

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/679

Efeitos da Estabilização Granulométrica e Melhoramento Químico na Resistência Mecânica do Revestimento Primário de uma Estrada Não Pavimentada do Estado da Bahia

Luiz Heleno Albuquerque Filho

Analista em Infraestrutura de Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, Brasil, luiz.albuquerque@dnit.gov.br

Michéle Dal Toé Casagrande

Professora Titular-Livre, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

Mario Sergio de Souza Almeida

Professor Adjunto, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil, mario.almeida@ufrb.edu.br

Ítalo Miller Machado Pereira

Mestrando, Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil, italomillermachado@hotmail.com

Paulo Ricardo Lemos de Santana

Mestrando, Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil, ricardolemos@aluno.ufrb.edu.br

RESUMO: A principal técnica utilizada para manutenção de estradas não pavimentadas no Brasil consiste na aplicação de revestimento primário no período seco e reconformação da plataforma ao longo de todo o ano, notadamente com maior frequência no período chuvoso. Reflexo dessa rotina, os custos do transporte de materiais selecionados têm se constituído na principal parcela da medição dos contratos de manutenção de estradas não pavimentadas do DNIT. Por questões econômicas e ambientais, torna-se indispensável incorporar técnicas de estabilização que permitam habilitar solos locais ou materiais reciclados disponíveis. O presente artigo tem por objetivo apresentar os resultados de estabilizações realizadas no revestimento primário de um segmento da rodovia federal BR-030, na Península de Marauá, no estado da Bahia. A campanha experimental envolveu a realização de ensaios de frasco de areia, compactação e Índice de Suporte Califórnia. Os corpos de prova foram moldados com soluções de estabilização granulométrica (pavimento asfáltico reciclado - RAP) e química (cimento Portland), com objetivo de avaliar os efeitos da estabilização em comparação à condição original da estrada. Os resultados dos ensaios indicaram ganhos de resistência mecânica e redução da expansão advindos da estabilização dos solos, principalmente a química, mesmo a baixos teores de cimento Portland.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de Solos, RAP, Cimento Portland, Estrada Não Pavimentada.

ABSTRACT: The main technique used to maintain unpaved roads in Brazil consists of applying a primary coating during the dry season and reconforming the platform throughout the year, notably more frequently during the rainy season. Reflecting this routine, the costs of transporting selected materials have constituted the main portion of the measurement of DNIT's unpaved road maintenance contracts. For economic and environmental reasons, it is essential to incorporate stabilization techniques that allow local soils or available recycled materials to be used. This article aims to present the results of stabilizations carried out on the primary coating of a segment of the BR-030 federal highway, on the Marauá Peninsula, in the state of Bahia. The experimental campaign involved carrying sand replacement, compaction and California Bearing Ratio tests. The specimens were molded with granulometric (reclaimed asphalt pavement - RAP) and chemical (Portland cement) stabilization solutions, with the aim of evaluating the effects of stabilization in comparison to the original condition of the road. The test results indicated gains in mechanical resistance and reduced expansion resulting from soil stabilization, mainly chemical, even at low levels of Portland cement.

KEYWORDS: Soil Stabilization, RAP, Portland Cement, Unpaved Road.

1 INTRODUÇÃO

É reconhecido que países em desenvolvimento, entre os quais se enquadra o Brasil, apresentam uma malha viária predominantemente composta por estradas não pavimentadas. Tal comportamento se fundamenta no fato de que a maior parte da economia desses países se baseia no modelo de produção, comercialização e exportação de produtos primários, os quais são transportados principalmente nesse tipo de estrada. Em muitas regiões, essas estradas representam a única forma de acesso da população a serviços básicos disponibilizados nas áreas urbanas, tais como saúde, educação, trabalho e lazer. Em função disso, as estradas não pavimentadas se revestem de importância singular no desenvolvimento econômico, social e cultural de qualquer país, por se constituírem na principal forma de ligação entre as suas zonas rurais e urbanas.

