



Projeto e análise mecanicista de pavimentos de asfalto com reforço de sub-base utilizando o software AEMC

Design and mechanic analysis of asphalt pavements with subgrade reinforced using the AEMC software

Pablo de Mello¹, Gabriel Bueno Brandão Simões², Gustavo de Miranda Saleme Gidrão³

RESUMO

Este projeto apresenta uma interessante metodologia para a utilização e dimensionamento de camadas de pavimentos asfálticos que utilizem o RCC como agregado graúdo e/ou camada de infraestrutura. Neste contexto, uma análise mecânica do material utilizado o RCC como reforço de subleito em pavimentos asfálticos de estradas. Neste sentido, o estudo promoveu o ensaio de índice de suporte Califórnia (CBR) da brita reciclada, e posteriormente realizou-se o dimensionamento empírico utilizando o método DNIT e avaliação estrutural mecanicista utilizando o MeDiNa AEMC. Os resultados de tensões, deformações e deslocamentos revelam que o material pode substituir parcialmente a brita granulada simples (BGS) como material de sub-base, contribuindo positivamente para o desempenho estrutural da infraestrutura rodoviária.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo da Construção Civil, RCC

ABSTRACT

This project presents an interesting methodology for the use and design of asphalt sidewalk layers using RCC as a coarse aggregate and/or infrastructure layer. In this context, a mechanical analysis of the material used as subgrade reinforcement in asphalt road sidewalks. To this end, the study carried out the California Bearing Ratio (CBR) test on recycled gravel, followed by empirical sizing using the DNIT method and mechanistic structural evaluation using the MeDiNa AEMC. The results of stresses, strains and displacements show that the material can partially replace simple granulated gravel (SGB) as a sub-base material, making a positive contribution to the structural performance of road infrastructure.

KEYWORDS: Construction and Demolition Waste, CDW

INTRODUÇÃO

A construção civil é uma indústria com importância estratégica no Brasil, no entanto é uma grande geradora de resíduos, denominamos, como Resíduos Sólidos da Construção Civil (RCC). Segundo MANFRINATO (2018), a geração de RCC continua crescendo devido ao desperdício observado na execução de empreendimentos sejam das esferas pública ou privada, gerando problemas quando estes resíduos são dispostos incorretamente. Assim, sendo este um problema ambiental para a sociedade. Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2017), os resíduos da construção civil também possibilitam uma economia nos custos da obra, embora este material tenha uma maior variabilidade.

Assim, BEIJA (2014) destaca que os agregados reciclados atendem as características necessárias para sua utilização em vias com maior fluxo de veículos, pela sua pouca deformabilidade, a qual garante mais resistência mecânica. A autora SANTOS (2015), conjuntamente afirma a possibilidade do uso do RCC no âmbito rodoviário, graças

¹ Bolsista do CNPQ. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail: pablomello@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 2971040349767373.

² Graduado em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail: gidrao@professores.utfpr.edu.br. ID Lattes: .

³ Docente no Curso de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail gidrao@utfpr.edu.br. ID Lattes: 5358252672517976.

a sua viabilidade econômica e técnica, pois o mesmo demonstrou capacidade em atuar até em camadas mais nobres do pavimento.

Desta forma, de acordo com o contexto apresentado, o agregado reciclado apresenta uma possível utilização, e sobretudo, os desenvolvimentos científicos vem apresentando grande enfoque nas propriedades físico-mecânicas destes materiais. Assim o presente trabalho avança no dimensionamento estrutural de uma infraestrutura de pavimento asfáltico com baixas solicitações, utilizando como material construtivo de reforço de sub-base o RCC. Para tanto, se utilizará o método empírico de dimensionamento preconizado pelo DNIT (2006) e posterior análise de deslocamentos utilizando o software MeDiNa AEMC (DNIT, 2020).

METODOLOGIA

AGREGADOS RECICLADOS

O agregado fora obtido por meio da coleta na Usina de Reciclagem de Entulhos de Guarapuava PR. O material é classificado como ARM segundo a ABNT NBR 15115 (2004). Após a coleta, fez-se o ensaio mecânico do CBR, no laboratório de mecânica dos solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, conforme procedimento descrito na Figura 1. O ensaio CBR foi realizado em uma prensa Marshall, com capacidade de 5000 kgf, automatizada, da marca SoloTest.

