



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

Thayse Balarotti Pedrazzi¹; Cassio Eduardo Lima de Paiva¹; Amaro Gabriel Joaquim¹

RESUMO

Este artigo apresenta a melhoria no acabamento da camada superficial de estrada de terra, com solos finos laterítico e não laterítico, através da superfície do leito existente tratado com adequados teores de cimento ou cal e acrescida da cravação de partículas granulares (com dimensões inferiores a 9,5 mm), antes da compactação final de acabamento e da cura, para melhoria das condições de rolamento e aderência.

Através de extenso programa de ensaios de laboratório, foi obtido que com o emprego de 4% de cimento ou 8% de cal aos solos finos laterítico (LG') e não-laterítico (NG'), compactados nas energias AASHTO normal e intermediária, respectivamente, as misturas alcançaram, simultaneamente, $RCS \geq 1,2$ MPa, $ISC \geq 20\%$, expansão $\leq 1\%$ e $PMI = 0\%$ aos 7 dias de cura; atendendo às especificações brasileiras para revestimento primário granular de estradas não pavimentadas e de solo melhorado com cimento e, adicionalmente, tolerância igual a zero para a erosão à ação da água. Utilizar agregados grossos de fresado asfáltico (com dimensões entre 9,5 mm e 4,8 mm), como tratamento primário por agulhamento, permite uma irregularidade mínima na superfície e é solução promissora para ser aplicada como nova fonte de aproveitamento do fresado armazenado em pilhas, que pode ser obtido gratuitamente pelos municípios de pequenas cidades.

PALAVRAS-CHAVE: Estrada de terra; solo melhorado com cimento; solo-cal; fresado asfáltico

ABSTRACT

This paper presents the improvement in the final surface layer of a earth road, with lateritic and non-lateritic fine soils, through the surface of the soil improvement with appropriate cement or lime content plus at embedding of granular particles with dimensions less than 9.5 mm, prior to finishing compaction and before curing, to improve rolling and grip conditions.

Through an extensive program of laboratory tests, it was obtained that with the use of 4% cement or 8% lime on lateritic (LG') and non-laterite (NG') fine soils, using AASHTO compaction effort standard and intermediate (Brazilian criterion) respectively, the mixtures simultaneously achieved $USC \geq 1.2$ MPa, $CBR \geq 20\%$, expansion $\leq 1\%$ and Loss of mass by immersion in water = 0% at 7 days of cure; meeting Brazilian specifications for granular coating of unpaved roads and cement-improved soil and, additionally, zero tolerance for erosion due to water action. Using reclaimed asphalt pavement (with dimensions between 9.5 mm and 4.8 mm), allows for minimal irregularities on the surface and is a promising solution to be applied as a new source of use for asphalt millings stored in piles, which can be obtained free of charge by municipalities in small towns.

KEY WORDS: Earth road; cement-improved soil; lime soil; reclaimed asphalt pavement

¹ InfrA, FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, thpedrazzi@gmail.com; cassio@unicamp.br



INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas representam 79% da malha viária brasileira, com predominância absoluta de estradas de terra, principalmente de solos tropicais, e sem qualquer tipo de tratamento na superfície; e, sob jurisdição municipal (DNIT, 2024; CNT, 2024; CNT, 2022). Estas estradas desempenham, no Brasil, um papel preponderante como meio de ligação entre pequenas cidades e áreas rurais, dando mobilidade ao escoamento dos produtos agrícolas, bem como acesso aos serviços gerais, contribuindo, assim, para a melhoria da qualidade de vida e no desenvolvimento das comunidades que possuem este tipo de infraestrutura viária (PIMENTEL, 2007).

E, também, em alguns locais, permitem a ligação entre o cinturão verde e a área urbana anexa. No cinturão verde, que é uma área com plantações destinadas a alimentação humana e que circula ou fica nas zonas rurais dos centros urbanos, a maior parte das suas estradas destinam-se ao acesso a propriedades rurais formadas por áreas de lazer e áreas agrícolas produtoras de produtos hortifrúteis; daí a importância da sua trafegabilidade para acessibilidade e distribuição de insumos, e, não para tráfego contínuo ou pesado.

Apesar da importância econômica e social destas estradas às comunidades que fazem parte, as restrições econômicas e a precariedade técnica que enfrentam os municípios brasileiros fazem com que essa classe de rodovia não sofra um processo apurado de construção nem uma manutenção adequada (FERREIRA e PAIVA, 2007). Como consequência, a superfície estradal se deteriora rapidamente, reduzindo a mobilidade veicular, limitando o desenvolvimento social e econômico e pondo em risco o sucesso destas comunidades rurais; pois, sua situação torna-se crítica em épocas de chuva, quando a lama torna o tráfego precário e representa risco aos motoristas. Portanto, estas estradas não pavimentadas precisam ser trafegáveis durante todo o ano, exigindo um processo de perenização da sua superfície de rolamento.