As características dos solos locais, a aplicação de eventual reforço ao subleito, o regime hidrológico, as condições de drenagem, a espessura da camada de aterro e o volume médio diário de tráfego constituem fatores a serem considerados na construção de estradas não pavimentadas. Custos inicialmente mais elevados na implantação podem ser compensados, a médio e longo prazo, pela redução dos custos de manutenção e pela preservação das boas condições de rolamento ao longo de todo o ano, principalmente no período chuvoso.

A deterioração causada por fatores de tráfego e climáticos atua de forma mais rápida e agressiva em estradas em leito natural, ou seja, sem nenhum tratamento na superfície de rolamento. A presença de uma camada de revestimento primário, constituída por materiais de melhor comportamento geotécnico, tem como principal vantagem reduzir a periodicidade e os custos das manutenções. Dentre as principais técnicas de tratamento primário das estradas não pavimentadas, destacam-se o agulhamento (inclusão de pedregulho ou cascalho em matriz argilosa), misturas de argila em matriz arenosa e o revestimento primário.

Essas técnicas de manutenção têm em comum a utilização apenas de rolos de pneus nas patrulhas e o lançamento de grandes quantidades de materiais selecionados, carregados e transportados de jazidas ou pedreiras localizadas, muitas vezes, distantes dos pontos de aplicação nas estradas. O impacto econômico e ambiental desse momento extraordinário de transporte é observado nos contratos de manutenção do DNIT, onde os serviços de transporte com caminhões basculantes de 6, 10 e 14 m³ constituem os itens mais relevantes das medições, totalizando mais de um bilhão de reais medidos nos últimos cinco anos (2019-2023).

Nesse sentido, torna-se necessário pesquisar técnicas de estabilização que habilitem os solos locais e reduzam a importação de materiais selecionados. Resíduos de construção civil e demolição (RCD), pavimento asfáltico reciclado (RAP), rejeitos de mineração, escória estabilizada de aciaria e outros materiais localmente disponíveis podem ser utilizados na estabilização granulométrica de estradas não pavimentadas. Também podem ser aplicadas soluções com aditivos químicos, tais como, cimento Portland, cal hidratada, polímeros acrílicos, bioenzimas, emulsões asfálticas, cinzas volantes geopolimerizadas, etc. Mais ainda, a estabilização mecânica, ou seja, a homogeneização, umidificação e aplicação de energia mecânica (compactação) ao solo, pode conferir maior resistência estável às cargas do tráfego, ao desgaste e à erosão.

Amorim (2013) avaliou o comportamento mecânico e desempenho funcional de trecho experimental em pavimento urbano de Campo Verde, no estado de Mato Grosso, construído com uma base composta por uma mistura de solos lateríticos locais e RCD. Foram realizados ensaios de caracterização, de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR), de resistência à compressão simples, de resistência à penetração dinâmica e avaliações de deflexões por meio da viga Benkelman. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica e econômica do RCD como uma alternativa para aplicação em obras de pavimentos urbanos.

Pereira et al. (2017) avaliaram a aplicação de técnicas de estabilização mecânica e granulométrica dos solos como alternativa na construção de estradas florestais de baixo custo. Os resultados da pesquisa indicaram a melhoria significativa dos parâmetros geotécnicos dos solos finos e grossos locais quando submetidos a maiores energias de compactação. A estabilização granulométrica realizada por meio da mistura de solos finos locais com cascalho habilitou essa mistura como revestimento primário.

Razali & Malek (2018) apresentaram os resultados da estabilização química em um trecho experimental de 2.000 metros construído em uma estrada não pavimentada da Malásia, com teores de cimento de 3%, 4%, 5% e 6%, além de uma seção de controle com solução convencional em agregado triturado. Os resultados dos ensaios de resistência e de expansão indicaram que o teor de cimento de 4% foi suficiente para habilitar as misturas com solos locais para atender as especificações técnicas do projeto.

Balkis & Macid (2019) pesquisaram a influência da estabilização química com cimento na plasticidade e na resistência de diversos solos do Chipre. Os ensaios foram realizados com adição de cimento em teores de 0%, 3%, 7% e 10% e os resultados apontaram para aumento do Índice de Suporte Califórnia entre 22% e 69%.

