

AVALIAÇÃO DO ADITIVO DYNABASE NA MELHORIA DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS NA RODOVIA NÃO PAVIMENTADA PR-092

EVALUATION OF THE DYNABASE ADDITIVE IN IMPROVING GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SOILS ON THE UNPAVED PR-092 HIGHWAY

Daniel Hatiro Fujiwara¹, Alisson Dalto de Mendonça Souza², Lucas Bach Adada³ & Rodrigo Moraes da Silveira⁴.

Recebido: 11 de Setembro 2025 / Revisado: 22 de Setembro 2025 / Aceito: 01 de Outubro 2025.

RESUMO: Este artigo apresenta uma investigação da estabilização química de solos em rodovias não pavimentadas, com foco na aplicação do aditivo comercial Dynabase, à base de hidróxido de cálcio. A pesquisa compreendeu a caracterização geotécnica de sete pontos de inspeção da rodovia estadual PR-092, entre os municípios de Cerro Azul e Doutor Ulysses, no estado do Paraná, e a avaliação das alterações nas propriedades físicas e mecânicas dos solos "*in situ*" e após estabilização. Para isso, foram realizados ensaios de laboratório, incluindo Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão de solo, complementados por acompanhamento expedito de campo. Os resultados indicaram melhorias significativas. Observou-se um aumento expressivo no ISC e redução severa da expansão. Tais resultados evidenciaram a capacidade da estabilização com Dynabase de transformar solos com baixa capacidade de suporte em materiais com resistência adequada para o leito estradal, demonstrando o potencial da técnica como uma alternativa eficiente e sustentável para a manutenção de vias não pavimentadas.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de solos; Dynabase; Índice de Suporte Califórnia; Rodovias não pavimentadas.

ABSTRACT: This article presents an investigation into the chemical stabilization of soils on unpaved roads, focusing on the application of a commercial additive, Dynabase, which is based on calcium hydroxide. The study included geotechnical characterization of seven inspection points along the PR-092 state highway, between the municipalities of Cerro Azul and Doutor Ulysses in Paraná, Brazil. Changes in the physical and mechanical properties of the soils were evaluated both *in situ* and after stabilization. Laboratory tests, such as the California Bearing Ratio (CBR) and soil expansion tests, were conducted, complemented by rapid field monitoring. The results demonstrated significant improvements: a marked increase in CBR values and a substantial reduction in expansion. These findings underscore the effectiveness of Dynabase stabilization in transforming low-bearing-capacity soils into materials with adequate strength for road beds, highlighting its potential as an efficient and sustainable alternative for maintaining unpaved roads.

KEYWORDS: California Bearing Ratio (CBR); Dynabase; Soil stabilization; Unpaved roads.

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária brasileira é caracterizada por uma vasta extensão de vias não pavimentadas, que somam aproximadamente 1,4 milhão de quilômetros, representando 78,5% da malha viária nacional, considerando as rodovias pavimentadas, não pavimentadas e

¹Superintendente, DER/PR SRLESTE.

²Engenheiro Civil, DER/PR.

³Docente, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

⁴Docente, Universidade Federal do Paraná.

planejadas. No estado do Paraná, a extensão de vias não pavimentadas é de cerca de 100 mil quilômetros, correspondendo a aproximadamente 7,1% de toda a malha viária não pavimentada do país (CNT, 2024; SRE, 2023).

Os números apresentados destacam a relevância e importância das vias não pavimentadas, essas estradas desempenham um papel fundamental ao proporcionar o fluxo regular de mercadorias e serviços, bem como prover o acesso das comunidades locais a serviços sociais essenciais. No entanto, para assegurar boas condições de rodagem e segurança, é necessário realizar serviços periódicos de manutenção e conservação da plataforma de rolamento.

Diferentemente das rodovias pavimentadas, que possuem estruturas mais robustas e demandam intervenções em intervalos mais longos (5 a 20 anos), as vias não pavimentadas são intrinsecamente mais vulneráveis e exigem manutenções anuais ou bienais (Eaton, Gerard e Cate, 1987).

A maior necessidade de manutenção das rodovias não pavimentadas deve-se, fundamentalmente, às suas diferenças estruturais em comparação com as pavimentadas. As vias pavimentadas são projetadas com múltiplas camadas sobre a terraplenagem para resistir eficazmente às cargas do tráfego e às intempéries (Bernucci *et al.*, 2008). Embora recebam tratamentos primários, como revestimento primário, agulhamento ou mistura de areia e argila (Santos *et al.*, 2019), sua superfície de rolamento, exposta continuamente, demanda manutenções e conservações periódicas para preservar a funcionalidade e reduzir custos de reconstrução a longo prazo (Baesso e Gonçalves, 2003).

