

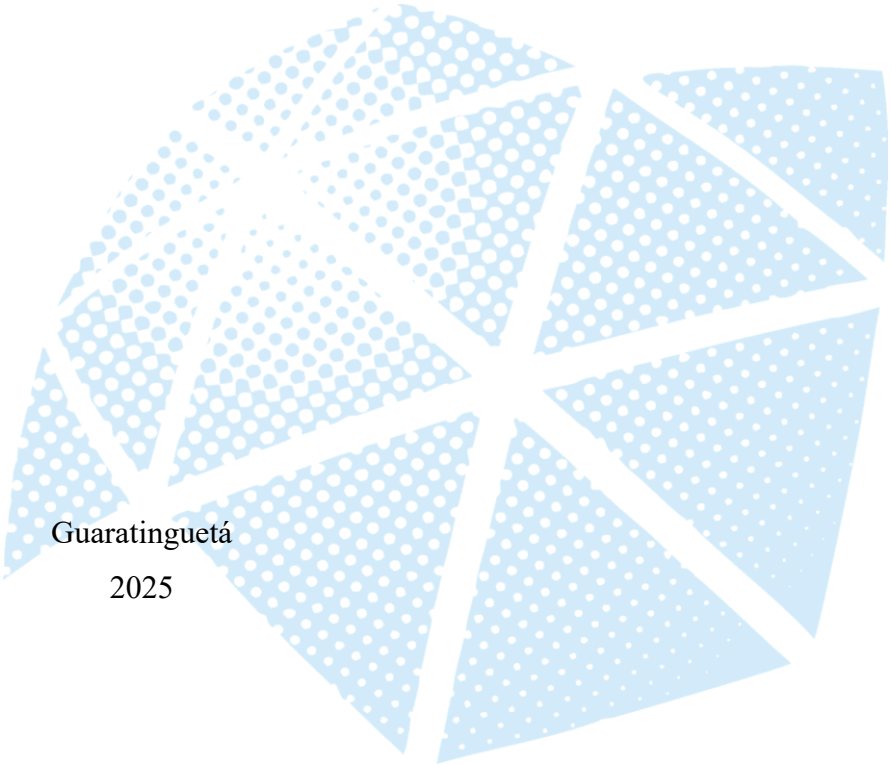
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

MATHEUS HENRIQUE GALORO

**ESTUDO LABORATORIAL DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE UM SOLO A
PARTIR DA ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE À BASE DE ENZIMAS PARA USO
EM ESTRADAS RURAIS NÃO PAVIMENTADAS.**

Guaratinguetá

2025



MATHEUS HENRIQUE GALORO

**ESTUDO LABORATORIAL DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE UM SOLO A
PARTIR DA ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE À BASE DE ENZIMAS PARA USO
EM ESTRADAS RURAIS NÃO PAVIMENTADAS.**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do e Ciências do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^a. Mariana Ferreira
Benessiuti Motta

Coorientador(a): Prof^º. Dr. Gabriel Orquizas
Mattielo Pedroso

Guaratinguetá

2025

G178e	Galoro, Matheus Henrique Estudo laboratorial da estabilização química de um solo a partir da adição de estabilizante à base de enzimas para uso em estradas rurais não pavimentadas / Matheus Henrique Galoro - Guaratinguetá, 2025. 81 f : il. Bibliografia: f. 78-81 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mariana F. Benessiuti Motta Coorientador: Prof. Dr. Gabriel O. Mattiello Pedroso 1. Solos - Estabilização. 2. Solos - Compactação. 3. Pavimentos. 4. Estradas rurais. I. Título. CDU 624.138
-------	---

MATHEUS HENRIQUE GALORO

Estudo laboratorial da estabilização química de um solo a partir da adição de estabilizante à base de enzimas para uso em estradas rurais não pavimentadas.

Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Faculdade de Engenharia e Ciências, Campus de Guaratinguetá, como parte dos requisitos para obtenção de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da defesa: 11 / 11 / 2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL ORQUIZAS MATTIELO PEDROSO
Data: 26/11/2025 11:40:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profº. Dr. GABRIEL ORQUIZAS MATTIELO PEDROSO
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 PAULO VALLADARES SOARES
Data: 28/11/2025 10:49:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profº. Dr. PAULO VALLADARES SOARES
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN
Data: 28/11/2025 20:16:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Drª. ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

Novembro/2025

Dedico este trabalho a Deus, à minha família, aos meus amigos, aos meus orientadores que me guiaram com sabedoria e paciência ao longo desta pesquisa e a todos que de alguma forma acreditaram em mim ao longo dessa jornada.

E, em especial, ao menino que um dia sonhou em viver tudo isso, cheio de sonhos e brilho nos olhos, sem imaginar o quanto era capaz. Hoje, ele estaria feliz e orgulhoso por esta conquista que juntos alcançamos e tudo que superamos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por Seu cuidado constante e por ter me guiado em todos os momentos desta caminhada até aqui. Por me conceder força, perseverança e fé, especialmente nos períodos mais difíceis e incertos, quando pensei que não conseguira.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Karine, e à minha avó, Célia, pelo amor, e incentivo em todos os momentos. Por me oferecerem as melhores condições possíveis de estudo e educação, e por todo o suporte financeiro, que me permitiu o concluir curso de Engenharia Civil da Unesp de Guaratinguetá, esta etapa tão importante da minha vida.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Mariana Ferreira Benessiuti Motta, expresso minha profunda gratidão pelo exemplo, por sua dedicação, paciência e generosidade ao ensinar, por suas aulas inspiradoras que tornavam simples os conceitos mais complexos, e pelo apoio constante ao longo da graduação e no desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Gabriel Orquiza Mattiello Pedroso, agradeço profundamente pelo seu exemplo, dedicação e paciência nos ensinamentos transmitidos durante a graduação. Obrigado pelas excelentes aulas que despertaram em mim o interesse pela engenharia rodoviária e de transportes, seu apoio e orientação dentro e fora do laboratório foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores Dr. Paulo Valladares Soares e Dr.^a Isabel Cristina de Barros Trannin, pelos valiosos ensinamentos, pelo seu carinho e dedicação ao nosso ensino. Muito obrigado por gentilmente aceitarem o convite para compor esta banca examinadora.

Agradeço ao técnico dos Laboratórios de Geotecnia e Transportes, Flávio Bernardes, pelo acompanhamento, instrução e disponibilidade em nas etapas experimentais desta pesquisa.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Civil e a todos os professores que fizeram parte da minha graduação no Campus de Guaratinguetá da UNESP pela qualidade do ensino transmitido e pela dedicação em formar ótimos profissionais.

A todos os funcionários, técnicos e servidores do Departamento de Engenharia Civil, bem como aos auxiliares e demais membros da comunidade universitária meu sincero reconhecimento por contribuírem diariamente para a manutenção e excelência da instituição.

Por fim, deixo meu agradecimento à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá da UNESP, por proporcionar um ensino público, gratuito e de extrema qualidade, me permitindo ser um engenheiro civil pronto a transformar conhecimento em impacto positivo à comunidade.

“ Me quebre e me reconstrua

O que for preciso

Porque eu amo a adrenalina em minhas veias

Faço o que for preciso

*Porque eu amo a sensação de quando rompo
meus limites*

O que for preciso

Me leve até o topo, estou pronto para

O que for preciso ”

Imagine Dragons, “Whatever It Takes”

RESUMO

No Brasil, a priorização de investimentos e políticas públicas no modal rodoviário nos últimos 100 anos o tornou o principal meio de transporte do país. Entretanto, apenas cerca de 12,5% de toda a malha rodoviária brasileira é pavimentada, restando uma grande extensão de estradas rurais sem revestimento, frequentemente sujeitas a degradações como erosões, atoleiros e buracos, agravados pela falta de recursos para a construção de pavimentos convencionais. Diante disso, este trabalho analisa, em escala laboratorial, o comportamento de um solo natural submetido à estabilização química com o uso do aditivo enzimático EMC², avaliando sua aplicação em estradas não pavimentadas. A estabilização enzimática vem se destacando como alternativa sustentável às técnicas convencionais com cal e cimento, por reduzir impactos ambientais e custos de manutenção. O produto EMC², composto por biocatalisadores e surfactantes, atua de forma a favorecer a compactação do solo, aumentando a coesão entre as suas partículas, prometendo ser uma alternativa economicamente mais viável. Foram coletadas amostras de solo da zona rural de Guaratinguetá (SP), classificado como argila arenosa (ABNT) e silte de baixa plasticidade – ML (SUCS). Para o solo natural e para misturas de solo tratado com o estabilizante enzimático EMC² em três diferentes dosagens, foram separadas amostras para a determinação da curva de compactação. Nos teores de umidade ótima obtidos para o solo natural e para as misturas de solo tratado, foram moldados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão simples (RCS), índice de suporte Califórnia (ISC) e módulo de resiliência (MR), em diferentes tempos de cura, a fim de se analisar a influência da adição do aditivo e do tempo de cura nos parâmetros de resistência do solo. Em todas as dosagens, os resultados mostraram que a adição da solução enzimática reduziu o teor de umidade ótima e aumentou a massa específica seca máxima do solo tratado. Além disso, foram observadas melhorias nos valores de RCS, ISC e MR, indicando maior capacidade de suporte e rigidez elástica, sugerindo um melhor comportamento do solo tratado com a solução enzimática, em relação ao solo natural, frente a carregamentos repetidos. De forma ampla, pode-se concluir que o aditivo enzimático EMC² é eficiente na melhoria de propriedades físico-mecânicas do solo analisado, mostrando-se como uma alternativa tecnicamente viável para estabilização de solos em estradas não pavimentadas.

Palavras-chave: Estabilização química; solo; estabilizante à base de enzimas; EMC²; resistência à compressão simples; Índice de Suporte Califórnia; módulo de resiliência; estradas não pavimentadas.

ABSTRACT

In Brazil, the prioritization of investments and public policies in the road transport sector over the past 100 years has made it the country's main way of transportation. However, only about 12.5% of the entire Brazilian road network is paved, leaving a vast extension of rural unpaved roads frequently subjected to degradation such as erosion, ruts, and potholes, aggravated by the lack of financial resources for conventional pavement construction. In this context, the present study analyzes, on a laboratory scale, the behavior of a natural soil subjected to chemical stabilization using the enzyme-based additive EMC², evaluating its potential application in unpaved roads. Enzymatic stabilization has emerged as a sustainable alternative to conventional techniques using lime and cement, as it reduces environmental impacts and maintenance costs. The EMC² product, composed of biocatalysts and surfactants, acts to favor soil compaction by increasing the cohesion between its particles, promising to be a more economically viable alternative. Soil samples were collected from a rural area in Guaratinguetá (São Paulo state, Brazil), classified as sandy clay (ABNT) and low-plasticity silt – ML (SUCS). For both the natural soil and mixtures of soil treated with the EMC² enzymatic stabilizer at three different dosages, samples were prepared to determination of the compaction curve. At the optimum water contents obtained for the natural soil and the treated soils, cylindrical specimens were molded for unconfined compressive strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR), and resilient modulus (MR) tests, at different curing times, in order to analyze the influence of the additive use and curing time on the soil mechanical strength parameters. In all dosages, the results showed that the addition of the enzymatic solution reduced the optimum water content and increased the maximum dry density of the treated soil. Furthermore, improvements were observed in UCS, CBR, and MR values, indicating greater bearing capacity and elastic stiffness, suggesting better performance of the soil treated with the enzymatic solution under repeated loading compared to the natural soil. Overall, it can be concluded that the EMC² enzymatic additive is effective in improving the physical and mechanical properties of the analyzed soil, proving to be a technically viable alternative for soil stabilization in unpaved roads.

Keywords: Chemical stabilization; soil; enzyme-based stabilizer; EMC²; unconfined compressive strength; California Bearing Ratio; resilient modulus; unpaved roads.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão esquemática da malha rodoviária brasileira.....	13
Figura 2 – Problemas relacionados ao grande volume de chuvas vistos em estrada rural do município de Guaratinguetá (SP).	14
Figura 3 – Exemplos de curvas granulométricas e escalas granulométricas da ABNT e da AASHO.	19
Figura 4 – Visualização esquemática dos três diferentes tipos de distribuições granulométricas, representadas pelas curvas A, B e C.....	20
Figura 5 – Ilustração esquemática de um pavimento (a) de concreto-cimento ou pavimento rígido e (b) asfáltico.....	23
Figura 6 – Ilustração da atuação do EMC ² ® no solo.	27
Figura 7 – Representação esquemática da curva de compactação de um solo ou material granular.....	28
Figura 8 – Variações na curva de compactação de um mesmo material de acordo com cada energia de Proctor.....	29
Figura 9 – Amostra de solo preparadas conforme NBR 6457/2016.....	39
Figura 10 – Pipeta com precisão de 0,01 ml usada para medir o volume de solução enzimática.....	39
Figura 11 – Cápsulas com amostras de solo com diferentes teores de umidade, levadas à estufa por 24h.....	39
Figura 12 – Corpo de prova moldado para o ensaio de determinação da RCS.	40
Figura 13 – Corpo de prova rompido após o ensaio para determinação da RCS.....	41
Figura 14 – Ensaio de aplicação de carga axial não confinada para obtenção da RCS.....	41
Figura 15 – Corpos de prova moldados para o ensaio de penetração para determinação do ISC.	42
Figura 16 – Corpos de prova imersos em água por 4 dias com relógio medidor de deslocamento.	42
Figura 17 – Ensaio para obtenção do ISC.	43
Figura 18 – Corpos de prova moldados para o ensaio triaxial dinâmico de carga repetida para determinação do MR.	45
Figura 19 – Ensaio triaxial dinâmico de cargas repetidas para determinação do MR.....	45
Figura 20 – Curvas de Compactação ($\rho_d \times w$) para o solo natural e para as misturas de solo tratado com estabilizante à base de enzimas EMC ² nas três dosagens estudadas.	50

Figura 21 – Variação da RCS em função da dosagem de solução enzimática EMC ² para os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.	52
Figura 22 – Variação da RCS em função do tempo de cura para as misturas de solo tratado com a solução enzimática EMC ² nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.	53
Figura 23 – Curva do Índice de Suporte Califórnia para o solo natural.	54
Figura 24 – Curvas do Índice de Suporte Califórnia para a mistura de solo tratado com solução enzimática EMC ² na dosagem 1/30, nos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.	54
Figura 25 – Curvas do Índice de Suporte Califórnia para a mistura de solo tratado com solução enzimática EMC ² na dosagem 1/15, nos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.	56
Figura 26 – Curvas do índice de suporte Califórnia para a mistura de solo tratado com solução enzimática EMC ² na dosagem 1/8, nos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.	55
Figura 27 – Variação do ISC em relação ao tempo de cura para as misturas de solo tratado com solução enzimática EMC ² nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.	56
Figura 28 – Variação do ISC em relação à dosagem de solução enzimática EMC ² para os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.	57
Figura 29 – Variação do MR _{médio} dos valores de MR obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida em relação ao tempo de cura, para as dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.	60
Figura 30 – Variação do MR _{médio} dos valores de MR obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida em relação à dosagem, para os tempos de cura de 0 e 7 dias.	60
Figura 31 – Variação do MR _{ajustado} , calculado a partir do modelo composto de Macêdo, para o par de tensões adotado, $\sigma_3 = 30$ kPa e $\sigma_d = 75$ kPa, em relação ao tempo de cura para as dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.	63
Figura 32 – Variação do MR _{ajustado} , calculado a partir do modelo composto de Macêdo, para o par de tensões adotado, $\sigma_3 = 30$ kPa e $\sigma_d = 75$ kPa, em relação à dosagem, para os tempos de cura de 0 e 7 dias.	63
Figura 33 – Corpos de prova moldados para o ensaio de RCS (a) com solo natural – à esquerda; (b) com solo tratado com a solução enzimática – à direita.	64
Figura 34 – (a) Cilindro com o solo extraído após o ensaio de penetração para obtenção do ISC com solo fortemente aderido às bordas internas. (b) cilindro visto sob outro ângulo.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização geotécnica do solo a ser utilizado.	37
Tabela 2 – Valores de penetração padrão do ensaio para determinação do ISC.	43
Tabela 3 – Valores de tensões padrão do ensaio para a determinação do MR.	46
Tabela 4 – Modelos empíricos para ajuste dos dados do MR a serem analisados.	47
Tabela 5 – Linearização dos modelos empíricos para ajuste dos dados do MR.	48
Tabela 6 – Teores de umidade ótima ($w_{ótima}$) e peso específico seco máximo ($\rho_{dmáx}$) do solo natural e das misturas de solo tratado com solução enzimática nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.	49
Tabela 7 – Valores de RCS para o solo natural e para as misturas de solo tratado com solução enzimática EMC ² nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8, em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.	51
Tabela 8 – Valores de ISC para o solo natural e para misturas de solo tratado com solução enzimática EMC ² , em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.	56
Tabela 9 – Valores de MR encontrados para o solo natural e para as misturas de solo tratado com a solução enzimática EMC ² , em tempos de cura de 0 e 7 dias, obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida, para os pares de tensão padronizados pela norma DNIT 134/2018-ME.	58
Tabela 10 – Valores de MR _{médio} dos valores de MR obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida, para o solo natural e para as misturas de solo tratado com a solução enzimática EMC ² , em tempos de cura de 0 e 7 dias.	59
Tabela 11 – Valores dos parâmetros empíricos ajustados para os diferentes modelos de comportamento do MR estudados, para o solo natural e para as misturas de solo tratado com solução enzimática EMC ² , em tempos de cura de 0 e 7 dias.	61
Tabela 12 – Valores de MR _{ajustado} para o solo natural e para as misturas de solo tratado com solução enzimática EMC ² , em tempos de cura de 0 e 7 dias, para o par de tensões adotado, $\sigma_3 = 30$ kPa e $\sigma_d = 75$ kPa, aplicados na equação ajustada do modelo composto de Macêdo.	62
Tabela 13 – Resultados gerais dos ensaios realizados e controle de umidade dos corpos de prova.	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO	14
1.2	OBJETIVOS.....	17
2	REVISÃO BOBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	SOLOS	18
2.2	ESTRADAS	21
2.3	PAVIMENTO	22
2.4	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	23
2.5	ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM ENZIMAS DO TIPO EMC ²	26
2.6	CURVA DE COMPACTAÇÃO.....	28
2.7	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	30
2.8	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)	31
2.9	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	36
3.2	PREPARO DAS AMOSTRAS	37
3.3	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	38
3.4	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	39
3.5	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC).....	41
3.6	ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	44
3.6.1	Método de ensaio.....	44
3.6.2	Modelos de comportamento do Módulo de Resiliência (MR).....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	UMIDADE ÓTIMA E MASSA ESPECÍFICA SECA APARENTE MÁXIMA	49
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	51
4.3	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)	53
4.4	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	57
4.4.1	Resultados gerais do ensaio.....	57
4.4.2	Modelos de comportamento para o Módulo de Resiliência	61
4.5	ANÁLISE E DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS	64

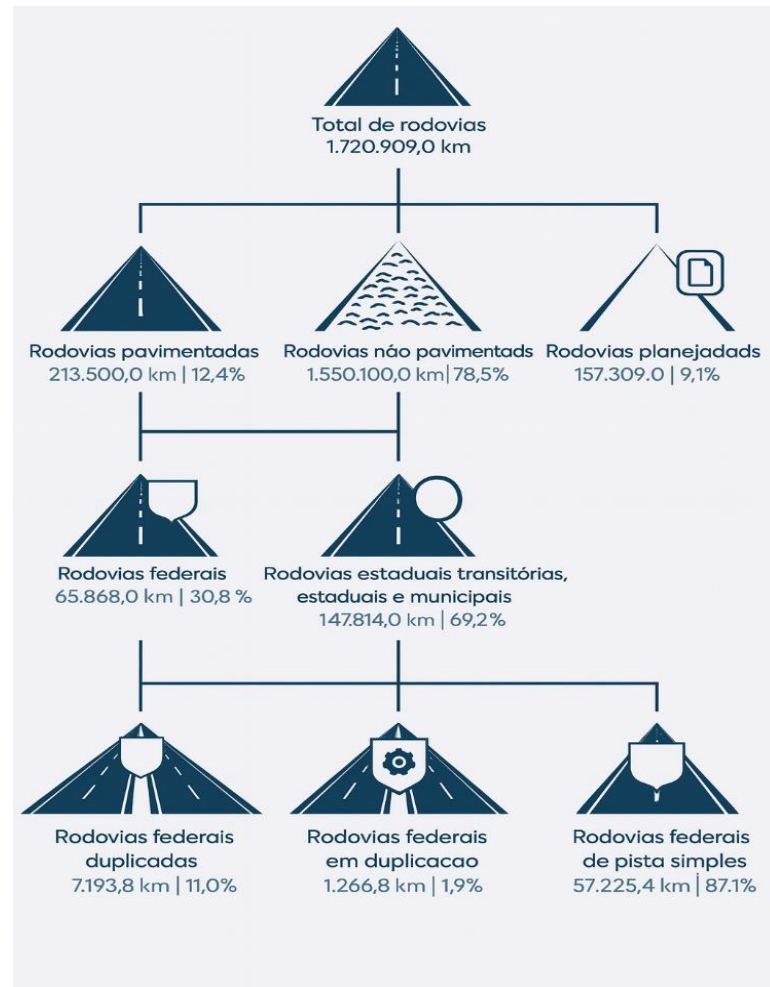
4.6	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE ESTUDOS ANTERIORES	72
5	CONCLUSÃO.....	74
6	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	76
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, historicamente, desde a gestão do então presidente Washington Luís, os investimentos e políticas de transporte têm priorizado o modo rodoviário, fator determinante para tornar esse meio de transporte predominante no país nos dias de hoje. O protagonismo desse modal remonta também à década de 1940, com a criação do Fundo Rodoviário Nacional (FNR), destinado ao financiamento público da conservação, manutenção e implantação das estradas de rodagem constantes no Plano Rodoviário Nacional. Com a ampliação da rede rodoviária, juntamente com o desenvolvimento da indústria automobilística, observou-se o surgimento de uma indústria de transporte de cargas e de passageiros em torno do modal rodoviário (CNT, 2022).