Yang et al. (2020) avaliaram projetos de estabilização química com adição de cimento em solos granulares e coesivos. A pesquisa envolveu a realização de ensaios de laboratório e avaliação da influência dos teores de cimento nas propriedades índices e na resistência mecânica, antes e depois da saturação, de solos classificados como A-4 e A-7-6 (TRB), solos esses caracterizados pela baixa capacidade de suporte e elevada expansão. Os resultados dos ensaios apontaram para a existência de relações estatisticamente significativas entre as propriedades índices dos solos, a sua classificação granulométrica e os teores de cimento adotados.

O presente artigo tem por objetivo apresentar os resultados de estabilizações granulométricas e químicas realizadas no revestimento primário de um segmento não pavimentado da rodovia federal BR-030, na Península de Maraú, no estado da Bahia. A campanha experimental envolveu a caracterização física e a realização de ensaios de frasco de areia, de compactação e de Índice de Suporte Califórnia. Os corpos de prova dos ensaios foram moldados com estabilizações granulométrica (incorporação de 50%, 60% e 70% de RAP) e química (adição de 1% e 2% de cimento Portland), tendo por objetivo avaliar os efeitos das estabilizações adotadas em comparação à condição original do revestimento primário da estrada.

2 IMPORTÂNCIA DAS ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS NA MALHA BRASILEIRA

As estradas não pavimentadas são formadas por vias de diferentes características e exigências técnicas e englobam as estradas vicinais, florestais, agrovias e estradas rurais. Essas estradas constituem ligações entre as propriedades rurais e povoados vizinhos, além de servirem de acesso às vias consideradas principais. Também compõem esse grupo as estradas destinadas à movimentação interna das propriedades rurais, que permitem o fluxo de moradores, máquinas, equipamentos e produtos agrícolas até as estradas vicinais.

Em virtude de sua grande extensão territorial, o Brasil possui uma das maiores malhas rodoviárias do mundo de estradas não pavimentadas, inferior apenas a da Índia e dos Estados Unidos (Tabela 1).

Tabela 1. Extensão total e participação das estradas pavimentadas e não pavimentadas nas principais malhas rodoviárias do mundo (IRF, 2023, apud UFRB, 2024).

País	Pavimentada (km)	Não Pavimentada (km)	Malha total (km)
Estados Unidos	4.511.838 (68%)	2.133.744 (32%)	6.645.582
Índia	3.748.291 (60%)	2.467.506 (40%)	6.215.797
China	4.496.716 (85%)	783.993 (15%)	5.280.709
Brasil	212.943 (13%)	1.366.872 (87%)	1.579.815
Rússia	1.107.513 (71%)	458.632 (29%)	1.566.145
Japão	1.013.500 (83%)	213.300 (17%)	1.226.800
Canadá	452.000 (40%)	674.600 (60%)	1.126.600
África do Sul	163.472 (22%)	586.528 (78%)	750.000

A pequena participação das rodovias pavimentadas na malha rodoviária total do Brasil mostra-se mais evidente quando comparada a outros países, inclusive da América Latina, tais como Colômbia e México. Com relação ao Japão, a diferença de densidade atinge a impressionante relação de mais de cem vezes. A Figura 1 apresenta a densidade da malha pavimentada (relação entre extensão da malha e área) de alguns países.

