Resistência à compressão do agregado RAP (*reclaimed asphalt pavement*) em camadas de base e sub-base de pavimento flexíveis

Compression strength of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) aggregate in flexible pavement base and sub-base layers

Emiliane Karolina Gonçalves dos Santos Braga Santana
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | eng.emiliane@gmail.com

Júnia Nunes de Paula
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | juniapaula@cefetmg.br

Resumo

A malha rodoviária compreende cerca de 21 milhões de quilômetro no mundo todo. Uma estimativa prever o crescimento de 3 a 4,7 milhões de quilômetros de estradas para o ano de 2050. Neste contexto, a relevância do presente estudo está relacionada à importância e ao uso intensivo do modal rodoviário, a exploração de recursos naturais para construção e manutenção da malha rodoviária e a redução de emissões CO_2 com aplicação de materiais reciclados em camada de base. Diante disso, uma avaliação foi feita para verificar a possibilidade de substituir agregados naturais (NA) por agregados reciclados RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) em camada de base de pavimentos. Misturas com 20% solo e 80% RAP, estabilizadas com 0%, 3,5% e 7% de cimento Portland foram submetidas a resistência à compressão não confinada (UCS). Os resultados mostram que a proporção mais adequada de cimento Portland (CP) está entre 4,5% a 5%, atendendo assim os valores normativos.

Palavras-chave: Cimento Portland; Base e sub-base rodoviária; Pavimento asfáltico reciclado RAP; Resistência à compressão não confinada.

ABSTRACT

The road network comprises approximately 21 million kilometers worldwide. An estimate predicts an increase of 3 to 4.7 million kilometers of roads by the year 2050. In this context, the relevance of this study is related to the importance and intensive use of the road modal, the exploitation of natural resources for the construction and maintenance of the road network, and the reduction of CO2 emissions with the application of recycled materials in the base layer. In view of this, an assessment was made to verify the possibility of replacing natural aggregates with recycled aggregates RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) in the base layer of pavements. Mixtures with 20% soil and 80% RAP, stabilized with 0%, 3.5%, and 7% Portland cement were subjected to unconfined compressive strength (UCS). The results show that the most appropriate proportion of Portland cement (CP) is between 4.5% and 5%, thus meeting the normative values.

Keywords: Portland cement; Road base and sub-base; Recycled asphalt pavement RAP; Unconfined compressive strength.

1 INTRODUÇÃO

Globalmente 35% das estradas são pavimentadas e 50% das estradas tem acessibilidade durante todo o ano, a maior parte das estradas pavimentadas encontra-se na América do Norte e na Europa, enquanto a maioria das estradas não pavimentadas e acessíveis sazonalmente é encontrada na América central, América do Sul e na África. A malha rodoviária compreende cerca de 21 milhões de quilômetros no mundo todo (Costa *et al*., 2020), as densidades rodoviárias mais elevadas estão associadas a países densamente povoados e mais ricos. Através de um modelo de regressão uma estimativa ainda em estudo prever o crescimento de 3 a 4,7 milhões de quilômetros de estradas para o ano de 2050 (Meijer *et al*., 2018).

O RAP é um material fresado gerado pela remoção de pavimentos asfálticos, consiste em agregados graduados de alta qualidade revestidos com um ligante asfáltico. Devido ao seu valor agregado, o RAP é geralmente reciclado diretamente nas usinas de asfalto, pois o material contém ainda ligante asfáltico ativo, que é aplicado novamente na camada de revestimento outra alternativa é a reciclagem a frio (espuma de asfalto). Mais de 94% do RAP é usado em novas misturas asfálticas, enquanto uma pequena porcentagem é incorporada em camadas de bases ou outras aplicações na engenharia (NAPA, 2020; Angulo *et al*., 2023).