Figura 1 – Ensaio mecânico do CBR



Fonte: Autoria própria (2023)

O ensaio do agregado foi realizado em 5 corpos de prova Marshall, com umidade e temperatura ambiente. O valor do CBR foi calculado seguindo a Equação 1, conforme a ABNT NBR 9895. Foram aplicados 55 golpes em 5 camadas dos corpos de prova, representando a energia de compactação modificada.

$$CBR = \frac{\textit{pressão calculada ou corrigida}}{\textit{pressão padrão}} \quad (1)$$

DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL UTILIZANDO O MÉTODO EMPÍRICO

Para a análise, o valor anual de tráfego utilizado foi compreendido como constante de $N = 10^6$, sendo embasado nas prescrições da ABNT NBR 15115 (2004), a qual salienta



o uso do RCC em pavimentos se resume a vias urbanas de baixo tráfego. Contudo, como uma maneira de concepção executiva, adotou-se 5 cm de espessura de concreto betuminoso. Além do RCC utilizado na sub-base, os demais materiais empregados nas camadas do pavimento, Revestimento de Concreto Asfáltico Betuminoso RJ CAP 50/70, Base de brita granulada simples (BGS) com CBR de 80 %, Solo natural com CBR variável de acordo com o cenário da região de Guarapuava – PR.

Para fins de nomenclatura, as alturas totais e espessuras das camadas do pavimento são expressas conforme as siglas representadas: R é a espessura da camada de revestimento (cm), B é a espessura da camada de base (cm), h_{20} é a espessura da camada de sub-base (cm), H_{20} é a espessura até a sub-base (cm), H_n é a espessura até o subleito (cm).

Por fim, para obter as espessuras de base (B) e sub-base (H_{20}), utilizam-se das inequações a seguir, representadas pelas Equações 2 e 3 segundo (DNIT, 2006).

$$R * K_r + B * K_b \geq H_{20} \quad (2)$$

$$R * K_r + B * K_b + h_{20} * K_s \geq H_n \quad (3)$$

Os coeficientes de equivalência estrutural utilizados foram: K_r igual à 2,0; K_b de 1,0; K_s de 1,0. Finalmente, a espessura total para se proteger uma camada de determinado CBR é determinada conforme a Equação 5:

$$H_t = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad (4)$$

Para esta etapa, se objetivou realizar uma análise paramétrica, mantendo as espessuras de base e revestimento constantes, enquanto o CBR do solo natural variou de 2% a 15% gerando espessuras variáveis de RCC.

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DOS DESLOCAMENTOS

Posteriormente, visando a verificação mecânica, realizaram-se simulações de esforços mecânicos no pavimento com os agregados convencionais e os agregados reciclados. Para esta etapa, utilizou-se o Software AEMC do Método de dimensionamento nacional, MeDiNa (MEDINA, DNIT, 2020). Para esta etapa, é necessário a entrada dos parâmetros elásticos do material, i.e., Módulo de Elasticidade do material em MPa, e coeficiente de Poisson.

O módulo de elasticidade é obtido, por simplificação, por meio de correlação com o ensaio CBR, similarmente realizado por BEIJA *et al* (2020), utilizando a deformação gerada pela tensão do pistão, e que se relaciona com a respectiva tensão, considerando a Lei de Hooke (Eq. 5):

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (5)$$

Os valores de massa específica dos materiais usuais (i.e., Asfalto e BGS) foram tomados como os característicos indicados no AEMC MeDiNa, enquanto segundo Suda (2021), a massa específica encontrada para o agregado reciclado foi de 2,040 g/cm³.



Tabela 1 – Materiais utilizados no pavimento

Material	E (MPa)	Coefficiente de Poisson	Massa Específica (g/cm ³)
RJ CAP 50/70	4500	0,30	2,400
Brita Graduada - Gnaisse C7	300	0,35	2,244
Brita 1 reciclada - RCC	187	0,35	2,040

Fonte – Autoria própria (2023)

Após o cálculo de deslocamentos, tensões e deformações, faz-se a avaliação de tensões e deflexões admissíveis no pavimento. Para esta etapa, foi utilizado o eixo duplo padrão, com carga igual à 8,2 ton, pressão dos pneus de 0,56 MPa, área de 366,07 cm² e de raio de 10,79 cm, conforme a carga apresentada no AEMC MeDiNa.