A manutenção convencional dessas rodovias enfrenta ainda desafios adicionais, como a escassez de materiais de jazidas, que resulta em custos elevados de aquisição, transporte, e impactos ambientais negativos, incluindo o carreamento de solos para cursos d'água e a geração de poeira. A poeira, em particular, afeta a qualidade do ar, a visibilidade e a saúde pública, além de prejudicar culturas agrícolas (Baesso e Gonçalves, 2003). A erosão em rodovias de cascalho é sensível à intensidade do tráfego (Reid e Dunne, 1984), demandando soluções para assegurar a capacidade de suporte, impermeabilização do leito e a segurança do usuário.

Diante desse cenário complexo e da necessidade premente de soluções mais eficientes e sustentáveis para a conservação da malha rodoviária não pavimentada, a estabilização química de solos emerge como uma alternativa promissora. Essa técnica visa aprimorar as propriedades do solo, através da inserção de um aditivo (Silva, 2016). Ao mesmo tempo, contribui para a redução da necessidade de extração de novos materiais de jazidas e minimiza os impactos ambientais associados ao carreamento de solos e à geração de poeira.

Como estudo de caso, selecionou-se a rodovia estadual PR-092, que liga os municípios de Cerro Azul e Doutor Ulysses, no Paraná. Essa via destaca-se pela relevância no escoamento da produção madeireira do estado, o que torna sua manutenção periódica essencial para a economia local destes municípios.

Para a pesquisa, o solo utilizado foi o presente na camada superficial de rolamento, um material heterogêneo, resultante de intervenções ao longo do tempo, sendo oriundo de diversas jazidas, dando a camada superficial características variadas, tanto em termos granulométricos, quanto em comportamento mecânico.

A justificativa para o desenvolvimento desta pesquisa está na necessidade de estudar e otimizar o uso de aditivos estabilizantes em condições reais de campo, de modo a gerar dados concretos sobre a melhoria das propriedades do solo. Esses resultados servirão de base para a elaboração de diretrizes que orientarão práticas de gestão rodoviária mais sustentáveis e eficazes em todo o país.

Este artigo apresenta um estudo sobre os efeitos da aplicação do aditivo estabilizante de solo Dynabase na manutenção de rodovias não pavimentadas, com foco nas alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo. O estudo visa à avaliação das variações no Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansibilidade do solo quimicamente estabilizado, buscando verificar a eficácia da técnica e contribuir para o avanço do conhecimento na área.

2 Manutenção Convencional

A conservação periódica de vias não pavimentadas na região leste do Estado do Paraná tem como principal intervenção a regularização do leito viário por meio de motoniveladora, executada sempre que são identificadas irregularidades na superfície de rolamento. Sob condições climáticas normais, essa operação é programada em ciclos bimestrais, visando manter a geometria e a funcionalidade do traçado (DER/PR, 2023).

A manutenção preventiva ou corretiva inclui, prioritariamente, a recomposição da camada de revestimento quando há perda de espessura devido a fatores como ação do tráfego, intemperismo, erosão ou mesmo desgaste decorrente das operações de conservação rotineira. Em condições padrão, a reposição de material granular é planejada para intervalos bienais, podendo ser antecipada em períodos de elevada pluviosidade, que aceleram a degradação (DER/PR, 2023).

Quando o subleito apresenta baixa capacidade de suporte ou comportamento crítico sob saturação hídrica, aplica-se camadas de material granular selecionado proveniente de jazidas,

objetivando aumentar a resistência e a drenagem. Essa intervenção é realizada conforme avaliação técnica, baseada em monitoramento das condições da via.

3 Dynabase

A precariedade das rodovias é um fator significativo que contribui para elevados custos operacionais, aumento do consumo de combustível e riscos de acidentes, gerando impactos sociais e econômicos adversos (CNT, 2022). A superfície das estradas não pavimentadas, composta por materiais do leito natural, muitas vezes requer adição de materiais extras para melhorar seu desempenho (DNIT, 2005).

A estabilização de solos é um conjunto de técnicas que visa melhorar as propriedades físicas e mecânicas das rodovias não pavimentadas, conferindo-lhes maior capacidade de resistência a deformações e rupturas (Senço, 2001).

A estabilização química de um solo envolve a alteração da sua estrutura por meio da adição de um aditivo (França, 2003). Os mecanismos de estabilização química do solo envolvem a indução de características hidrofóbicas às partículas, o aumento das forças repulsivas entre elas e a melhoria da coesão do solo (Lambe e Michaels, 1954 apud Emmert, 2010). Aditivos comuns como cimento, cal e betume são empregados por suas capacidades de aumentar a resistência, melhorar a trabalhabilidade e conferir impermeabilidade (Silva, 2016; Moreira, 2010).

O aditivo Dynabase, um estabilizante comercial à base de hidróxido de cálcio, foi selecionado para este estudo. Este produto se apresenta como um pó sólido acinzentado, com a vantagem de poder ser armazenado a céu aberto. Na FIGURA I são apresentadas as características físicas do aditivo.

FIGURA I – ESTABILIZANTE À GRANEL



FONTE: O Autor (2024).