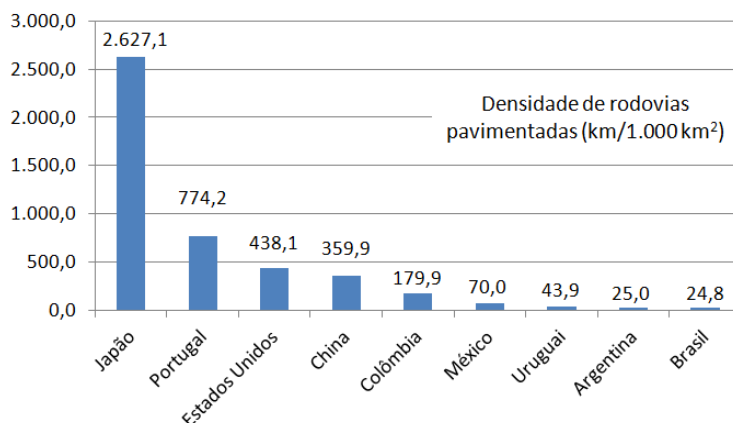


Figura 1. Densidade da malha pavimentada de alguns países (IRF, 2023, apud UFRB, 2024).

A Tabela 2 apresenta a malha rodoviária do Brasil dividida em função de sua jurisdição (federal, estadual e municipal) e das condições de pavimentação da via, ou seja, pavimentadas ou não pavimentadas.

Tabela 2. Malha rodoviária do Brasil, por jurisdição e condição do revestimento (CNT, 2022).

Jurisdição	Não Pavimentada (km)	Pavimentada (km)	Total (km)
Federal	8.274	66.150	74.424
Estadual	105.601	119.747	225.348
Municipal	1.235.810	28.018	1.263.828
Total (km)	1.349.685	213.915	1.563.600

Apesar de possuir majoritária concentração nos municípios, em torno de 98% de suas malhas, as estradas não pavimentadas também se mostram relevantes nas malhas dos demais entes da federação, representando, em média, 47% de toda a malha dos estados e do Distrito Federal e 17% da malha rodoviária federal, com maior concentração nas Regiões Norte e Centro-Oeste e cuja manutenção compete exclusivamente ao DNIT.

3 CUSTOS DE MANUTENÇÃO DAS ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS NO DNIT

O DNIT é responsável pela manutenção de 8.274 km de rodovias federais não pavimentadas em todas as unidades da federação. Para garantir a funcionalidade das rodovias, foram firmados 76 contratos administrativos, com valor global de aproximadamente 2,6 bilhões de reais. A medição dos contratos nos últimos 5 anos (2019-2023) atingiu o montante de 1,8 bilhões de reais. O custo médio aproximado para manutenção das rodovias não pavimentadas foi de R\$ 80.000,00 por quilômetro, por ano (DNIT, 2024a).

Em análise aos resumos dos referidos contratos de manutenção, observa-se que os serviços mais relevantes consistiram no transporte de materiais selecionados com caminhões basculantes de 6, 10 e 14 m³ para recomposição do revestimento primário das rodovias. Apenas a medição dos serviços de transporte foi de 750 milhões de reais, o que representa mais de 40% do total das medições dos contratos no período.

A composição de custo do serviço de recomposição de revestimento primário com material de jazida (Código SICRO 4915611), associada ao transporte dos materiais selecionados, prevê a execução do serviço com motoniveladora, caminhão tanque e rolo compactador de pneus. A reconformação da plataforma da estrada, outro serviço relevante nos contratos de manutenção, é realizada exclusivamente por meio de motoniveladora. Apenas composições de custos de sub-base e base estabilizadas granulometricamente e melhoradas com cimento na pista do SICRO estabelecem patrulha completa de equipamentos, com motoniveladora, caminhão pipa, tratores e rolos compactadores diversos (DNIT, 2024b).

Ou seja, as soluções atuais de manutenção das rodovias federais não pavimentadas têm envolvido a importação de quantidades crescentes de materiais selecionados para recomposição do revestimento primário, normalmente transportados a grandes distâncias e com simples lançamento na plataforma da estrada, sem o devido tratamento e compactação, o que não permite a incorporação desses materiais à estrutura da estrada.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental envolveu a coleta de amostras de solos e a realização de ensaios de campo para determinação da massa específica aparente *in situ* com emprego do frasco de areia, no subleito, na profundidade de 1 m, e na camada de revestimento primário, com espessura média de 20 cm, de um segmento não pavimentado da rodovia federal BR-030, no trecho entre o entroncamento com a rodovia estadual BA-001 e o distrito de Campinho, na Península de Maraú, na costa da Bahia. Esse segmento da rodovia encontra-se não pavimentado, não havendo previsão de revestimento definitivo no intervalo de monitoramento da pesquisa.