A perenização da superfície de uma estrada pode ocorrer mediante duas grandes soluções: a primeira pelo tratamento do solo superficial de forma a torná-lo resistente ao tráfego e às chuvas, a segunda solução seria a construção de uma camada granular superposta ao subleito estradal compactado e que, igualmente, pudesse resistir às solicitações do tráfego e do clima.

O emprego de revestimento primário granular em vias não pavimentadas é uma solução normatizada pelos órgãos competentes no Brasil (DNIT, 2023b; DER-PR, 2023b; DER-SP, 2006; DER-BA, 2006); porém, a sua utilização ainda é pouco frequente, principalmente, devido ao custo de construção. Contudo, esta solução é frequentemente utilizada na América do Norte, Austrália e Europa com o sucesso esperado (JOAQUIM, 2017).

A estabilização química é um tratamento de baixo custo usado nos solos já desde tempos remotos. Adequados teores de aditivo químico, como cimento ou cal, podem ser aplicados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas de solos com baixo desempenho, especialmente quando não se pretende atingir altas resistências e se deseja apenas tratar o solo local para atender a um baixo volume de tráfego e ao clima.

Neste contexto, este artigo apresenta um estudo de laboratório onde se buscou determinar a melhoria com cimento e cal de duas plataformas estradais em solo fino tropical, com baixo volume de tráfego e sem previsão de pavimentação em planos futuros imediatos (JOAQUIM, 2017); com acréscimo de cuidados construtivos para melhoria das condições de rolamento e aderência para promover a trafegabilidade em todos os momentos do ano, através da cravação de agregados



grossos de fresado asfáltico (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP, em inglês) na superfície, como um tratamento primário por agulhamento (DER-PR, 2023b).

Merece destaque que resíduos das operações de fresagem de pavimentos asfálticos no Brasil não são reutilizados em novas capas recicladas e se constituem em passivo ambiental. Este artigo analisa a viabilidade técnica da utilização do resíduo da fresagem como tratamento primário.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os solos finos lateríticos usados na pavimentação são encontrados em grandes quantidades em países de clima tropical ao longo de todo o globo (ROBINSON e THAGESEN, 2004), dentre eles o Brasil (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Contudo, nem sempre na condição natural, estes solos apresentam um desempenho adequado como plataformas viárias de estradas não pavimentadas.

Para permitir uma superfície de rolamento com características superiores às do solo natural, com a função de assegurar condições satisfatórias de tráfego, mesmo sob condições climáticas adversas, o emprego de revestimentos primário em vias não pavimentadas é uma solução normatizada no Brasil (DNIT, 2023b; DER-PR, 2023b; DER-SP, 2006; DER-BA, 2006); porém, a sua aplicação ainda é limitada, razão pela qual as vias não pavimentadas apresentam-se muito precárias.

Segundo as especificações nacionais, na execução do revestimento primário granular é utilizado material de boa qualidade, selecionado e estabilizado granulometricamente, que é compactado em espessura entre 10 cm e 20 cm, sobre a terraplenagem concluída. Para efeito de seleção do material, os parâmetros são Índice de Suporte Califórnia – ISC (*California Bearing Ratio* - CBR, em inglês) e plasticidade, principalmente, na energia de compactação AASHTO intermediária.

Adequados teores de aditivo químico como cimento ou cal podem ser aplicados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas de solos com baixo desempenho, especialmente quando se pretende tratar o solo local (KESTLER, 2009) e obter uma mistura que não deve ser rígida para ser mantida com a motoniveladora. Para empregar em revestimento primário de estradas não pavimentadas, esta técnica de estabilização já é usada na América do Norte, Austrália e Europa (AMARO, 2017).

No Brasil, vários trabalhos foram desenvolvidos com a aplicação de aditivos químicos, dentre eles cimento e/ou cal, de modo a melhorar o desempenho das camadas do pavimento (CONSOLI, MORAES e FESTUGATO, 2012; INGUNZA, PEREIRA e SANTOS JUNIOR, 2015; CONSOLI, LOPES e HEINECK, 2009; MARCON, CORRÊA e TRICHÊS, 2015); onde a seleção do teor do ligante é baseada, principalmente, na avaliação da resistência à compressão simples (RSC) e ISC, empregando energia de compactação AASHTO normal e intermediária.