Atualmente, passando-se quase 100 anos do início desse processo, o modal rodoviário é responsável pela movimentação de aproximadamente 65% de toda a carga e por 95% do total de passageiros pelo país. Além disso, de acordo com dados do DNIT (2022) e do Ministério da Infraestrutura (2020), de cerca de 1,7 milhão de quilômetros que compõe a malha rodoviária brasileira, apenas 12,4% desse total são de rodovias pavimentadas, restando 78,5% de estradas não pavimentadas, que equivale a 1,4 milhão de quilômetros, como mostrado na figura 1.

Figura 1 – Divisão esquemática da malha rodoviária brasileira.



Fonte: CNT, com dados de DNIT (2022) e Ministério da Infraestrutura (2020).

É notável que uma parcela significativa da malha rodoviária brasileira não é pavimentada, estando sujeita a diversas patologias que podem ocorrer em estradas rurais. Santos (2011) aponta algumas patologias, com base no manual do IPT (1985), que podem estar relacionadas à falta de capacidade de suporte do subleito, ao mau desempenho da superfície de rolamento ou à deficiência do sistema de drenagem, sendo elas:

- Ondulações;
- Rodeiros;
- Atoleiros;
- Pista escorregadia e derrapante;
- Buracos; e
- Erosões.

Problemas do tipo podem ser vistos em muitos locais, principalmente zonas rurais de pequenos municípios, como no caso da cidade de Guaratinguetá (SP), mostrado em matéria de Carvalho (2022) para o Jornal O Vale.

Figura 2 – Problemas relacionados ao grande volume de chuvas vistos em estrada rural do município de Guaratinguetá (SP).



Fonte: Carvalho (2022).

A falta de recursos financeiros e a grande extensão de estradas rurais em zonas mais afastadas tornam inviável a construção de um pavimento flexível com material asfáltico, como seria o mais correto. Dessa forma, o estudo de soluções mais econômicas e de fácil aplicação mostram-se de extrema importância para a comunidade de diversos locais, onde é imprescindível o fluxo de pessoas e veículos, que muitas vezes é impossibilitado pelo grande volume de chuvas.

1.1 JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO

Cristelo (2001), aponta que as principais justificativas para a estabilização de um solo podem ser:

- a necessidade de desenvolvimento econômico de uma região formada de terrenos tecnicamente inadequados;
- permitir a utilização de estradas secundárias e rurais, em boas condições;

- fornecer composições para bases de pavimentos;
- atuar como material que reduz a absorção de ruídos, particularmente em zonas urbanas, relativo a outros materiais de construção;
- propiciar a circulação de tráfego em determinadas áreas e em curtos intervalos de tempo, por exemplo, em caso de emergências militares; e
- fornecer alternativa à execução de pavimentos, nomeadamente das bases, sub-bases de estradas e aeródromos.

Para Huss (2018), o conhecimento das potencialidades e limitações dos materiais de uma região, possibilita a escolha de soluções economicamente mais viáveis para a execução das camadas de um pavimento, sendo uma dentre outras opções, a nomeada estabilização química, que consiste na composição do solo, proveniente do local da obra com aditivos.

Como apresentado em estudos realizados por Santos *et al.* (2018), por Huss (2018) e por Pereira *et al.* (2006), em muitos locais por onde uma estrada passa, o material lá presente não apresenta características que o tornam compatível e interessante para seu uso em pavimentação. Tal fato pode ser agravado ao se tratar de estradas rurais, em que o não uso de capa asfáltica deixa esse material exposto à umidade das chuvas e à ação direta da carga dos veículos que por elas passam, ou seja, esse material deveria funcionar e ter as mesmas características dos materiais usados como camada de rolamento, de forma a resistir às ações diretas do tráfego do ambiente onde estão inseridas.

Uma saída adotada, principalmente na construção de rodovias pavimentadas com ligante asfáltico, é a remoção do solo e a sua substituição por outro com características apropriadas ao projeto de base, sub-base e subleito, quando necessário. Entretanto, como apresentado por Huss (2018) essa substituição ocasiona, normalmente, custo de transporte. Santos *et al.* (2018) apontam que a substituição do solo implica em aumento dos custos de construção e do impacto ambiental da obra, podendo-se citar: remoção do material, extração de materiais de outras áreas (muitas vezes em locais distantes), aumento das distâncias de transporte e a definição e o tratamento de locais para bota-foras. Visto isso, é de comum acordo entre os autores que uma alternativa interessante é a utilização de solos locais submetidos a processos de estabilização, de forma a melhorar suas características físico-mecânicas.

Assim, o emprego da mistura do solo, oriundo do local da obra, com aditivos (cal, cimento, etc), a denominada estabilização química, dentre outros métodos, torna-se de suma importância na pavimentação urbana em cidades e municípios, obtendo-se, assim, um material com propriedades geotécnicas adequadas para esse uso. Observa-se, ainda, que tal processo se

mostra como solução à preservação dos recursos naturais na construção rodoviária, especialmente em substituição ao emprego das britas, tradicionalmente usadas em camadas de pavimentos (HUSS, 2018).

Embora a grande maioria dos engenheiros rodoviários ainda usem produtos somente à base de cal para estabilização de solos, Rafique *et al.* (2016) apresenta perigos ambientais importantes associados ao uso desses produtos.

Além disso, quando cimento e cal são utilizados para a estabilização do solo, eles normalmente criam camadas de solo rígidas que fornecem resistência sem necessariamente reduzir o fluxo de umidade através da camada. Camadas rígidas estão sujeitas a fissuras, semelhantes a pavimentos de concreto, que devem ser construídas com juntas de dilatação para compensar o fenômeno de retração natural que propagam fissuras aleatórias. Na estabilização do solo, não há como se fazer juntas de expansão e, portanto, a fissuração é um efeito colateral esperado da estabilização com cimento e cal, reduzindo a sua eficácia geral e, muitas vezes, sujeitando os pavimentos a rachaduras reflexivas (STABILIZATION PRODUCTS LLC, 2020).

Na busca por novas tecnologias que propiciem melhorias nas propriedades de engenharia dos solos, os aditivos compostos por soluções enzimáticas atuam como agentes de estabilização de solos, fornecendo uma melhor estabilidade dos agregados em conjunto com as partículas do solo utilizados em base de rodovias. Esses aditivos se mostram como uma alternativa bastante interessante nos quesitos de sustentabilidade e economia, visto que são ecológicos e não agredem o meio ambiente. Conhecer o potencial desses aditivos ou propor novas metodologias de ensaio capazes de se avaliar a influência desses agentes estabilizadores em todos os tipos de solos tem sido o maior desafio dos pesquisadores nas últimas décadas (SANTOS *et al.*, 2018).

Estudos recentes confirmam a eficiência de aditivos compostos por soluções enzimáticas na estabilização de solos. Os resultados de Rafique *et al.* (2016) foram bastante promissores no quesito de elevação da capacidade de suporte do solo, o ISC (Índice Suporte Califórnia). Na dosagem 1/400 (proporção aditivo/água), foi observado uma elevação de 55% nos valores da capacidade de suporte (ISC). Com esse nível de melhora, segundo os autores, haveria uma redução de custo entre 15-20% na construção de novas rodovias e uma redução de custo de 60% na manutenção das rodovias quando comparadas com rodovias cujo solo foram construídas sem estabilizadores de solo.

Além disso, estudos comparativos de Eujine *et al.* (2017a *apud* Santos *et al.*, 2018) e Eujine *et al.* (2017b *apud* Santos *et al.*, 2018), relacionados à substituição da cal por solução a

base de enzimas na estabilização dos solos mostraram uma melhoria na capacidade de suporte dos solos. Na proporção de 70mL/m³ (volume de aditivo/m³ de solo), Eujine *et al.* (2017a) observaram uma elevação de 3 vezes nos valores de ISC sob condições secas de um solo estabilizado com cal com adição da enzima, e de 6 vezes de solo estabilizado somente com a enzima, quando comparados com o solo na condição natural.

1.2 OBJETIVOS

Visto o que foi apresentado anteriormente, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da estabilização química a partir da adição de solução estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² em propriedades do solo natural, visando melhorá-las a fim de se usar esse material estabilizado como pavimento em estradas rurais, dispensando-se o uso de ligante, cal e/ou cimento.

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Caracterização geotécnica do solo;
- b) Determinação e análise comparativa da umidade ótima ($w_{ótima}$) e massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) para o solo natural e para misturas de solo tratado com estabilizante a base de enzimas do tipo EMC², em três dosagens diferentes.
- c) Análise comparativa entre os valores de resistência à compressão simples (RCS) encontrados para amostras de solo natural e para amostras de solo tratado com estabilizante a base de enzimas do tipo EMC², em três dosagens diferentes, em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias;
- d) Análise comparativa entre os valores de índice de suporte Califórnia (ISC) encontrados para amostras de solo natural e para amostras de solo tratado com estabilizante a base de enzimas do tipo EMC², em três dosagens diferentes, em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias;
- e) Análise comparativa entre os valores de módulo de resiliência (MR) encontrados para amostras de solo natural e para amostras de solo tratado com estabilizante a base de enzimas do tipo EMC², em três dosagens diferentes, em tempos de cura de 0 e 7 dias;

2 REVISÃO BOBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS

Os solos são materiais naturais formados pela decomposição das rochas, influenciados por fatores climáticos, biológicos e geológicos. Sua composição e comportamento variam amplamente conforme o tipo de rocha de origem, as condições climáticas e os processos de transporte e deposição. Devido à sua heterogeneidade, o estudo do solo é essencial em qualquer obra de engenharia civil, principalmente na pavimentação, onde ele atua como material de fundação, subleito ou até mesmo como componente das camadas estruturais (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Em pavimentação, o solo tem papel fundamental como suporte da estrutura, sendo a camada mais inferior do pavimento (subleito). Sua capacidade de suporte influencia diretamente o desempenho e a durabilidade do pavimento, visto que deformações excessivas nessa camada podem causar recalques diferenciais e fissuras nas camadas superiores. Por isso, o conhecimento de suas propriedades geotécnicas, como granulometria, limites de consistência, massa específica e comportamento sob carga, é indispensável para o dimensionamento e execução adequados das obras viárias (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Sampaio (2019) aponta que os solos superficiais brasileiros, em especial os tropicais, apresentam grande variabilidade de comportamento em função do teor de umidade, da estrutura e do grau de laterização. Essa variabilidade pode comprometer o desempenho mecânico do pavimento, tornando necessária a aplicação de técnicas de estabilização para adequar suas propriedades. Ainda conforme a autora, solos argilosos tendem a apresentar maior plasticidade e menor capacidade de suporte, enquanto solos arenosos, embora mais drenantes, possuem baixa coesão e menor resistência à tração.

De acordo com a classificação proposta pelo Transportation Research Board (TRB) e pelo sistema MCT (Miniatura Compactado Tropical), amplamente utilizados no Brasil, os solos podem ser classificados conforme sua granulometria, plasticidade e comportamento na compactação. Essa classificação auxilia na escolha das técnicas de melhoria e estabilização mais adequadas (SAMPAIO, 2019).

De acordo com Caputo (2015), os solos são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. O solo é, portanto, uma função da rocha mãe e dos diferentes agentes de alteração.

Caputo (2015) também traz o conceito de laterização ou latorização, processo característico do Brasil e de zonas tropicais úmidas, e estações chuvosas e secas alternadas, em que, por lixiviação, ocorre a remoção da sílica coloidal e o enriquecimento dos solos e rochas com ferro e alumínio.

A granulometria de um solo consiste em classifica-lo, segundo as dimensões das suas partículas e dentro de determinados limites convencionais, as frações constituintes, sendo o solo dividido de acordo com as dimensões dos grãos em pedregulho, areia, silte e argila (CAPUTO, 2015).

Na figura 3 são apresentados três exemplos de curvas granulométricas e duas escalas granulométricas: a da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a da American Association of State Highway Officials (AASHO), muito utilizada para fins rodoviários.

Figura 3 – Exemplos de curvas granulométricas e escalas granulométricas da ABNT e da AASHO.

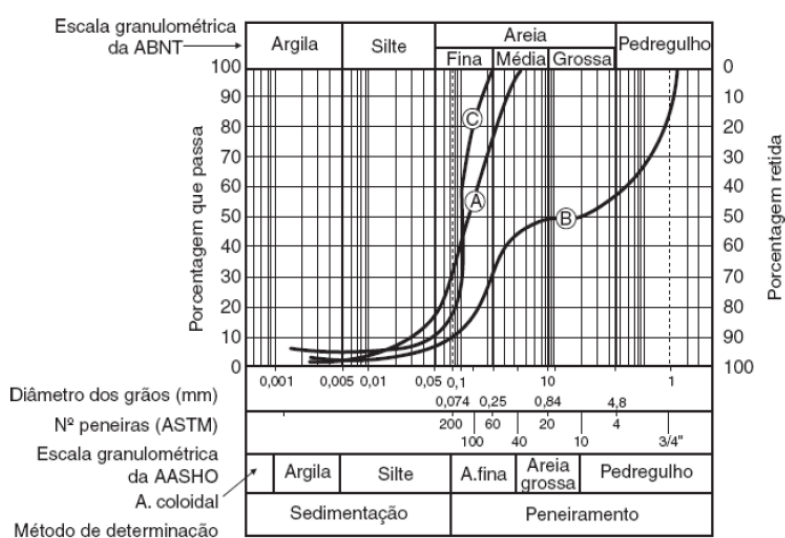


FIGURA 3.5

Fonte: Caputo (2015).

As curvas A, B e C da figura 3, denominadas como curvas granulométricas, correspondem cada uma a um solo diferente. Na figura 4 é possível visualizar esquematicamente os diferentes tipos de distribuição granulométricas para cada uma das três curvas. A Curva A da figura representa um solo bem graduado, a curva C um solo com graduação uniforme e a curva B um solo de graduação aberta ou descontínua.

Figura 4 – Visualização esquemática dos três diferentes tipos de distribuições granulométricas, representadas pelas curvas A, B e C.



Fonte: Caputo (2015).

Nogami e Villoibor (1995) apontam que os principais mecanismos de classificação de solos, o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e o Transportation Research Board (TRB) são inadequados para a classificação de solos brasileiros e de regiões tropicais, uma vez que ambos foram desenvolvidos para regiões temperadas. Para isso, o sistema MCT foi desenvolvido pelos autores, em 1981, com o objetivo de classificar adequadamente os solos tropicais, que quando classificados pelas demais metodologias, não apresentavam resultado satisfatório no campo.

O comportamento geotécnico do solo pode ser definido, ainda, pela região onde se localiza. O estudo geotécnico dos solos tropicais não pode ser realizado através dos procedimentos tradicionais de classificação, uma vez que a formação desses solos é associada ao intenso processo de intemperismo, o que não ocorre para os solos de região temperada, cuja caracterização está englobada nas metodologias tradicionais. Os solos tropicais apresentam características obtidas através dos processos pedológicos e geológicos típicos de regiões quentes e úmidas, sendo divididos em solos lateríticos e saprolíticos (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

2.2 ESTRADAS

As estradas são vias terrestres especialmente projetadas e construídas para possibilitar o tráfego seguro e eficiente de veículos e pessoas entre diferentes localidades. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), as estradas fazem parte do sistema viário terrestre e constituem elementos fundamentais para o desenvolvimento econômico e social de um país, pois viabilizam o transporte de pessoas, bens e serviços, promovendo a integração regional e nacional.

Uma estrada é composta por diversos elementos estruturais e funcionais, como a plataforma, a pista de rolamento, os acostamentos e as faixas de domínio, todos projetados de forma a garantir conforto, segurança e durabilidade da via. A concepção de uma estrada deve considerar fatores técnicos, econômicos, topográficos e ambientais, de modo a assegurar a melhor solução para o tráfego previsto (DNIT, 2006).

O DNIT (2006) classifica as estradas de acordo com diversos critérios, dentre eles o tipo de revestimento, sendo divididas em:

- Estradas não pavimentadas (ou de terra): aquelas que não possuem camada de revestimento superficial, em que o solo local compactado funciona como superfície de rolamento, estando normalmente presentes em áreas rurais ou de baixo volume de tráfego.
- Estradas revestidas com tratamento superficial (revestimento primário ou secundário): possuem uma camada de material granulado ou estabilizado, com ou sem adição de ligantes, que melhora as condições de rolamento e reduz problemas como levantamento de poeira e erosão.
- Estradas pavimentadas: aquelas que apresentam pavimento, constituído por uma ou mais camadas estruturais (base, sub-base e revestimento) sendo dimensionadas para suportar os esforços do tráfego e proteger o subleito. Essas camadas podem ser compostas por materiais granulares, solo-cimento, concreto asfáltico, concreto de cimento entre outros.

As estradas não pavimentadas não possuem a camada asfáltica, responsável por selar a estrutura da estrada e conferir maior resistência e durabilidade. Desta forma, o revestimento primário ou o solo do subleito precisam resistir diretamente aos esforços causados pelo tráfego de veículos. Além disso, a ausência de camada selante expõe o solo diretamente aos fatores climáticos e ambientais, aumentando os riscos de erosão. Assim, o tratamento das vias através

de processos de estabilização torna-se necessário nesses casos, buscando-se minimizar os desgastes e aumentar a durabilidade dessas estradas (SAMPAIO, 2019).

2.3 PAVIMENTO

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Os pavimentos são projetados de forma que cada camada tenha certa espessura e rigidez e que o sistema de camadas responda com uma rigidez conjunta adequada às condições climáticas e geométricas do local e ao tráfego, durante sua vida de projeto (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), o pavimento viário tradicionalmente classifica-se em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis, ou, como se tem usado, a nomenclatura de pavimentos de concreto de cimento *Portland* (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de pavimento.

Os pavimentos de concreto-cimento englobam os chamados pavimentos rígidos, em que o revestimento consiste em uma placa de concreto de cimento Portland, podendo ou não ser armadas com barras de aço, levando em conta sua espessura, que é fixada em função da resistência a flexão das placas e das resistências das camadas subjacentes (BERNUCCI *et al.*, 2022).

