

PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA COM ESTABILIZANTE DE SOLOS: EFEITOS DO DYNABASE

GATO, Felipe Alfano¹; JESUS, Jézer Emanuel¹;
Prof. Me. Rafael Augusto Valentim da Cruz Magdalena ²

Universidade São Francisco

felipealfanogato@gmail.com; jezeremmanuel@outlook.com;

¹ Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista

² Professor Orientador, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista

RESUMO. A construção de estradas rurais enfrenta desafios significativos, principalmente devido às diferentes condições dos solos, o que pode comprometer a sustentabilidade econômica e ambiental dos projetos de pavimentação. Em muitos casos, a remoção e substituição do subleito, ou a execução de camadas de sub-base e base, tornam-se soluções inviáveis devido aos altos custos e impactos ambientais. Nesse contexto, a estabilização "in situ" do solo, por meio de estabilizantes, surge como uma alternativa eficiente. Este artigo visa avaliar a aplicação de um estabilizante de solos no subleito de uma estrada rural no Município de Bragança Paulista, Estado de São Paulo. Este artigo foca em uma análise comparativa em laboratório, avaliando as propriedades do solo natural e do solo estabilizado, com foco nas características de capacidade de suporte e resistência. A utilização de estabilizantes no solo reduz custos e prazos de execução de obras, eliminando processos como abertura de caixa, bota fora e importação de materiais. Esses produtos agem diretamente nas partículas do solo, aumentando sua resistência, capacidade de suporte e reduzindo a expansão e a permeabilidade. Ademais, melhoram a granulometria e promovem a cimentação das partículas, tornando a resistência mais durável. Com a obstrução dos canais capilares, diminuem a sucção e a infiltração de água, prevenindo problemas como instabilidade, em solos argilosos, e garantindo maior durabilidade e eficiência às pavimentações. Dessa forma, a estabilização com uso de produtos apresenta-se como uma solução mais econômica, durável e ambientalmente responsável para a pavimentação de estradas rurais.

Palavras-chave: Estabilização de solos, Subleito, Pavimentação rural e Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A construção de estradas rurais em terrenos com subleitos de baixa resistência constitui um desafio persistente e complexo para a engenharia civil contemporânea. Tais condições exigem um planejamento rigoroso, com análises aprofundadas sobre estabilidade, recalques e a sequência construtiva, uma vez que os subleitos inadequados comprometem a performance das pavimentações, podendo levar a falhas estruturais e à degradação prematura das vias. Em muitos casos, a tradicional prática de remoção e descarte de solos inapropriados, seguida pela execução de camadas de bases e sub-bases, é economicamente inviável, consequentemente condenando a logística, principalmente em áreas rurais, onde o custo de transporte e a escassez de materiais adequados agravam ainda mais a situação. Assim, a busca por alternativas que promovam o melhoramento do solo "in situ" se faz imprescindível para viabilizar obras de pavimentação sustentáveis, eficientes e economicamente acessíveis.

De acordo com Leite et al. (2021), no meio rural, os desafios relativos à construção de estradas são ainda mais acentuados devido à falta de infraestrutura adequada e ao uso de

técnicas obsoletas, que não atendem às exigências modernas de resistência e durabilidade. Quando as estradas não são projetadas e executadas de maneira adequada, não só comprometem a segurança e a funcionalidade da via, mas também geram impactos ambientais significativos, como o carreamento de sedimentos para os corpos hídricos. Tais problemas resultam em erosão do solo e poluição das águas, prejudicando a fauna e a flora locais e, muitas vezes, tornando os custos operacionais e ambientais ainda mais elevados. Por conseguinte, os engenheiros se veem obrigados a buscar soluções inovadoras que minimizem os custos, respeitem o meio ambiente e melhorem a qualidade das estradas.

Dentro desse contexto, o mercado da construção civil apresenta diversas técnicas de melhoramento de solos moles “in situ”, que têm sido amplamente utilizadas, tais como as colunas de *deep soil mixing* (DSM) e a técnica de *jet grouting* (JG), ambas envolvem a injeção de calda de cimento no solo, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas e aumentar sua capacidade de suporte. No entanto, o sistema de pavimentação convencional brasileiro, ainda largamente adotado, prioriza a remoção dos solos inapropriados e a substituição por materiais importados para a construção das camadas de base e sub-base. Essa metodologia, embora eficiente em alguns casos, envolve altos custos operacionais e logísticos, como o transporte de solos e a execução de escavações profundas para abertura de caixa, com o consequente descarte de material em locais distantes e a necessidade de transporte de agregados para o canteiro de obras. Além disso, a escassez de matéria-prima e os elevados custos associados à importação de materiais tornam esse modelo ainda mais difícil de ser implementado de forma economicamente viável, especialmente em áreas rurais isoladas.

O objetivo central deste artigo consiste em avaliar a aplicação de um estabilizante de solos no subleito de uma estrada rural no Município de Bragança Paulista, Estado de São Paulo. Para tanto, será realizada uma análise comparativa entre o solo natural que constitui o subleito e o mesmo solo após a aplicação do estabilizante, com a finalidade de verificar a diferença de resistência entre os dois. A pesquisa será conduzida por meio de ensaios laboratoriais, em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com o intuito de fornecer dados concretos que possam embasar decisões sobre a aplicabilidade dessa técnica, considerando não apenas os aspectos técnicos, mas também a sustentabilidade econômica e ambiental da solução proposta.

Em síntese, a estabilização de solos aditivados representa uma solução inovadora e promissora para os problemas enfrentados na construção de estradas rurais, especialmente em regiões com solo de baixa qualidade geotécnica e escassez de matérias primas. A utilização dessa técnica oferece benefícios técnicos, econômicos e ambientais, tornando-se uma alternativa viável para o melhoramento da infraestrutura rural no Brasil. Este artigo, ao analisar a eficácia dessa abordagem, contribuirá para a disseminação de conhecimentos que possam orientar a implementação de soluções mais sustentáveis e eficientes na construção de pavimentações rurais, ampliando o acesso e a qualidade de vida para as comunidades do interior, com a vantagem adicional de reduzir os custos e impactos ambientais associados a obras convencionais.

Por fim, os dados deste trabalho são provenientes de ensaios realizados na Empresa Tecnofoco Laboratório, localizada no Município Bragança Paulista, Estado de São Paulo, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em que constam os equipamentos e metodologia a serem utilizados e todos os procedimentos foram acompanhados pelos autores deste artigo.