O Dynabase atua por meio da interação do hidróxido de cálcio com as partículas do solo, promovendo a aglutinação, floculação e o fortalecimento das ligações. Como resultado, o solo tratado adquire novas propriedades geomecânicas, incluindo um aumento substancial na capacidade de suporte, uma redução significativa na expansibilidade e a eliminação da necessidade de materiais complementares.

O mecanismo de ação do Dynabase combina a impermeabilização com a cimentação, o que também aprimora a distribuição granulométrica e diminui a sucção e a condutividade hidráulica do solo. Sua aplicação pode ser realizada de forma mecânica ou manual, desde que haja homogeneidade da mistura. A seguir, apresentam-se na TABELA I, disponibilizada pelo fabricante, as propriedades químicas do produto:

TABELA I – PROPRIEDADES DO PRODUTO

Parâmetros	Unidade	L.M	L.D	Resultados
Antimônio	mg Sb/Kg	-	50,00	n.d.
Arsênio	mg As/Kg	-	2,00	n.d.
Bário	mg Ba/Kg	-	15,00	21
Berílio	mg Be/Kg	-	4,00	n.d.
Cádmio	mg Cd/Kg	-	0,50	n.d.
Chumbo	mg Pb/Kg	-	10,00	n.d.
Cobalto	mg Co/Kg	-	5,00	n.d.
Cobre	mg Cu/Kg	-	2,50	n.d.
Crômio VI	mg Cr/Kg	-	4,50	n.d.
Crômio Total	mg Cr/Kg	-	3,00	n.d.
Mercúrio	mg Hg/Kg	-	1,25	n.d.
Molibdênio	mg Mo/Kg	-	10,00	n.d.
Níquel	mg Ni/Kg	-	1,50	4,60
Prata	mg Ag/Kg	-	2,00	n.d.
Selênio	mg Se/Kg	-	3,00	n.d.
Tálio	mg Tl/Kg	-	100,00	n.d.
Vanádio	mg V/Kg	-	50,00	n.d.
Zinco	mg Zn/Kg	-	0,50	3,00
Umidade	%	-	0,10	31,30
Óleos/Graxas	%	-	0,10	0,16
Cianeto	mg CN/Kg	250,00	1,70	n.d.
Fluoretos	mg F/Kg	-	100,00	n.d.
PH	-	<2 e 12,50	-	12,74

FONTE: Dynabase (2015).

L.M – Limites máximos segundo anexo F da ABNT NBR 10004/2004;

L.D – Limite de detecção do método;

n.d. – Não detectado;

Resultados expressos na base seca.

Considerando essas propriedades, torna-se necessário avaliar também o comportamento do produto frente a processos de lixiviação, medindo a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes em resíduos sólidos através da sua dissolução em meio extrator. Os resultados fornecidos pelo fabricante estão apresentados nas TABELAS II e III.

TABELA II – RESULTADOS ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

Parâmetros	Unidade	L.M	L.D	Resultados
Arsênio	mg As/L	1,0	0,010	n.d.
Bário	mg Ba/L	70,0	0,3	0,48
Cádmio	mg Cd/L	0,5	0,004	n.d.
Chumbo Total	mg Pb/L	1,0	0,05	n.d.
Crômio Total	mg Cr/L	5,0	0,016	n.d.
Mercurio	mg Hg/L	0,1	0,001	n.d.
Prata	mg Ag/L	5,0	0,009	n.d.
Selênio	mg Se/L	1,0	0,003	n.d.
Fluoreto	mg F/L	150	0,10	<0,20

FONTE: Dynabase (2015).

TABELA III – RESULTADOS ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

Aspecto	Homogênea de coloração cinza
% Sólidos secos	100
PH do Extrato lixiviado obtido	12,39
Tempo total de lixiviação em horas	18
Volume dos líquidos obtidos em ml	1000

FONTE: Dynabase (2015).

L.M – Limites máximos segundo anexo F da ABNT NBR 10004/2004;

L.D – Limite de detecção do método;

n.d. – Não detectado.

Além do processo de lixiviação, é fundamental analisar o comportamento do produto em relação a solubilização, que consiste na dissolução do produto em um líquido, permitindo estimar seu potencial de contaminação de águas subterrâneas e superficiais. Os resultados fornecidos pelo fabricante estão apresentados nas TABELAS IV e V.