Segundo Wahab *et al.* (2021), a adição de 6% de cimento ao solo fino laterítico (MH/A-7-5, segundo as classificações SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos e TRB/AASHTO - *Transportation Research Board*) foi considerado suficiente para obter um RCS superior a 0,8 MPa, considerando os padrões do Departamento de Obras Públicas da Malásia (Sudeste Asiático) para construção de estradas de baixo volume de tráfego. Os resultados do ensaio de durabilidade revelaram que a mistura solo-cimento resultante resistiu a 15 ciclos de umedecimento-secagem; no entanto, a RCS das amostras diminuiu em relação aos ciclos, mas no final do 15º ciclo, o resultado da RCS foi superior a 0,8 MPa. Esse trabalho mereceu destaque quanto aos requisitos e seus resultados pela sua semelhança com a pesquisa apresentada neste artigo técnico e por se tratar de país com clima com muita semelhança ao clima brasileiro.



Em outro trabalho feito pela mesma equipe de pesquisa da Malásia, Razali e Malek (2019), a camada tratada com cimento foi protegida por um tratamento superficial betuminoso.

Segundo Marcon, Corrêa e Trichês (2015), a adição de 2% e 3% de cal a solos expansivos (respectivamente CH/A-7-5 e CL/A-7-6, segundo as classificações SUCS/AASHTO), mudou o comportamento do solo, de não laterítico (NG') para laterítico (LG'), segundo a metodologia Miniatura Compactada Tropical – MCT, e gerou alterações de plasticidade e ISC nos solos, proporcionando viabilidade técnica para uso como subleito de pavimento de baixo volume de tráfego.

Segundo Lovato (2004), a adição de 3% de cal ao solo argilo-arenoso laterítico (LG', segundo a classificação MCT) apresentou comportamento aceitável para utilização em camada de base e/ou sub-base de pavimentos.

Não obstante, no que tange a revestimento primário de estradas não pavimentadas, é inexistente algum estudo que permita melhorar um solo superficial fino laterítico com adequados teores de aditivos químicos, que pudesse apresentar resistência ao tráfego e clima, e atender às especificações brasileiras para estradas deste porte.

A construção de uma estrada não pavimentada é mais economicamente viável quando não se precisa importar material. Neste sentido, quando se tem um solo tropical com propriedades geotécnicas aquém das requeridas nas normas para fins de pavimentação, a estabilização química pode ser uma solução interessante.

Deste modo, teores adequados de aditivo químico de cimento ou cal podem ser aplicados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas destes solos, especialmente quando não se pretende atingir altas resistências, e se quer tratar o solo local para atender a um baixo volume de tráfego, tornando a solução economicamente viável. Este artigo objetiva avaliar o desempenho de dois solos finos tropicais, laterítico e não laterítico, no seu estado natural e após tratamento com adequados teores de cimento e cal. O assunto faz parte da linha de pesquisa em Infra e superestrutura rodoviária, em andamento, do programa de pós-graduação, na área de Transportes, do Departamento de Infraestrutura e Ambiente da Unicamp.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo foi desenvolvido fazendo-se o emprego de dois solos finos brasileiros, um laterítico e outro não laterítico, cada um deles tratados isoladamente com os dois aditivos químicos, nomeadamente, cimento (CP II-F-32, da CSN) e cal hidratada (CH-III ITAÚ, da Votorantim) (JOAQUIM, 2017).

Os dois solos estudados foram coletados na região de Campinas-SP e, considerando a profundidade de ocorrência do processo de laterização, os solos foram coletados na profundidade entre 2 e 5 metros. O primeiro solo (S-1) foi coletado no campus da Unicamp, nas imediações do Hospital das Clínicas, e o segundo solo (S-2) foi coletado em um trecho de estrada não pavimentada, ou estrada vicinal, que dá acesso à Rodovia Dom-Pedro, SP-065, pista norte, km 81+500.

Além dos dois solos selecionados serem bastante predominantes na região de Campinas, também se considerou o fato de serem solos com baixo desempenho, permitindo se avaliar o mínimo teor de aditivo para melhorá-los.