O RAP é composto por 90% a 95% de agregado e 5% a 10% de betume (Plati; Cliatt, 2018). Na reciclagem a quente o percentual que pode ser aplicado em novas misturas varia entre 10% e 30%. O envelhecimento do RAP dificulta a ativação do ligante, mesmo com a adição de agentes rejuvenescedores, e ainda deve-se levar em consideração o transporte para o processamento de reciclagem do material em usinas. A reciclagem a frio, *in situ* em camada de base, ou a recuperação em profundidade total, permitem incorporar maior volume do material, que viabiliza a renovação total da estrutura do pavimento, o que resulta em uma alternativa mais sustentável e resolução dos problemas estruturais do pavimento (Ungureanu *et al*., 2020; Ghanizadeh; Rahrovan; Bafghi, 2018).

Alguns estudos sobre a aplicação de RAP em camada de base de pavimentos, relatam que a UCS diminui com o aumento no teor de RAP e aumenta com o teor de cimento. O RAP é um material hidrofóbico, quimicamente incompatível com a pasta de cimento hidrofílica, o que faz com que as misturas apresentem menor resistência na zona de transição da interface entre o agregado e a pasta de cimento, essas conclusões estão em conformidade com diversas literaturas (Khay *et al*., 2015; Pratikso; Purwanto; Sudarno, 2017; Ungureanu *et al*., 2020; Ghanizadeh; Rahrovan; Bafghi, 2018; Kasu; Manupati; Muppireddy, 2020; Adresi *et al*., 2017).

Fedrigo *et al*. (2017) ao utilizar RAP com NA e variação de cimento de 2%, 4%, e 6% com diferentes energias de compactação, concluiu que o aumento do teor de cimento aumenta a UCS, porém elevados teores de cimento aumenta a fragilidade das misturas, tornando-as mais suscetíveis a fissuras. No entanto é importante realçam que um maior esforço de compactação pode contrabalançar a utilização de baixos teores de cimento, reduzindo custos e riscos de fissuração por retração.

O objetivo deste estudo é avaliar a UCS do RAP reciclado na camada de base e sub-base de um pavimento em substituição aos NA, além disso, pertente-se investigar a proporção mais adequada de CP, para a estabilização química da camada de base.

2 METODOLOGIA

Os materiais constituintes deste estudo são RAP, solo fino e cimento Portland. Para avaliar o potencial do RAP para ser empregado em camada de base de pavimento, os seguintes ensaios foram realizados: a granulometria por peneiramento do RAP e da mistura (solo + RAP) foi realizada conforme NBR 7181 (ABNT, 2018), o método de ignição foi adotado para verificar o teor de betume na amostra RAP conforme ASTM D6307 (2019), a obtenção da umidade ótima e densidade seca máxima foram determinadas pelo ensaio de compactação conforme NBR 7182 (ABNT, 2020), a resistência à fragmentação foi medida pelo ensaio de abrasão *Los Angeles* conforme NBR 16974 (ABNT, 2022), o equivalente de areia do RAP foi determinado conforme NBR 12052 (ABNT, 1992) e o índice de forma do RAP foi determinado pelo método do paquímetro conforme NBR 7809 (ABNT, 2019).

Após a realização do ensaio de granulometria observou que o RAP se enquadra melhor na faixa B do DNIT 141 – ES (2022), mas sendo necessário a adição de material passante na peneira de 2,0 mm 0,42 mm e 0,074 mm, portanto um solo fino foi adicionado a mistura de RAP e cimento.