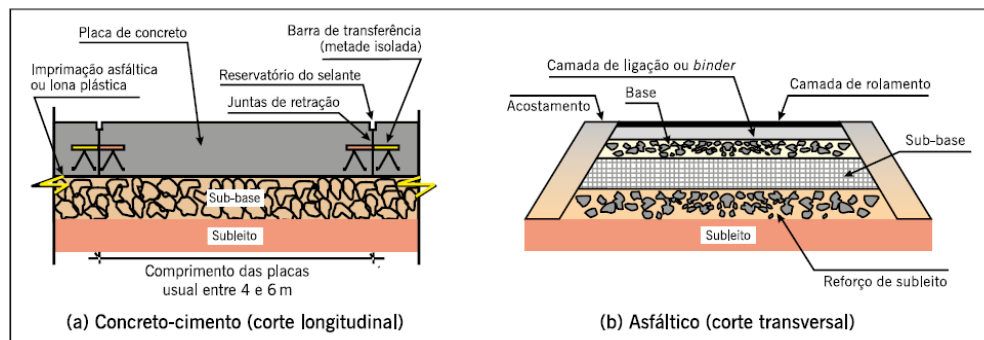
De acordo com o DNIT (2006), o revestimento em placas de cimento Portland tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores absorvendo, portanto, praticamente todas as tensões provenientes do carregamento. Por isso, usa-se designar a subcamada desse pavimento como sub-base, como pode ser visto na figura 5(a), uma vez que a qualidade desse material pode ser menor, equivalendo-se a sub-base dos pavimentos asfálticos.

Já os pavimentos asfálticos englobam, por sua vez: (I) os pavimentos flexíveis, cujas camadas granulares abaixo do revestimento asfáltico são constituídas por materiais granulares, solos, solo-agregados, entre outros e (II) os pavimentos semirrígidos, onde abaixo do revestimento asfáltico, a base ou sub-base são constituídas por materiais cimentadas, ou aglutinados por ligante hidráulico, que resistem aos esforços de tração.

Esse segundo grupo de pavimento, em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados, filler e ligantes asfálticos, é formado por quatro camadas principais, sendo elas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, conforme

apresentado na figura 5(b). Além disso, o revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento, em contato direto com as rodas dos veículos, e por camadas intermediárias ou de ligação, denominadas de binder. Dependendo do tráfego e da qualidade dos materiais disponíveis, pode-se suprir alguma dessas camadas (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Figura 5 – Ilustração esquemática de um pavimento (a) de concreto-cimento ou pavimento rígido e (b) asfáltico.



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

De acordo com DNIT (2006), no pavimento flexível, as camadas apresentam deformação elástica sob o carregamento aplicado e, a carga se distribui através das camadas. Bernucci *et al.* (2022) apontam que as tensões e deformações na camada asfáltica pela ação das cargas do tráfego são responsáveis pelo surgimento de danos nessa camada, sendo os principais deles o trincamento por fadiga e os afundamentos por deformação permanente. Assim, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito também são de importância estrutural nos pavimentos asfálticos, especialmente nos pavimentos flexíveis.

Tendo isso em vista, é plausível estender o estudo de tais efeitos para vias rurais sem revestimento, uma vez que o material presente em superfície pode ser equiparado aos materiais que compõem as camadas subjacentes ao revestimento asfáltico no pavimento flexível, de forma a mitigar defeitos como deformações excessivas, inclusive em estradas sem revestimento (não pavimentadas ou de terra), em que o solo do subleito se encontra em contato direto com as solicitações do tráfego de veículos.

2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos é um conjunto de técnicas destinadas a melhorar as propriedades físicas e mecânicas de um solo, de modo que ele possa atender aos requisitos de resistência, durabilidade e deformabilidade exigidos em obras de engenharia, especialmente em

pavimentação. Trata-se de um processo pelo qual o solo natural é modificado artificialmente, com o objetivo de aumentar sua capacidade de suporte, reduzir a suscetibilidade à erosão, melhorar a compactação e diminuir a permeabilidade (BERNUCCI *et al.*, 2022).

De acordo com Sampaio (2019), a estabilização de um solo consiste na modificação de suas características naturais por meio da adição de agentes estabilizantes ou pelo uso de técnicas que alterem sua estrutura física, química ou mineralógica. Essa prática permite o aproveitamento de materiais locais com características inicialmente desfavoráveis, reduzindo custos e impactos ambientais associados ao transporte de materiais nobres.

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), o objetivo fundamental da estabilização é melhorar o desempenho do solo como material de pavimentação ou fundação, de forma a se obter solos com maior resistência à compressão e à tração, menor deformabilidade, maior durabilidade e menor variação volumétrica em função das mudanças de umidade.

Sampaio (2019) destaca que a estabilização visa aumentar a resistência mecânica e a coesão entre as partículas, tornando o solo mais estável sob esforços de tráfego e condições climáticas adversas. Dessa forma, esse processo torna-se essencial na construção de estradas não pavimentadas, especialmente em áreas rurais e florestais, onde há grande variação de tipos de solo e limitações orçamentárias. Como observam Sampaio (2019) e Machado (2013 *apud* Sampaio, 2019), a aplicação da estabilização de solos é especialmente relevante em estradas florestais e rurais, pois possibilita a melhoria das condições de trafegabilidade e a redução dos custos de manutenção, assegurando maior durabilidade e sustentabilidade às obras.

Conforme a classificação apresentada por Sampaio (2019) e Bernucci *et al.* (2022), as técnicas de estabilização podem ser agrupadas em quatro categorias principais:

a) Estabilização mecânica:

É o método mais simples e consiste na mistura física de solos ou agregados com diferentes granulometrias, visando melhorar a distribuição das partículas e obter uma curva granulométrica mais bem graduada. Essa técnica busca aumentar a densidade e reduzir a deformabilidade do solo compactado. Bernucci *et al.* (2022) aponta que o sucesso dessa técnica depende do controle rigoroso da compactação e da umidade ótima, parâmetros obtidos por meio dos ensaios de Proctor.

b) Estabilização química:

Métodos que envolvem a adição de produtos químicos ou ligantes que reagem com o solo, modificando suas propriedades físico-químicas. Dentre os agentes estabilizantes mais comuns estão o cimento, a cal, o asfalto e, mais recentemente, os aditivos enzimáticos. Sampaio (2019) ressalta que os estabilizantes químicos podem atuar de diferentes formas, podendo reagir com as partículas do solo (como no caso do cimento e da cal), promover ligações físico-químicas (como nos polímeros e enzimas) ou reduzindo a permeabilidade (como nos ligantes asfálticos).

O uso de estabilizantes a base de enzimas como o EMC², enquadra-se nesse tipo de estabilização, agindo sobre a fração argilosa do solo e promovendo a agregação das partículas finas, de forma melhorar o agrupamento das partículas e, consequentemente, aumentando a compactação do solo, melhorando suas características físicas e mecânicas.

c) Estabilização térmica:

Esse tipo de estabilização, abordado por Sampaio (2019), consiste na alteração da estrutura mineralógica do solo por meio do aquecimento a altas temperaturas, provocando a desidratação e recristalização de minerais argilosos. Trata-se de uma técnica eficaz, porém de alto custo, sendo raramente utilizada em obras rodoviárias convencionais.

d) Estabilização elétrica:

Esse tipo de estabilização, também abordado por Sampaio (2019), baseia-se na aplicação de corrente elétrica contínua através do solo, promovendo a migração de íons e a redistribuição de água nos poros. Essa técnica é utilizada em situações especiais, principalmente em solos argilosos saturados, para acelerar a drenagem e o adensamento.

De forma geral, o comportamento dos solos em pavimentos depende da interação entre suas propriedades intrínsecas, o tipo de compactação e as condições ambientais locais. Portanto, a caracterização detalhada e a escolha de técnicas de estabilização adequadas são etapas determinantes para o sucesso das obras viárias.

Além das propriedades físicas, o comportamento mecânico do solo sob carregamentos cíclicos é um dos fatores mais relevantes para o desempenho de pavimentos. Solos com baixo

módulo resiliente ou elevada expansibilidade tendem a deformar-se permanentemente sob o tráfego, reduzindo a vida útil do pavimento. Assim, o controle da compactação e, quando necessário, a estabilização do solo, são medidas fundamentais para garantir o desempenho estrutural. A escolha do tipo de estabilização deve levar em conta o tipo de solo, o tráfego previsto, as condições climáticas e a disponibilidade de materiais. Em pavimentação, é comum a combinação de técnicas, por exemplo, estabilização mecânica seguida de adição química ou vice-versa, para se alcançar resultados mais satisfatórios (BERNUCCI *et al.*, 2022).

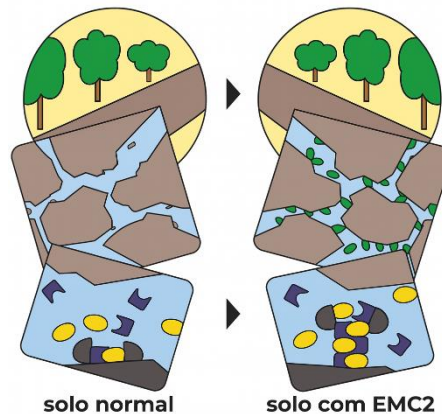
2.5 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM ENZIMAS DO TIPO EMC²

O EMC² é uma sigla para *Earth Materials Catalyst*, ou Catalisador de Materiais Terrosos em português, sendo o índice de elevado ao quadrado indicando que é um produto concentrado. De origem americana, o produto é fabricado pela *Stabilization Products LLC.*, da Califórnia e visa melhorar as características mecânicas do solo sem agredir o meio ambiente, sendo uma alternativa aos produtos tradicionais utilizados na estabilização química de solos, tais como a cal e o cimento.

Trata-se de um biocatalizador composto por uma emulsão de polímeros solúveis em água, surfactantes e uma pequena quantidade de óleos essenciais, que promovem a aceleração de reações químicas. Além disso, seu efeito aglutinante aumenta a cimentação e impermeabilização das partículas do solo, reduzindo o índice de vazios e, dessa forma, aumentando a compactação do material granular (BASE FORTE, 2025).

Segundo o fabricante, as enzimas presentes no estabilizante EMC², quando incorporadas ao solo e em contato com a água catalisam reações químicas que geram produtos químicos que se entrosam nas partículas minerais, emaranhando e soldando as partículas do solo, como mostrado na figura 6. Além disso, ações secundárias envolvendo a lubrificação das partículas e a diminuição da tensão superficial d'água, permitem se obter maiores compactações e resistências aos carregamentos.

Figura 6 – Ilustração da atuação do EMC²® no solo.



Fonte: Adaptado de Huss (2018)

A aplicação do EMC² não requer nenhuma etapa extra de execução durante a obra, podendo ser adicionado diretamente na água usada na compactação do solo. De acordo com o fabricante, por se tratar de um produto superconcentrado, 1 litro do produto diluído em água pode tratar um volume de 30 m³ de solo, o que o torna, também, uma opção mais econômica em relação aos métodos tradicionais de estabilização química.

Por fim, alguns benefícios do uso do estabilizante a base de enzimas EMC², que podem ser apontados, de acordo com a Base Forte (2025) são:

- Em estradas não-pavimentadas, reduz a infiltração de umidade, a susceptibilidade ao aparecimento de buracos, ao afundamento nas trilhas de rodas, a corrugações, a perda de material por abrasão e a poeira;
- Torna viável o uso de materiais terrosos a atuarem como base, sub-base, reforço do subleito e até mesmo como camada de rolamento;
- Facilidade de manuseio, reduzindo os custos de frete e de equipamentos de proteção individual;
- Praticamente nenhum impacto ambiental, por se tratar de um produto biodegradável, não reativo, não corrosivo e não inflamável;
- Economia de água, ao reduzir o teor de umidade ótima;
- Redução do pó em casos de solos com grande quantidade de finos;
- Redução dos custos de construção e manutenção de vias, ao reduzir a necessidade de agregados de custo mais elevado e de jazidas e custos de transporte.

2.6 CURVA DE COMPACTAÇÃO

Segundo Caputo (2015), a compactação é o processo de adensamento artificial do solo por meio da aplicação de energia mecânica, com o objetivo de reduzir o volume de vazios e, conseqüentemente, aumentar a densidade seca do material. Diferente do adensamento natural (causado pelo peso próprio do solo e pela drenagem), a compactação é controlada, visando melhorar propriedades de engenharia, como resistência, estabilidade e impermeabilidade.

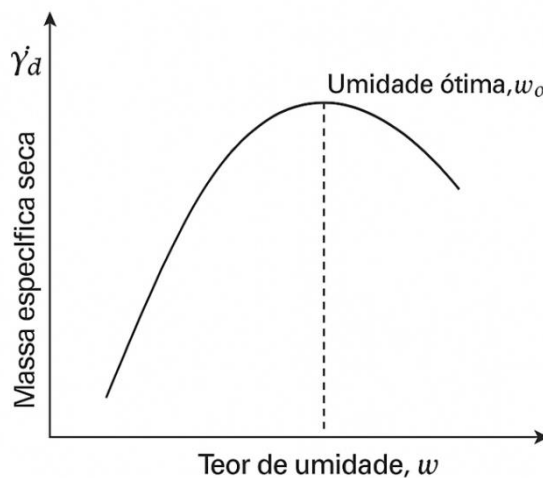
A curva de compactação é o principal resultado obtido nos ensaios de laboratório, como o Proctor Normal e o Proctor Modificado, normatizados pela NBR 7182 (ABNT, 2016), e representa graficamente a relação entre o teor de umidade (w) no eixo das abscissas (x) e a massa específica seca (ρ_d) no eixo das ordenadas (y).

Ao se compactar várias amostras do mesmo solo com diferentes teores de umidade, observa-se que:

- Inicialmente, o aumento da umidade melhora a compactação, pois a água atua como lubrificante entre as partículas.
- Após certo ponto, o excesso de água ocupa os vazios e reduz a densidade seca, pois substitui o ar por água, que é menos compressível.

Esse comportamento resulta numa curva parabólica, cujo ponto máximo define o teor de umidade ótima ($w_{ótima}$) que proporciona a maior densidade seca – a massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$), valor correspondente ao ponto máximo da curva, apresentada na figura 7.

Figura 7 – Representação esquemática da curva de compactação de um solo ou material granular.



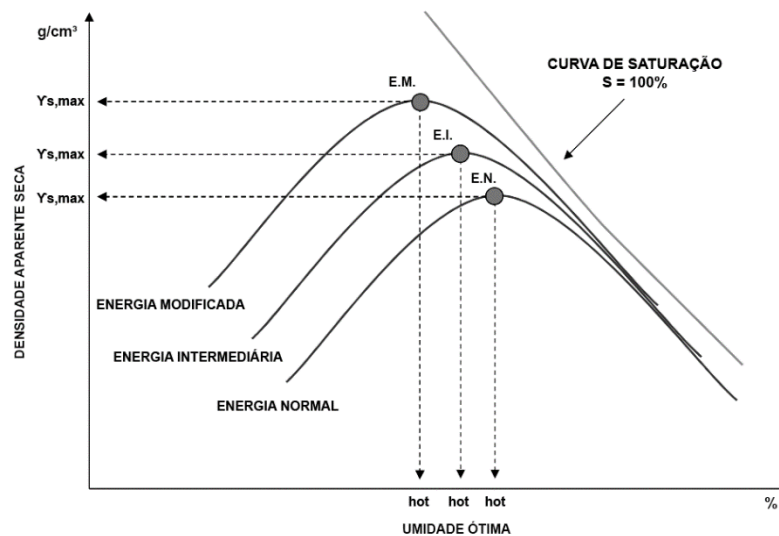
Fonte: Adaptado de Caputo (2015), com base na NBR 7182 (ABNT, 2016).

O comportamento do solo, indicado na curva de compactação, se dá porque à medida que w cresce até $w_{ótima}$, o solo se torna mais “trabalhável”, resultando em massas específicas maiores e teores de ar menores. No entanto, como não é possível expulsar todo o ar existente nos vazios do solo, a curva de compactação não pode atingir a curva de saturação (figura 8), onde $V_{ar} = 0$, fazendo com que a partir da $\rho_{d,máx}$, o ramo torna-se descendente. Para um baixo w , o atrito entre as partículas é alto, dificultando a compactação. Com o aumento de w , ocorre um efeito de lubrificação entre as partículas, facilitando a saída de ar e aumentando a compactação do solo. No entanto, após $w_{ótima}$, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, e a maior quantidade de água presente resulta em redução da massa específica do solo (LEÃO, 2018).

De acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016) há três métodos principais de ensaio: o Proctor Normal (Standard), com a menor energia de compactação, representando as condições típicas de campo em obras de pequeno porte ou com equipamentos leves; o Proctor Intermediário; e o Proctor Modificado, com a maior energia de compactação, utilizado em obras de pavimentação, barragens e aterros rodoviários, onde se busca maior densidade e resistência, simulando a compactação com equipamento mais pesados.

Cada método de ensaio de Proctor resulta em uma curva diferente – conforme pode ser visto na figura 8. O aumento da energia de compactação desloca a curva para cima e para a esquerda, isto é, maior $\rho_{d,máx}$ e menor $w_{ótima}$ (Caputo, 2015).

Figura 8 – Variações na curva de compactação de um mesmo material de acordo com cada energia de Proctor.



Fonte: Suporte (2025).

A curva de compactação é utilizada para: definir parâmetros de controle de campo, como o grau de compactação (%), comparando a densidade obtida in situ com a densidade seca máxima do ensaio laboratorial, projetar camadas de pavimento, avaliar a eficiência de equipamentos compactadores e selecionar um teor de umidade ideal para execução de aterros e fundações (CAPUTO, 2015).

De acordo com Caputo (2015), o controle da compactação deve sempre considerar as condições reais de campo, pois fatores como tipo de solo, granulometria e teor de umidade natural afetam a eficiência da compactação.

2.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

A resistência à compressão simples (RCS) consiste em uma propriedade mecânica que mede a capacidade de um material de resistir a cargas aplicadas de forma axial até sua ruptura. No contexto de solos, a RCS é particularmente importante para avaliar a capacidade de suporte e deformabilidade de solos compactados, utilizados em camadas de pavimentos (LAMBE; WHITMAN, 1979).

Segundo Lambe e Whitman (1979), a resistência à compressão simples de um solo ou material granular é influenciada por fatores como teor de umidade, grau de compactação, granulometria, plasticidade e sua história de carregamento, sendo, portanto, um indicador indireto da coesão e da estrutura interna do solo.

O conceito de resistência à compressão simples foi adaptado de ensaios de mecânica dos materiais, originalmente aplicados a concreto e argilas coesivas. Nos anos 1950-1970, pesquisas como Seed *et al.* (1962) estabeleceram métodos para correlacionar resistência à compressão simples com propriedades de pavimentos, influenciando o dimensionamento de camadas de solo e sub-base.

Como principais usos na engenharia rodoviária, Mattos (2005) aponta a importância da resistência à compressão simples no dimensionamento de camadas de sub-base e base, de forma a garantir que suportem o carregamento do tráfego. Seus estudos mostram que solos com maior resistência à compressão simples permitem a aplicação de camadas mais finas e mais duráveis em um pavimento, otimizando o custo de pavimentação. Além disso, essa propriedade foi usada por Seed *et al.* (1962) para estimar o módulo de resiliência, propriedade importante para prever deformações elásticas sob cargas repetidas. O DNIT (2006) também recomenda o estudo da resistência a compressão simples para se selecionar e dimensionar solos estabilizados.

A NBR 12770 (ABNT, 2022) normatiza o ensaio no Brasil, definindo os critérios para a preparação dos corpos de prova, aplicação da carga e interpretação dos resultados. O ensaio de resistência à compressão simples deve ser realizado em amostras cilíndricas de solo coesivo, compactadas em condições controladas, submetidas a carga axial até a ruptura. O valor da resistência é obtido pela razão entre a carga última ou máxima aplicada no momento da ruptura do corpo de prova e a área da seção transversal. Além disso, as normas DNIT 143/-ES (DNIT, 2022) e DNIT 140-ES (DNIT, 2022) estabelecem diretrizes para uso de materiais estabilizados com cimento e valores mínimos de RCS para uso como base e sub-base.