Os ensaios de caracterização granulométrica e de determinação das massas específicas aparente e dos grãos, limites de consistência, resistência mecânica e expansão dos solos e das misturas estabilizadas foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, parceiro do DNIT na pesquisa de avaliação de técnicas de estabilização e reforço em estradas não pavimentadas.

Os ensaios foram realizados em consonância às normas NBR 6508/1984 (Massa específica dos grãos), DNER 92/1984-ME (Frasco de areia), DNER 93/1984-ME (Densidade real), DNER 52/1994-ME (Umidade com Speedy), NBR 6459/2016 (Limite de liquidez), NBR 7180/2016 (Limite de plasticidade), NBR 7182/2016 (Compactação), DNIT 172/2016-ME (Índice de Suporte Califórnia - CBR), DNIT 258/2023-ME (Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão) e DNIT 259/2023-CLA (Classificação de solos finos tropicais).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Granulometria, Densidade Real dos Grãos e Limites de Consistência

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas dos solos do subleito e da camada de revestimento primário das amostras coletadas no km 904,3. A Tabela 3 apresenta a densidade real dos grãos e os limites de consistência dos solos (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade).

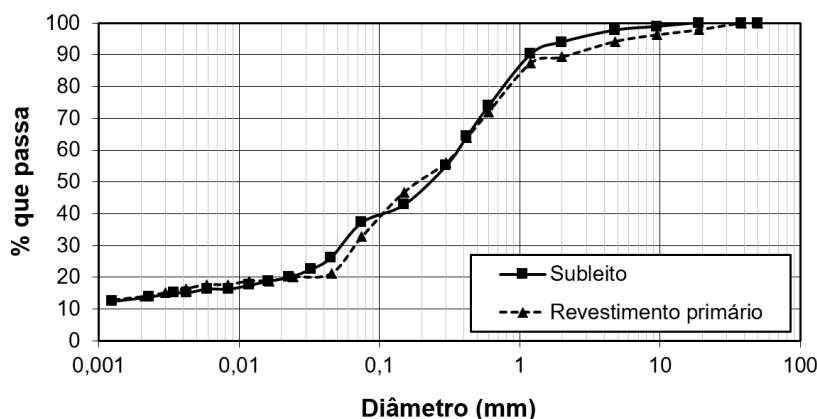


Figura 2. Curvas granulométricas dos solos.

Tabela 3. Densidade real dos grãos e limites de consistência.

Camada ensaiada	Densidade real dos grãos (g/cm ³)	Limites de consistência		
		LL (%)	LP (%)	IP (%)
Subleito	2,69	30	18	12
Revestimento primário	2,74	32	20	12

De forma complementar, a Tabela 4 apresenta as frações granulométricas e as classificações dos solos segundo o *Transportation Research Board* (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Tabela 4. Frações granulométricas e classificação dos solos, segundo TRB e SUCS.

Camada Ensaída	Granulometria				TRB		SUCS
	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	IG	Grupo	Grupo
Subleito	15	22	57	6	3	A-6	SC
Revestimento primário	17	16	56	11	0	A-2-6	SC

Os solos do subleito e do revestimento primário apresentam curvas granulométricas bastante convergentes, indício do processo de aterramento e recomposição da plataforma da estrada ao longo das atividades de manutenção. Em função da proximidade em relação ao nível do mar, esse segmento da estrada tem sido continuamente alteado ao longo de décadas. O subleito original, com as condições realmente locais, seguramente está localizado alguns metros abaixo da cota tratada como subleito nesse artigo.

Segundo o SUCS, os solos ensaiados desse segmento da estrada são classificados como pertencentes ao grupo SC, ou seja, solos arenosos com significativa quantidade de finos. As frações granulométricas das amostras confirmam essa presença dos finos, principalmente no subleito, onde as frações argilosa e siltosa somam conjuntamente 37%. Na camada de revestimento primário, observa-se uma maior participação de pedregulhos em sua constituição, consistente à função estrutural a ser desempenhada na estrada.