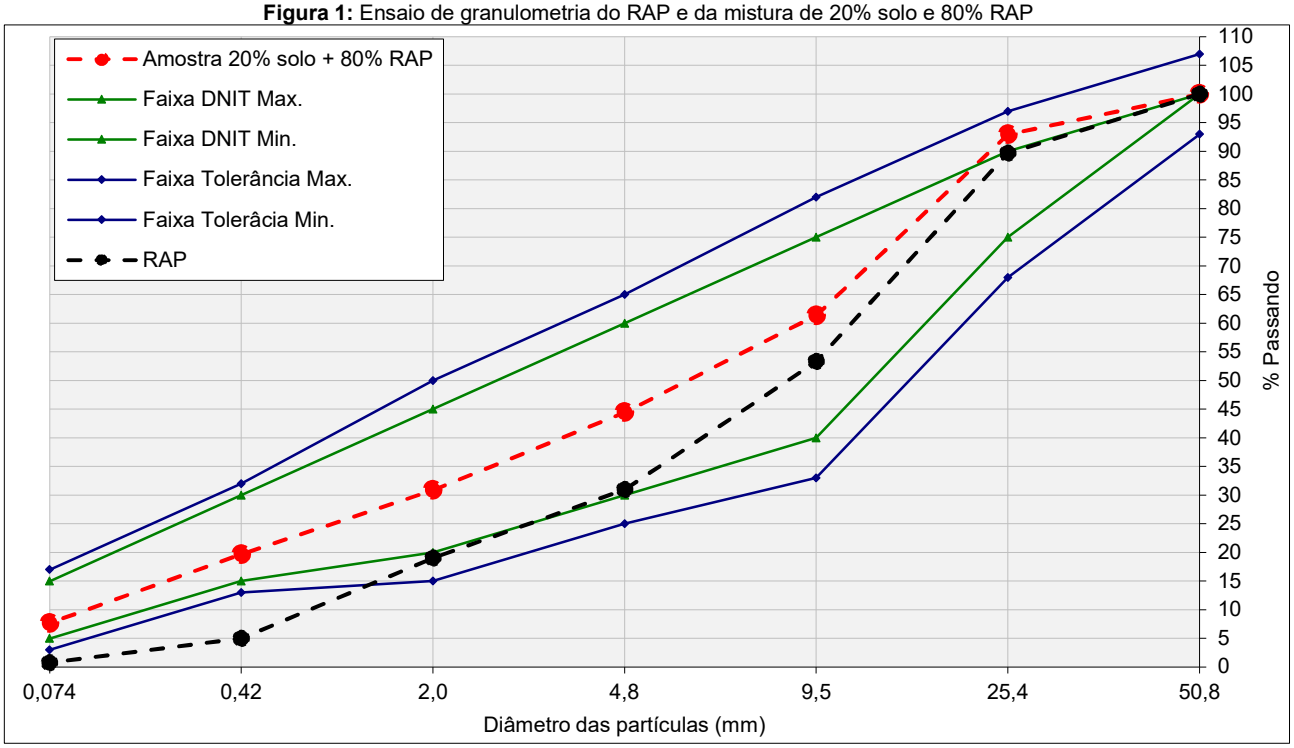
O solo foi caracterizado segundo sua granulometria por peneiramento conforme NBR 7181 (ABNT, 2018), o material passante na peneira 74 µm (n° 200) foi submetido ao ensaio de granulometria a laser. A consistência do solo foi determinada pelos ensaios de limites de Atterberg, conforme NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016). O cimento CPV foi caracterizado quanto a sua resistência conforme NBR 7215 (ABNT, 2019), o índice de finura foi determino conforme NBR 11579 (ABNT, 2013), os tempos de pega foram determinados pela NBR 16607 (ABNT, 2018) e a perda ao fogo foi determinada conforme NBR 17086 – 6 (ABNT, 2023).

As amostras deste experimento possuem 5 elementos, foram moldadas na umidade ótima com energia de compactação Proctor modificado em 10 camadas (DNIT 181 – ME, 2018), foram submetidos a cura de 7 dias e saturação de 4 horas antes do ensaio de UCS (ABNT NBR 12025, 2012).