2.8 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

O ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou, como originalmente chamado *California Bearing Ratio* (CBR), é um dos métodos mais tradicionais e amplamente empregados na engenharia rodoviária para a avaliação da capacidade de suporte dos solos utilizados em subleitos, sub-bases e bases de pavimentos. Seu princípio é empírico e consiste em comparar a resistência à penetração de um pistão padronizado em uma amostra de solo compactado com a resistência de um material-padrão britado (geralmente brita triturada). Essa relação é expressa em porcentagem, sendo o valor de ISC um indicador direto da resistência do solo ao cisalhamento sob cargas repetidas, fundamental para o dimensionamento estrutural de pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O ensaio foi desenvolvido na Califórnia, na década de 1920, pelo California Division of Highways, com a finalidade de se avaliar o potencial de ruptura do subleito, que, de acordo com Porter (1950 *apud* Bernucci *et al.*, 2022), era um defeito frequente nas rodovias do estado da Califórnia naquela época. O ensaio foi concebido para avaliar, por meio de ensaio penetrométrico, a resistência dos materiais submetidos a esforços e deslocamentos significativos, com o objetivo de estabelecer um critério de comparação entre diferentes solos empregados na construção de rodovias norte-americanas (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Sua adoção internacional ocorreu nas décadas seguintes, consolidando-se como método-padrão devido à sua simplicidade e boa correlação com o desempenho real de pavimentos. No Brasil, de acordo com Bernucci *et al.* (2022), o ensaio CBR foi introduzido em 1942, durante a Segunda Guerra Mundial, quando engenheiros brasileiros tiveram contato com técnicos norte-americanos que o utilizavam na construção de pistas de aeroportos e estradas militares.

Desde então, o método passou a ser amplamente empregado em projetos de pavimentação, tornando-se base para o desenvolvimento de diversas normas e manuais técnicos, como o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) e as Especificações de Serviço e Métodos de Ensaio DNIT-ME 172 (DNIT, 2016) e NBR 9895 (ABNT, 2016).

A resistência obtida no ensaio do ISC combina, indiretamente, a coesão com o ângulo de atrito do material granular analisado. O ensaio permite ainda determinar o potencial de expansão do solo após imersão em água, o que é crucial para prever variações volumétricas em condições de saturação, comuns em estradas rurais e pavimentos sem impermeabilização (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O resultado do ensaio é fundamental para a classificação e seleção de solos utilizados em camadas estruturais, sendo diretamente empregado em métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos, como o método do DNER (1981 *apud* DNIT, 2006) e sua atualização pelo DNIT (2006).

O ISC fornece uma base empírica de correlação entre o tipo de solo e a espessura das camadas do pavimento, possibilitando estimar o comportamento mecânico sob tráfego. Solos com ISC inferior a 2% são geralmente inadequados para uso estrutural, enquanto valores acima de 20% indicam materiais com boa resistência e baixa deformabilidade, apropriados para camadas de base (DNIT, 2006).

Em ambientes tropicais, a variabilidade de solos lateríticos e saprolíticos requer atenção especial, pois sua resposta ao ensaio pode diferir dos solos temperados que originaram o método. Por essa razão, diversas pesquisas nacionais como a de Nogami e Villibor (1995) e de Ferri (2018) e o próprio Manual de Pavimentação do DNIT (2006) recomendam o uso de CBR corrigido ou complementado por ensaios mecânicos mais representativos, como o módulo de resiliência (MR).

2.9 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

O módulo de resiliência (MR) é um parâmetro fundamental utilizado na caracterização mecânica de solos e materiais granulares, para seu uso em pavimentação em camadas de base/sub-base de estradas, definindo a rigidez elástica recuperável de solos ou materiais granulares submetidos a carregamento repetido. Em resumo, o módulo de resiliência consiste na razão entre a tensão cíclica aplicada e a deformação elástica residual após descarga, ou seja, uma medida da capacidade elástica do material de suportar cargas repetidas sem deformações permanentes excessivas. A sua importância no projeto de pavimentos está no fato de que

materiais com maior módulo de resiliência tendem a apresentar menores deformações permanentes e melhor desempenho estrutural sob esforços de tráfego repetido, contribuindo para maior vida útil da via (LIU *et al.*, 2019).

Na aplicação prática, o MR é utilizado como um dos principais parâmetros de entrada em métodos mecanicista-empíricos de dimensionamento de pavimentos, como o novo método brasileiro MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). Esse método representa uma evolução em relação aos métodos puramente empíricos utilizados anteriormente, ao permitir a modelagem das tensões, deformações e danos acumulados ao longo da vida útil do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2022). Além disso, o MeDiNa adota valores de MR obtidos em condições laboratoriais representativas e reconhece esse parâmetro como variável essencial na previsão de desempenho estrutural (DNIT, 2018).

Sob a ótica mecanicista, o MR é diretamente associado à previsão de tensões e deformações resilientes em softwares de cálculo estrutural como o MeDiNa, permitindo estimar critérios de desempenho como deformação permanente (afundamento de trilha de roda), fadiga das camadas tratadas e nível de dano acumulado ao longo do ciclo de carregamento (BALBO, 2007). Além disso, o MeDiNa foi desenvolvido com base em premissas mecanicistas modernas, onde o MR é a principal variável de entrada para simulação estrutural, sendo utilizado para calibração de modelos de deterioração e previsão de vida útil do pavimento (FRANCO; MOTTA, 2018).

De acordo com Pezo *et al.* (1993), a interpretação desse parâmetro ultrapassa a simples comparação numérica, pois o MR condiciona a distribuição de tensões entre as camadas do pavimento e define, mecanicamente, se um material pode desempenhar função estrutural como subleito, sub-base ou base, bem como comparar quantitativamente os ganhos obtidos por estabilização química, mecânica ou enzimática.

Dessa forma, o MR trata-se de um parâmetro amplamente utilizado em métodos de dimensionamento mecanicista-empíricos, pois permite estimar o comportamento elástico dos materiais sob o tráfego repetido, sendo mais representativo quando comparado a ensaios estáticos como o tradicional CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia). O módulo de resiliência reflete a capacidade do solo de retornar à sua forma original após cada ciclo de carregamento, sendo um indicador direto da durabilidade e da resistência à deformação permanente de uma estrutura de pavimento (MEDINA; MOTTA, 2015).

Com o objetivo de descrever o comportamento resiliente dos solos, diversos modelos empíricos foram propostos ao longo das décadas, cuja evolução segue um percurso cronológico que reflete o crescente entendimento do comportamento dos solos sob tensões repetidas, desde

modelos simplificados até expressões mais completas que consideram múltiplas variáveis de tensão.

Os primeiros estudos sobre o comportamento resiliente de solos, realizados por Seed *et al.* (1962), indicavam que o módulo de resiliência estava fortemente relacionado à tensão desvio cíclica (σ_d), levando ao desenvolvimento dos primeiros modelos empíricos, que sugeriam que o módulo de resiliência (MR) tendia a reduzir com o aumento da tensão desvio aplicada, na forma:

$$M_R = k_1 \cdot (\sigma_d)^{k_2} \quad (1)$$

Esse modelo foi inicialmente aplicado em estudos de comportamento de solos finos e argilosos, nos quais a variação da tensão confinante era pouco significativa. No entanto, Seed *et al.* (1962) observaram que, em materiais granulares, a tensão confinante (σ_3) tinha papel mais relevante, propondo o modelo na forma:

$$M_R = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2} \quad (2)$$

No entanto, esse segundo modelo, descrito pela equação (2), ainda se mostrou limitado por não considerar o efeito conjunto das tensões de confinamento (σ_3) e desvio (σ_d) cíclicas, não representando de forma eficaz o comportamento resiliente da maioria dos solos. Foi então que Seed *et al.* (1962) também introduziu o conceito de tensão média total (θ), resultando no modelo σ - θ e propondo que o módulo de resiliência (MR) de materiais granulares dependia da soma das tensões principais.

$$M_R = k_1 \cdot (\theta)^{k_2} \quad (3)$$

onde:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \text{soma das tensões principais}$$

Mais tarde, quase 10 anos depois, Hicks e Monismith (1971) retomaram o modelo de Seed *et al.* e refinaram a formulação, mantendo a estrutura geral σ - θ , porém substituindo θ por sua definição explícita $\theta = 3\sigma_3 + \sigma_d$, ficando então a equação na forma expandida:

$$M_R = k_1 \cdot (3 \cdot \sigma_3 + \sigma_d)^{k_2} \quad (4)$$

Além disso, Hicks e Monismith (1971) utilizaram uma base experimental mais ampla, relacionando o MR não apenas com θ , mas também com condições de compactação e umidade. A reformulação por eles proposta melhorou a interpretação física do modelo, mostrando que o

MR depende primariamente da tensão de confinamento média (σ_3), mas que o efeito da carga aplicada (σ_d) também tem influência indireta.

Posteriormente, Uzan (1985) propôs um modelo que incorpora duas variáveis de tensão independentes, a tensão média (θ) e a tensão desvio (σ_d), associadas a uma nova variável, a pressão atmosférica padrão ou de referência (p_a), cujo valor é aproximadamente 100 kPa, de forma a adimensionar os parâmetros do modelo:

$$M_R = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{k_3} \quad (5)$$

De acordo com Uzan (1985), esse modelo permite descrever com mais precisão o comportamento resiliente de solos e materiais submetidos a diferentes condições de carregamento, sendo capaz de abranger desde solos finos até materiais granulares.

Baseando-se no modelo proposto por Uzan, Pezo *et al.* (1992) desenvolveram um modelo derivado, ajustando-o a condições típicas de ensaios realizados em laboratórios norte-americanos. Pezo *et al.* (1992) substituíram a tensão média (θ) pela tensão confinante efetiva (σ_3), argumentando que, para solos finos e materiais tratados, essa variável representa melhor o confinamento efetivo do solo, ficando a equação na forma:

$$M_R = k_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{k_3} \quad (6)$$

Esse modelo passou a ser amplamente aplicado em programas de dimensionamento mecanístico-empíricos, como o AASHTO 2002, MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) e o MeDiNa, no Brasil. Com isso, sua formulação passou a ser considerada a base para o dimensionamento de pavimentos segundo as normas americanas e também adotada, com adaptações, em metodologias brasileiras, como a do DNIT 172/2016 – ME, que segue a mesma lógica de análise do comportamento resiliente de materiais granulares. Além de ser indicados por órgãos oficiais como o DNIT, no contexto brasileiro, o modelo Pezo *et al.* (1992) é amplamente empregados em pesquisas e práticas de engenharia rodoviária, amplamente citados em trabalhos acadêmicos recentes como o de Pinto (2006) e Balbo (2007).

Em seguida, Macêdo (1996) propôs uma simplificação do então modelo de Pezo *et al.* (1992), retirando a variável da pressão atmosférica de normalização (p_a) da equação. Ao estudar o comportamento do módulo de resiliência em solos brasileiros, Macêdo observou que os valores de tensão aplicados em ensaios triaxiais eram relativamente pequenos e de mesma ordem de grandeza para diferentes materiais estudados (em kPa). Além disso, a variação dimensional causada pela divisão por p_a ($\approx 100,0$ kPa) não afetava significativamente o ajuste

empírico, mas complicava a calibração dos coeficientes k_1 , k_2 , e k_3 , além de dificultar a aplicação prática em laboratórios nacionais (onde se usa diretamente kPa ou MPa). Dessa forma, esse novo modelo também passou a ser amplamente usado em estudos e pesquisas de pavimentação rodoviária no Brasil devido ao fato de seu ajuste de coeficientes k_1 , k_2 , e k_3 tornar-se mais prático. O modelo de Macêdo (1996), também conhecido como Modelo Composto de Macedo é descrito como:

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (7)$$

No contexto brasileiro, o desenvolvimento do Modelo Composto para previsão do MR permitiu ajustar o comportamento não linear dos solos tropicais frente a carregamentos repetidos, tornando o parâmetro mais aderente às características dos materiais nacionais e aplicável ao dimensionamento mecanicista-empírico (MACÊDO, 1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consistiu no estudo laboratorial da estabilização química de um solo a partir da adição do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² em amostras de solo da zona rural do município de Guaratinguetá (SP), cujos parâmetros foram estudados e determinados por Pereira (2022), de forma a se analisar a influência da adição do produto e da variação do seu teor nos seguintes parâmetros do solo:

- Umidade ótima ($w_{ótima}$);
- Massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$);
- Resistência à compressão Simples (RCS);
- Índice de Suporte Califórnia (ISC) e
- Módulo de Resiliência (MR).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

De acordo com os estudos realizados por Pereira (2022), o solo a ser estudado se classifica como uma argila arenosa, de acordo com a classificação ABNT, de baixa plasticidade e granulometria contínua. Além disso, aspectos pedológicos na região classificam o solo como latossolo amarelo, observado pela classificação tátil visual, o qual apresenta uma coloração amarela alaranjada. Com relação ao Sistema Universal de classificação de Solos (SUCS),

determinada a partir dos limites de consistência do solo, o solo se classifica como ML – Silte de baixa plasticidade. Ainda, segundo Pereira (2022), essa diferença verificada pelos dois métodos de classificação pode ser justificada pelo limite de liquidez, o qual tangencia os limites entre ML e CL, na carta de plasticidade de Casagrande.

A seguir, são apresentados na tabela 1 as principais propriedades e índices do solo a ser utilizado no estudo.

Tabela 1 – Caracterização geotécnica do solo a ser utilizado.

PROPRIEDADE	UNIDADE	VALOR
Densidade Relativa dos Grãos	g/cm ³	2,744
Massa Específica Seca	g/cm ³	1,35
Índice de Vazios	-	1,03
Porosidade	%	50,81
Limite de Liquidez	%	50,08
Limite de Plasticidade	%	33,19
Índice de Plasticidade	%	16,89
Classificação USCS	-	ML
Classificação ABNT	-	Argila Arenosa
Índice de Atividade Coloidal	-	0,3 (Baixa atividade)
Teor de Matéria Orgânica	%	0,72

Fonte: Pereira (2022).

3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

Para os ensaios realizados, foram separadas e preparadas amostras do solo analisado (figura 9), conforme as diretrizes da NBR 6457 (ABNT, 2016), e posteriormente pesadas de acordo com o que era solicitado para cada ensaio.

Para cada um dos ensaios realizados, foram moldados corpos de prova com solo natural e misturas de solo tratado com estabilizante a base de enzimas do tipo EMC² em três dosagens diferentes (litros de estabilizante/m³ de solo): 1/30 (indicada pelo fornecedor), 1/15 e 1/8 (o dobro e o triplo do recomendado pelo fornecedor, respectivamente). O volume da solução concentrada foi medido com o auxílio de uma pipeta com precisão de 0,01 ml, de modo que,

para cada 1000 cm³ de solo, foram adicionados 0,03 ml, 0,07 ml e 0,13 ml para as dosagens 1/30, 1/15 e 1/8, respectivamente, e para cada 2000 cm³ de solo, foram adicionados 0,07 ml, 0,13 ml e 0,25 ml para as dosagens 1/30, 1/15 e 1/8, respectivamente (figura 10).

Figura 9 – Amostra de solo preparadas conforme NBR 6457/2016.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 10 – Pipeta com precisão de 0,01 ml usada para medir o volume de solução enzimática.



Fonte: Acervo do autor (2025).

3.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação seguiu as recomendações e procedimentos da NBR 7182 (ABNT, 2016), para a energia Proctor Normal, no cilindro de 10 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura (pequeno), em 3 camadas com 26 golpes de soquete pequeno para cada camada, para se determinar a massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) e a umidade ótima ($w_{ótima}$) do solo estudado, e a influência da adição do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² nesses parâmetros.

Para amostras de solo natural e amostras de misturas de solo tratado com solução enzimática nas dosagens (litros de estabilizante/m³ de solo) 1/30, 1/15 e 1/8, foram moldados de 5 a 6 corpos de prova, com diferentes teores de umidade, pensando-os em balança com precisão de 0,1 kg, anotando as respectivas massas observadas e separando-se em capsulas amostras de solo utilizado para moldar cada corpo de prova, levando-as à estufa por 24 horas (figura 11), pesando sua massa antes e após irem a estufa, a fim de se determinar a massa específica seca (ρ_d) e o teor de umidade (w) para cada corpo de prova. A partir desses valores, obteve-se pares de coordenadas para então se construir a curva de compactação $\rho_d \times w$, sendo $w_{ótima}$ dada pelo ponto na curva onde ρ_d é máximo - $\rho_{d,máx}$.

Figura 11 – Cápsulas com amostras de solo com diferentes teores de umidade, levadas à estufa por 24h.



Fonte: Acervo do autor (2025).

3.4 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Seguindo os procedimentos da NBR 12770 (ABNT, 2022), foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão simples (RCS), em amostras de solo natural e amostras de solo tratado com solução enzimática nas dosagens (litros de estabilizante/m³ de solo) 1/30, 1/15 e 1/8 em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias, sendo moldados dois corpos de prova para cada uma das dosagens e para cada tempo de cura estudados, nos respectivos teores de umidade ótima ($w_{ótima}$), determinados nos ensaios de compactação, descritos no item 3.3.

Foram moldados corpos de prova em formatos de cilindro de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, extraídos de corpos de prova moldados na energia Proctor Normal no cilindro de

10,00 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura (pequeno), em 3 camadas com 26 golpes de soquete pequeno para cada camada (figuras 12 e 13). Após os tempos de cura determinados, os corpos de prova foram submetidos à aplicação de carga no sentido axial em prensa hidráulica em uma velocidade de ruptura de 1mm/min (figura 14). O valor de RCS referente a cada dosagem e tempo de cura analisados foi obtido pela média dos valores de tensão de ruptura dos dois corpos de prova após cada ensaio, sendo a RCS para cada corpo de prova a razão entre a carga aplicada no momento da ruptura (F) e a área da seção transversal do corpo de prova (A_s), como descrito nas equações (8) e (9).

$$RCS_i = \frac{F_i}{A_{s_i}} \quad (8)$$

$$RCS = \frac{\sum RCS_i}{2} \quad (9)$$

Figura 12 – Corpo de prova moldado para o ensaio de determinação da RCS.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 13 – Corpo de prova rompido após o ensaio para obtenção da RCS.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 14 – Ensaio de aplicação de carga axial não confinada para obtenção da RCS.



Fonte: Acervo do autor (2025).

3.5 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

Seguindo os procedimentos da NBR 9895 (ABNT, 2016), foram realizados ensaios para a determinação do índice de suporte Califórnia (ISC), em amostras de solo natural e amostras de solo tratado com solução enzimática nas dosagens (litros de estabilizante/m³ de solo) 1/30, 1/15 e 1/8 em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.

Foram moldados corpos de prova no teor de umidade ótima ($w_{ótima}$), determinado nos ensaios de compactação, descritos no item 3.3, na energia Proctor Normal no cilindro de 15,08 cm de diâmetro por 17,78 cm de altura (grande) com disco espaçador de altura 63,5 mm, em 5 camadas com 12 golpes de soquete grande para cada camada (figura 15).

Figura 15 – Corpos de prova moldados para o ensaio de penetração para determinação do ISC.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Cada corpo de prova foi então imerso em água por um período de 4 dias, fazendo-se a leitura inicial e final do extensômetro, de forma a avaliar a expansão do solo (figura 16). Após esse período, foi realizada a penetração a uma velocidade constante de 1,27 mm/min (figura 17), anotando-se as cargas aplicadas para diferentes profundidades de penetração padronizadas pela NBR 9895 (ABNT, 2016), apresentadas na tabela 2.

Figura 16 – Corpos de prova imersos em água por 4 dias com relógio medidor de deslocamento.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Figura 17 – Ensaio para obtenção do ISC.



Fonte: Cava (2021).

Tabela 2 – Valores de penetração padrão do ensaio para determinação do ISC.

TEMPO (min)	PENETRAÇÃO (mm)		PRESSÃO PADRÃO (kgf)	LEITURA DO ANEL (mm)	CARGA CALCULADA (kgf)	ISC (%)
	mm	pol				
0,5	0,63	0,025	-			
1,0	1,27	0,050	-			
1,5	1,90	0,075	-			
2,0	2,54	0,100	1350			
2,5	3,17	0,125	-			
3,0	3,81	0,150	-			
3,5	4,44	0,175	-			
4,0	5,08	0,200	2050			
5,0	6,35	0,250	-			
6,0	7,62	0,300	-			
7,0	8,89	0,350	-			
8,0	10,16	0,400	-			
9,0	11,43	0,450	-			
10,0	12,70	0,500	-			

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado da NBR 9895 (ABNT, 2016) e da norma DNIT 172/2016.