Pavimentação de vias rurais

O progresso do Brasil está diretamente relacionado ao transporte de cargas, majoritariamente realizado pelo modal rodoviário. De acordo com a CNT (Confederação Nacional do Transporte) (2023), atualmente, 65% das cargas e 95% dos passageiros são transportados por rodovias, que formam a terceira maior malha rodoviária do mundo. No entanto, quanto à conservação, 67,5% das rodovias são classificadas como Regular, Ruim ou Péssimo, enquanto apenas 32,5% são consideradas Ótimo ou Bom, mantendo-se estáveis em relação ao ano anterior, que apresentou 66,0% e 34,0%, respectivamente.

Tendo como base, essa extensa rede, junto com a extensa faixa territorial brasileira, ainda existe áreas que a pavimentação não alcança, muitas comunidades rurais ainda carecem de acesso a vias pavimentadas, prejudicando a mobilidade e dificultando o desenvolvimento dessas regiões.

A pavimentação de vias em comunidades rurais traz vantagens importantes, como o fortalecimento do escoamento da produção agrícola, a redução nos custos de transporte e o aumento do acesso a serviços essenciais. No entanto, há desvantagens na baixa durabilidade dessas vias, que eleva os custos de manutenção, causa impactos ambientais e aumenta o risco de acidentes. A qualidade reduzida das pavimentações rurais deve-se ao uso de materiais menos duráveis, agravada pelo clima, baixa disponibilidade de materiais, difícil acesso e pelo tráfego de veículos pesados, o que acelera deformações no pavimento.

Mesmo com o menor custo de execução comparado a outros modais, a pavimentação de vias rurais ainda enfrenta desafios significativos relacionados à conservação e durabilidade, especialmente em regiões onde o solo não possui as propriedades necessárias para suportar cargas e resistir às condições climáticas adversas.

[...] Independente da obra a ser realizada com um determinado tipo de solo, este deverá apresentar boas propriedades físicas e mecânicas quanto à durabilidade e resistência. Em várias situações, o solo de determinado local não apresenta condições requeridas pela obra, podendo ser pouco resistente, muito compressível ou apresentar características que deixam a desejar economicamente (TRINDADE et al., 2008, p. 11).

Nesses casos, é fundamental buscar alternativas que otimizem os custos e melhorem a eficiência das obras, garantindo vias de qualidade para as comunidades rurais.

Sendo assim, as camadas de reforço de subleito, sub-base, base e revestimento devem suprir as condições pouco favoráveis do solo.

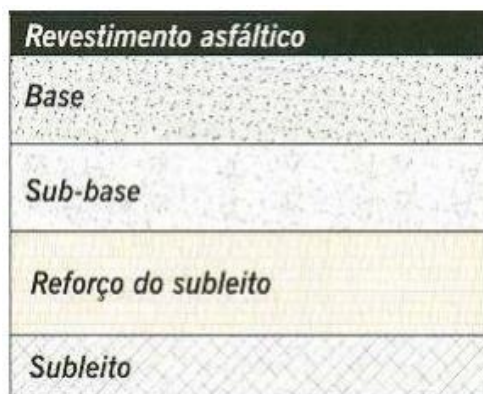


Figura 01: Camadas de pavimento flexíveis
Fonte: BERNUCCI et al., 2008, p.337

Para Horonjeff (1966 apud LOBO, 2013), a consistência da camada do revestimento se resume na mistura de material betuminoso e agregados. Suas principais funções são as de impermeabilizar a base contra a penetração das águas da superfície, protegê-la do desgaste ocasionado pelo tráfego e distribuir as cargas.

Revestimento

O revestimento é a camada superficial do pavimento, responsável por suportar diretamente o tráfego e resistir ao desgaste causado pelos esforços horizontais. Além disso, proporciona conforto e segurança, e atua como impermeabilizante, protegendo as camadas inferiores da água. O revestimento é composto por uma camada superior, chamada camada de rolamento, e camadas de ligação, também conhecidas como binder (BERNUCCI et al., 2008, p. 9). A camada de binder, embora tenha propriedades mecânicas inferiores à camada de rolamento, é essencial para o processo de construção. O revestimento é formado por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. Os agregados conferem atrito à superfície, enquanto o ligante asfáltico impede a penetração de água nas camadas mais profundas do pavimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, p. 2; BERNUCCI et al., 2008, p. 9).

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é uma mistura asfáltica amplamente utilizada na pavimentação de vias urbanas e rurais. Produzido em usinas apropriadas, é composto por agregados graduados, fíler (quando necessário) e cimento asfáltico, sendo aplicado e compactado enquanto ainda está quente.

Sua importância está na alta resistência, durabilidade e capacidade de suportar tráfego intenso, além de proporcionar um acabamento uniforme e seguro. Para zonas rurais, o CBUQ tem se destacado como solução eficiente devido à sua capacidade de suportar as condições adversas desses ambientes, como tráfego de veículos pesados e variações climáticas. Além disso, sua durabilidade reduz a necessidade de manutenções frequentes, oferecendo uma opção econômica e sustentável para melhorar a infraestrutura em regiões afastadas.

Conforme Balbo (2007), o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), também conhecido como CAUQ (concreto asfáltico usinado a quente), é a mistura asfáltica mais tradicional e amplamente utilizada no Brasil. Ele é aplicado na construção de revestimentos de pavimentos, incluindo camadas de rolamento e de ligação.

Reforço de Subleito, Sub-base e Base

O reforço do subleito é uma camada adicional construída sobre o solo regularizado, com materiais de maior qualidade para suportar cargas pesadas ou solos com baixo desempenho estrutural. A sub-base atua como camada corretiva ou complementar à base, sendo constituída por materiais mais resistentes. Por sua vez, a base é a camada final que suporta o revestimento (SENÇO, 1997, p. 15, 17, 19, 20; SENÇO, 2001, p. 13). No Brasil, essas camadas são compostas por materiais granulares, solos ou cimentados. Materiais granulares, como brita e macadame, não possuem coesão, enquanto solos coesivos têm resistência à compressão e tração. Materiais cimentados, como solo-cimento, aumentam a resistência ao tráfego e à compressão, oferecendo mais rigidez à estrutura do pavimento. Bases asfálticas, como solo-asfalto e macadame betuminoso, também são utilizadas para melhorar a coesão e resistência à tração (BERNUCCI et al., 2008, p. 352).

Subleito

O subleito, conforme definido pela NBR 7207 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, p. 1), é o solo existente sob o pavimento ou revestimento, funcionando como a fundação do projeto rodoviário. Este solo precisa ser compactado e regularizado para garantir a estabilidade do pavimento e absorver as cargas do tráfego. Quando o solo do subleito possui baixa capacidade de suporte, pavimentos mais espessos são necessários. Em contrapartida, subleitos de boa qualidade permitem pavimentos mais finos (SENÇO, 1997, p. 14). Quando o solo natural não é adequado, ele deve ser substituído por materiais com maior resistência, garantindo a durabilidade da infraestrutura.