As verificações de tensão admissível nas camadas, bem como o deslocamento elástico admissível foram realizadas conforme as Equações 6 e 7, com σ_{adm} sendo a tensão admissível, D_{adm} sendo a deflexão elástica admissível, MEDINA e MOTTA (2005):

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006E}{1 + 0,7\log N} \quad (6)$$

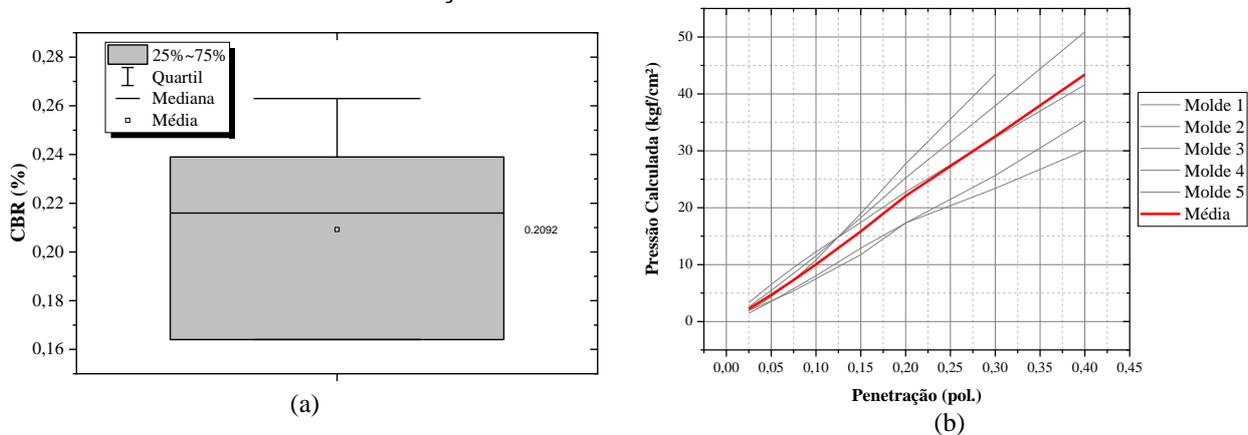
$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176\log N \quad (7)$$

Em que N é o número de repetições, no caso deste artigo N = 1E+6;

RESULTADOS

O valor médio do valor de CBR para o RCC foi de 20,92%. Para este valor, o material pode ser utilizado para fins de subleito, conforme classificação do DNIT. A variabilidade obtida os resultados experimentais podem ser apresentados conforme o Boxplot do Gráfico 1.a o Gráfico 1.b representa o gráfico característico de penetração vs. Deslocamento da média e individual das amostras obtidos no ensaio CBR.

Gráfico 1 – Características do agregado reciclado: (a) Boxplot dos valores de CBR; (b) Gráfico Penetração x Pressão calculada da média dos CBRs



Fonte – Autoria própria (2023)

Utilizando a abordagem simplificada, o módulo de elasticidade do RCC adotado no software AEMC MeDiNa é o valor médio de 187 MPa. Os principais resultados obtidos pelo dimensionamento empírico do pavimento utilizando o RCC, são apresentados no Tabela 2:



Tabela 2 – Dimensionamento dos pavimentos em todos os CBR’S do solo de Guarapuava

ID	CBR Solo (%)	CBR RCC (%)	Espessura do Revestimento asfáltico (cm)	Espessura da base (cm)	Espessura da sub-base de RCC (cm)	Espessura final (cm)
1	2				75	100
2	3				55	80
3	4				45	70
4	5				35	60
5	6				30	55
6	7				25	50
7	8	15	5	20	20	45
8	9				20	45
9	10				15	40
10	11				15	40
11	12				10	35
12	13				10	35
13	14				10	35
14	15				5	30

Fonte – Autoria própria (2023)

Nota-se a partir da Tabela 2, que a diminuição do CBR do solo natural acarreta a crescente necessidade de reforço de subleito, função esta desempenhada pelo agregado reciclado. O comportamento de deflexão ao longo da seção transversal da via, mostra o deslocamento máximo ocorrendo no topo do revestimento asfáltico, com valores inferiores aos de deslocamento máximo apresentado pela Eq. 7 (vide Tabela 3).