TABELA IV – RESULTADOS ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

Parâmetros	Unidade	L.M	L.D	Resultados
Alumínio	mg Al/L	0,2	0,03	0,09
Arsênio	mg As/L	0,01	0,010	n.d.
Bário	mg Ba/Kg	0,7	0,03	1,16
Cádmio	mg Cd/L	0,005	0,001	n.d.
Chumbo Total	mg Pb/L	0,01	0,01	n.d.
Cobre	mg Cu/Kg	2,0	0,010	0,017
Crômio Total	mg Cr/L	0,05	0,016	n.d.
Ferro	mg Fe/L	0,3	0,012	0,118
Manganês	mg Mn/L	0,1	0,012	n.d.
Mercurio	mg Hg/L	0,001	0,001	n.d.
Prata	mg Ag/L	0,05	0,009	n.d.
Selênio	mg Se/L	0,01	0,003	n.d.
Sódio	mg Na/L	200	0,003	3,42
Zinco	mg Zn/L	5,0	0,001	0,067
Cianeto	mg CN/L	0,07	0,017	n.d.
Fluoreto	mg F/L	1,5	0,10	<0,40
Sulfato	mg SO4/L	250	2	2
Cloreto	mg Cl/L	250	0,5	21,2
Nitrato	mg N/L	10,0	0,02	n.d.
Fenóis Totais	mg C6H5OH/L	0,01	0,001	0,036
Surfactantes	mg LAS/L	0,5	0,07	<0,35

FONTE: Dynabase (2015).

TABELA V – RESULTADOS ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

Umidade %	31,3
Massa da amostra em (g)	250
Volume (água destilada) ml	1000
PH do extrato solubilizado	12,30

FONTE: Dynabase (2015).

L.M – Limites máximos segundo anexo F da ABNT NBR 10004/2004;

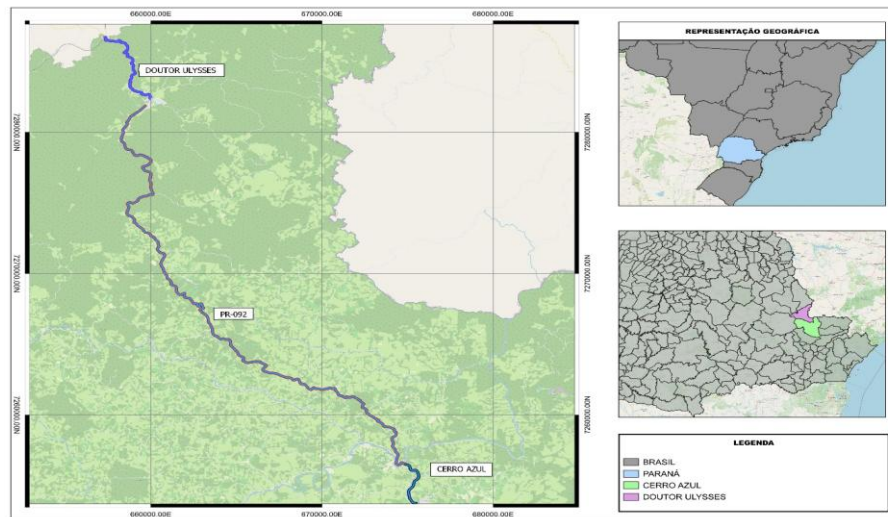
L.D – Limite de detecção do método;

n.d. – Não detectado.

4 Materiais e Métodos

Esta pesquisa foi desenvolvida e aplicada em um trecho não pavimentado da rodovia PR-092, localizada na região do Vale do Ribeira, no Estado do Paraná. Na FIGURA II é exposta a localização do estudo.

FIGURA II – MAPA DE LOCALIZAÇÃO



FONTE: O Autor (2024).

Sete segmentos representativos foram selecionados de forma randômica ao longo da rodovia. Esses locais foram escolhidos por suas distintas características geológicas, o que permitiu avaliar o desempenho do produto Dynabase em diversas condições. Em cada um desses segmentos, foram coletadas amostras do solo superficial, correspondente à camada a ser estabilizada, para caracterização geotécnica.

Nestes locais, colheu-se amostras de material visando a determinação da taxa de aplicação do aditivo. A profundidade da coleta do material foi superficial, correspondente à espessura estabilizada.

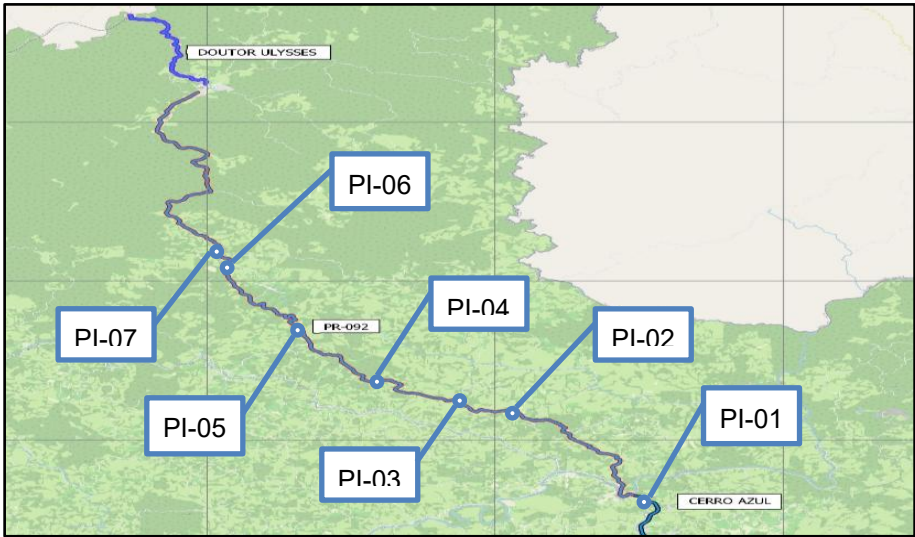
A classificação tátil-visual dos solos foi realizada conforme os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 9604/2016. Na TABELA VI apresenta-se a classificação e na FIGURA III são demonstrados os pontos de inspeção.