Como premissa, para determinar a dosagem adequada ou ótima de aditivo, isto é, a que permite a mistura atender aos requisitos das especificações construtivas para revestimento primário granular de estradas não pavimentadas (DNIT, 2023b; DER-PR, 2023b; DER-SP, 2006; DER-BA, 2006) e



para solo melhorado com cimento (DER-PR, 2023a), foram adotados valores limites para os ensaios ISC, expansão, RCS e, adicionalmente, tolerância nula para o ensaio de perda de massa por imersão em água – PMI, segundo a metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995); parâmetros que devem ser atendidos simultaneamente, conforme apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Critérios de dosagem para as misturas

Parâmetros	RCS	ISC e expansão	PMI
Valores limites ^{NOTA}	$\geq 1,2$ MPa aos 7 dias de cura	$\geq 20\%$ e $\leq 1\%$	0%
Documento de origem	DER-PR (2023a)	DNIT (2023b); DER-PR (2023b); DER-SP (2006); DER-BA (2006)	Nogami e Villibor (1995)

NOTA: Valores característicos considerados nas misturas solos melhorados com cimento e com cal oriundos das especificações citadas e do livro técnico citado.

Em ordem de alcançar os objetivos, o programa de experimentos em laboratório foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa da pesquisa, os solos e as misturas compactados foram submetidos ao ensaio de RCS; além dos ensaios para caracterização e classificação dos solos sem aditivo (granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, mini-MCV e PMI). As variáveis independentes consideradas nesta etapa foram: teor de cimento (0%, 2,5%, 3%, 3,5% e 4%, em massa, em relação à massa do solo seco) (DER-PR, 2023a; DNIT, 2010), teor de cal (0%, 2%, 4%, 6% e 8%, em massa, em relação à massa do solo seco) (DNIT, 2019), energia de compactação (AASHTO normal e intermediária), de modo a definir os valores ótimos, para os teores dos aditivos e para as energias de compactação, que, simultaneamente, atendem ao critério de RCS $\geq 1,2$ MPa aos 7 dias de cura.

A segunda etapa da pesquisa consistiu na realização dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, ISC, PMI, resistência à tração com compressão diametral (RTCD), cisalhamento direto (CD) e resistência à compressão triaxial estática (RCT) para as misturas ótimas dos solos com os aditivos, determinadas na primeira etapa; cumprindo-se, exceto nos ensaios de limites de consistência, o tempo de cura de 7 dias, devido ao tempo de reação dos aditivos com o solo. Portanto, nesta etapa, as misturas avaliadas para os solos S-1 e S-2 apenas consideraram os teores de 4% de cimento e de 8% de cal, compactadas usando a energia normal para S-1 e a energia intermediária para S-2.

Com base nos objetivos da pesquisa, também foram realizados os ensaios de limites de *Atterberg* (limite de liquidez e limite de plasticidade), para os solos na condição natural e após tratamento, permitindo avaliar a influência dos aditivos na plasticidade do solo.

Para os ensaios de RCS e RTCD foram moldados corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e com 8 cm de diâmetro e 5 cm de altura, respectivamente.

Os ensaios de CD e RCT foram realizados usando as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, ambos ensaios na condição não drenada ou rápido (*Uncosolidated-Undrained* – UU, em inglês).

Os ensaios de laboratório seguiram as seguintes normas técnicas:

- Distribuição granulométrica das partículas – NBR 7181 (ABNT, 2016a);
- Determinação do limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016b);
- Determinação do limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016c);
- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – NBR 9895 (ABNT, 2016d);
- Ensaio de resistência à compressão simples – NBR 12025 (ABNT, 2012);



- Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão - DNIT-ME 258 (DNIT, 2023c);
- Resistência à tração por compressão diametral – DNIT-ME 136 (DNIT, 2018);
- Ensaio de cisalhamento direto - ASTM D6528 (ASTM, 2007);
- Ensaio triaxiais estático – ASTM D2850 (ASTM, 2015).

O programa experimental completo da pesquisa desenvolvida está representado esquematicamente na figura 1.