Em que pese a similaridade observada nas curvas granulométricas, os valores da fração passante na peneira # 200, limite entre solos finos e granulares na classificação TRB, resultaram em uma diferenciação entre os solos. Enquanto o solo do subleito foi classificado como fino (A6), a maior presença de pedregulhos na camada do revestimento primário resultou na classificação desse solo como granular (A-2-6).

5.2 Metodologia MCT

Os solos lateríticos apresentam gênese particular, caracterizada por intenso intemperismo e pela atuação de processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas. Por essa razão, deve-se atentar para a eventual influência negativa dos aditivos químicos, a médio e em longo prazo, na instabilização dos agregados, particularmente de suas concreções. Isso ocorre porque os óxidos de ferro e alumínio, compostos químicos responsáveis pela cimentação natural nos solos lateríticos, podem ter sua capacidade de troca catiônica aumentada em função da alteração das condições originais de pH do solo, resultando na desagregação das concreções e consequente instabilização das misturas com incorporação de aditivos químicos.

Os ensaios realizados com base na Metodologia MCT identificaram comportamento levemente laterítico no revestimento primário, conforme o ponto destacado em vermelho no grupo LA' do gráfico utilizado para classificação de solos tropicais da norma DNIT 259/2023-CLA (Figura 3). Associado aos baixos teores de aditivos utilizados e a temporalidade das soluções em estradas não pavimentadas, essa constatação, por si só, não constitui restrição à potencial estabilização química do revestimento primário desse trecho da rodovia.

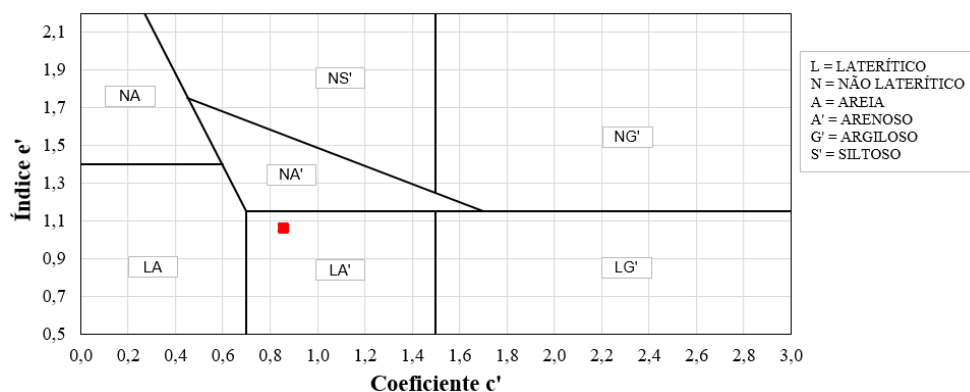


Figura 3. Classificação do solo da camada de revestimento primário pela Metodologia MCT.

5.3 Compactação, Densidade In Situ, CBR e Expansão

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de compactação, de densidade *in situ* com o frasco de areia e de Índice de Suporte Califórnia (CBR) realizados nas amostras dos solos do subleito e da camada de revestimento primário. Importante destacar que os resultados apresentados refletem a aplicação da energia do Proctor normal (PN) no subleito e do Proctor intermediário (PI) na camada de revestimento primário.

Tabela 5. Compactação, densidade *in situ*, CBR e expansão dos solos.

Camada Ensiada	Compactação		Densidade <i>in situ</i>		CBR (%)	Expansão (%)
	$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m ³)	W _{ótima} (%)	$\gamma_{d\text{nat}}$ (kN/m ³)	W _{nat} (%)		
Subleito (PN)	18,54	13,5	17,52	9,3	7,8	0,1
Revestimento primário (PI)	19,45	8,6	18,66	8,7	28,0	0,4

A comparação entre os pesos específicos secos advindos do ensaio de compactação e do método do frasco de areia evidencia a importância da aplicação de energia mecânica na estruturação das camadas de uma estrada. Mesmo confinado a 1,0 metro de profundidade, o subleito apresenta, em sua condição natural, grau de compactação equivalente a 94% de sua condição compactada. O CBR obtido nos ensaios comprova o comportamento fraco e pobre do subleito original, conforme indicado anteriormente na classificação TRB.