3 RESULTADOS E ANÁLISE

Conforme o método rodoviário de classificação de solo (AASHTO) a mistura de 20% solo e 80% RAP é do tipo A-2-7, possui boa condição de suporte para fundação de pavimento (Manual de pavimentação IPR – 719, 2006). A curva granulométrica do RAP e da mistura de 20% solo e 80% RAP é apresentada na Figura 1.

Figura 1: Ensaio de granulometria do RAP e da mistura de 20% solo e 80% RAP



A Tabela 1, apresenta as características dos materiais e os valores requeridos por norma.

Tabela 1: Características e condições especificas dos materiais

Parâmetros	Resultados	Requisitos	Referência
Teor de betume - RAP	3,86%	-	-
Abrasão por *Los Angeles* - RAP	18%	< 55%	DNIT 141 - ES (2022)
Equivalente de areia - RAP	88,35%	> 30%	DNIT 141 - ES (2022)
Índice de forma - RAP	2,27	≥ 0,5	DNIT 167 - ES (2013)
Umidade ótima - RAP + Solo	6,6%	-	-
Umidade ótima - RAP + Solo + 7% Cimento	8,1%	-	-
Limite de Liquidez RAP + Solo	43,4 %	≤ 25%	DNIT 141 - ES (2022)
Limite de Plasticidade RAP + Solo	33,32%	≤ 6%	DNIT 141 - ES (2022)
Limite de Liquidez - Solo	61 %	-	-
Limite de Plasticidade - Solo	43,09%	-	-
Resistência à compressão aos 7 dias - Cimento	44,5 MPa	≥ 34,0	ABNT NBR 16697 (2018)
Resistência à compressão aos 28 dias - Cimento	55,3 MPa	-	-
Finura pela peneira 75 µm	0,18%	≤ 6%	ABNT NBR 16697 (2018)
Finura pela peneira 45 µm	2,26	-	-
Início de pega	134 min.	≥ 60	ABNT NBR 16697 (2018)
Fim de pega	194 min.	≤ 600	ABNT NBR 16697 (2018)
Perda ao fogo	5,08%	≤ 6,5	ABNT NBR 17086 - 6 (2023)

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

A UCS das amostras com 20% solo e 80% RAP, apresentam a resistência média de 0,45 MPa, 1,53 MPa e 3,01 MPa respectivamente com a adição de 0%, 3,5% e 7% de cimento, conforme indicado na Tabela 2.

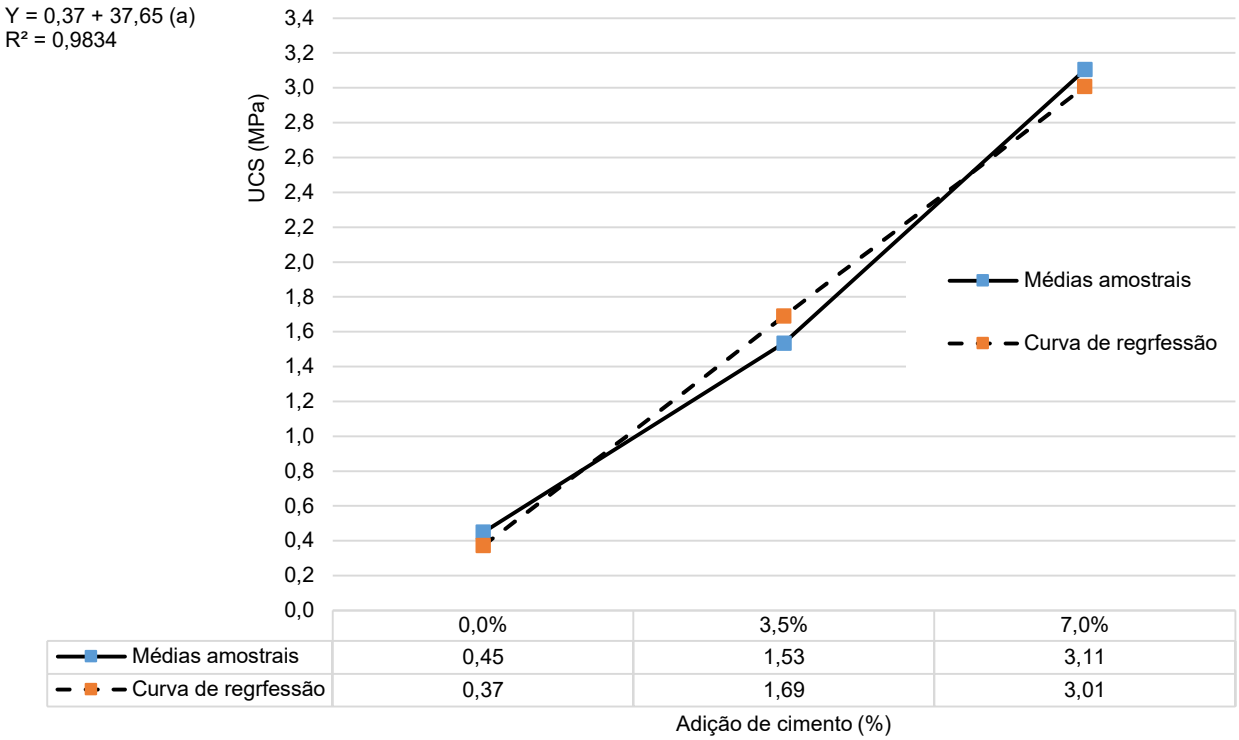
Tabela 2: Tensões médias e deformações (mm)