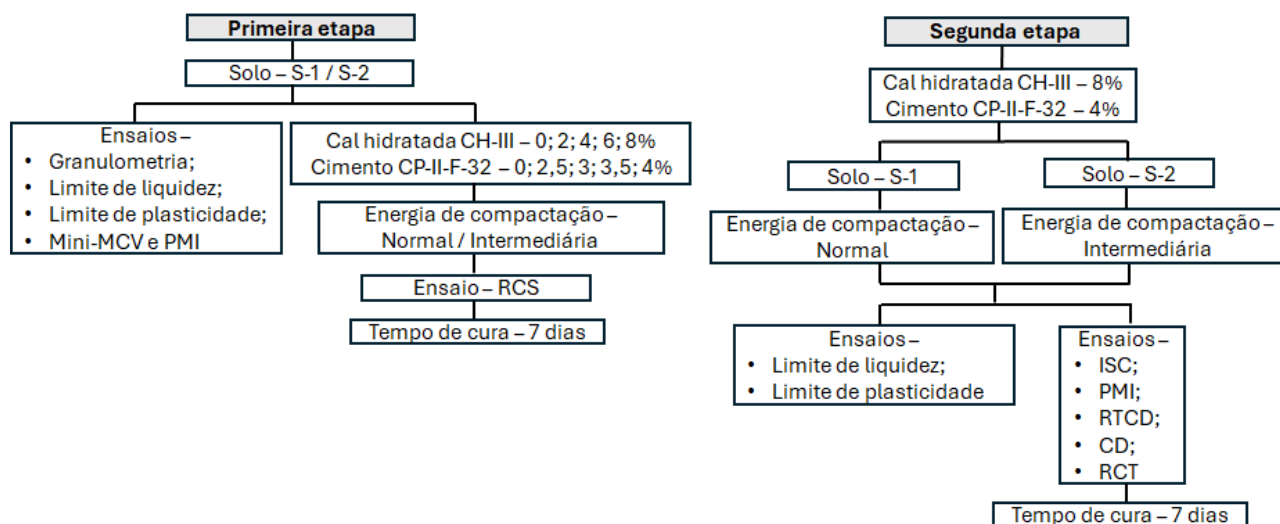


Figura 1. Programa experimental desenvolvido durante a pesquisa

RESULTADOS

A tabela 2 apresenta a classificação dos solos objetos de estudo, sem aditivo; obtida a partir dos ensaios de caracterização, Mini-MCV e PMI realizados na primeira etapa do programa de pesquisa.

Tabela 2. Classificação dos solos S-1 e S-2, sem aditivo

Solo	SUCS	AASHTO (IG) ^{Nota 1}	MCT ^{Nota 2}
S-1	ML	A-7-5 (10)	LG'
S-2	MH	A-7-5 (11)	NG'

NOTA 1: IG – Índice de Grupo; NOTA 2: DNIT, 2023a

A tabela 3 apresenta o resumo de todos os resultados dos ensaios realizados na segunda etapa do programa de pesquisa para as misturas ótimas dos solos com os aditivos, em comparação aos solos sem aditivo.

Conforme a tabela 3, os solos sem aditivo não atenderam aos requisitos mínimos considerados nesta pesquisa (tabela 1), o que justifica o estudo da sua melhoria com cimento e cal.

Destaca-se que, na energia de compactação normal, o solo laterítico S-1 (LG') apresentou desempenho maior que o outro solo não laterítico S-2 (NG') em todos os ensaios, tal como esperado. Portanto, para o S-2 (NG'), foi necessário um incremento da energia de compactação, isto é, da normal para intermediária.



Este estudo provou que, com a aplicação de 4% de cimento, que é considerado baixo teor, é possível melhorar os solos finos de comportamento laterítico S-1 (LG') e não-laterítico S-2 (NG') para uma aplicação como revestimento primário de estradas não pavimentadas.

Contudo, para a cal visando uma aplicação como revestimento primário de estradas não pavimentadas, foi requerida uma dosagem maior (8%) para melhorar os solos finos de comportamento laterítico S-1 (LG') e não-laterítico S-2 (NG'), o que pode ser justificado pela qualidade ou desempenho diferenciado dos aditivos entre si e a resposta dos solos e das suas misturas após o seu tratamento.

Tabela 3. Quadro resumo de resultados para os solos sem aditivo químico e para as misturas ótimas com aditivos químicos

SOLO	S-1 (LG')			S-2 (NG')		
Ter ótimo de aditivo	Solo sem aditivo	4% cimento	8% cal	Solo sem aditivo	4% cimento	8% cal
Limite de Liquidez (%)	47	45	44	52	56	47
Índice de plasticidade (%)	13	12	8	20	18	11
Teor de umidade ótima (%)	25,4	24,0	27,4	21,6	24,2	23,6
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,63	1,67	1,57	1,69	1,77	1,57
ISC (%)	18	56	79	20	58	63
Expansão (%)	0,16	0,03	0	0,71	0,03	0
RCS (MPa)	0	1,60	1,28	0	1,70	1,44
PMI (%)	38	0	0	1	0	0
RTCD (MPa)	0,02	0,13	0,08	0,04	0,14	0,13
Ângulo atrito - CD (°)	31	60	39	35	61	40
Coesão - CD (kPa)	79	190	245	112	148	231
Ângulo atrito - RCT (°)	33	42	34	34	42	35
Coesão - RCT (kPa)	70	126	167	172	188	261
Energia de compactação AASHTO	Normal			Intermediária		

De forma a avaliar o desempenho das melhores misturas compactadas no campo, como solo melhorado com cimento e solo-cal, foram confeccionados 6 corpos de prova para ficarem expostos ao clima, como apresentados na figura 2. Para cada um dos solos pesquisados, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo: 01 na condição natural (sem aditivo), 01 com 4% de cimento e 01 com 8% de cal; moldados nos valores ótimos de teores dos aditivos e energia de compactação definidos na pesquisa em laboratório (tabela 3).