Estabilizante

O emprego de estabilizantes dos solos, na camada de subleito, se mostra de suma importância a fim de aumentar a resistência e impermeabilização do solo e diminuir seus agregados de matérias prima, conseqüentemente diminuindo os custos de camada para camada.

A aplicação de estabilizantes dos solos é uma abordagem que, além de melhorar as propriedades mecânicas do solo, pode reduzir significativamente os custos de construção e aumentar a eficiência das obras. Em comparação com as técnicas tradicionais de pavimentação, o uso de estabilizantes pode diminuir de forma substancial a necessidade de transporte de materiais e a remoção de solos, o que resulta em menor impacto ambiental e redução de custos logísticos. Assim, essa alternativa contribui para a sustentabilidade das obras, ao mesmo tempo que proporciona um ganho considerável na qualidade e durabilidade da pavimentação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Etapas da metodologia

A etapa de Identificação do Solo (Item 1) foi crucial para determinar a necessidade de utilizar o DYNABASE ideal, visto que sua aplicação varia conforme o tipo de solo. O primeiro passo do estudo envolveu o Solo Regional (Item 2), no qual realizamos um levantamento do solo do Estado de São Paulo, fornecendo uma visão geral das características geotécnicas. A partir disso, o Local de Análise (Item 3) foi escolhido com base em critérios de acessibilidade e representatividade para o estudo, viabilizando a coleta do solo adequado.

No item 4, realizamos a Identificação do Solo Municipal em parceria com a Secretaria do Meio Ambiente (SMMA), que nos forneceu a classificação precisa dos solos do Município para garantir que a amostra representasse as condições reais do terreno. Com essas informações, passamos à Identificação do Solo da Região Escolhida (Item 5), aprofundando a análise geotécnica local, essencial para o estudo da resistência do solo e a viabilidade do uso do estabilizante do solo.

A fase seguinte, o Experimento CBR dos Solos (Item 6), envolveu a realização de ensaios laboratoriais para determinar a capacidade de suporte do solo, tanto com a aplicação do estabilizante quanto sem. A partir desses testes, foi possível realizar uma Análise de Viabilidade Econômica (Item 7), verificando a relação custo-benefício da estabilização. Caso os resultados indiquem viabilidade econômica, a análise com base no CBR (Item 8) será aprofundada, levando à conclusão sobre a eficácia e recomendação do uso do produto para pavimentação.



Figura 02: Fluxograma dos procedimentos
Fonte: Próprios autores

A análise do solo foi fundamental para determinar a viabilidade do uso de estabilizantes e o impacto econômico dessa aplicação. Através dos ensaios CBR, foi possível avaliar a resistência do solo com e sem estabilizante, o que permitiu identificar a melhor abordagem para melhorar a qualidade do solo e otimizar o custo da pavimentação. Os resultados indicaram que, em algumas situações, o uso de estabilizantes é economicamente viável, oferecendo uma solução eficaz e com menor impacto ambiental para a construção de pavimentos.

Identificação e Localização do Solo

As características do solo foram inicialmente extraídas com base em documentos disponibilizados pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), através do Mapa Série Brasil (2001). O órgão define o tipo de solo coletado como ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS (PVA80 - PVA Eutrófico + PV Eutrófico + LV Distrófico) ou LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS (LVA9 - LCA Distrófico + CX Tb Distrófico). Entretanto, apesar da tipagem coletada, fica-se claro uma incerteza quanto à definição do solo pelo instituto. Sendo assim, foi necessário recorrer à Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Município de Bragança Paulista (SMMA), a fim de buscar uma definição mais precisa com o órgão responsável da própria cidade. Logo, a combinação de dados gerais com análises locais é essencial para decisões técnicas mais assertivas, evidenciando a importância de fontes atualizadas e específicas no planejamento rodoviário.

Sendo assim, com base na Figura 03, foi possível identificar que o solo PVA38, este o qual representa a segunda maior cobertura territorial no Município de Bragança Paulista/SP, abrange uma área de 19.957,50 hectares, o que corresponde a 39,01% da extensão total do Município, sendo na zona rural o mais predominante.

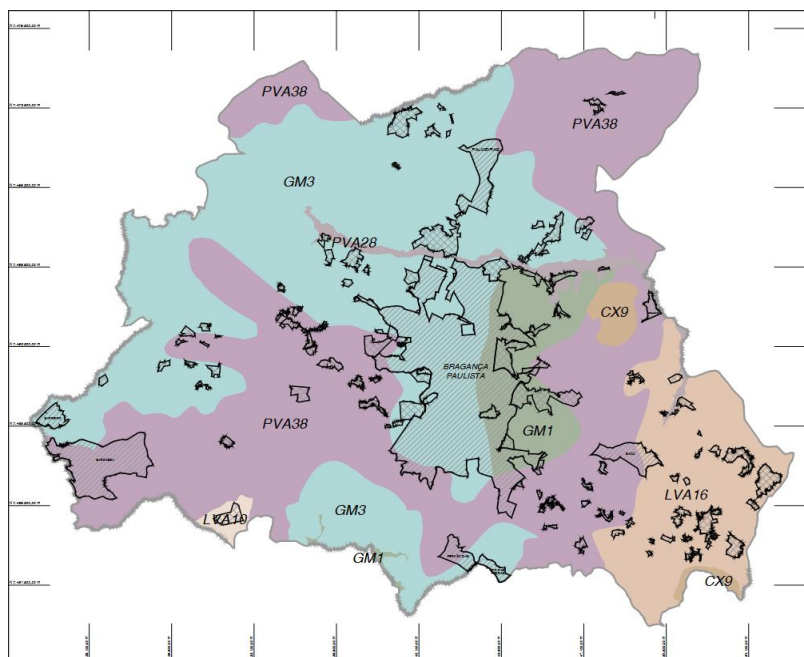


Figura 03: Mapa Pedológico do Município de Bragança Paulista/SP
Fonte: Prefeitura de Bragança Paulista (Secretaria Municipal do Meio Ambiente)

Após a identificação do solo predominante na região, foi necessário selecionar um local estratégico para a coleta e estudo, considerando os empreendimentos realizados pela prefeitura de Bragança Paulista, Estado de São Paulo. O local escolhido, especificamente na R. Luís Mendes Ferreira, no bairro Bosques das Pedras (23°00'21.1"S 46°31'21.6"W), conforme ilustrado na Figura 04. Essa área abrange uma parcela significativa de bairros rurais e está inserida em um contexto de intenso desenvolvimento urbano, com diversas obras de pavimentação sendo realizadas nas proximidades. A escolha visou alinhar o estudo às necessidades práticas do Município, garantindo a aplicabilidade dos resultados obtidos.