A partir dos valores de pressão correspondentes as penetrações padrões apresentadas na tabela 2, construiu-se a curva de força (F) x penetração para cada corpo de prova. A partir dos valores de cargas aplicados para penetração de 2,54 mm e 5,08 mm, calculou-se o ISC para essas penetrações, conforme as equações (10) e (11).

$$ISC_{0,1''} = \frac{F_{0,1''}}{1350} \times 100 \quad (10)$$

$$ISC_{0,2''} = \frac{F_{0,2''}}{2050} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

$F_{0,1''}$ = carga correspondente à penetração de 0,1'' (2,54 mm) em kgf;

$F_{0,2''}$ = carga correspondente à penetração de 0,2'' (5,08 mm) em kgf;

1350 = carga padrão do material de referência à penetração de 0,1'' (2,54 mm) em kgf;

2050 = carga padrão do material de referência à penetração de 0,2'' (5,08 mm) em kgf;

Por fim, o maior dentre os dois valores calculados corresponde ao ISC do corpo de prova ensaiado.

3.6 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

3.6.1 Método de ensaio

Seguindo os procedimentos da norma DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018), foram realizados ensaios para a determinação do módulo de resiliência (MR), em amostras de solo natural e amostras de misturas de solo tratado com solução enzimática nas dosagens (litros de estabilizante/m³ de solo) 1/30, 1/15 e 1/8 em tempos de cura de 0 e 7 dias. Diferente dos ensaios para determinação da RCS e ISC, descritos anteriormente nos itens 3.4 e 3.5, respectivamente, para os ensaios de determinação do MR sua realização foi possível apenas para os dois tempos de cura iniciais de 0 e 7 dias devido ao fato do ensaio ser realizado em um laboratório externo à Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, com disponibilidade de uso de apenas um dia para a realização do ensaio em sete corpos de prova. Além disso, usualmente no campo períodos maiores que 7 a 14 dias de cura são pouco utilizados, mesmo que a análise em 28 dias seja importante para o entendimento da evolução dos mecanismos de cura do solo tratado com a solução enzimática no decorrer do tempo.

Foram moldados corpos de prova nos teores de umidade ótima ($w_{ótima}$), determinados nos ensaios de compactação descritos no item 3.3, na energia Proctor Normal no cilindro de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, em 10 camadas, com 12 golpes de soquete de 2,5 kg e altura de queda de 30,5 cm para cada camada (figura 18).

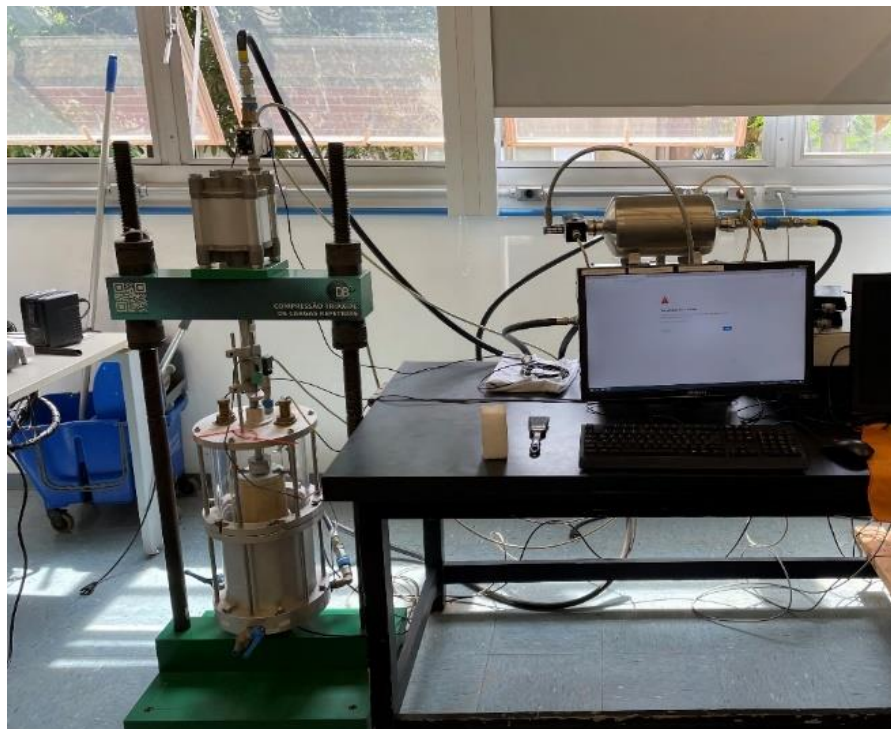
Figura 18 – Corpos de prova moldados para o ensaio triaxial dinâmico de carga repetida para determinação do MR.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Em seguida, cada corpo de prova foi envolvido por uma membrana de borracha, montado entre as placas de carga superior e inferior, e colocado dentro da célula triaxial, onde foram submetidos ao ensaio triaxial dinâmico de carga repetida (figura 19), com a aplicação de pares de tensões: tensões axiais dinâmicas repetidas (σ_1), com frequência de 1 Hz (0,1 s para carregamento e 0,9 s de descarregamento) e tensão confinante (σ_3) padronizados pela norma DNIT 134-ME (DNIT, 2018), conforme descrito na tabela 3.

Figura 19 – Ensaio triaxial dinâmico de cargas repetidas para determinação do MR.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Tabela 3 – Valores de tensões padrão do ensaio para a determinação do MR.

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_1/σ_3
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: Elaboração própria, adaptado da tabela da norma DNIT 134-ME (DNIT, 2018).

Para cada par de tensões (σ_1 , σ_3) é calculado a tensão desvio (σ_d), que é dada pela diferença entre a tensão axial aplicada (σ_1) e a tensão confinante (σ_3), e a deformação específica recuperável ou resiliente (ε_r), que é dada pela razão entre o deslocamento recuperável ou resiliente (δ_r), em mm, e a altura de referência do medidor de deslocamento – LVDT – (H_0), em mm, conforme as equações (12) e (13).

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (12)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{H_0} \quad (13)$$

Por fim, para cada par de tensões (σ_3 , σ_d) é calculado o (MR), dado pela razão entre σ_d e ε_r , conforme a equação (14).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (14)$$

Para possibilitar uma análise comparativa entre o solo natural e as misturas de solo tratado com solução estabilizadora a base de enzimas nas dosagens e tempos de cura estudados,

calculou-se o valor médio do MR para cada corpo de prova ensaiado – $MR_{\text{médio}}$. Posteriormente, determinou-se um par de tensões padrão conveniente a ser aplicado na equação de ajuste dos dados obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida, explicado no item a seguir.

3.6.2 Modelos de comportamento do Módulo de Resiliência (MR)

Com a finalidade de se representar o comportamento de cada uma das misturas e tempos de cura estudados sob diferentes condições de confinamento e carga, ajustou-se os resultados do módulo de resiliência (MR), obtidos através do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida, a modelos empíricos, de modo a estimar o valor de MR a partir das tensões atuantes.

Dentre os diversos modelos empíricos propostos para o ajuste matemático dos dados obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida para a determinação do MR, o presente trabalho buscou fazer essa análise sob três dos diferentes modelos descritos anteriormente no item 2.9, apresentados resumidamente na tabela 4.

Tabela 4 – Modelos empíricos para ajuste dos dados do MR a serem analisados.

MODELO	EQUAÇÃO		VARIÁVEIS	PARÂMETROS
Modelo de Seed et al. (1962)	$MR = k_1 \cdot (\sigma_d)^{k_2}$	(1)	σ_d	k_1, k_2
Modelo de Seed et al. (1962)	$MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2}$	(2)	σ_3	k_1, k_2
Modelo Composto de Macêdo (1996)	$MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2} \cdot (\sigma_d)^{k_3}$	(7)	σ_3, σ_d	k_1, k_2 e k_3

Fonte: Autor (2025).

Os parâmetros empíricos k_1 , k_2 e k_3 foram determinados por meio de Regressão Linear Múltipla, a partir da linearização de cada equação com uso de transformação logarítmica, aplicando o logaritmo natural ($\ln$) nas equações (1), (2) e (7), apresentadas na tabela 4, ficando as equações linearizadas conforme a tabela 5.

Tabela 5 – Linearização dos modelos empíricos para ajuste dos dados do MR.

MODELO	FORMA LINEARIZADA: $Y = A + BX_1 + CX_2$						EQUAÇÃO LINEARIZADA
	A	B	C	Y	X ₁	X ₂	
Modelo de Seed <i>et al.</i> $MR = k_1 \cdot (\sigma_d)^{k_2}$ (1962)	$\ln(k_1)$	k_2	-	$\ln(MR)$	$\ln(\sigma_d)$	-	$\ln(MR) = \ln(k_1) + k_2 \ln(\sigma_d)$
Modelo de Seed <i>et al.</i> $MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2}$ (1962)	$\ln(k_1)$	k_2	-	$\ln(MR)$	$\ln(\sigma_3)$	-	$\ln(MR) = \ln(k_1) + k_2 \ln(\sigma_3)$
Modelo Composto de Macedo $MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2} \cdot (\sigma_d)^{k_3}$ (1996)	$\ln(k_1)$	k_2	k_3	$\ln(MR)$	$\ln(\sigma_3)$	$\ln(\sigma_d)$	$\ln(MR) = \ln(k_1) + k_2 \ln(\sigma_3) + k_3 \ln(\sigma_d)$

Fonte: Autor (2025).

Com o auxílio do software Excel, calculou-se os valores de $\ln(MR)$, $\ln(\sigma_3)$ e $\ln(\sigma_d)$, encontrados para cada corpo de prova, a partir dos quais, utilizando-se a ferramenta de análise de dados do mesmo software, realizou-se o ajuste dos dados a partir de Regressão Linear Múltipla, determinando-se os valores de A , B e C (quando presente) da equação linear $Y = A + BX_1 + CX_2$ e o coeficiente de determinação R^2 . Os valores dos parâmetros empíricos de ajuste (k_1 , k_2 e k_3) são dados por:

$$k_1 = e^A \quad (15)$$

$$k_2 = B \quad (16)$$

$$k_3 = C \quad (17)$$

A partir do ajuste dos parâmetros do modelo composto de Macêdo para cada mistura e tempo de cura estudados, valores de tensões foram substituídos na equação a fim de se comparar a variação dos valores de MR do solo natural com as misturas de solo tratado com a solução enzimática nas dosagens e tempos de cura estudados.

Nem a norma brasileira DNIT 134/2018 – ME (DNIT, 2018), nem o Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2000) e nem normas internacionais como a AASHTO 2002 e ASTM D4683 definem pares fixos de tensões de σ_3 e σ_d a serem utilizados, apenas recomendando que o ensaio triaxial cíclico seja realizado com uma faixa representativa das

tensões reais de serviço, cobrindo condições de baixa, média e alta tensão para permitir ajuste de modelos como Pezo *et al.* (1992) e Macêdo (1996).

Para a análise comparativa entre o solo natural e o solo estabilizado com a solução enzimática EMC² nas dosagens e tempos de cura estudados, optou-se pelo uso de um par de tensões representativo ($\sigma_3 = 30$ kPa; $\sigma_d = 75$ kPa), correspondente às condições médias de confinamento e solicitação em estradas rurais de baixo volume de tráfego. Apesar de este par de tensões não ser fixado por norma, ele está dentro de faixas adotadas na literatura de Uzan (1985), Pezo *et al.* (1992) e Franco e Motta (2018) como condição prática de serviço para camadas superficiais de solo compactado em pesquisas. Assim, essa escolha permite simular de forma realista a o comportamento do MR do solo funcionando como camada de rolamento, representando o estado de tensões mais comumente encontrado em campo para solos em estradas rurais não pavimentadas, submetidos a eixos leves e baixo volume de tráfego.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 UMIDADE ÓTIMA E MASSA ESPECÍFICA SECA APARENTE MÁXIMA

De acordo com os valores apresentados na tabela 6, pode-se observar que, com a adição do estabilizante a base de enzimas do tipo EMC², há um ligeiro aumento da massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$), cujo valor de 1,40 g/cm³ encontrado para o solo natural passa a ficar entre 1,43 g/cm³ e 1,47 g/cm³, nas dosagens 1/30 e 1/15 e 1/8, respectivamente. Além disso, pode-se observar uma ligeira redução no teor de umidade ótima ($w_{ótima}$), em que o valor de 28% encontrado para o solo natural passa a ficar entre 25% e 27% nas dosagens 1/8 e 1/15, respectivamente.

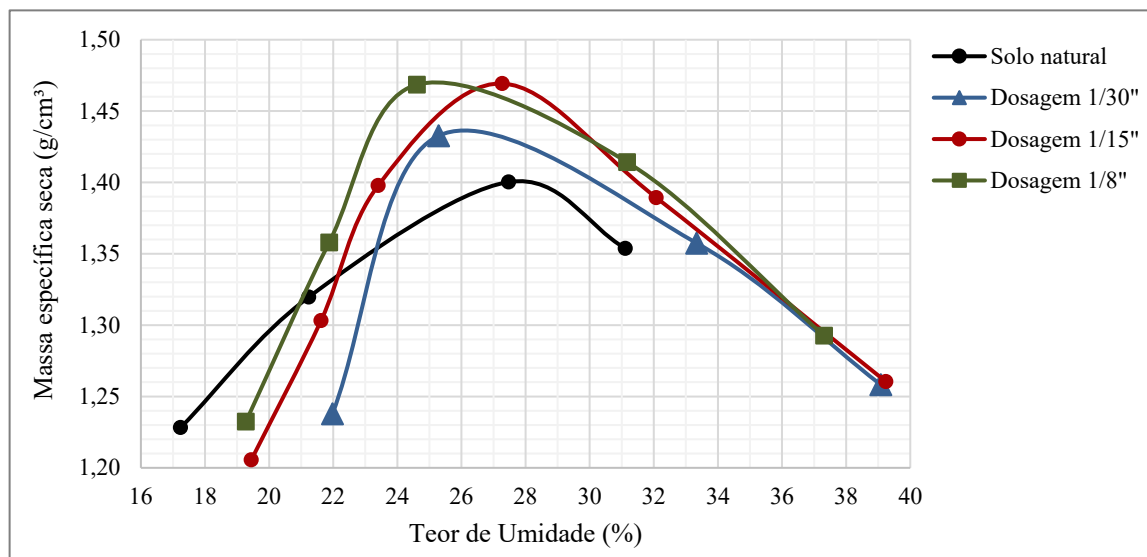
Tabela 6 – Teores de umidade ótima ($w_{ótima}$) e peso específico seco máximo ($\rho_{dmáx}$) do solo natural e das misturas de solo tratado com solução enzimática nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.

CONCENTRAÇÃO EMC2 NO SOLO (litros solução enzimática/m ³ de solo)	$\rho_{d,máx}$ (g/cm ³)	$w_{ótima}$ (%)
Solo natural	1,40	28,0
Dosagem 1/30	1,43	26,0
Dosagem 1/15	1,47	27,0
Dosagem 1/8	1,47	25,0

Fonte: Autor (2025).

Na figura 20, pode-se observar um deslocamento do ponto de inflexão das curvas de compactação para a esquerda no eixo das abscissas – teor de umidade (w) – e para cima no eixo das ordenadas – massa específica seca (ρ_d) – com a adição do estabilizante a base de enzimas do tipo EMC². No entanto, ao se analisar os resultados encontrados para as dosagens 1/30 e 1/8, em que o aumento da concentração da solução enzimática acarretou uma diminuição na $w_{ótima}$, poderia se esperar que o valor encontrado para $w_{ótima}$ e o ponto de inflexão da curva de compactação para a dosagem intermediária 1/15 ficasse entre os valores de 25% e 26% encontrados para as dosagens inferior e superior a ela, o que não ocorreu, ficando sua $w_{ótima}$ acima desses dois valores, em 27%.

Figura 20 – Curvas de Compactação ($\rho_d \times w$) para o solo natural e para as misturas de solo tratado com estabilizante à base de enzimas nas três dosagens estudadas.



Fonte: Autor (2025).

Outro ponto a se observar é o aumento de $\rho_{d,máx}$, em que o aumento do seu valor se deu com o aumento da concentração da solução enzimática, porém não subindo mais seu valor da dosagem 1/15 para a dosagem 1/8, se mantendo em 1,47 g/cm³. Tal fato pode estar relacionado a dois possíveis fatores: (1) O aumento do valor de $\rho_{d,máx}$ com o aumento da concentração da solução enzimática se dá até atingir um valor máximo, a partir do qual o aumento da concentração não exerce mais influência em seu valor; ou (2) problemas na compactação da dosagem 1/8, em que poderiam ser obtidos maiores valores $\rho_{d,máx}$, para o mesmo teor de umidade ou teores diferentes.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

De acordo com os valores apresentados na tabela 7, pode-se observar que a adição do estabilizante a base de enzimas do tipo EMC² promove um aumento na resistência à compressão simples (RCS) do solo, cujo valor sobe com o aumento da concentração da solução enzimática e com o decorrer do tempo de cura. Imediatamente, no dia da mistura, aos 0 dias de cura, o rompimento dos corpos de prova moldados nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8 atingiram um valor de RCS média de 14,1 kPa, 15,9 kPa e 24,5 kPa, respectivamente, superando o valor inicial de RCS média encontrada para o solo natural de 6,8 kPa. Aos 28 dias de cura, foi encontrado o maior valor de RCS média de 42,7 kPa para os corpos de prova moldados na dosagem 1/8.

Tabela 7 – Valores de RCS para o solo natural e para as misturas de solo tratado com solução enzimática EMC² nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8, em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.

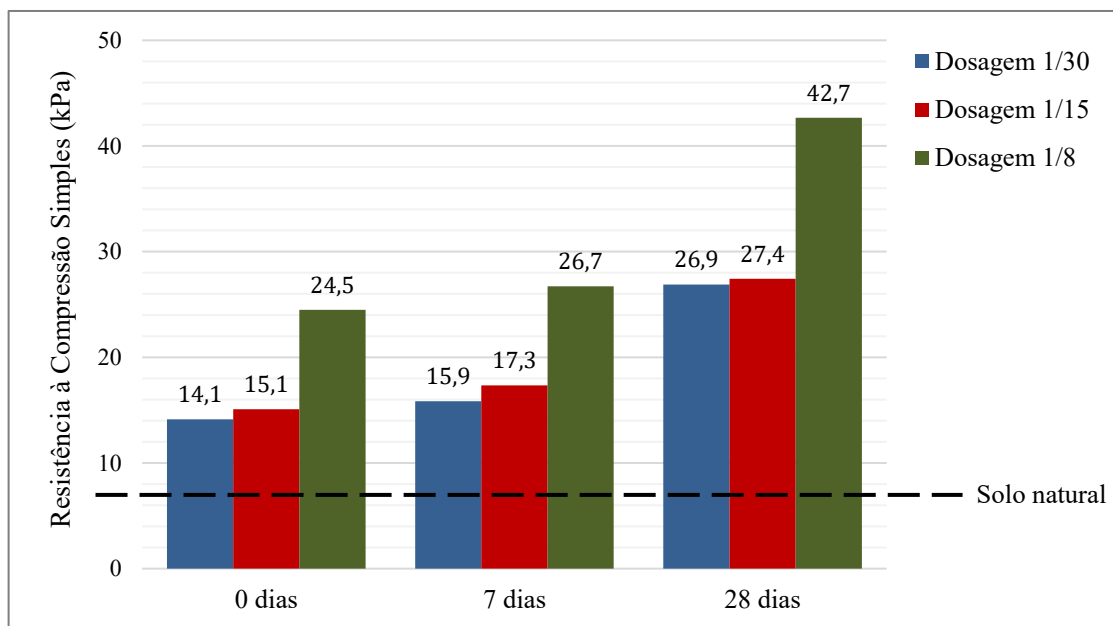
DOSAGEM DE EMC ² NO SOLO (litros solução enzimática/m ³ de solo)	TEMPO DE CURA (dias)	RCS CP1 (kPa)	RCS CP2 (kPa)	RCS média (kPa)	AUMENTO % EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL	RAZÃO DE GANHO EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL
Solo Natural	-	6,4	7,2	6,8	-	-
Dosagem 1/30	0	14,3	14,0	14,1	108%	2,1
	7	15,6	16,1	15,9	133%	2,3
	28	25,8	28,0	26,9	295%	4,0
Dosagem 1/15	0	13,6	16,6	15,1	122%	2,2
	7	16,7	18,0	17,3	155%	2,5
	28	25,0	29,8	27,4	303%	4,0
Dosagem 1/8	0	20,5	28,5	24,5	260%	3,6
	7	25,9	27,6	26,7	293%	3,9
	28	40,7	44,6	42,7	527%	6,3

Fonte: Autor (2025).