TABELA VI – PONTOS DE INSPEÇÃO

Ponto	Localização	Material	Cor
PI-01	km 087+390m	Areia argilosa com minerais micáceos e pedregulhos com alteração de rocha	Marrom claro
PI-02	km 101+090m	Areia argilosa com pedregulho	Marrom claro
PI-03	km 102+990m	Areia argilo siltosa	Marrom amarelado
PI-04	km 106+090m	Argila siltosa	Marrom avermelhado
PI-05	km 110+490m	Silte argiloso	Rosa claro
PI-06	km 117+290m	Argila siltosa	Marrom rosado
PI-07	km 118+490m	Areia argilo siltosa com pedregulho	Marrom amarelado

FONTE: O Autor (2024).

FIGURA III – PONTOS INSPECIONADOS

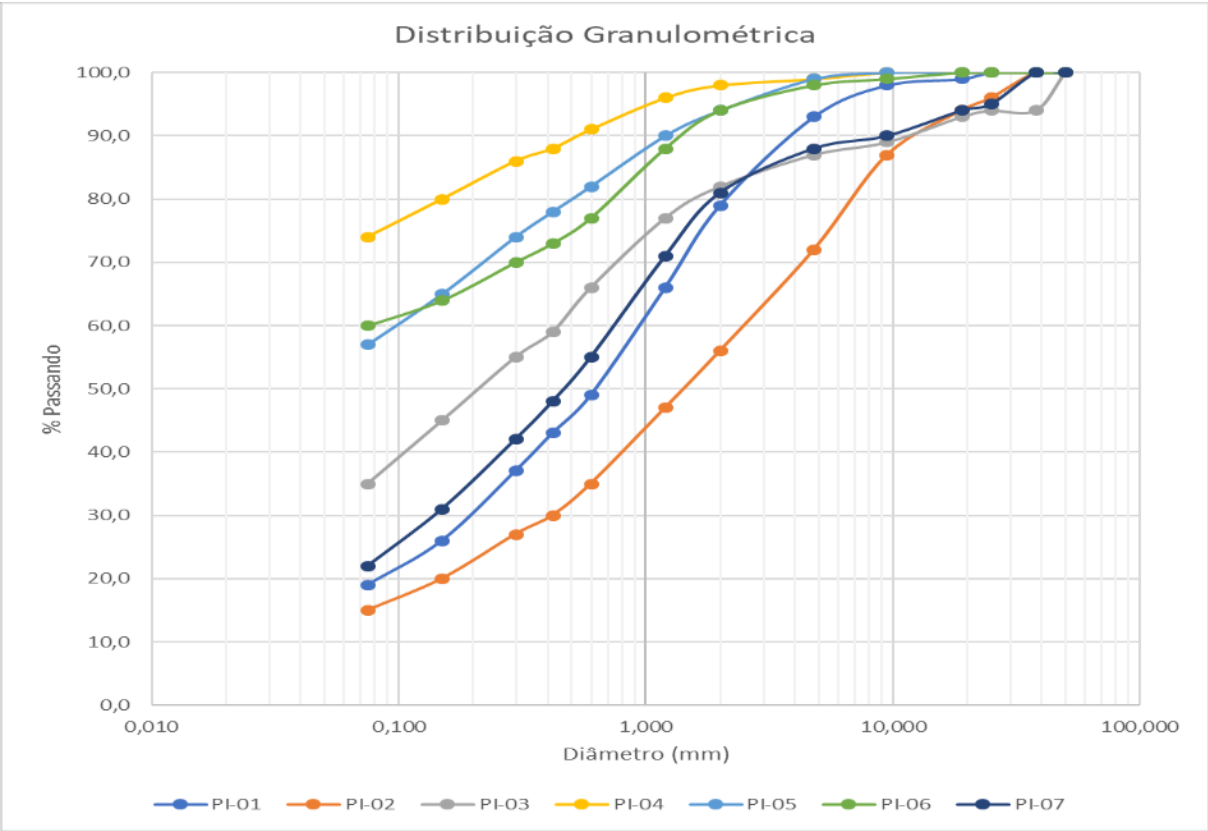


FONTE: O Autor (2024).