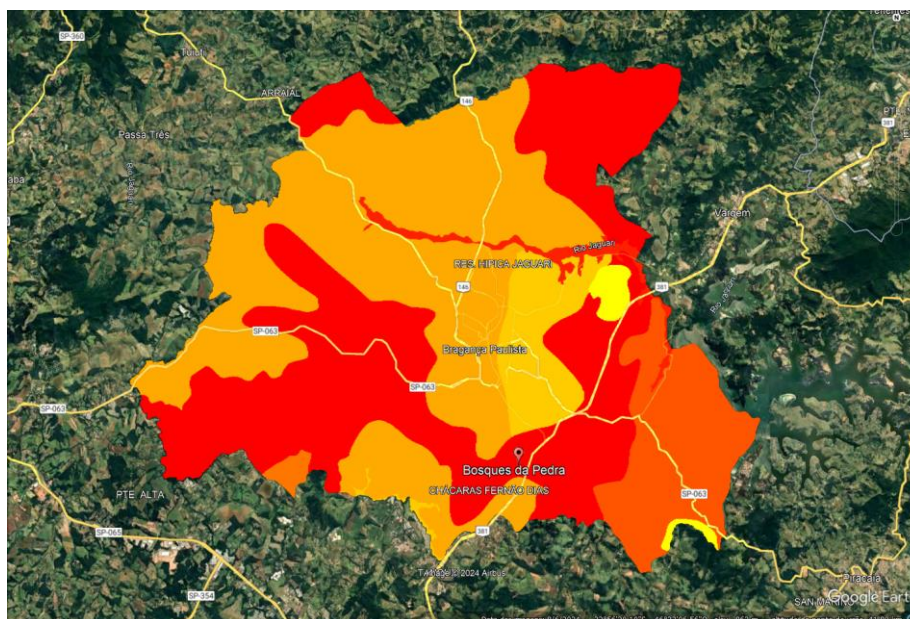


Figura 04: Localização do solo coletado e analisado.
Fonte: Prefeitura de Bragança Paulista (Secretaria Municipal do Meio Ambiente).

Dynabase

O DYNABASE foi o estabilizante de solos selecionado para este estudo devido às suas características técnicas e operacionais vantajosas. Trata-se de um produto sólido, de coloração acinzentada, reconhecido por sua fácil aplicação e versatilidade. Na forma mais econômica, a granel, pode ser armazenada a céu aberto por longos períodos sem comprometer sua qualidade ou eficácia. Além disso, seu manuseio é seguro, não oferecendo riscos à saúde humana ou ao meio ambiente. Uma das principais vantagens do DYNABASE é sua capacidade de introduzir novos parâmetros geotécnicos ao solo tratado. Sua ação estabilizante e aglutinante atua diretamente nas partículas do solo, promovendo um aumento significativo na capacidade de suporte. Esse desempenho elimina a necessidade de materiais adicionais, como brita, cimento, cascalho ou outros agregados, para estabilização da camada tratada. O mecanismo de funcionamento do DYNABASE baseia-se na impermeabilização e cimentação das partículas do solo. Essas propriedades garantem maior resistência e durabilidade à camada estabilizada. Além disso, o produto complementa a granulometria do solo, contribuindo para a obstrução dos canais capilares. Com isso, reduz-se consideravelmente o poder de sucção e percolação, fatores que comprometem a estabilidade do solo em condições naturais.

O solo utilizado no experimento foi identificado como PVA38. Ele é composto por uma associação de argissolo vermelho-amarelo e cambissolo háplico, ambos distróficos típicos. Apresenta textura média a argilosa, com horizontes “A” moderados. O solo varia entre profundo e pouco profundo, com características rochosas. A área onde foi coletado possui relevo forte ondulado, o que influencia diretamente em suas propriedades geotécnicas. Essas condições tornam necessário o uso de técnicas específicas para sua estabilização e aplicação eficiente em obras.

Após a pré-definição do tipo de solo que compõe o subleito, recomenda-se a realização de ensaios laboratoriais para caracterizá-lo adequadamente. Esses ensaios são essenciais para determinar as propriedades específicas do solo a ser tratado. Com base nos resultados, define-se a quantidade exata de DYNABASE necessária para a estabilização. Esse processo garante a eficiência do produto e sua aplicação correta. Assim, é possível otimizar recursos e assegurar a qualidade da obra.



Figura 05: Estabilizante do solo
(Fornecido pela Empresa DYNABASE).
Fonte: Próprios autores.



Figura 06: Solo PVA38 coletado (Localização:
23°00'21.1"S 46°31'21.6"W)
Fonte: Próprios autores

Experimento CBR

Segundo Biopdi, o ensaio CBR (California Bearing Ratio) ou ensaio ISC (Índice de suporte Califórnia) consiste em um método para avaliar a resistência do solo à penetração de um cilindro padronizado com relação a penetração em uma brita padrão, ou seja, compara as propriedades mecânicas deste solo a uma brita padrão. Os resultados são apresentados de maneira percentual sendo por exemplo um valor de CBR ou ISC de 15% significa que a resistência a penetração do solo testado é de 15% do valor da brita padronizada. Sendo assim, para o artigo, com os dados obtidos do ensaio de caracterização e utilizando-se o mesmo material foram moldados 4 corpos de prova com adição de diferentes quantidades do estabilizante de solos DYNABASE.

Inicialmente foi calculada a umidade higroscópica do solo coletado, para se definir a quantidade necessária de água a ser adicionada para se atingir a sua umidade ótima, que define o teor de umidade ideal para se realizar a compactação do ensaio de CBR.

A umidade higroscópica é a quantidade de umidade residual que permanece no solo após o mesmo ser seco à temperatura ambiente, ou seja, é a quantidade de água que uma amostra de solo contém. Através dele é possível definir a quantidade necessária de água a ser adicionada na amostra. Para se determinar a umidade higroscópica foi necessário calcular o peso do material seco ao ar em relação ao mesmo material após algumas horas em um sistema que simulava uma estufa.

Para o solo coletado e com base nos dados de umidade ótima obtidos no ensaio de caracterização feito pela empresa Tecnofoco, constatou-se ser necessário a adição de 816,00 mililitros de água na quantidade de 5.000,00 gramas de solo para se atingir a umidade ótima de 27,6%.