Para cada uma das dosagens foi observado um comportamento diferente na razão de aumento da RCS, conforme pode ser observado na tabela 7 e nas figuras 21 e 22. No dia da mistura, os corpos de prova ensaiados sem tempo de cura (aos 0 dias) na dosagem 1/8 apresentaram um aumento mais significativo na RCS, na ordem de 260%, em relação aos

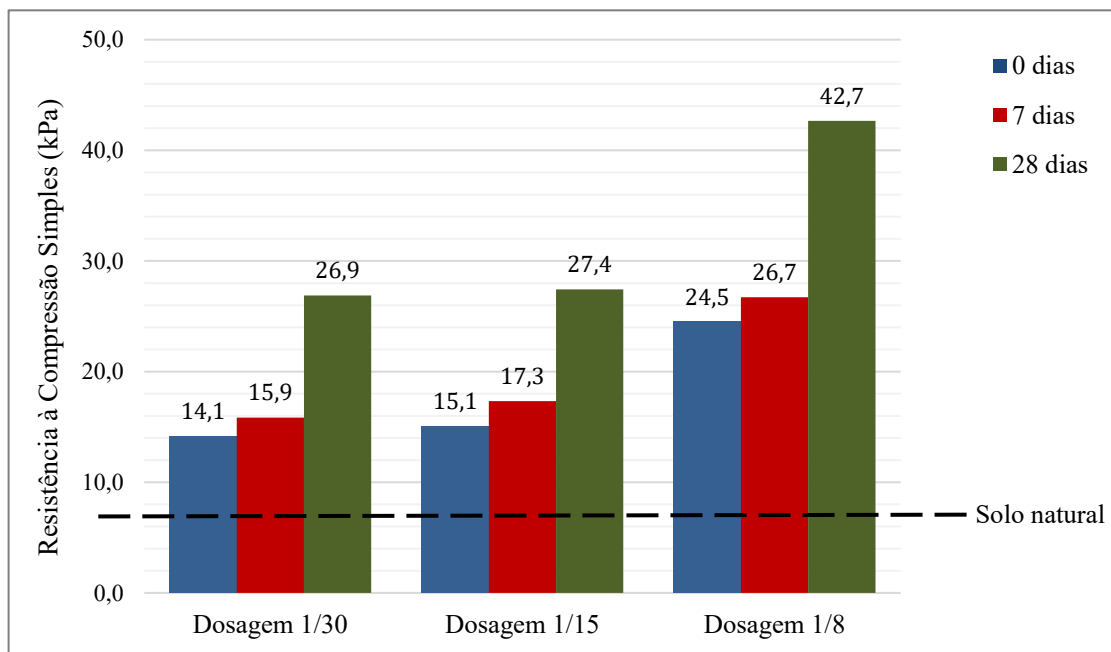
valores encontrados de RCS para as dosagens 1/30 e 1/15, cujos aumentos foram na ordem de 108% e 122%, respectivamente. Passando para os 7 dias de cura, o maior aumento observado em relação ao tempo de cura anterior (0 dias) foi observado na dosagem 1/15, na ordem de 15%, diferente da menor taxa de aumento encontrada para essa mesma dosagem anteriormente, e as dosagens 1/30 e 1/8 obtiveram um aumento na ordem de 12% e 9%, respectivamente, em relação ao tempo de cura anterior (0 dias). Por fim, aos 28 dias, a maior taxa de aumento em relação ao tempo de cura anterior (7 dias) se deu para a dosagem 1/30, na ordem de 70%, enquanto para as dosagens 1/15 e 1/8, esse aumento ficou na ordem de 58% e 60%, respectivamente.

Figura 21 – Variação da RCS em função da dosagem de solução enzimática EMC² para os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2025).

Figura 22 – Variação da RCS em função do tempo de cura para as misturas de solo tratado com a solução enzimática EMC² nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.



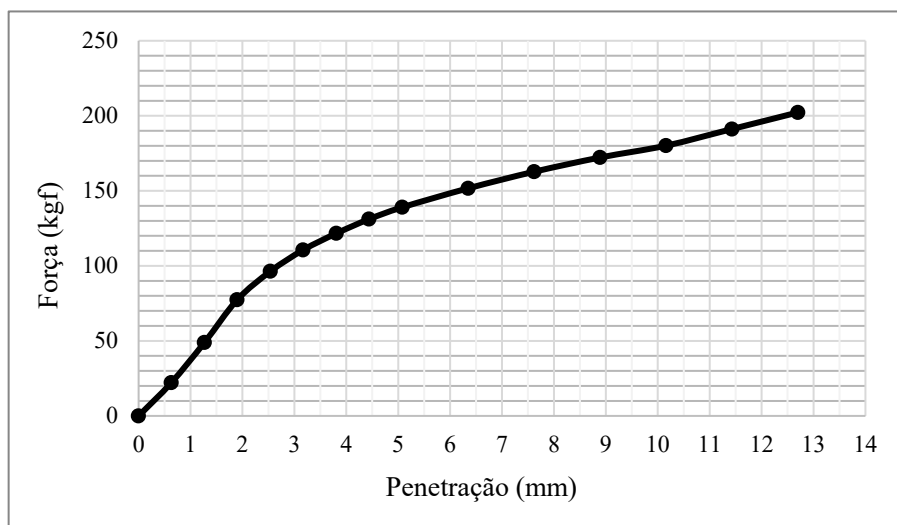
Fonte: Autor (2025).

Outro ponto a se destacar é que, por ser a dosagem intermediária, poderia se esperar que os valores de RCS encontrados para a dosagem 1/15 estivessem na média entre os valores encontrado para as dosagens 1/30 e 1/8. No entanto, o que pode ser observado na figura 21 é que para todos os tempos de cura, esse valor está abaixo de um valor médio entre os valores encontrados para as dosagens 1/30 e 1/8, aproximando-se mais dos valores de RCS encontrados para a dosagem 1/30, especialmente aos 28 dias de cura, em que o aumento no valor de RCS em relação ao tempo de cura anterior (7 dias) foi na ordem de 58% para a dosagem 1/15, o menor aumento em relação ao tempo de cura anterior observado pra as três dosagens estudadas aos 28 dias.

4.3 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

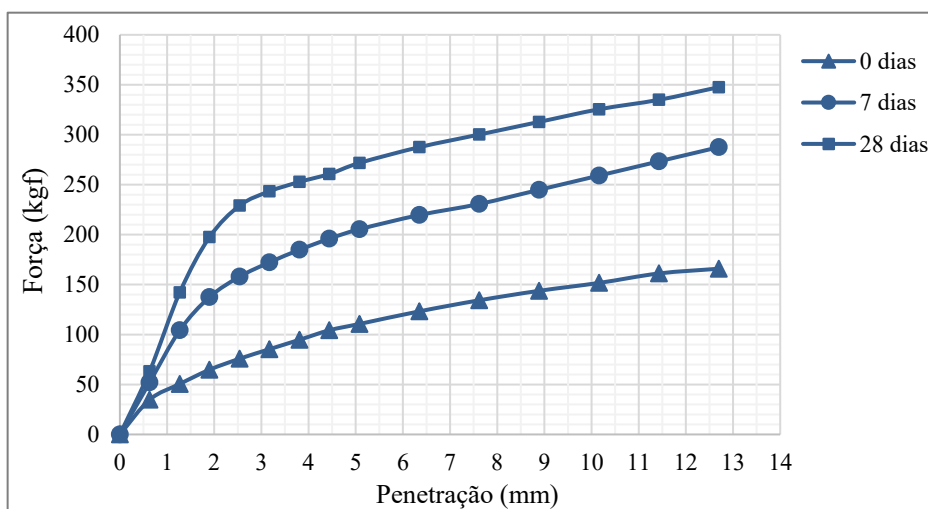
As curvas do Índice de Suporte Califórnia (ISC) para o solo natural e para as misturas de solo tratado com a solução enzimática EMC² em diferentes tempos de cura nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8 são apresentadas nas figuras 23, 24, 25 e 26, respectivamente.

Figura 23 – Curva do Índice de Suporte Califórnia para o solo natural.



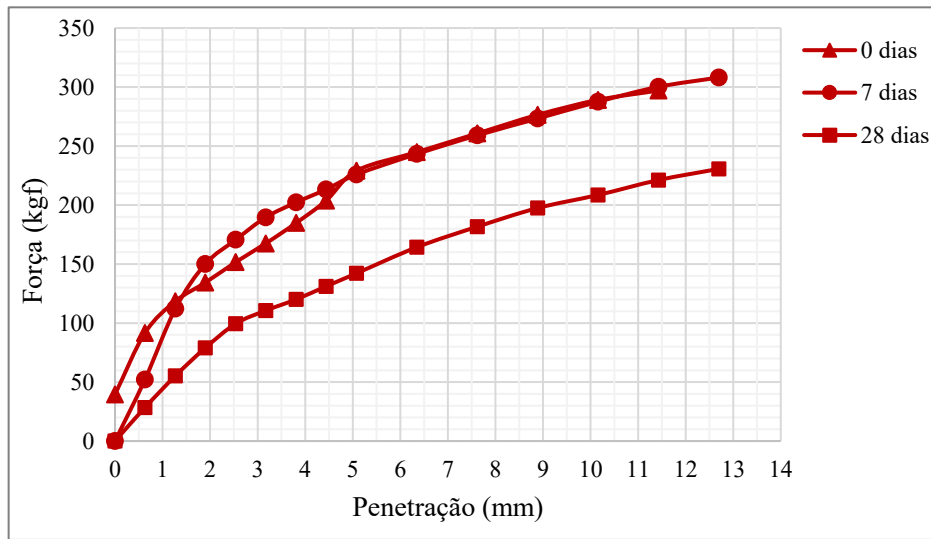
Fonte: Autor (2025).

Figura 24 – Curvas do Índice de Suporte Califórnia para a mistura de solo tratado com solução enzimática EMC² na dosagem 1/30, nos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.



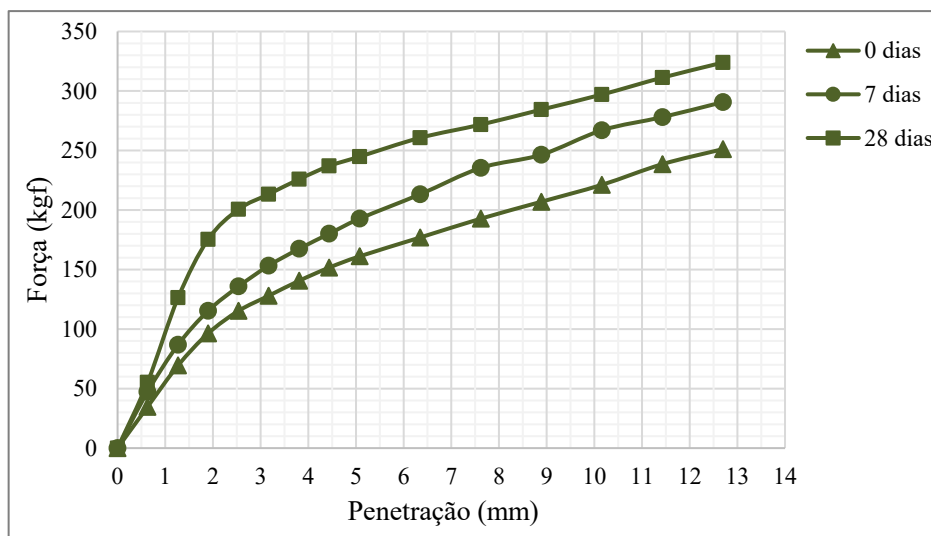
Fonte: Autor (2025).

Figura 25 – Curvas do Índice de Suporte Califórnia para a mistura de solo tratado com solução enzimática EMC² na dosagem 1/15, nos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2025).

Figura 26 – Curvas do Índice de Suporte Califórnia para a mistura de solo tratado com solução enzimática EMC² na dosagem 1/8, nos tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2025).

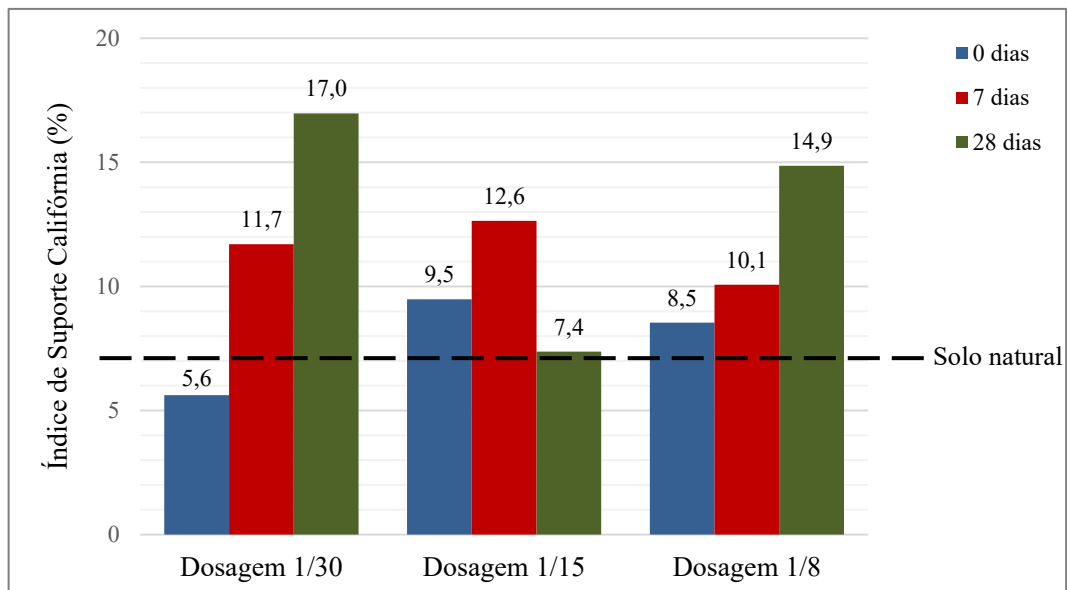
De acordo com os valores apresentados na tabela 8 e conforme pode ser visto nas figuras 27 e 28, pode-se observar que a adição do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² promoveu um aumento no Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo em quase todos os corpos de prova ensaiados, com exceção do corpo de prova moldado na dosagem 1/30, imerso em água aos 0 dias de cura e ensaiado após 4 dias de imersão.

Tabela 8 – Valores de ISC para o solo natural e para misturas de solo tratado com solução enzimática EMC², em tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.

DOSAGEM DE EMC ²	TEMPO DE CURA (dias)	ISC (%)	GANHO % EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL	RAZÃO DE GANHO EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL
NO SOLO (litros solução enzimática/ m ³ de solo)				
Solo Natural	-	7,1	-	-
	0	5,6	-21%	0,8
Dosagem 1/30	7	11,7	64%	1,6
	28	17,0	138%	2,4
	0	9,5	33%	1,3
Dosagem 1/15	7	12,6	77%	1,8
	28	7,4	3%	1,0
	0	8,5	20%	1,2
Dosagem 1/8	7	10,1	41%	1,4
	28	14,9	108%	2,1

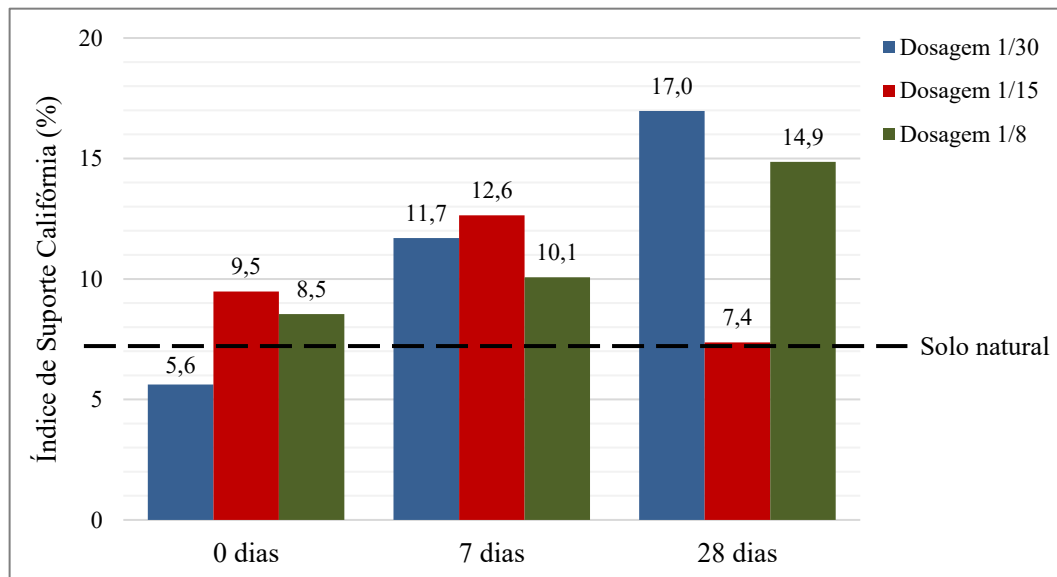
Fonte: Autor (2025).

Figura 27 – Variação do ISC em relação ao tempo de cura para cada as misturas de solo tratado com solução enzimática EMC² nas dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.



Fonte: Autor (2025).

Figura 28 – Variação do ISC em relação à dosagem de solução enzimática EMC² para os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2025).

Foi observado um aumento no valor do ISC com o tempo de cura, exceto na dosagem 1/15, em que o corpo de prova ensaiado aos 28 dias apresentou o menor valor do ISC dentre os corpos de prova moldados na dosagem 1/15, conforme observado na figura 27. Com relação ao aumento da concentração da solução estabilizadora a base de enzimas EMC², não se observou um comportamento uniforme, ora sendo constatado um aumento no valor do ISC, ora uma redução, para tempos de cura iguais, conforme pode ser observado na figura 28.

4.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

4.4.1 Resultados gerais do ensaio

De acordo com os valores apresentados na tabela 9, pode-se observar que a adição do estabilizante a base de enzimas do tipo EMC² promoveu um ganho nos valores do módulo de resiliência (MR) em todos os corpos de prova do solo tratado com a solução enzimática estudada. Entretanto, nem sempre é observado esse aumento, como no caso do corpo moldado na dosagem 1/30, em que para alguns pares de tensão são encontrados valores de MR inferiores ao MR encontrado para o corpo de prova moldado com o solo natural. Além disso, a variação do valor de MR não ocorre de forma uniforme com o aumento da concentração da solução enzimática na mistura e com o tempo de cura, mudando de acordo com os pares de tensão confinante (σ_3) e tensão desvio (σ_d) aplicados.

Tabela 9 – Valores de MR encontrados para o solo natural e para as misturas de solo tratado com a solução enzimática EMC², em tempos de cura de 0 e 7 dias, obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida, para os pares de tensão padronizados pela norma DNIT 134/2018-ME.

MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MPa)								
σ ₃ (kPa)	σ _d (kPa)	CONCENTRAÇÃO DE SOLUÇÃO A BASE DE ENZIMAS EMC ²						
		NO SOLO (litros solução enzimática/m3 de solo)						
		SOLO NATURAL	Dosagem 1/30		Dosagem 1/15		Dosagem 1/8	
			TEMPO DE CURA		TEMPO DE CURA		TEMPO DE CURA	
			0 dias	7 dias	0 dias	7 dias	0 dias	7 dias
20,0	20,0	59,5	68,7	55,9	65,8	79,2	58,9	63,6
20,0	40,0	56,0	68,3	51,4	62,9	65,1	42,6	44,9
20,0	60,0	45,1	53,4	47,2	48,2	66,4	40,3	44,9
35,0	35,0	46,2	76,3	63,0	62,3	74,5	64,3	63,6
35,0	70,0	34,8	56,2	53,5	47,0	67,8	50,6	59,0
35,0	105,0	33,9	51,4	50,5	41,6	58,9	44,7	50,9
50,0	50,0	52,5	64,4	58,0	57,8	69,6	73,8	83,9
50,0	100,0	39,1	46,8	54,1	43,9	57,3	62,0	78,2
50,0	150,0	34,9	40,1	49,7	47,3	47,9	53,5	66,7
70,0	70,0	47,1	77,1	64,4	68,8	74,2	71,4	84,4
70,0	140,0	39,5	60,1	49,4	49,5	57,2	54,0	63,5
70,0	210,0	39,2	46,0	42,9	46,0	51,6	57,2	52,4
105,0	105,0	64,3	78,6	69,5	82,5	88,1	81,1	91,0
105,0	210,0	46,8	55,0	57,1	60,5	71,1	62,3	69,1
105,0	315,0		44,9	81,5		62,8	52,8	59,3
140,0	140,0		90,6	81,3		96,9	90,1	100,3
140,0	280,0		64,1	60,5		74,4	65,4	76,2
140,0	420,0		53,2	0,0		75,6	54,5	61,5

Fonte: Autor (2025).