4.1 Pontos de Coleta e Caracterização Geotécnica do Solo

A caracterização geotécnica do trecho estudado envolveu a coleta de sete amostras deformadas do solo diretamente do leito da rodovia, ou seja, do material “*in situ*” presente na camada superficial de rolamento. Trata-se de um material com composição bastante heterogênea, decorrente da mistura entre o solo natural e materiais provenientes de jazidas utilizadas em manutenções anteriores do revestimento primário. Os ensaios de granulometria (ABNT, 2025), teor de umidade (ABNT, 2024), limite de liquidez (ABNT, 2017), limite de plasticidade (ABNT, 2016), além do índice de plasticidade (ABNT, 2016) e índice de grupo, foram realizados e permitiram a classificação detalhada do solo, exposta na FIGURA IV.

FIGURA IV – CURVA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA



FONTE: O Autor (2024).

Os solos identificados como Solo PI-01, Solo PI-02 e Solo PI-07 foram classificados como solos predominantemente arenosos, com menor quantidade de finos. O solo PI-03 exibiu características intermediárias, enquanto Solo PI-04, Solo PI-05 e Solo PI-06 apresentaram altos teores de finos, sendo classificados como solos siltosos ou argilosos, todos os solos foram classificados de acordo com a ABNT NBR 6457/2024. Na TABELA VII, encontram-se expostos os resultados dos ensaios de limites de liquidez e limite de plasticidade, bem como os valores obtidos para o índice de plasticidade e índice de grupo dos solos em questão.

TABELA VII – LIMITES DE ATTERBERG E ÍNDICE DE GRUPO

	PI-01	PI-02	PI-03	PI-04	PI-05	PI-06	PI-07
Limite de liquidez (%)	32	29	43	51	34	57	32
Limite de plasticidade (%)	25	22	32	37	27	36	26
Índice de plasticidade (%)	7	7	11	14	7	21	6
Índice de grupo	0	0	0	12	4	12	0

FONTE: O Autor (2024).

Com base nos ensaios de granulometria, limites de Atterberg e índice de grupo, as amostras foram classificadas de acordo com o *Transportation Research Board* (TRB). Este sistema é muito empregado na engenharia rodoviária, no qual categoriza solos e materiais granulares para pavimentação conforme sua granulometria e resistência, orientando a seleção de subleitos, sub-bases e bases. Divide-se em grupos (A-1 a A-7), indicando aptidão para uso viário e necessidade de estabilização (DNIT, 2006).

Conforme a classificação TRB, as amostras Solo PI-01, Solo PI-02 e Solo PI-07 são classificadas como A-2-4, indicando solos arenosos com pequena quantidade de finos cujo comportamento como subleito de excelente a bom. A amostra Solo PI-03 foi classificada como A-2-7, sendo um solo arenoso com teor ligeiramente maior de finos, mas ainda possuindo um comportamento bom como subleito.

As amostras Solo PI-04 e Solo PI-06 foram classificadas como A-7-5, o que indica solos argilosos de alta plasticidade, cujo comportamento como subleito de baixa capacidade de suporte, são menos indicados para estruturas de pavimentação devido à sua instabilidade.

Por fim, a amostra Solo PI-05 foi classificada como A-4, identificando um solo siltoso com baixa plasticidade, possuindo também limitações de suporte para aplicações em estruturas de pavimentos.

4.2 Parâmetros de Aplicação e Ensaio Laboratoriais

O fornecedor do Dynabase recomenda porcentagens de mistura com o aditivo estabilizante entre 2% e 3% da massa seca de solo. Para fins dos ensaios laboratoriais e considerando as variações naturais no controle de dosagem em campo, optou-se por adotar 3% do aditivo, visto que um teor médio de 2% poderia acarretar em pontos com dosagens insuficientes.

Para compreender a extensão dos resultados da aplicação do aditivo químico, recorreu-se para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) (ABNT, 2025) e Expansibilidade (ABNT, 2025).

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) é um ensaio de penetração amplamente utilizado na engenharia de pavimentos para avaliar a capacidade de suporte de solos e materiais granulares. Mede-se a resistência de um solo à penetração de um pistão cilíndrico padronizado, comparando essa resistência com a de um material padrão (DNIT, 2016).

Um valor de ISC mais alto indica maior capacidade de suporte e, consequentemente, melhor desempenho do solo como sub-base ou subleito de pavimentos.

A determinação do ISC é fundamental para o dimensionamento de camadas de pavimentação pelo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNER, 1981). Solos com baixo ISC requerem camadas mais espessas para distribuir as cargas do tráfego.

O ensaio de expansão do solo, normalmente realizado em conjunto com o Índice de Suporte Califórnia (ISC), mede a variação de volume que o solo compactado sofre ao ser submerso em água (DNIT, 2012). Segundo Bernucci (1987), qualquer tipo de solo, seja ele tropical ou não, apresenta menor capacidade de suporte e maior perda de capacidade de suporte por umedecimento, quanto maior for sua expansão.