Misturas	Tensão média (MPa)	Desvio padrão	Deformação (mm)
80% RAP + 20% solo + 0% Cimento	0,45	0,036	6,00
80% RAP + 20% solo + 3,5% Cimento	1,53	0,095	5,02
80% RAP + 20% solo + 7% Cimento	3,11	0,058	4,59

Através da análise de regressão obteve-se a equação modelo, indicada na Figura 2, onde “a” corresponde ao percentual de cimento nas misturas, e o coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 0,9847, o que mostrou que o modelo representa bem o problema, visto que o R^2 é maior que 0,70.

É indicado pela norma DNIT 167 - ES (2013), que a resistência à compressão simples aos 7 dias seja entre 2,1 e 2,5 MPa, para camada de base de pavimento. A Figura 2 apresenta as médias amostrais e os valores calculados pela equação de regressão, onde 5% de cimento atende os valores normativos, podendo ser aplicado na camada de base, as misturas com teores de cimento inferior podem ser aplicadas em camada de sub-base ou reforço de subleito.

Figura 2: Resistência média à compressão não confinada das misturas de RAP estabilizadas com cimento



Conforme esperado a UCS aumenta com o aumento do teor de cimento nas misturas de solo e RAP, estando em conformidade com outras pesquisas, também era esperado que a substituição total de NA apresentasse resistências inferiores, porém próximo aos valores solicitados pela norma do DNIT 167- ES (2013).

Os resultados de pesquisas realizadas com elevados teores de RAP são apresentados na Tabela 3. As misturas que contêm solo apresentam em geral resistências inferiores, como por exemplo 2,43 MPa para 60% RAP com 40% solo (SP-SC) e 4% cimento (Ghanizadeh; Rahrovan; Bafghi, 2018), semelhante aos valores obtidos nesta pesquisa.