Os valores obtidos ao se calcular a média dos valores de MR (MR_{médio}) encontrados para cada corpo de prova são apresentados na tabela 10. Pode-se observar que a adição do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² promoveu um aumento no valor de MR_{médio} em todos os corpos de prova em que o solo foi tratado com a solução enzimática, porém o aumento desse valor não se deu de forma uniforme com o aumento da dosagem e com o tempo de cura.

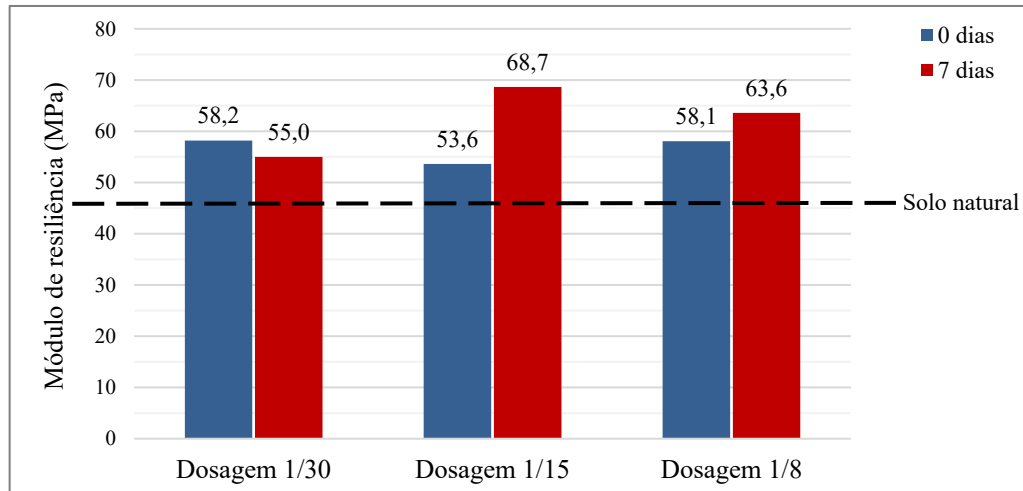
Tabela 10 – Valores de $MR_{\text{médio}}$ dos valores de MR obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida, para o solo natural e para as misturas de solo tratado com a solução enzimática EMC², em tempos de cura de 0 e 7 dias.

DOSAGEM DE EMC ² NO SOLO (litros solução enzimática/ m ³ de solo)	TEMPO DE CURA (dias)	$MR_{\text{médio}}$ (MPa)	GANHO % EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL	RAZÃO DE GANHO EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL
Solo natural	-	45,6	-	-
Dosagem 1/30	0	58,2	28%	1,3
	7	55,0	21%	1,2
Dosagem 1/15	0	53,6	18%	1,2
	7	66,7	46%	1,5
Dosagem 1/8	0	58,1	27%	1,3
	7	63,6	39%	1,4

Fonte: Autor (2025).

Como pode ser observado na tabela 10 e descrito pelos gráficos apresentados na figura 29, o maior valor de $MR_{\text{médio}}$ foi alcançado para o corpo de prova moldado na dosagem 1/15 ensaiado aos 7 dias de cura, com $MR_{\text{médio}} = 68,67$ Mpa, ocorrendo um aumento em relação ao valor de $MR_{\text{médio}}$ do corpo de prova moldado na dosagem 1/15 ensaiado aos 0 dias, o qual apresentou o valor mais baixo de $MR_{\text{médio}}$ dentre os corpos de prova de solo tratado com a solução enzimática. O mesmo comportamento foi observado nos corpos de prova moldados na dosagem 1/8, em que o valor de $MR_{\text{médio}}$ do corpo de prova rompido aos 7 dias de cura é superior ao valor de $MR_{\text{médio}}$ do corpo de prova rompido aos 0 dias. Porém, ao se analisar os corpos de prova moldados na dosagem 1/30, foi observado uma redução do valor de $MR_{\text{médio}}$ para o corpo de prova rompido aos 7 dias de cura, ficando abaixo do valor encontrado para o corpo de prova rompido aos 0 dias e sendo o segundo valor mais baixo encontrado para o $MR_{\text{médio}}$ dentre as amostras de solo tratado com a solução enzimática.

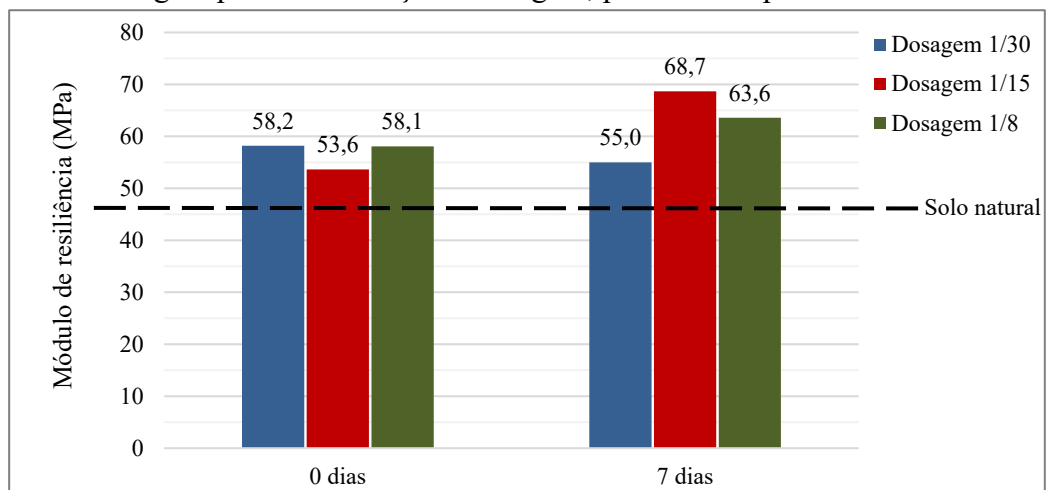
Figura 29 – Variação do $MR_{\text{médio}}$ dos valores de MR obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida em relação ao tempo de cura, para as dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.



Fonte: Autor (2025).

Ao se analisar tempos de cura iguais (figura 30), também pode ser observado um comportamento não uniforme. Aos 0 dias, os valores de $MR_{\text{médio}}$ calculados para as dosagens 1/30 e 1/8 permanecem praticamente iguais, ocorrendo uma queda pouco significativa na dosagem 1/8, e uma queda mais significativa na dosagem 1/15, cujo valor de $MR_{\text{médio}}$ é o menor encontrado para todas as amostras de solo tratado com a solução enzimática estudada. Já aos 7 dias, ocorre um aumento nos valores de $MR_{\text{médio}}$ tanto para a dosagem 1/15 quanto para a dosagem 1/8, em relação à dosagem 1/30, porém ocorrendo de forma mais significativa na dosagem intermediária 1/15, que alcançou o maior valor dentre todos os corpos de prova, quando comparada à dosagem em maior concentração 1/8.

Figura 30 – Variação do $MR_{\text{médio}}$ dos valores de MR obtidos a partir do ensaio triaxial dinâmico de carga repetida em relação à dosagem, para os tempos de cura de 0 e 7 dias.



Fonte: Autor (2025).

4.4.2 Modelos de comportamento para o Módulo de Resiliência

Os valores determinados para os parâmetros empíricos k_1 , k_2 e k_3 , ajustados a partir dos modelos propostos no item 3.6.2 são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Valores dos parâmetros empíricos ajustados para os diferentes modelos de comportamento para o MR estudados, para o solo natural e para as misturas de solo tratado com solução enzimática EMC², em tempos de cura de 0 e 7 dias.

MODELO	DOSAGEM DE		TEMPO DE CURA (dias)	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
	EMC ² NO SOLO (litros solução enzimática/ m ³ de solo)						
Seed <i>et al.</i> (1962) $MR = k_1 \cdot (\sigma_d)^{k_2}$	Solo natural	-	87291	-0,1527	-	0,26	
	Dosagem 1/30	0	103053	-0,1185	-	0,19	
		7	47858	0,0396	-	0,03	
	Dosagem 1/15	0	89501	-0,1114	-	0,15	
		7	80580	-0,0373	-	0,03	
	Dosagem 1/8	0	54176	0,0171	-	0,00	
		7	56840	0,0313	-	0,01	
Seed <i>et al.</i> (1962) $MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2}$	Solo natural	-	47430	-0,0154	-	0,00	
	Dosagem 1/30	0	54502	0,0214	-	0,00	
		7	31226	0,1520	-	0,31	
	Dosagem 1/15	0	42066	0,0699	-	0,04	
		7	50514	0,0726	-	0,08	
	Dosagem 1/8	0	27255	0,1894	-	0,36	
		7	28653	0,2051	-	0,36	
Macêdo (1996) $MR = k_1 (\sigma_3)^{k_2} (\sigma_d)^{k_3}$	Solo natural	-	64110	0,2726	-0,3198	0,52	
	Dosagem 1/30	0	69620	0,4318	-0,4104	0,74	
		7	36247	0,3171	-0,1772	0,52	
	Dosagem 1/15	0	58174	0,3798	-0,3442	0,66	
		7	59220	0,3392	-0,2665	0,56	
	Dosagem 1/8	0	33419	0,5314	-0,3420	0,91	
		7	34916	0,5363	-0,3312	0,81	

Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos ao se calcular a os valores de MR seguindo a equação do modelo composto de Macêdo ($MR_{ajustado}$), substituindo os valores de 30 kPa e 75 kPa para σ_3 e σ_d , respectivamente, para os corpos de prova de cada dosagem e tempo de cura estudado são apresentados na tabela 12. Pode-se observar que, a adição do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² promoveu um aumento no valor calculado para o $MR_{ajustado}$ em todos os corpos de prova em que o solo foi tratado com a solução enzimática, assim como observado nos valores de $MR_{médio}$, apresentados no item 4.4.1. Porém, da mesma forma como observado no item anterior, o aumento do valor de $MR_{ajustado}$ não se deu de forma uniforme com o aumento da concentração da solução enzimática e com o tempo de cura.

Tabela 12 – Valores do $MR_{ajustado}$ para o solo natural e para as misturas de solo tratado com solução enzimática, em tempos de cura de 0 e 7 dias, para o par de tensões adotado $\sigma_3 = 30$ kPa e $\sigma_d = 75$ kPa, aplicados na equação ajustada do modelo composto de Macêdo.

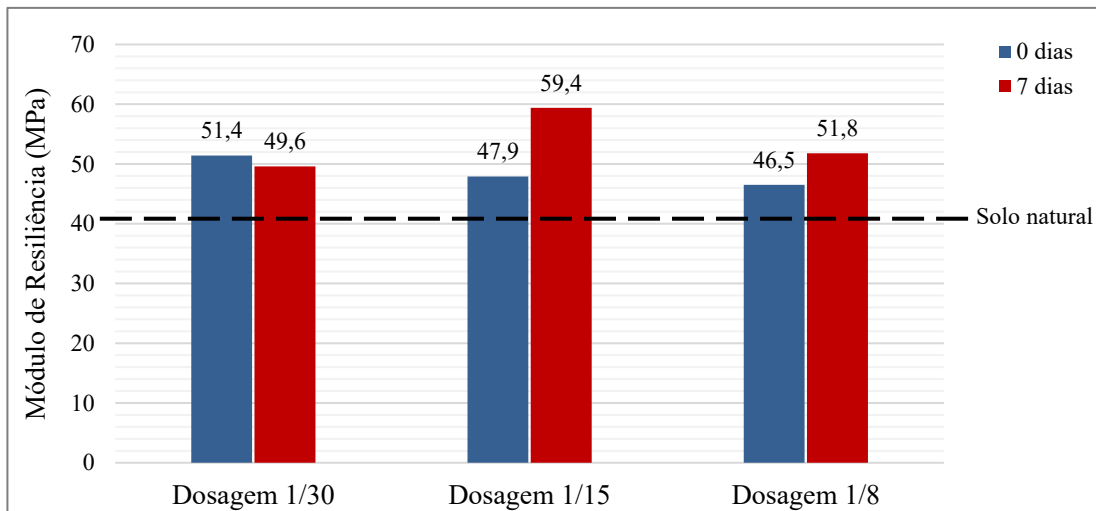
DOSAGEM DE EMC2 NO SOLO (litros solução enzimática/ m ³ de solo)	TEMPO DE CURA (dias)	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	MR (MPa)	GANHO %	RAZÃO DE
					EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL	AUMENTO EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL
Solo natural	-	30	75	40,7	-	-
Dosagem 1/30	0	30	75	51,4	26%	1,3
	7	30	75	49,6	22%	1,2
Dosagem 1/15	0	30	75	47,9	18%	1,2
	7	30	75	59,4	46%	1,5
Dosagem 1/8	0	30	75	46,5	14%	1,1
	7	30	75	51,8	27%	1,3

Fonte: Autor (2025).

Como pode ser observado na tabela 12, e descrito no gráfico apresentado na figura 31, o maior valor de $MR_{ajustado}$ foi encontrado para o corpo de prova moldado na dosagem 1/15 e ensaiado aos 7 dias, com $MR_{ajustado} = 59,40$ Mpa, ocorrendo um aumento em relação ao valor de $MR_{ajustado}$ calculado para o corpo de prova moldado na dosagem 1/15 ensaiado aos 0 dias. O mesmo comportamento foi observado nos corpos de prova moldados na dosagem 1/8, em que o valor de $MR_{ajustado}$ calculado para o corpo de prova ensaiado aos 7 dias de cura é superior ao valor de $MR_{ajustado}$ calculado para o corpo de prova ensaiado aos 0 dias. Porém, ao se analisar os corpos de prova moldados na dosagem 1/30, foi observado uma redução no valor de

$MR_{ajustado}$ calculado para o corpo de prova ensaiado aos 7 dias de cura, ficando abaixo do valor encontrado para o corpo de prova ensaiado aos 0 dias. Tal comportamento segue de forma igual ao observado no item 4.4.1, apesar de pequena diferença nos valores.

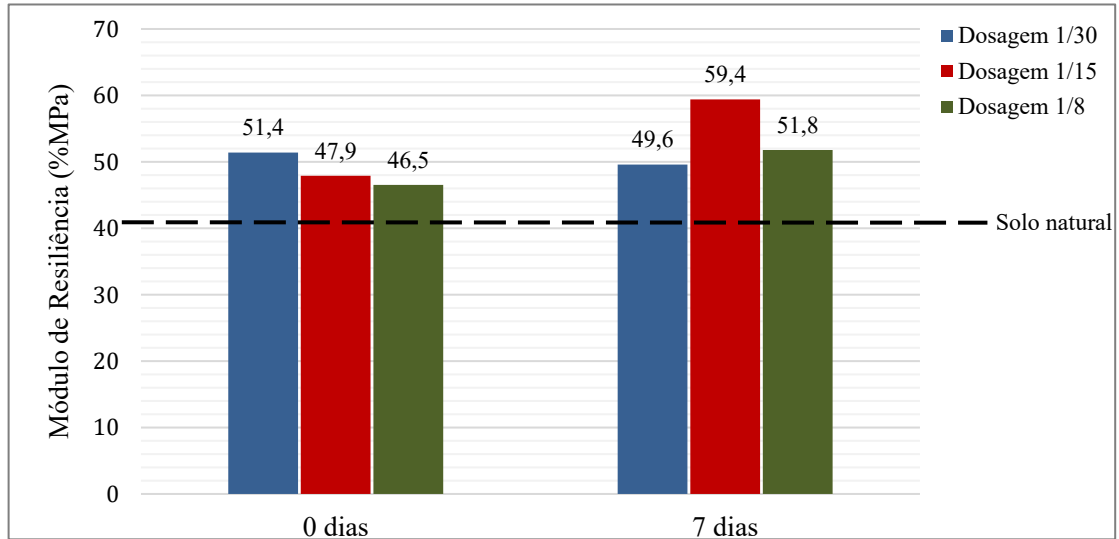
Figura 31 – Variação do $MR_{ajustado}$, calculado a partir do modelo composto de Macêdo, para o par de tensões adotado, $\sigma_3 = 30$ kPa e $\sigma_d = 75$ kPa, em relação ao tempo de cura para as dosagens 1/30, 1/15 e 1/8.



Fonte: Autor (2025).

Ao se analisar tempos de cura iguais (figura 32), também pode ser observado um comportamento não uniforme. Porém diferente do observado no item 4.4.1, em 0 dias, os valores de $MR_{ajustado}$ calculados diminuem com o aumento da concentração da solução enzimática, especialmente na dosagem em maior concentração 1/8, sendo encontrado o menor valor de $MR_{ajustado}$ calculado dentre todas as amostras de solo tratado com a solução enzimática EMC². Já aos 7 dias, ocorre o mesmo observado no item 4.4.1, sendo observado um aumento nos valores de $MR_{ajustado}$ calculado tanto para a dosagem 1/15 quanto para a dosagem 1/8, em relação a dosagem 1/30, porém, quando comparada com a dosagem em maior concentração de 1/8, esse aumento ocorreu de forma mais significativa na dosagem intermediária 1/15, que alcançou o maior valor de $MR_{ajustado}$ calculado dentre todos os corpos de prova.

Figura 32 – Variação do $MR_{ajustado}$, calculado a partir do modelo composto de Macêdo, para o par de tensões adotado, $\sigma_3 = 30$ kPa e $\sigma_d = 75$ kPa, em relação à dosagem, para os tempos de cura de 0 e 7 dias.



Fonte: Autor (2025).

4.5 ANÁLISE E DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

Primeiramente, ao se analisar os teores de umidade ótima ($w_{ótima}$) encontrados para as misturas de solo tratado com o estabilizante à base de enzimas do tipo EMC², chamou atenção o fato de $w_{ótima}$ encontrada para a dosagem intermediária ter ficado acima das demais dosagens. Para as três dosagens estudadas, o valor de $w_{ótima}$ encontrado foi menor em relação ao solo natural, o que já era esperado, uma vez que, segundo o fabricante, o uso do produto reduz a quantidade de água necessária no processo de compactação. Dessa forma, podia também ser esperado que o aumento da concentração da solução enzimática promovesse uma redução em $w_{ótima}$, o que ocorreu, uma vez que na dosagem de maior concentração, 1/8, foi encontrado o menor valor de $w_{ótima}$, igual a 25%. Entretanto, na dosagem intermediária 1/15, o valor de 27% encontrado para $w_{ótima}$ ficou acima do valor de $w_{ótima}$ de 26%, encontrado para a dosagem mais baixa 1/30. Com isso, pode-se levantar duas hipóteses iniciais: (I) de que a redução na quantidade de água não ocorre de forma uniforme e proporcional ao aumento da concentração do estabilizante estudado ou (II) possíveis falhas nas curvas de compactação, especialmente na curva obtida para a dosagem 1/15.