Figura 07: Dosagem de água
Fonte: Próprios autores.

Para o primeiro corpo de prova foram realizadas 4 etapas, sendo a primeira etapa a pesagem de 4.950,00 gramas de solo, a segunda etapa a adição de 50,00 gramas de estabilizante de solos DYNABASE, que corresponde a 1% da quantidade de 5.000,00 gramas de solo. Na

terceira etapa o material foi misturado até se apresentar homogêneo ao solo e na última etapa foi adicionado 816,00 mililitros de água.



Figura 08: Pesagem do solo
Fonte: Próprios autores.



Figura 09: Pesagem do DYNABASE
Fonte: Próprios autores.



Figura 10: Mistura homogênea
Fonte: Próprios autores.



Figura 11: Adição de água
Fonte: Próprios autores.

Para o segundo corpo de prova foram seguidas as mesmas etapas, foram pesados 4.900,00 gramas de solo e adicionados 100,00 gramas de estabilizante de solos DYNABASE, que corresponde a 2% da quantidade de 5.000,00 gramas de solo. Após a pesagem, o material foi misturado até se apresentar homogêneo ao solo e então foi adicionado 816,00 mililitros de água.



Figura 12: Pesagem do solo
Fonte: Próprios autores.



Figura 13: Pesagem do DYNABASE
Fonte: Próprios autores.

Para o terceiro corpo de prova foram seguidas as mesmas etapas, foram pesados 4.850,00 gramas de solo e adicionados 150,00 gramas de estabilizante de solos DYNABASE, que corresponde a 3% da quantidade de 5.000,00 gramas de solo. Após a pesagem, o material foi misturado até se apresentar homogêneo ao solo e então foi adicionado 816,00 mililitros de água.



Figura 14: Pesagem do solo
Fonte: Próprios autores.



Figura 15: Pesagem do DYNABASE
Fonte: Próprios autores.

Para o quarto corpo de prova foram seguidas as mesmas etapas, foram pesados 4.800,00 gramas de solo e adicionados 200,00 gramas de estabilizante de solos DYNABASE, que corresponde a 4% da quantidade de 5.000,00 gramas de solo. Após a pesagem, o material foi misturado até se apresentar homogêneo ao solo e então foi adicionado 816,00 mililitros de água.



Figura 16: Pesagem do solo
Fonte: Próprios autores.



Figura 17: Pesagem do DYNABASE
Fonte: Próprios autores.

Após a mistura homogênea do solo e adição de 816,00 mililitros de água, atingindo-se a umidade ótima de compactação, para cada amostra, o método de ensaio adotado foi o DNER ME-129/94 Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Utilizando o Equipamento AASHTO, na energia intermediária de compactação, compactando-se cinco camadas, cada camada com 26 golpes.



Figura 18: Compactação das camadas no cilindro
Fonte: Próprios autores.



Figura 19: Pesagem do cilindro com solo compactado
Fonte: Próprios autores.

Após a finalização das cinco camadas de compactação, o molde cilíndrico metálico é então finalizado, colocando-se uma sobrecarga-padrão bipartida para ensaio CBR/ISC com peso de 4,540 quilogramas, disco anelar de ferro fundido, dividido diametralmente em 2 partes, com $2270 \pm 10\text{g}$ de massa cada, sobre a superfície do solo compactado que tem como finalidade simular o peso das camadas sobre o subleito.



Figura 20: 1º Corpo de prova finalizado
Fonte: Próprios autores.

A base inferior e superior molde cilíndrico metálico possuem orifícios que permitem a entrada de água, os corpos de prova são então depositados em tanque de água, que visa simular a ação das chuvas e do lençol freático no corpo de prova moldado.

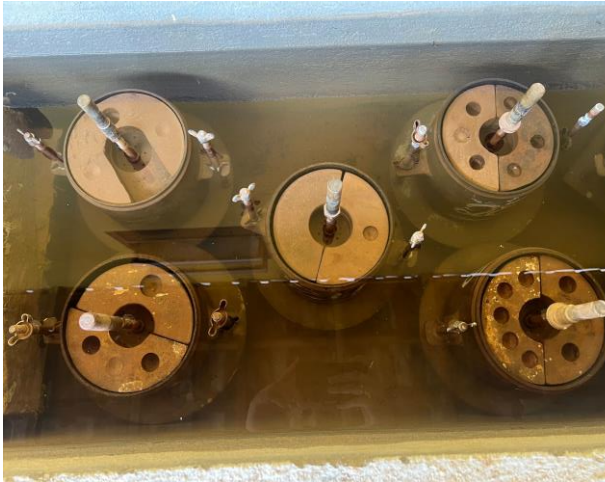


Figura 21: Corpo de prova submerso
Fonte: Próprios autores.



Figura 22: Corpo de prova submerso com relógio comparador
Fonte: Próprios autores.

Após ficarem submersos, os moldes cilíndricos são então retirados e levados para a Prensa CBR Manual.



Figura 23: Corpo de prova na Prensa CBR Manual
Fonte: Próprios autores.

Na Prensa CBR Manual o corpo de prova foi colocado sobre a base, sendo atingido pelo pistão, enquanto a manivela manual é girada sem parar, em uma velocidade contínua. Foram realizadas as medidas de resistência à penetração do cilindro durante 6,00 minutos, nos intervalos de 30 segundos, 1,00 minuto, 1,50 minutos, 2,00 minutos, 3,00 minutos, 4,00 minutos e 6,00 minutos. Assim obtém-se os dados de penetração (mm) por carga(N)/pressão (MPa).



Figura 24: Moldes cilíndricos metálicos após o ensaio.
Fonte: Próprios autores.

Outras fotos foram produzidas ao longo de todo procedimento e tudo isso pode ser verificado na íntegra no link a seguir:

<https://1drv.ms/f/s!AjaCFEHqEUXSaKsyT-KqHdPpeB0?e=D2YhRj>

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ponderações Iniciais dos Resultados

O ensaio de CBR foi realizado com um corpo de prova por quantidade de estabilizante. Embora a norma recomende a utilização de cinco corpos de prova para cada proporção, a limitação na disponibilidade do material estabilizante impossibilitaria a produção da quantidade exigida, mesmo assim, os corpos de prova apresentaram um aumento progressivo no Índice de Suporte Califórnia (ISC), evidenciando que a capacidade de suporte do solo aumentava proporcionalmente à adição do estabilizante. Tal comportamento confirma a eficácia e a consistência do estabilizante utilizado. No entanto, para aprofundar a análise e buscar resultados mais significativos, buscamos dados complementares para darmos continuidade no estudo. Com isso, para complementar a análise, utilizamos como base relatórios técnicos fornecidos pela própria empresa DYNABASE, os quais apresentavam características geotécnicas do solo e procedimentos aplicados similares às condições do nosso estudo. Esses dados adicionais permitiram proporcionalmente embasar de forma consistente as informações apresentadas em nosso artigo, contribuindo para os resultados obtidos.