Tabela 3: UCS das misturas aos 7 dias de cura

Referência	Misturas	UCS (MPa)
Goldoni *et al*. (2023)	70% RAP + 30% NA + 2% Cimento	1,80
	70% RAP + 30% NA + 4% Cimento	4,40
	70% RAP + 30% NA + 6% Cimento	5,60
Kasu, Manupati e Muppireddy (2020)	100% NA + 2,5% Cimento	2,60
	100% NA + 5% Cimento	5,00
	100% NA + 7,5% Cimento	7,50
	100% NA + 10% Cimento	11,62
	60% RAP + 40% NA + 2,5% Cimento	1,23
	60% RAP + 40% NA + 5% Cimento	3,20
	60% RAP + 40% NA + 7,5% Cimento	6,00
	60% RAP + 40% NA + 10% Cimento	8,50
Ungureanu *et al*. (2020)	100% RAP + 3,5% Cimento	1,44
Adresi *et al*. (2019)	80% RAP + 20% Filler + 3% Cimento	1,50
	80% RAP + 20% Filler + 5% Cimento	3,60
	80% RAP + 20% Filler + 7% Cimento	3,60
Ghanizadeh, Rahrovan e Bafghi (2018)	0% RAP + 100% solo (SP-SC) + 3% Cimento	2,76
	20% RAP + 80% solo (SP-SC) + 3% Cimento	2,55
	40% RAP + 60% solo (SP-SC) + 3% Cimento	2,26
	60% RAP + 40% solo (SP-SC) + 4% Cimento	2,43
	0% RAP + 100% solo (GW-GC) + 3% Cimento	3,61
	20% RAP + 80% solo (GW-GC) + 3% Cimento	3,43
	40% RAP + 60% solo (GW-GC) + 3% Cimento	2,23
	60% RAP + 40% solo (GW-GC) + 5% Cimento	2,26
Pratikso, Purwanto e Sudarno (2017)	100% RAP + 1,5% Cimento	1,18
	100% RAP + 3% Cimento	1,58
	100% RAP + 4,5% Cimento	2,01
	100% RAP + 6% Cimento	2,57
	100% RAP + 7,5% Cimento	3,44
Khay *et al*. (2015)	100% RAP + 0% NA + 6% Cimento	5,85
	75% RAP + 25% NA + 6% Cimento	6,75

4 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciam que estabilização química com CP atribuiu maior resistência ao RAP, as misturas com 20% solo e 80% RAP, estabilizadas com 0%, 3,5% e 7% de cimento Portland, obtiveram respectivamente a UCS de 0,45 MPa, 1,53 MPa e 3,01 MPa. A UCS com a adição de 3,5% de cimento para a adição de 7% de cimento obteve um aumento na resistência de 103,3%.

Pode-se concluir que o maior teor de cimento na estabilização do RAP obtém-se maiores UCS, a proporção mais adequada de CP está entre 4,5% a 5%, atendendo assim os valores normativos. Sabe-se que alguns materiais não resistem a energia modifica, devido à quebra do agregado, portanto para o solo e o RAP com adição de 3,5% de cimento tem-se a hipótese que a energia intermediária apresentaria uma resistência superior a 1,53 MPa. Não necessariamente maior energia de compactação obtém-se maiores resistências, portanto é necessário estudar a energia ótima de compactação do material.

Observa-se que o solo utilizado no estudo não é o mais adequado para compor a mistura com o RAP, devido ou elevado limite de liquidez e plasticidade. Os resultados mostram que a pequena porção de argila existente no solo possui uma influência expressiva devido à elevada plasticidade que o solo possui. O solo utilizado não tem elevada capacidade de cimentação natural, exigindo misturas com maior teor de cimento para atingir resistência de suporte compatível com os esforços do tráfego de uma rodovia. O presente estudo confirma a possibilidade de utilizar 100% materiais *in situ*, sem processamento em sem utilização de áreas de bota-fora.

Embora pesquisadores tenham estudado a utilização de materiais reciclados e outros subprodutos em base de pavimentação, ainda falta uma caracterização geotécnica abrangente do RAP, bem como os estudos de durabilidade, estudos de viabilidade econômica e análise do ciclo de vida.

3 AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

ADRESI, M. *et a*l. Influence of high content of reclaimed asphalt on the mechanical properties of cement-treated base under critical environmental conditions. **International Journal of Pavement Engineering**, v.20, n.9, 1098–1105, 23 out. 2017. doi: https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1388508.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test Method for Asphalt Contento f Asphalt Mixture by Ignition Method**, ASTM D 6307 – 19. ASTM International, West Conshohocken, United States, 2019.