Na figura 2 (a) e (b), pode-se visualizar os 3 corpos de prova moldados com cada um dos solos pesquisados, sendo que, dentre os 2 corpos de prova adjacentes, o primeiro foi moldado com 4% de cimento e o segundo com 8% de cal, e o corpo de prova atrás dos dois adjacentes foi moldado na condição natural (sem aditivo).

Conforme a figura 2, os corpos de prova moldados com o S-1 (LG') (figura 2(a)) apresentaram pequenas fissuras após o período de 2 meses de exposição; sendo que, a trinca foi notória, sobretudo, no corpo de prova sem aditivo. Já os corpos de prova moldados com S-2 (NG') (figura 2(b)), no geral, não apresentaram fissuras.

Verificou-se, também, que o S-1 (LG') (figura 2(a)) com aditivos, apresentou a superfície mais regular ou lisa em comparação com o S-2 (NG') (figura 2(b)) com aditivos, pois o S-1 (LG') possui maior quantidade de finos (70%), principalmente, de argila, que é responsável por gerar maior integração ou coesão entre as partículas.



(a)

(b)

Figura 2. Corpos de prova expostos ao clima: (a) com S-1 (LG⁺), dentre os 2 adjacentes à frente, o primeiro foi moldado com 4% de cimento e o segundo com 8% de cal, compactados na energia normal; (b) com S-2 (NG⁺), dentre os 2 adjacentes à frente, o primeiro foi moldado com 4% de cimento e o segundo com 8% de cal, compactados na energia intermediária - após 2 meses de exposição (Acervo do terceiro autor)

Portanto, os requisitos para materiais granulares apresentados nas especificações brasileiras para revestimento primário e solos melhorados quimicamente, acrescido da tolerância nula à erosão pela ação da água, tomados como premissa da pesquisa (tabela 1), podem ser obtidos não somente para o cimento, mas também para a cal.

A principal desvantagem desta solução é que a superfície final resultante é muito lisa. Outra desvantagem desta solução seria a infiltração de água em trincas, semelhantes às fissuras ocorridas nos corpos de prova da figura 2, que poderia promover deterioração precoce da camada.

Merece destaque a ausência de especificação de serviço construtivo de camada de solo tratado exposta ao tráfego e ao clima no Brasil. As especificações existentes para solo estabilizado ou melhorado com cimento ou com cal se destinam a camadas tratadas de regularização de subleito, sub-base e base que são camadas intermediárias de pavimento e devidamente protegidas por revestimento superposto e, portanto, não ficam expostas ao clima e ao tráfego durante a sua vida útil.

O processo de estabilização química de solos é um processo que precisa ser cuidadoso porque diferentes tipos de solos exigem diferentes teores dos aditivos melhoradores; naturalmente, para cada tipo de solo é necessário um estudo de laboratório específico. Esta solução exige um processo construtivo também cuidadoso, no qual, o aditivo em pó precisa ser igualmente distribuído no solo solto, devidamente misturado e adequadamente umedecido, para que os resultados de laboratório possam ser reproduzidos no campo. Esta construção necessita de equipamentos de construção pesada para se obter o sucesso esperado (DER-PR, 2023a).

Retornando ao aspecto peculiar da solução de tratamento do solo superficial por via química ficar lisa e poder gerar falta de segurança veicular, este inconveniente poderia ser sanado com a cravação de fragmentos granulares sobre a superfície estradal antes da sua compactação final e antes da cura. Nesta pesquisa foi utilizada uma fina camada granular, na ordem de 2 cm, de resíduos de fresagem, cravada, permitindo uma irregularidade mínima nesta superfície. Preferencialmente, o serviço deve ser executado com a cravação de partículas granulares com tamanho inferior a 9,5mm (entre 9,5mm a 4,8mm), prévia a compactação final de acabamento e antes da cura, com rolo liso; como um tratamento superficial por agulhamento (DER-PR, 2023b).



A utilização de resíduos de fresagem no agulhamento visou uma solução sustentável para materiais granulares pouco utilizados como reuso no Brasil, além de se constituir de partículas resistentes à chuva. Esta utilização é semelhante àquela sugerida por Trombeta (2023) e Silva (2023), que analisaram a utilização de fragmentos de resíduos cerâmicos como material de agulhamento sobre plataformas estradais.