Na camada de revestimento primário, a diferença entre os pesos específicos secos indica potencial lançamento direto de materiais selecionados e compactação pelo tráfego durante as operações de recomposição da plataforma da estrada. O grau de compactação equivalente da condição natural em relação à compactada atingiu 95%. Para fins de comparação, as normas do DNIT para controle de execução de reforço de subleito, bases e sub-bases estabelecem a necessidade de grau de compactação nunca inferior a 100%.

Com relação à resistência mecânica, os resultados de CBR e de expansão obtidos qualificam os solos da camada de revestimento primário, segundo a norma DNIT 445/2023-ES. Entretanto, o índice de plasticidade desse solo (12%) mostra-se superior ao estabelecido na referida norma para regiões com pluviosidade superior a 1.500 mm anuais (7%), razão pelo qual técnicas de estabilização dos solos foram pesquisadas.

Em virtude de disponibilidade de materiais no local, foram selecionadas duas técnicas de estabilização, uma granulométrica e outra química, para os solos da camada de revestimento primário da estrada, a saber: incorporação de 50%, 60% e 70% de RAP e adição de 1% e 2% de cimento Portland. A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de compactação e de CBR do revestimento primário (solo puro) e das misturas.

Tabela 6. Compactação, CBR e expansão do revestimento primário e das misturas estabilizadas.

Materiais	Compactação (PI)		CBR (%)	Expansão (%)
	$\gamma_{d_{\max}}$ (kN/m ³)	w _{ótima} (%)		
Solo puro	19,45	8,6	28,0	0,36
50% de solo + 50% de RAP	20,38	7,1	39,4	0,08
40% de solo + 60% de RAP	20,58	6,2	48,9	0,06
30% de solo + 70% de RAP	20,49	5,1	41,4	0,04
Solo + 1% de cimento (cura de 7 dias)	20,10	10,2	85,0	0,00
Solo + 2% de cimento (cura de 7 dias)	20,04	10,2	167,8	0,00

As estabilizações granulométrica e química realizadas nos solos do revestimento primário resultaram em aumento da resistência e redução da expansão das misturas em comparação a sua condição natural.

Com a incorporação de RAP, o acréscimo de resistência mecânica atingiu até 75% em relação ao solo natural. Entretanto, foi observada redução do CBR quando incorporado 70% de RAP (maior teor aplicado na pesquisa). Esse comportamento pode estar associado ao desequilíbrio na proporção de finos em relação aos agregados graúdos no traço, o que resultaria em uma mistura mais instável e menos resistente. A redução do peso específico seco máximo e da umidade ótima no máximo teor de RAP corroboram esse entendimento.

Já o acréscimo de resistência e redução da expansão advindos da estabilização química foram muito mais relevantes, mesmo diante dos baixos teores de cimento Portland adicionados às misturas. Com a adição de 1% de cimento, a mistura teve incremento de 300% no CBR em relação à condição original, enquanto que a adição de 2% de cimento resultou em um aumento de 600%. Esses resultados mostram-se promissores e os valores foram muito superiores aos obtidos em pesquisas com solos similares e referenciadas nesse artigo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A campanha experimental proposta permitiu caracterizar adequadamente os solos constituintes do subleito e do revestimento primário da estrada não pavimentada em discussão. A camada considerada como subleito apresenta comportamento fraco e pobre, o que tem justificado a aplicação contínua de revestimento primário nas atividades rotineiras de manutenção da estrada, de forma a manter a qualidade de rolamento.