Análise quantitativa

O experimento conduzido com quatro corpos de prova, analisados por meio da Prensa CBR Manual, evidenciou um incremento progressivo no Índice de Suporte Califórnia (ISC) relacionado à inclusão do estabilizante de solos DYNABASE. Esse comportamento é atribuído à capacidade do estabilizante de modificar as propriedades mecânicas do solo, aprimorando sua resistência estrutural e tornando-o adequado para compor camadas de base de pavimentos asfálticos. A análise quantitativa e qualitativa demonstrou um aumento sucessivo no ISC com o uso do estabilizante, evidente na Figura 25.

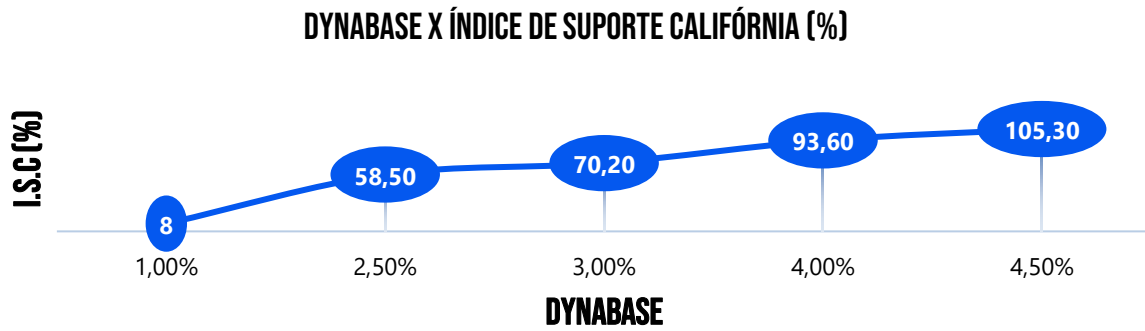


Figura 25: Gráfico DYNABASE x (I.S.C).
Fonte: Próprios autores.

A análise dos dados experimentais, representados graficamente, confirma a eficiência técnica do DYNABASE em melhorar a capacidade de suporte do solo, evidenciando sua aplicabilidade na engenharia de pavimentos. O incremento sucessivo do ISC em função da adição do estabilizante demonstra que o produto não apenas atende aos critérios técnicos exigidos, mas também proporciona uma alternativa viável e confiável para otimizar o desempenho de pavimentos, especialmente em contextos de solos com suporte insuficiente.

Viabilidade de custos e prazos

Dessa forma, como exemplo o perfil de via local, fundamentado pelo Plano Diretor de Bragança Paulista, Estado de São Paulo, foi possível realizar uma análise técnica-comparativa sobre a viabilidade do uso do estabilizante de solo - DYNABASE. Este artigo considerou a dinâmica geotécnica do solo local e as especificações de pavimentação estabelecidas, utilizando 10 metros de largura e 1 quilômetro de extensão. O método convencional, que envolve a abertura de caixa e a importação de materiais, foi confrontado com a estabilização "in situ" do solo.

PERFIL VII - VIA LOCAL VIA RURAL

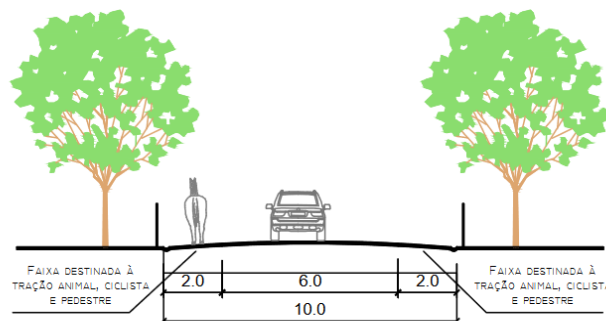


Figura 25: Dimensionamento viário, via local rural.
Fonte: Site Prefeitura de Bragança Paulista.

Os resultados indicaram vantagens técnicas significativas do uso do estabilizante. Observou-se uma redução de 2.000 m³ de descartes em bota-fora, menor dependência logística devido à eliminação da importação de agregados e uma economia de 26% nos custos totais da obra. A metodologia também demonstrou maior eficiência em termos de prazo de execução, já que a base foi formada com o próprio solo tratado, o que favoreceu não apenas a sustentabilidade econômica, mas também a ambiental.

COMPARAÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS

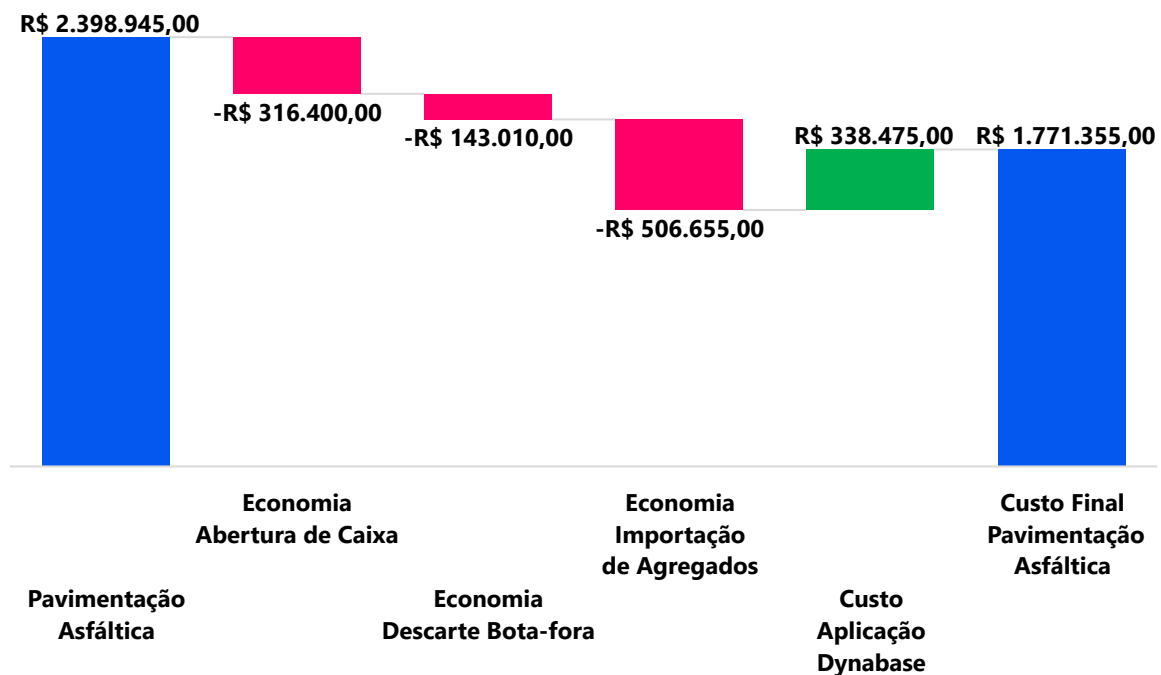


Figura 26: Gráfico Comparação de Custos Operacionais.
Fonte: Próprios autores.