A figura 3 mostra um corpo de prova (cilíndrico, com 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura) onde o processo de agulhamento proposto, utilizando agregados grossos de fresado asfáltico (com dimensões entre 9,5 mm e 4,8 mm), foi executado sobre a superfície do solo laterítico S-1 (LG') melhorado com 4% de cimento, compactado na energia normal.

O material fresado utilizado na pesquisa foi obtido da fresagem do pavimento asfáltico da avenida John Boyd Dunlop, na cidade de Campinas-SP, e cedido pela Prefeitura Municipal de Campinas - PMC.

Os agregados graúdos do fresado foram obtidos por peneiramento, conforme norma NBR 7181 (ABNT, 2016a), utilizando-se as peneiras $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm), $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm) e #4 (4,8 mm). As frações retidas na peneira de 12,7 mm foram descartadas, e a composição adotada foi de 25% (material retido na peneira de 9,5 mm) e 75% (material retido na peneira de 4,8 mm), utilizada sem processamento adicional e conforme o material recebido da PMC.



Figura 3. Corpo de prova da mistura S-1 (LG') melhorada com 4% de cimento, compactado na energia normal, com tratamento primário por agulhamento na superfície, utilizando agregados grossos de fresado asfáltico (Acervo do primeiro autor)

Comparativamente a esta solução proposta, poder-se-ia prever um tratamento superficial betuminoso semelhante ao apresentado por Wahab *et al.* (2021), que relatou sucesso após 18 meses de acompanhamento da solução da camada de solo tratada mais tratamento superficial betuminoso.

CONCLUSÃO

Este trabalho objetiva apresentar o desempenho de dois solos finos tropicais, um laterítico S-1 (LG') e outro não laterítico S-2 (NG'), no seu estado natural e após tratamento com teores



adequados de cimento ou cal, para empregar como revestimento primário de estradas não pavimentadas.

Conclui-se que o emprego de 4% de cimento ou 8% de cal aos solos S-1 (LG') e S-2 (NG'), compactados nas energias AASHTO normal e intermediária, respectivamente, atenderam, simultaneamente, as especificações brasileiras para revestimento primário granular de estradas não pavimentadas ($\text{CBR} \geq 20\%$ e $\text{expansão} \leq 1\%$), para solo melhorado com cimento ($\text{RCS} \geq 1,2 \text{ MPa}$) e, adicionalmente, a tolerância igual a zero para a erosão à ação da água ($\text{PMI} = 0\%$), aos 7 dias de cura.

O tratamento dos solos com teores adequados de cimento ou cal mais a cravação de fina camada de partículas granulares de fresado asfáltico (com dimensões entre 9,5 mm e 4,8 mm), prévia a compactação final de acabamento da superfície e a cura, como tratamento primário por agulhamento, é apresentado como solução alternativa, sustentável e econômica para o acabamento de estradas de terra.

O teor ótimo de cimento obtido nesta pesquisa apresentou valor inferior àqueles necessários a uma mistura tipo solo-cimento, e adequado ao valor mínimo de RCS para uma camada melhorada com cimento. O solo S-1 (LG') alcançou os valores mínimos de RCS, ISC e PMI considerados, com compactação na energia normal; enquanto, o solo S-2 (NG') apenas os atingiu na energia intermediária, como está prescrita na especificação de serviço de pavimentação ES-PA-11 do DER-PR (2023a) para solo tratado com cimento.

O teor ótimo de cal obtido nesta pesquisa apresentou valor superior àqueles necessários a uma mistura para melhoria com cal do subleito, como está prescrita na especificação de serviço ES-422 do DNIT (2019). Assim como nas misturas com cimento, as resistências mínimas consideradas no estudo das misturas de solo com cal, o solo S-1 (LG') necessitou de uma energia de compactação normal, enquanto o solo S-2 (NG') precisou ser compactado na energia intermediária.

Neste processo construtivo, o solo tratado é aquele da plataforma estradal e os únicos materiais importados são os aditivos químicos para a sua melhoria. Devido a este fato, constitui-se numa técnica construtiva de baixo custo, mas que, por outro lado, a exigência de estudo laboratorial prévio para determinar o teor mínimo necessário de atendimento dos requisitos técnicos exigidos causa muito receio nos gestores rodoviários e desestimula a consideração deste processo construtivo. A não realização de estudo laboratorial prévio, ou estudo deficiente, resulta em teor de aditivo inferior ao adequado, que promove precoce deterioração da camada, ou em teor superior, que, além de ser antieconômico, pode promover elevada rigidez da camada, que poderá ser trincada durante a construção ou na sua fase de operação, por fadiga prévia da sua vida útil de projeto.