A análise das tensões da simulação realizada no AEMC, sustenta a hipótese de capacidade do pavimento dimensionado resistir aos esforços solicitantes, tendo comportamento estrutural adequado, com as tensões inferiores que àquelas obtidas pela Eq. 6 (vide Tabela 3). De forma direta, a deflexão do pavimento tende a aumentar com valores de CBR do solo mais elevado, uma vez que são requeridas pelo dimensionamento camadas de inferiores de infraestrutura. A Tabela 3 sintetiza a verificações estruturais.

Tabela 3 – Dimensionamento dos pavimentos em todos os CBR’S do solo de Guarapuava

ID	CBR Solo (%)	CBR RCC (%)	Deflexão admissível (µm)	Deflexão máxima (µm)	tensão admissível (MPa)	tensão solicitante (MPa)
1	2	15	899	635	11,31	0,69
2	3	15	899	684	11,31	0,71
3	4	15	899	717	11,31	0,73
4	5	15	899	757	11,31	0,77
5	6	15	899	778	11,31	0,79
6	7	15	899	799	11,31	0,81
7	8	15	899	817	11,31	0,87
8	9	15	899	817	11,31	0,87
9	10	15	899	830	11,31	0,87
10	11	15	899	830	11,31	0,87
11	12	15	899	833	11,31	0,89
12	13	15	899	833	11,31	0,89
13	14	15	899	833	11,31	0,89
14	15	15	899	826	11,31	0,90

Fonte – Autoria própria (2023)

Conclusão

A partir dos resultados obtidos, pode-se estabelecer o valor de CBR médio obtido para o RCC como de 20,92%, pode-se utilizar como valor de referência no anteprojeto desta infraestrutura, no entanto, o resultado pode sofrer alterações quanto as suas distintas



origens do RCC. A investigação é limitada ao comportamento elástico linear uniaxial, sendo uma notável limitação do estudo. Ensaio em regime biaxial, com determinação de evolução de dano e acúmulo de plasticidade devem ser realizados em futuros estudos.

Por meio das simulações desenvolvidas, pode-se verificar que o RCC utilizado, apresenta viabilidade mecânica como sub-base em pavimentos flexíveis, pelo $CBR \geq 20\%$, desta forma, o seu uso contribui para a sustentabilidade na indústria da construção civil.

Agradecimentos

Os Agradecimento a UTFPR, a qual possibilitou o desenvolvimento deste projeto.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

ABRECON (Associação Brasileira para Reciclagem de Construção Civil e Demolição). **Reciclagem de resíduos da construção e demolição no Brasil**. Disponível em <<http://abrecon.org.br/>>. Acesso em 20 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15115 Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004.

BEJA, I. A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B. **Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil**. Construction and Building Materials, v. 258, out. 2020.

BEJA, I. A.; **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DNIT (2006). **Manual de pavimentação. Publicação IPR – 179**. Ministério dos Transportes. Departamento nacional de infra-estrutura de transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT: Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos. Versão 1.1.5.0. **DNIT TED 682/2014**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/solicitacao-de-download-do-medina>>. Acesso em 20 ago. 2022.,2

MANFRINATO, J. W. S.; et al. **Implantação de usina para reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) como ação para o desenvolvimento sustentável – Estudo de caso**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 28., 2008, Rio de Janeiro. Anais.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005, 570 p.

SANTOS, Adriana Goulart et al. **Avaliação do custo de construção de uma estrutura de pavimento empregando agregado reciclado de RCD**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v 10, n. 1, 2015.

SUDA, Guilherme Henrique. **Aplicação de agregados de resíduos de construção e demolição na produção de concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná., UTFPR, Câmpus Guarapuava, 2021.