Solos com alta capacidade de expansão, tipicamente aqueles com alto teor de argilas expansivas, podem causar fissuras e deformações em estruturas de pavimentação devido às mudanças volumétricas induzidas pelo teor de umidade.

A redução da expansão é um objetivo fundamental na estabilização de solos, pois garante a estabilidade e a durabilidade do pavimento ao longo do tempo, minimizando patologias relacionadas a variações de teor de umidade.

5 Resultados e Discussão

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de laboratório. A análise das propriedades geotécnicas do solo, tanto *in situ* quanto após o tratamento com o aditivo químico, permite a compreensão do efeito do produto nas características dos materiais. A seguir, são detalhados os resultados referentes ao Índice de Suporte Califórnia (ISC) e à expansão do solo.

5.1 Análise de ISC e Expansão

Na TABELA VIII, apresenta-se os respectivos resultados dos ensaios do Índice de Suporte Califórnia e de expansão.

TABELA VIII – EXPANSÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Material e energia	Parâmetro	PI-01	PI-02	PI-03	PI-04	PI-05	PI-06	PI-07
Solo “ <i>in situ</i> ”	Expansão (%)	0,15	0,35	3,1	0,8	1,0	0,8	0,5
P.I.	I.S.C. (%)	35,5	44,5	6,1	28,0	27,5	17,4	39,5
Solo estabilizado	Expansão (%)	0	0,02	0,1	0,3	0,4	0,1	0,03
P.I.	I.S.C. (%)	66,0	101,0	69,5	63,0	75,0	71,0	71,0

FONTE: O Autor (2024).

Os valores de ISC do solo “*in situ*” nos pontos de inspeção (PIs) variaram de 6,1% a 44,5%, indicando uma resistência limitada em diversas amostras. Notavelmente, o Solo PI-03 apresentou um ISC de apenas 6,1%, o Solo PI-06 de 17,4% e o Solo PI-05 de 27,5%, indicando baixa capacidade de suporte em seu estado natural.

Com a estabilização química, observou-se um aumento considerável no ISC em todos os solos ensaiados, com valores variando de 63,0% a 101,0%, indicando maior resistência e adequação para uso na pavimentação.

Os solos PI-03 e PI-06 tiveram os maiores aumentos percentuais (1039,34% e 308,05%, respectivamente) de ISC, evidenciando o impacto positivo em solos com baixo ISC inicial. Amostras como o Solo PI-02, já com resistência razoável, ainda tiveram um acréscimo significativo de 126,97% de ISC. Esses aumentos mostram que a estabilização pode mais que dobrar a capacidade de suporte, e em alguns casos, aumentá-la em mais de dez vezes.

A expansão do solo “*in situ*” variou de 0,15% a 3,1%, com o Solo PI-03, Solo PI-05 e Solo PI-06 apresentando valores mais elevados, indicando propensão a alterações volumétricas. Com a estabilização, a expansão foi reduzida para valores entre 0% e 0,4%, refletindo menor tendência do solo a expandir e maior estabilidade.

A estabilização resultou em uma redução de até 100%, sendo particularmente importante em solos com alta expansibilidade inicial como o Solo PI-03, que teve uma redução de 96,77% (de 3,1% para 0,1%), conforme apresentado na TABELA IX.

TABELA IX – COMPARATIVO DE ACRÉSCIMO DE ISC E REDUÇÃO DE EXPANSÃO

Material e energia	Parâmetro	PI-01	PI-02	PI-03	PI-04	PI-05	PI-06	PI-07
Solo “ <i>in situ</i> ” P.I.	I.S.C (%)	35,5	44,5	6,1	28,0	27,5	17,4	39,5
Solo estabilizado P.I.	I.S.C. (%)	66,0	101,0	69,5	63,0	75,0	71,0	71,0
Acréscimo (%)		85,92	126,97	1039,34	125,00	172,72	308,05	79,75
Solo “ <i>in situ</i> ” P.I.	Expansão (%)	0,15	0,35	3,1	0,8	1,0	0,8	0,5
Solo estabilizado P.I.	Expansão (%)	0	0,02	0,1	0,3	0,4	0,1	0,03
Redução (%)		100	94,29	96,77	62,50	60,00	87,50	94,00

FONTE: O Autor (2024).

5.2 Variabilidade Climática

Nesta pesquisa, o revestimento estabilizado não atingiu o desempenho esperado sob condições climáticas adversas. Após chuvas prolongadas, formou-se uma fina camada de lama sobre a superfície, exigindo a aplicação de nova camada de material granular sobre o solo estabilizado. No entanto, os trechos estabilizados que receberam uma nova camada granular, não apresentaram mais deformações ou atoleiros durante períodos chuvosos, fatos típicos relacionados a deficiências no subleito. Isso se deve à melhoria significativa no ISC e redução expressiva na expansão, mesmo em solos com baixa capacidade de suporte como o Solo PI-03 e o Solo PI-06.