ANGULO, Sergio Cirelli *et al*. **MARE Manual de aplicação do agregado reciclado**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2023. doi: https://doi.org/10.11606/9786589190196

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16974.** Agregados – Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*. 2022

____ **NBR 7809.** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. 2019.

____ **NBR 17086-6.** Cimento Portland – Análise química – Parte 6: Determinação da perda ao fogo. 2023.

____ **NBR 7215.** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019.

____ **NBR 11579.** Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (n° 200)**.** 2013.

____ **NBR 16607.** Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. 2018.

____ **NBR 16697.** Cimento Portland – Requisitos. 2022.

____ **NBR 7181.** Solo – Análise granulométrica. 2018.

____ **NBR 6459.** Solo – Determinação do limite de liquidez. 2017.

____ **NBR 7180.** Solo – Determinação do limite de plasticidade. 2016.

____ **NBR 7182.** Solo – Ensaio de compactação. 2020.

____ **NBR 12025**. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpo de prova cilíndricos – Método de ensaio. 2012.

____ **NBR 12052.** Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia. 1992.

COSTA, J. *et al*. Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs. **Construction and Building Materials**, v. 265, 30 dez. 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120325.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente** – Especificação de serviço, DNIT 141/2022 - ES. Brasília, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência** – Método de ensaio, DNIT 181/2018. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos "*in situ*" com adição de cimento Portland** – Especificação de serviço**,** DNIT 167/2013. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR-719. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 31 mar. 2024.

FEDRIGO, W. *et al*. Strength, shrinkage, erodibility and capillary flow characteristics of cement-treated recycled pavement materials. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v.10, n. 5, p.393–402, 10 set. 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.001.

GHANIZADEH, Ali Reza; RAHROVAN, Morteza; BAFGHI, Kazem Barkhordari. The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation. **Construction and Building Materials**, v.161, p.165–174, 10 fev. 2018. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.124.

GOLDONI, A. G. *et al*. Durability and mechanical long-term performance of reclaimed asphalt pavement stabilized by alkali-activation. **Soils and Rocks**, v. 46, n. 1, 31 maio 2023. doi: https://doi.org/10.28927/SR.2023.007422.

KASU, Sridhar Reddy; MANUPATI, Kumar; MUPPIREDDY, Amaranatha Reddy. Investigations on design and durability characteristics of cement treated reclaimed asphalt for base and subbase layers. **Construction and Building Materials**, v.252, p.119102, 20 ago. 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119102.

KHAY, S. *et al*. Laboratory Investigation of Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 27(6). 2015. doi: https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001158.

MEIJER, J. R. *et al*. Global patterns of current and future road infrastructure. **Environmental Research Letters**, v.13, n.6, 23 mai. 2018.

NAPA. *National Asphalt Pavement Association*. **RAP Benefits for Pavement Owners**. 2020. Disponível em: https://www.asphaltpavement.org. Acesso em: 19 set. 2023.

PLATI, C.; CLIATT, B. A sustainability perspective for unbound reclaimed asphalt pavement (RAP) as a pavement base material. **Sustainability** (Switzerland), v. 11, n. 1, 24 dez. 2018. doi: https://doi.org/10.3390/su11010078.

PRATIKSO, P.; PURWANTO, A.; SUDARNO, S. Analysis influence of cement of the asphalt pavement demolition material on roads Semarang-Demak-Indonesia. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v.11, n.1, p.73–78, 21 maio 2017. doi: https://doi.org/10.4090/juee.2017.v11n1.073078.

UNGUREANU, D. *et al*. Accelerated testing of a recycled road structure made with reclaimed asphalt pavement material. **Construction and Building Materials**, v.262, 30 nov. 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120658.