sub-base de 10 cm e uma espessura total de 37 cm, resultando na solução mais eficiente em termos de materiais e custo. No Cenário 2, com a mistura M2 (35% de resíduo), o I.S.C. caiu para 11%, exigindo um aumento de 2 cm na sub-base e uma espessura total de 39 cm, o que implica maior consumo de materiais e custos adicionais. O Cenário 3, com a mistura M3 (50% de resíduo), apresentou o pior desempenho (I.S.C. de 6%), exigindo uma sub-base de 29 cm e uma espessura total de 56 cm, o que eleva significativamente os custos e compromete a viabilidade técnica e econômica do projeto.

Os resultados deste estudo corroboram evidências de que a incorporação de resíduos em pavimentação é viável: Oda et al. (2024) demonstraram que rejeito de mineração em misturas solo-cimento para base e sub-base reduz consumo de recursos naturais e de cimento, mantendo desempenho mecânico conforme normas, Andalicio (2020), em trecho experimental da BR-040, mostrou que altos teores de resíduo podem comprometer a resistência estrutural, exigindo dosagem criteriosa, e Brasileiro e Matos (2015) evidenciaram benefícios ambientais e técnicos na aplicação de RCD em pavimentos. Nossa pesquisa reforça essas conclusões ao indicar que 20 % de resíduo de britagem calcária oferece o melhor equilíbrio entre desempenho técnico e sustentabilidade.

4 CONCLUSÃO

A pesquisa demonstrou que a adição adequada de resíduos pode melhorar solos para a construção de pavimentos. A mistura com 20% de resíduo apresentou a melhor relação entre resistência mecânica e consumo de materiais, permitindo a redução da espessura da sub-base sem comprometer a estrutura do pavimento. Por outro lado, teores maiores de resíduo (35% e 50%) reduziram a resistência do reforço de subleito, exigindo espessuras adicionais e aumentando o consumo de insumos. Os resultados destacam a importância de estudos para determinar a dosagem ideal de resíduos, equilibrando desempenho, sustentabilidade e viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT: 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT: 2017b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT: 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT: 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e rochas — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT: 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo — Determinação do índice de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT: 2025.
- ANDALICIO, A. F. **Proposta de pavimento flexível com a utilização de resíduos de mineração – execução e análise de um trecho experimental**. Dissertação de Mestrado—Ouro Preto - MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.
- BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, jun. 2015.
- BURGOS, P. C.; CONCIANI, W. Índices físicos, textura, consistência e classificação de solos. In: **Solos não saturados no contexto geotécnico**. p. 265–294. São Paulo, SP, Brazil: ABMS, 2023.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3ª edição - Publicação IPR - 719. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ. 2006.
- FERNANDES, F. C.; DE QUEIROZ, F. L.; DE FRANÇA, F. A. N. Variabilidade das propriedades geotécnicas do resíduo de britagem de rocha calcária e sua utilização em obras rodoviárias. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. p. 1-8. 2016.
- FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V.; ZUPPOLINI NETO, A. Método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, Lisboa. **Anais do Congresso Rodoviário Português**, 2002.
- MACÊDO, M.M. **Solos modificados com cimento - efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife - PE. 2004.
- MARANGON, M. **Utilização de solo-cimento em uma solução alternativa de estrutura de arrimo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio. Rio de Janeiro - RJ. 1992.
- ODA, S. et al. Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 29, n. 2, 2024.
- SINFRA - Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística. **Anexo I – atos preparatórios – termo de referência**. 2020. Disponível em: <https://www.sinfra.mt.gov.br/documents/363190/15277376/02+-+ANEXO+I+-+ATOS+PREPARATORIOS+-+27.07.20.pdf/00923238-fbca-3f74-83b5-c51b1ecb63ab>. Acesso em: 08 de janeiro 2025.