Do ponto de vista ambiental, a melhoria do subleito estabilizado diminui a necessidade de importar materiais e reduz a contaminação de corpos hídricos por sedimentação. Na Tabela X, encontram-se resumidos os principais impactos ambientais e benefícios da utilização do aditivo em comparação à manutenção convencional.

TABELA X – RESUMO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Tipo de Impacto Ambiental	Aplicação do Aditivo	Benefícios
Extração de materiais naturais	Revestimento e subleito	Preservação de recursos naturais e menor degradação de áreas.
Produção de poeira	Revestimento	Melhoria da qualidade do ar, da visibilidade nas vias e da saúde pública.
Sedimentação em corpos hídricos	Revestimento e subleito	Preservação da qualidade da água e dos ecossistemas.
Emissão de poluentes veiculares	Revestimento	Menor consumo de combustível e emissões de CO ₂ .
Gestão de resíduos	Revestimento e subleito	Redução da necessidade de manutenção frequente, minimizando a geração de resíduos na execução dos serviços.

FONTE: O Autor (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa apresentou a eficácia da estabilização química do solo com o aditivo Dynabase na melhoria das propriedades mecânicas dos solos amostrados em diferentes segmentos da rodovia não pavimentada PR-092, localizada no Estado do Paraná.

Os resultados revelam aumentos na capacidade de suporte (ISC), e reduções na expansão expressivos, confirmando a capacidade da técnica em transformar solos de baixa qualidade em solos com resistência adequada e maior estabilidade.

Apesar da eficácia geral, a heterogeneidade dos solos nas vias não pavimentadas constitui um fator limitante para a estabilização da camada de revestimento primário, que está diretamente exposta ao tráfego e intemperismo.

Por outro lado, a aplicação do Dynabase para reforço do subleito demonstrou-se eficaz, pois o material confinado não sofre os impactos diretos.

Para o refinamento e aprofundamento de estudos futuros, intenciona-se:

- Realizar ensaios de Índice de Suporte Califórnia e expansibilidade com diversos produtos estabilizantes disponíveis no mercado e a avaliação de diferentes teores de aditivo para otimizar a dosagem;
- Investigar os efeitos dos aditivos nas características micromorfológicas do material por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Em suma, a estabilização química com Dynabase mostrou-se uma alternativa viável e sustentável para a manutenção da rodovia analisada, promovendo maior durabilidade e menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solos - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2025.

BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. **Estradas rurais: técnicas adequadas de manutenção**. Florianópolis: Departamento de Estradas de Rodagem, 2003.

BERNUCCI, *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2008.

BERNUCCI, L. L. B. **Expansão e contração de solos tropicais compactados e suas aplicações às obras viárias: classificação de solos tropicais com base na expansão e contração**. 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2022: relatório gerencial**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>. Acesso em: 11 set. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2024: relatório gerencial**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/cbf59b9e-fd1a-41fc-b230-172c4dc42100>. Acesso em: 10 jan. 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ (DER/PR). **CO069/2023DOP**. Curitiba: DER/PR, 2023. (Diretoria de Operação). Disponível em: <https://www.transparencia.pr.gov.br>. Acesso em: 29 set. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro: DNER, 1981. (Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Divisão de Informática Técnico-Científica).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **Manual de conservação rodoviária**. Brasília: DNIT, 2005. (Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisa Rodoviária – IPR).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 3 ed. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 160/2012-ME: Solos – determinação da expansibilidade – método de ensaio**. Brasília: DNIT, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 172/2016-ME: Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Brasília: DNIT, 2016. (Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Instituto de Pesquisa Rodoviária – IPR).

DYNABASE – COMÉRCIO DE PRODUTOS QUÍMICOS LTDA. **Caderno de recomendações do fabricante**. Penápolis, São Paulo, 2015.

EATON, R. A.; GERARD, S.; CATE, D. W. **Rating unsurfaced roads: a field manual for measuring maintenance problems**. Hanover: US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1987.

EMMERT, F. **Avaliação do emprego de técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com um produto RBI grade 81**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. Secretaria de Infraestrutura e Logística. Departamento de Estradas de Rodagem. **Sistema Rodoviário Estadual 2022 (SRE)**. Curitiba, 2023

MOREIRA, E. D. **Desempenho de dois trechos de solo-emulsão em vias de baixo volume de tráfego**. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2010.

REID, L. M.; DUNNE, T. **Sediment production from forest road surfaces**. Water Resources Research, v. 20, n. 11, p. 1753-1761, 1984.

SANTOS, A. R.; *et al.* **Estradas Vicinais de Terra. Manual Técnico Para Conservação e Recuperação**. 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental, 2019. Disponível em: https://www.abge.org.br/downloads/Miolo_Estradas-Vicinais_vers%C3%A3o_pdf.pdf. Acesso em: 29 set. 2025.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. v. 2. São Paulo: Pini, 2001.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2016.