Como pode ser observado no gráfico em todas as áreas apresentadas houve ganho técnico-econômico. No método convencional, a execução demanda abertura de caixa, transporte para bota-fora e importação de grandes volumes de matérias-primas, processos que ampliam o custo e o tempo de construção. Com o DYNABASE, utiliza-se o próprio solo *in situ* como base do pavimento, eliminando etapas intermediárias e simplificando a logística, configurando uma solução mais sustentável, econômica e eficiente para atender às demandas de infraestrutura rodoviária.

A comparação dos custos entre os métodos de pavimentação foi feita com base nos dados da planilha referencial de custos da *Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano* do Estado de São Paulo (CDHU), data base de agosto de 2024, desonerada, a qual é amplamente utilizada no Estado de São Paulo, para execução de planilhas orçamentárias pelas prefeituras do Estado. A relação de custo entre os métodos é possível ser observada na planilha orçamentária a seguir:

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA PARA FORNECIMENTO DE MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÃO DE OBRA

OBRA: COMPARAÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA EM RELAÇÃO A EXECUÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO COM ADIÇÃO ESTABILIZANTE DE SOLOS DYNABASE

**TABELAS UTILIZADAS:
-CDHU 195 - AGO/2024 - COM
DESONERAÇÃO;**

**LOCAL: R. LUÍS MENDES FERREIRA, BAIRRO BOSQUES DAS PEDRAS
(23°00'21.1"S 46°31'21.6"W)**

DATA: NOVEMBRO 2024

B.D.I. ADOTADO =

25,59%



ÍTEM	TABELA	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	QUANT.	UNID	R\$ UNITÁRIO S/ B.D.I.	R\$ TOTAL S/ B.D.I.	R\$ UNITÁRIO C/ B.D.I.	R\$ TOTAL C/ B.D.I.
1.0	EXECUÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO ATRAVÉS DO MÉTODO CONVENCIONAL								
1.1	LIMPEZA CAMADA SUPERFICIAL DE 20CM								
1.0.1	CDHU	07.01.020	Escavação e carga mecanizada em solo de 1ª categoria, em campo aberto	2.000,00	M3	18,13	36.260,00	22,77	45.540,00
1.0.2	CDHU	05.10.023	Transporte de solo de 1ª e 2ª categoria por caminhão para distâncias superiores ao 5º km até o 10º km	2.000,00	M3	19,09	38.180,00	23,98	47.960,00
1.0.3	CDHU	05.09.007	Taxa de destinação de resíduo sólido em aterro, tipo solo/terra	2.500,00	M3	30,27	75.675,00	38,02	95.050,00
1.2	PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO CONVENCIONAL								
1.0.2	CDHU	02.10.060	Locação de vias, calçadas, tanques e lagoas	10.000,00	M2	1,71	17.100,00	2,15	21.500,00
1.0.3	CDHU	54.01.400	Abertura de caixa até 25 cm, inclui escavação, compactação, transporte e preparo do sub-leito	10.000,00	M2	25,19	251.900,00	31,64	316.400,00
1.0.4	CDHU	05.10.023	Transporte de solo de 1ª e 2ª categoria por caminhão para distâncias superiores ao 5º km até o 10º km	2.000,00	M3	19,09	38.180,00	23,98	47.960,00
1.0.5	CDHU	05.09.007	Taxa de destinação de resíduo sólido em aterro, tipo solo/terra	2.500,00	M3	30,27	75.675,00	38,02	95.050,00
1.0.6	CDHU	54.01.210	Base de brita graduada	1.500,00	M3	268,95	403.425,00	337,77	506.655,00
1.0.7	CDHU	54.03.240	Imprimação betuminosa impermeabilizante	10.000,00	M2	15,57	155.700,00	19,55	195.500,00
1.0.8	CDHU	54.03.230	Imprimação betuminosa ligante	10.000,00	M2	6,00	60.000,00	7,54	75.400,00

1.0.9	CDHU	54.03.210	Camada de rolamento em concreto betuminoso usinado quente - CBUQ	500,00	M3	1.515,93	757.965,00	1.903,86	951.930,00
TOTAL PAVIMENTO ASFÁLTICO ATRAVÉS DO MÉTODO CONVENCIONAL									R\$ 2.398.945,00
2.0 PAVIMENTO ASFÁLTICO COM ESTABILIZANTE DE SOLOS DYNABASE									
2.1 LIMPEZA CAMADA SUPERFICIAL DE 20CM									
2.0.1	CDHU	07.01.020	Escavação e carga mecanizada em solo de 1ª categoria, em campo aberto	2.000,00	M3	18,13	36.260,00	22,77	45.540,00
2.0.2	CDHU	05.10.023	Transporte de solo de 1ª e 2ª categoria por caminhão para distâncias superiores ao 5º km até o 10º km	2.000,00	M3	19,09	38.180,00	23,98	47.960,00
2.0.3	CDHU	05.09.007	Taxa de destinação de resíduo sólido em aterro, tipo solo/terra	2.500,00	M3	30,27	75.675,00	38,02	95.050,00
2.2 PAVIMENTAÇÃO COM DYNABASE									
2.2.1	CDHU	02.10.060	Locação de vias, calçadas, tanques e lagoas	10.000,00	M2	1,71	17.100,00	2,15	21.500,00
2.2.2	CDHU	07.12.040	Aterro mecanizado por compensação, solo de 1ª categoria em campo aberto, sem compactação do aterro	1.500,00	M3	22,36	33.540,00	28,08	42.120,00
2.2.3	COMPOSIÇÃO DE CUSTO		Aplicação de 4,50% de DYNABASE	1.500,00	M3	130,69	196.035,00	164,13	246.195,00
2.2.4	CDHU	07.12.030	Compactação de aterro mecanizado a 100% PN, sem fornecimento de solo em campo aberto	3.000,00	M3	13,31	39.930,00	16,72	50.160,00
2.2.5	CDHU	54.03.240	Imprimação betuminosa impermeabilizante	10.000,00	M2	15,57	155.700,00	19,55	195.500,00
2.2.6	CDHU	54.03.230	Imprimação betuminosa ligante	10.000,00	M2	6,00	60.000,00	7,54	75.400,00
2.2.7	CDHU	54.03.210	Camada de rolamento em concreto betuminoso usinado quente - CBUQ	500,00	M3	1.515,93	757.965,00	1.903,86	951.930,00
TOTAL PAVIMENTO ASFÁLTICO COM ESTABILIZANTE DE SOLOS DYNABASE									R\$ 1.771.355,00
RESUMO DA PLANILHA								%	TOTAL
1.0	EXECUÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO ATRAVÉS DO MÉTODO CONVENCIONAL							100%	2.398.945,00
2.0	PAVIMENTO ASFÁLTICO COM ESTABILIZANTE DE SOLOS DYNABASE							100%	1.771.355,00

O Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) adotado, é o mínimo aceito para obras de construção de pavimentação asfáltica, utilizando-se planilhas referência de custo desoneradas. A composição das camadas utilizadas no método convencional de pavimentação segue o que é atualmente adotado no Município de Bragança Paulista, Estado de São Paulo para obras de pavimentação asfáltica.

CONCLUSÃO

O estudo realizado demonstrou a eficácia do estabilizante de solos DYNABASE, destacando sua capacidade de melhorar a capacidade de suporte dos solos locais. Os experimentos laboratoriais indicaram um aumento progressivo no Índice de Suporte Califórnia (ISC), evidenciando a melhoria nas propriedades geotécnicas do solo após o tratamento com o produto. Esta modificação contribui para a estabilização do solo, promovendo maior durabilidade às estruturas viárias construídas sobre ele. Com tudo, toda inovação deve ser avaliada durante todo seu período de utilização.

A comparação entre o método de estabilização "in situ" e o método convencional revelou vantagens econômicas e ambientais significativas. O método "in situ" apresenta custos mais baixos, pois elimina a necessidade de transporte de agregados como brita e cascalho, além de contribuir para a preservação ambiental ao reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar a produção de resíduos. Essas vantagens são essenciais para reduzir os custos e aumentar a sustentabilidade dos projetos de infraestrutura rodoviária.

Além das vantagens econômicas, a técnica do DYNABASE também se mostrou uma solução sustentável, pois permite otimizar os custos e prazos de execução das obras. Com a utilização do estabilizante, é possível não apenas melhorar o desempenho do pavimento rodoviário, mas também atender às exigências técnicas de infraestrutura moderna. A metodologia mostrou-se eficaz para aumentar o ISC, fundamental para garantir a estabilidade e segurança das vias, especialmente em áreas com solos de baixa qualidade.

Essa técnica se revelou vantajosa, especialmente em regiões distantes dos centros urbanos, onde há escassez de matérias-primas e dificuldades logísticas. A possibilidade de eliminar a dependência de agregados externos e reduzir o descarte de resíduos contribui para a sustentabilidade econômica e ambiental. Prefeituras de cidades pequenas, com orçamentos limitados, podem adotar essa metodologia como uma alternativa viável para a construção e manutenção de infraestrutura viária de qualidade.

Porém, é essencial realizar estudos e ensaios laboratoriais detalhados antes de aplicar a técnica. A caracterização do solo e a adequação do produto às condições locais são cruciais para garantir a eficácia e segurança do método. A análise cuidadosa das condições locais assegura a aplicabilidade e a confiabilidade do DYNABASE em diferentes contextos.

AGRADECIMENTOS FINAIS

Agradecimentos gerais, deste trabalho só foi possível graças à colaboração direta e indireta de pessoas e instituições. Um agradecimento mais que especial à duas empresas de extrema importância que foram essenciais para a realização deste artigo, sendo a DYNABASE por encaminhar sem custos o material base do estudo (estabilizante do solo) e Empresa Tecnofoco Laboratório por ceder o espaço para a realização dos experimentos, assim como à Universidade São Francisco. Aos professores pelo conhecimento adquirido durante todo o curso, em especial ao Orientador Prof. Me. Rafael Augusto Valentim da Cruz Magdalena por todo o suporte. Aos pais, familiares, amigos e principalmente a Deus, pois só chegamos até aqui graças a Ele.

Agradecimentos especiais de Jézer Emanuel a Maria Madalena Taffuri de Jesus por tudo; de Felipe Gato, a Tiago Domingues pelos ensinamentos no ramo da engenharia civil, e por ser um irmão mais velho na vida.

Este trabalho é, acima de tudo, um reflexo das parcerias e apoios recebidos ao longo dessa trajetória, e é com grande satisfação que o finalizamos, cientes de que ele não seria o mesmo sem a colaboração de todos.

REFERÊNCIAS

VILABETUME. Pavimentação de estradas rurais benefícios e importância. Disponível em: <<https://vilabetume.com.br/pavimentacao-de-estradas-rurais-beneficios-e-importancia/>> Acesso em 11 de setembro de 2024.

TRINDADE, T.P.; et. Al. Compactação de solos: Fundamentos teóricos e práticos. Viçosa: Editora UFV, 2008. 95 p.

CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2023 reforça a importância de maior investimento na malha rodoviária. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2023-refora-a-importancia-de-maior-investimento-na-malha-rodoviria>> Acesso em 19 de setembro de 2024.

MEDINA, J. Apostila de estabilização de solos – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.

CRISTELO, N.M.C. Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de Cal. Dissertação de Mestrado – Universidade de Minho, Braga – Portugal, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207: terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. v. 1.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimp.). Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

DNIT, Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR, 3ª Ed. Rio de Janeiro, 2006.

LOBO, A. V. de L. Avaliação do uso de agregados miúdos reciclados de concreto em concretos betuminosos usinados a quente, Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BRAGANÇA PAULISTA, Secretaria Municipal de Meio Ambiente arquivos e mapas. Disponível em: <<https://www.braganca.sp.gov.br/secretarias-municipais/meio-ambiente/arquivos-e-mapas/arquivos-e-mapas-2021>>. Acessado em 16 de novembro de 2024.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Informações Ambientais. Disponível em: <https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/brasil/solos.pdf>. Acesso em 16 de novembro de 2024.

DYBASE. Disponível em: <<https://www.dynabase.com.br/>> Acesso em 16 de novembro de 2024.