A convergência das curvas granulométricas dos solos do subleito e do revestimento primário constitui indício do aterramento da plataforma da estrada com revestimento primário pelas operações rotineiras de manutenção ao longo de décadas. O subleito original do segmento em pesquisa, com as condições realmente locais, seguramente está localizado alguns metros abaixo da cota tratada como subleito nesse artigo.

A comparação dos pesos específicos secos do subleito, em sua condição natural e compactada, aponta para o lançamento direto dos materiais na plataforma da estrada em períodos anteriores de manutenção. Esse mesmo comportamento é observado nos ensaios com os solos do revestimento primário atual.

Embora os resultados de resistência mecânica e expansão habilitem os solos do revestimento primário, conforme norma DNIT 445/2023-ES, o índice de plasticidade mostrou-se superior ao limite estabelecido para regiões com pluviosidade elevada. Nesse sentido, foram selecionadas as duas técnicas de estabilização adotadas nessa pesquisa: incorporação de 50%, 60% e 70% de RAP e adição de 1% e 2% de cimento Portland.

Os resultados indicaram ganhos de resistência e redução da expansão das misturas em comparação ao solo em sua condição natural, o que confirmou a potencialidade das técnicas de estabilização adotadas. Os ensaios da Metodologia MCT demonstraram comportamento levemente laterítico dos solos arenosos do revestimento primário. Essa ocorrência não inviabiliza a aplicação de estabilização química nesse segmento da estrada não pavimentada. Ensaios adicionais devem ser realizados para avaliar a intensidade e o tempo da instabilização das misturas em relação à vida útil esperada para a solução e ao ciclo de manutenções da estrada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos da Unidade Local do DNIT de Itabuna e dirigentes da Superintendência Regional do DNIT no Estado da Bahia pelo apoio no desenvolvimento da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amorim, E.F. (2013). *Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de Caso: Município de Campo Verde - MT*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 173 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) NBR 6508. *Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*. RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) NBR 7180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) NBR 7182. *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Balkis, A.P. & Macid, S. (2019). Effect of cement amount on CBR values of different soil. *European Journal of Science and Technology*, (16): 809-815.
- Confederação Nacional do Transporte (2022) *Anuário CNT - Estatística Consolidada*. Disponível em <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Inicial>, Acesso em 3 de mar. 2024.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) Norma DNER 52. *Solos e agregados miúdos - Determinação da umidade com emprego do speedy. Método de ensaio*. Brasília.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) Norma DNER 92. *Solos - Determinação da massa específica aparente in situ com emprego de frasco de areia. Método de ensaio*. Brasília.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) Norma DNER 93. *Solos - Determinação da densidade real. Método de ensaio*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016) *Norma DNIT 172. Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas - Método de ensaio*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) *Norma DNIT 258. Solos - Compactação em equipamento miniatura - Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão - Método de ensaio*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) *Norma DNIT 259. Solos - Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura - Classificação*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) *Norma DNIT 445. Terraplenagem - Revestimento primário - Especificação de serviço*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2024a) *Sistema Interno de Acompanhamento de Contratos - SIAC*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2024b) *Composições de Custos - Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO*. Brasília.
- Pereira, R.S., Emmert, F., Miguel, E.P., Mota, F.C.M. & Leal, F.A. (2017). *Estabilização mecânica de solos como alternativa na construção de estradas florestais de baixo custo*. *Nativa*, 5 (3), p. 212-217.
- Razali, R. & Malek, M.S. (2018). *The usage of cement for soil stabilization in construction of low volume roads in Malaysia*. 10th Malaysian Road Conference & Exhibition: Materials Science and Engineering.
- Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (2024) *Relatório de Pesquisa TED DNIT - Avaliação de desempenho e adequação de diferentes técnicas de reforço e estabilização dos solos em rodovias federais não pavimentadas*. Cruz das Almas, Bahia, 110 p.
- Yang, Y., Li, S., Li, C., Wu, L., Yang, L., Zhang, P. & Huang, T. (2020). *Comprehensive laboratory evaluations and a proposed mix design procedure for cement-stabilized cohesive and granular soils*, *Frontiers in Materials*, v. 7, article 239.