Muitas pesquisas têm sido dedicadas ao reaproveitamento de agregados da fresagem de pavimentos asfálticos; o desenvolvimento de soluções interessantes é exigência para o desenvolvimento sustentável.

Naturalmente, processos de melhoramento por via química de solos superficiais resultam em solução de menor custo e menor impacto ambiental que a solução convencional de revestimento primário granular superposto que utiliza, predominantemente, agregados de origem pétreos obtidos diretamente da pedra.

Outras soluções alternativas já foram analisadas no Brasil visando a eliminação, ou diminuição, dos agregados pétreos virgens mediante a sua substituição por resíduos graúdos da construção civil, que, predominantemente, têm sido estudados como agregados de misturas de concreto ou camadas de sub-base para pavimentos (MARTINS *et al.* 2021; ANGULO, 2023; ARULRAJAH *et al.*, 2012).



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D6528 - Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D2850 - Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils, 2015.
- ANGULO, S. C. Resíduos de construção e demolição: fundamentos sobre gestão e reciclagem. São Paulo: EPUSP, 2023.
- ARULRAJAH, A. et al. Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. Geotechnical Testing Journal, v. 35, n. 5, p. 743-751, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 9895 - Solo - Índice de Suporte Califórnia, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 12025 - Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos, 2012.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletins técnicos CNT - abril de 2024.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Anuário CNT do transporte - estatísticas consolidadas, 2022.
- CONSOLI, N. C.; LOPES JR, L. S.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. Journal of materials in Civil Engineering, v. 21, n. 5, p. 210-216, 2009.
- CONSOLI, N. C.; MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, n. 10, p. 1568-1573, 2012.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-PR-ES-PA 11 - Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento, 2023a.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-PR-ES-TE 07 - Terraplenagem: revestimento primário, 2023b.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-SP-ET-DE-P00/013 - Revestimento primário, 2006.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-BA-ES-T-08/01 - Revestimento primário, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-CLA-259 - Solos - Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura, 2023a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ES-140 - Pavimentação - Sub-base de solo melhorado com cimento, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ES-422 - Pavimentação - Solo-cal - Adição de cal para melhoria de subleito, 2019.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ES-445 - Terraplenagem - Revestimento primário, 2023b.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - Guia SNV, 2024.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME-136 - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME-258 - Solos - Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão, 2023c.

FERREIRA, F. M.; PAIVA, C. E. L. Uma aplicação comparativa de métodos de avaliação das condições superficiais de estrada não-pavimentada. Revista Vias Gerais, n. 6, p. 20-24. ASSENDER - Associação de Engenheiros do DER/MG, 2007.

INGUNZA, M. P. D.; PEREIRA, K. L. A.; SANTOS JUNIOR, O. F. Use of sludge ash as a stabilizing additive in soil-cement mixtures for use in road pavements. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 27, n. 7, 06014027, 2015.

JOAQUIM, A. G. Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não pavimentadas. Dissertação de mestrado. Campinas: Unicamp, 2017.

KESTLER, M. A. Stabilization selection guide for aggregate and native-surfaced low-volume roads. Washington: National Technology and Development Program, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 2009.

LOVATO, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

MARCON, A. F.; CORRÊA, J. F.; TRICHÊS, G. Improvement in physical and mechanical properties of soils by the addition of lime for paving roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2473, p. 209-214, 2015.

MARTINS, L. et al. Influência de agregados reciclados de concreto nas propriedades de novos concretos. Research, Society and Development, v. 10, n. 4, e34210414238, 2021.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Vilibor, 1995.

PIMENTEL, K. C. A. Estradas não-pavimentadas e ferrovias reforçadas com geossintéticos. Tese de doutorado. Brasília: UNB, 2007.

RAZALI, R.; MALEK, M. S. C. The usage of cement for soil stabilisation in construction of low volume roads in Malaysia. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 512 012006, 2019.

ROBINSON, R., THAGESEN, B. Road engineering for development. London: Taylor & Francis, 2004.

SILVA, T. C. A. Análise do método do agulhamento no ensaio CBR sem imersão. Trabalho de conclusão de curso. Ilha Solteira: UNESP, 2023.

TROMBETA, E. R. Adaptação do ensaio CBR para o método do agulhamento com o uso de resíduos cerâmicos. Trabalho de conclusão de curso. Ilha Solteira: UNESP, 2023.

WAHAB, N. A. et al. Strength and durability of cement-treated lateritic soil. Sustainability, 13(11), 6430, 2021.