Com relação aos valores de massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) encontrados e sua variação em relação ao solo natural, foi observado no item 4.1 que houve um aumento nos valores encontrados para as três dosagens estudadas em relação ao solo natural, o que também

já era esperado, já que o processo de cimentação descrito no item 2.5 sugere um melhor agrupamento das partículas do solo, possibilitando uma melhor compactação do material, o que pode refletir no aumento observado em $\rho_{d,m\acute{a}x}$. No entanto, não houve variação no valor de $\rho_{d,m\acute{a}x}$ entre as dosagens de maior concentração, 1/15 e 1/8, com $\rho_{d,m\acute{a}x}$ se estabelecendo em 1,47 g/cm³. Tal fato pode estar relacionado a dois possíveis fatores: (I) O aumento no valor de $\rho_{d,m\acute{a}x}$ com o aumento da concentração da solução enzimática se dá até atingir um patamar máximo, a partir do qual o aumento da concentração não exerce mais influência em seu valor; ou (II) novamente, problemas nas curvas de compactação, especialmente na curva obtida para a dosagem 1/8, em que maiores valores de $\rho_{d,m\acute{a}x}$ poderiam ser obtidos.

Um melhor agrupamento das partículas do solo tratado com a solução enzimática pôde ser bem observado ao se extrair os corpos de prova para os ensaios de RCS, a partir de um corpo de prova maior moldado no cilindro pequeno padrão de Proctor, sendo possível visualizar o arranjo das partículas de solo compactado. Nas figuras 33(a) e 33(b) são mostrados um corpo de prova moldado com solo natural e um corpo de prova moldado com solo tratado com solução enzimática, respectivamente. Na figura 33(b), visualmente, o corpo de prova extraído aparece com uma textura mais lisa, sugerindo um melhor arranjo e agrupamento das partículas do solo tratado com o aditivo enzimático, em relação ao solo natural – figura 33(a).

Figura 33 – Corpos de prova moldados para o ensaio de RCS (a) com solo natural – à esquerda; (b) com solo tratado com a solução enzimática – à direita.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Passando-se a analisar os resultados encontrados para a resistência à compressão simples (RCS) e sua variação para as dosagens e tempos de cura estudados em relação ao solo natural, foi observado que houve um aumento nos valores encontrados para as três dosagens

estudadas em relação ao solo natural, subindo com o tempo de cura. No entanto, como observado no gráfico apresentado na figura 21, os valores de RCS encontrados para os corpos de prova moldados na dosagem 1/15 foram abaixo do esperado, uma vez que, por ser uma dosagem intermediária, poderia se esperar que os valores de RCS encontrados nessa dosagem estivessem na média entre os valores encontrados para as dosagens 1/30 e 1/8, ficando, porém bem mais próximos da dosagem de menor concentração, 1/30, em todos os tempos de cura, especialmente aos 28 dias de cura, em que o aumento em relação ao tempo de cura anterior foi o menor dentre as três dosagens estudadas.

Com relação aos resultados encontrados para o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e sua variação para as dosagens e tempos de cura estudados em relação ao solo natural, foi observado um aumento nos valores encontrados para quase todas as três dosagens e tempos de cura estudados em relação ao solo natural, ficando apenas o corpo de prova moldado na dosagem 1/30 e ensaiado aos 0 dias de cura, após imersão de 4 dias, com valor de ISC inferior ao encontrado para o solo natural. Além disso, o aumento do valor de ISC não seguiu de forma uniforme para todas as três dosagens e tempos de cura estudados, em que, o aumento da dosagem e do tempo de cura nem sempre promoveu um aumento no valor de ISC, para dosagens e tempos de cura iguais.

Com relação aos resultados encontrados para o Módulo de Resiliência (MR), foi observado um aumento nos valores encontrados para as três dosagens e tempos de cura estudados em relação ao solo natural, tanto para o $MR_{\text{médio}}$ quanto para o MR_{ajustado} calculados para cada dosagem e tempo de cura. No entanto, mais uma vez esse aumento não seguiu de forma uniforme, em que o aumento da dosagem e do tempo de cura nem sempre promoveu um maior aumento nos valores de $MR_{\text{médio}}$ e MR_{ajustado} , para dosagens e tempos de cura iguais.

A variação nos valores de RCS, ISC e MR observados, que não se deu uniformemente, pode estar relacionada aos mecanismos das reações e processos químicos que ocorrem na mistura de solo tratado com o estabilizante à base de enzimas do tipo EMC², em que a sintetização de compostos que promovem a cimentação e aglutinação do material granular ocorrem de tal forma que sua intensidade e velocidade não seguem uma relação diretamente proporcional à concentração da solução na mistura.

Também foi observado que, ao se extrair o solo do cilindro após a realização do ensaio de penetração para determinação do ISC, havia uma pequena camada de solo fortemente aderida à superfície interna do cilindro, como mostrado nas figuras 34(a) e 34(b), indicando que, quando o corpo de prova foi imerso em água, houve uma possível diluição da solução enzimática ou dos compostos cimentantes e aglutinantes gerado após o processo de cura, uma vez que isso foi

constatado em todos os corpos de prova. Algo semelhante também foi observado por Santos *et al.* (2018) em seu estudo sobre a influência do uso de estabilizante, também à base de enzimas, sugerindo o autor que a imersão em água anulou o efeito do aditivo, que migrou para o solo nas bordas do cilindro.

Figura 34 – (a) Cilindro com solo fortemente aderido às bordas internas, após extração do corpo de prova imerso e ensaiado para obtenção do ISC. (b) cilindro visto sob outro ângulo.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Outro ponto importante a se observar são os desvios de umidade (Δw) apresentados pelos corpos de prova. O teor de umidade (w) é um fator que influencia na massa específica seca (ρ_d) de um solo ou material granular estabilizado e, conseqüentemente, na sua compactação. Mesmo dentro do permitido pelas normas de ensaio da ABNT e DNIT, que permite um $\Delta w = \pm 2\%$, pequenas variações no teor de umidade do solo compactado, seja em seu estado natural ou tratado com a solução enzimática, pode ter exercido impacto significativo nos valores de RCS, ISC e MR obtidos através dos ensaios realizados.

Na tabela 13 são apresentados os resultados de todos os ensaios realizados, para o solo natural e para as três dosagens nos tempos de cura estudados, juntamente com o controle de umidade dos respectivos corpos de prova.

Tabela 13 – Resultados gerais dos ensaios realizados e controle de umidade dos corpos de prova.

DOSAGEM DE EMC2 NO SOLO (litros solução enzimática/ m3 de solo)	TEMPO DE CURA (dias)	RESULTADOS OBTIDOS	CONTROLE DE UMIDADE		GANHO EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL
			w (%)	Δw (%)	
Solo natural $w_{ótima} = 28\%$	-	RCS (kPa) 6,8	27,4%	-0,6%	-
	-	ISC (%) 7,1	27,4%	-0,6%	-
	-	MR médio (Mpa) 45,6	27,7%	-0,3%	-
	-	MR ajustado (Mpa) 40,7	27,7%	-0,3%	-
Dosagem 1/30 $w_{ótima} = 26\%$	0		27,2%	1,2%	2,08
	7	RCS (kPa) 15,9	25,5%	-0,5%	2,33
	28		27,8%	1,8%	3,95
	0		27,8%	1,8%	0,79
	7	ISC (%) 11,7	24,5%	-1,5%	1,64
	28		24,6%	-1,4%	2,38
	0	MR médio (Mpa) 58,2	25,8%	-0,2%	1,28
	7		27,4%	1,4%	1,21
	0	MR ajustado (Mpa) 51,4	25,8%	-0,2%	1,26
	7		27,4%	1,4%	1,22
Dosagem 1/15 $w_{ótima} = 27\%$	0		26,6%	-0,4%	2,22
	7	RCS (kPa) 17,3	25,9%	-1,1%	2,55
	28		27,6%	0,6%	4,03
	0		25,4%	-1,6%	1,33
	7	ISC (%) 12,6	25,1%	-1,9%	1,77
	28		26,9%	-0,1%	1,03
	0	MR médio (Mpa) 53,6	27,2%	0,2%	1,18
	7		25,2%	-1,8%	1,50
	0	MR ajustado (Mpa) 47,9	27,2%	0,2%	1,18
	7		25,2%	-1,8%	1,46
Dosagem 1/8 $w_{ótima} = 25\%$	0		23,1%	-1,9%	3,60
	7	RCS (kPa) 26,7	25,1%	0,1%	3,93
	28		24,8%	-0,2%	6,27
	0		25,1%	0,1%	1,20
	7	ISC (%) 10,1	24,6%	-0,4%	1,41
	28		24,4%	-0,6%	2,08
	0	MR médio (Mpa) 58,1	26,5%	1,5%	1,28
	7		25,3%	0,3%	1,28
	0	MR ajustado (Mpa) 46,5	26,5%	1,5%	1,14
	7		25,3%	0,3%	1,27

Fonte: Autor (2025).

Ao se observar os resultados apresentados na tabela 13, juntamente com o teor de umidade (w) de cada corpo de prova ensaiado, observou-se que, para os corpos de prova moldados nas dosagens 1/30 e 1/8, os melhores resultados de RCS e MR foram obtidos para os corpos de prova que apresentaram menores desvios de umidade (Δw), e que, em contrapartida, os piores resultados de RCS e MR foram observados nos corpos de prova com maior Δw , principalmente com desvio positivo, ou seja, com w maior que $w_{ótima}$ para a mistura estudada.

Dos corpos de prova moldados e submetidos aos ensaios para a determinação do MR na dosagem 1/30, o que foi ensaiado aos 0 dias de cura apresentou $MR_{\text{médio}}$ e MR_{ajustado} superior ao que foi ensaiado aos 7 dias, superando inclusive os valores apresentados pelos corpos de prova moldados nas dosagens 1/15 e 1/8 ensaiados no mesmo tempo de cura, aos 0 dias, apresentando os maiores valores de $MR_{\text{médio}}$ e MR_{ajustado} dentre os corpos de prova ensaiados aos 0 dias de cura. Ao se comparar com o corpo de prova moldado na dosagem 1/8 e ensaiado aos 0 dias, que apresentou $\Delta w = 1,5\%$, e o outro corpo de prova moldado na dosagem 1/30 e ensaiado aos 7 dias, que apresentou $\Delta w = 1,4\%$, observou-se que o corpo de prova moldado na dosagem 1/30 e ensaiado aos 0 dias apresentou menor desvio de umidade, com $\Delta w = -0,2\%$. Já o corpo de prova moldado na dosagem 1/8 e ensaiado aos 7 dias, com $\Delta w = 0,3\%$, também apresentou resultados positivos, dentro do esperado, conseguindo superar os valores de $MR_{\text{médio}}$ e MR_{ajustado} para a dosagem 1/8 aos 0 dias, superando também os valores de $MR_{\text{médio}}$ e MR_{ajustado} obtidos para a dosagem 1/30 aos 0 dias, que eram os maiores alcançados até então.

Contudo, nos corpos de prova moldados na dosagem 1/15, os melhores resultados para RCS, ISC e MR foram observados nos corpos de prova com maior desvio negativo de umidade, conforme os valores de w dos corpos de prova mais se aproximaram de 25% ou ficaram entre os valores de 25% e 26% determinados como $w_{ótima}$ para os solos tratados nas dosagens 1/8 e 1/30, respectivamente. Em contrapartida, os corpos de prova moldados na mesma dosagem, 1/15, apresentaram resultados abaixo do esperado com baixos valores de Δw , conforme w se aproximou de 27%, e também para valores de Δw positivos.

Nos ensaios para determinação de RCS, dos corpos de prova ensaiados aos 7 dias, os corpos de prova moldados na dosagem 1/15, que apresentaram $\Delta w = -1,1\%$, foram os que apresentaram maior ganho percentual de RCS, em torno de 15%, em relação ao tempo de cura anterior (0 dias), superando os aumentos percentuais em relação ao tempo de cura anterior (0 dias), de 12% e 9%, observados para os corpos de prova moldados nas dosagens 1/30 e 1/8, respectivamente. Em contrapartida, os corpos de prova moldados na dosagem 1/15 e ensaiados aos 28 dias, que apresentaram $\Delta w = 0,6\%$, obtiveram resultados bem abaixo do esperado ao se comparar com os resultados alcançados aos 28 dias pelos corpos de prova moldados na dosagem

1/8, superando em apenas 0,5 kPa o valor de RCS para os corpos de prova moldados na dosagem 1/30 e ensaiados aos 28 dias. Além disso, nos ensaios para determinação do MR, o corpo de prova moldado na dosagem 1/15 e ensaiado aos 7 dias, com $w = 25,2\%$ e $\Delta w = -1,8\%$, foi o que apresentou os maiores valores de $MR_{\text{médio}}$ e MR_{ajustado} dentre todos os corpos de prova, tanto aos 0 como aos 7 dias. Em contrapartida, o corpo de prova ensaiado aos 0 dias, com $w = 27,2\%$ e $\Delta w = 0,2\%$ foi o que apresentou os menores valores de $MR_{\text{médio}}$ e MR_{ajustado} dentre os corpos de prova com solo tratado com a solução enzimática, tanto aos 0 como aos 7 dias. Para os resultados do ISC, também foi observado que o corpo de prova moldado na dosagem 1/15 e ensaiado aos 0 dias de cura, com $w = 25,4\%$ e $\Delta w = -1,6\%$, e o moldado na dosagem 1/15 e ensaiado aos 7 dias de cura, com $w = 25,1\%$ e $\Delta w = -1,9\%$, apresentaram os maiores valores de ISC dentre os três corpos de prova ensaiados no mesmo tempo de cura. Em contrapartida, o corpo de prova moldado na dosagem 1/15 e ensaiado aos 28 dias de cura, $w = 26,9\%$ e $\Delta w = -0,1\%$, foi o que apresentou o menor valor de ISC dentre os três corpos de prova ensaiados no mesmo tempo de cura.

Retomando o que foi observado no item 4.1, acerca das curvas de compactação encontradas para as misturas de solo tratado com o estabilizante à base de enzimas do tipo EMC², era esperado que $w_{\text{ótima}}$ para a dosagem intermediária 1/15 ficasse entre 25% e 26%, valores de $w_{\text{ótima}}$ encontrados para as dosagens 1/8 e 1/30, respectivamente. Juntamente a isso, observa-se que, de acordo com a tabela 13, os melhores resultados de RCS, ISC e MR obtidos para a dosagem intermediária 1/15 foram encontrados para os corpos de prova moldados com w se aproximando de 25%, também sugerindo que esse teor de umidade pode estar associado a uma maior compactação das partículas do solo nessa dosagem. Com isso, os valores observados para a dosagem 1/15 para os corpos de prova moldados com umidade próxima de 27% possivelmente podem não representar a real evolução desses parâmetros do solo tratado nessa dosagem, podendo-se alcançar melhores resultados com corpos de prova moldados com teor de umidade mais próximo de 25%, o provável teor de umidade ótima para essa dosagem.

Considerando também os valores de $\rho_{d,\text{máx}}$ encontrados para as dosagens 1/15 e 1/8, uma vez que valores de w próximos de 25% promovem melhores resultados nos ensaios para a dosagem 1/15, possivelmente pode-se encontrar maiores valores de $\rho_{d,\text{máx}}$ para essa dosagem, e também para a dosagem 1/8, cuja $w_{\text{ótima}}$ encontrada também pode estar levemente equivocada, apesar de, em sua maioria, os resultados encontrados para essa dosagem em todos os ensaios serem extremamente positivos, podendo-se também alcançar melhores resultados para o solo tratado na dosagem 1/8.

Analisando-se os valores de ISC encontrados para os corpos de prova moldados nas dosagens 1/30 e 1/8, o comportamento não uniforme com o aumento da concentração da solução estabilizadora também pode estar ligado ao Δw de cada corpo de prova. No entanto, aqui, diferente dos corpos de prova moldados na dosagem 1/15, cuja $w_{ótima}$ considerada estava equivocada, os resultados obtidos nos demais ensaios de RCS e MR para as dosagens 1/30 e 1/8 apontam que os valores de $w_{ótima}$ apresentados no item 4.1 para essas dosagens esteja correto. No entanto corpos de prova moldados nas dosagens 1/30 e 1/8 com w abaixo da $w_{ótima}$ e com Δw negativo apresentaram valores de ISC mais altos quando comparados aos corpos de prova moldados nas dosagens 1/30 e 1/8 em tempos de cura iguais. Aos 0 dias de cura, o corpo de prova moldado na dosagem 1/30, com $w = 27,8\%$ e $\Delta w = 1,8\%$, apresentou ISC significativamente baixo, inferior inclusive ao valor de ISC encontrado para o corpo de prova moldado com solo natural, sendo o valor de ISC mais baixo encontrado dentre todos os corpos de prova. Já aos 7 e 28 dias, a dosagem 1/30 apresentou valores de ISC superiores em relação à dosagem 1/8, em que para o corpo de prova moldado na dosagem 1/30 e ensaiado aos 7 dias, foi medido $w = 24,5\%$ e $\Delta w = -1,5\%$, e para o corpo de prova moldado na dosagem 1/30 e ensaiado aos 28 dias, foi medido $w = 24,6\%$ e $\Delta w = -1,4\%$, sendo a dosagem 1/30 aos 28 dias a que apresentou o maior valor de ISC dentre todos os corpos de prova ensaiados.

Tais resultados, observados nos valores de ISC obtidos para os corpos de prova moldados nas dosagens 1/30 e 1/8, podem ser explicados pelo fato de que a máxima resistência mecânica de um solo ou material granular estabilizado se dá em teores de umidade ligeiramente inferiores à $w_{ótima}$. Em estudos comparativos de ISC em diferentes teores de umidade para um mesmo material, diversos autores observaram que corpos de prova moldados exatamente na $w_{ótima}$ determinado no ensaio de Proctor geralmente apresentam valores de resistência menores do que aqueles moldados com w ligeiramente abaixo da $w_{ótima}$. Rahman *et al.* (2023) verificaram, em oito tipos de solo, que o pico de ISC e MR ocorreu entre 0,5% e 5% abaixo da $w_{ótima}$, demonstrando que pequenas variações no teor de umidade de moldagem do corpo de prova podem alterar significativamente os parâmetros resistência do material.

Rahman *et al.* (2023) afirmam que em umidades próximas ou ligeiramente abaixo da $w_{ótima}$, há melhor contato entre as partículas sólidas do material e menor lubrificação pela água, o que favorece a sua resistência. Além disso, Lu e Likos (2004) apontam que esse comportamento ocorre porque, no lado seco da curva de compactação, o solo apresenta maior sucção matricial, o que eleva o esforço efetivo aparente e, conseqüentemente, a sua resistência ao cisalhamento e à penetração. Dessa forma, é possível concluir que solos compactados em

um teor de umidade ligeiramente inferior a $W_{ótima}$ pode oferecer melhores parâmetros de resistência mecânica.

4.6 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE ESTUDOS ANTERIORES

Os resultados obtidos neste estudo para o solo tratado com a solução enzimática EMC² demonstraram comportamento semelhante ao observado em outros estudos nacionais que investigaram a estabilização química de solos tropicais com produtos enzimáticos, ainda que com diferenças relevantes atribuídas ao tipo de solo, metodologia de moldagem, energia de compactação, dosagens e tempos de cura avaliados.

No estudo de Santos *et al.* (2018), o uso do aditivo enzimático ESS-X em solo do tipo ML, conforme a classificação do Sistema Unificado de Classificação e Solos (SUCS), resultou em ganhos expressivos na resistência à compressão simples (RCS), com um aumento em torno de 3,6 vezes ou 259% em relação ao solo natural na maior dosagem por eles estudada, 1/150, aos 28 dias de cura, demonstrando elevada sensibilidade da RCS ao uso do aditivo enzimático em questão. No presente estudo, observou-se também um aumento progressivo da RCS com o tempo de cura, especialmente para a maior dosagem aqui utilizada, 1/8, em que se atingiu um ganho de aproximadamente 6,3 vezes ou 527% após 28 dias de cura, em relação ao solo natural. Apesar das diferenças metodológicas, ambos os estudos indicam que soluções enzimáticas podem promover incrementos relevantes na RCS, quando aplicadas em solos finos e submetidas ao processo adequado de compactação e cura, tendendo a promover maiores ganhos conforme se aumenta a concentração do aditivo e o tempo de cura.

Com relação ao Índice de Suporte Califórnia (ISC), o estudo de Santos *et al.* (2018) não apresentou melhora significativa nesse parâmetro, quando comparado à RCS. No presente trabalho, o maior valor encontrado para o ISC na dosagem 1/30 aos 28 dias de cura corresponde a um ganho de 2,4 vezes ou 138% em relação ao valor encontrado para o solo natural. De forma semelhante, o maior valor de ISC encontrado por Santos *et al.* (2018) para o solo tratado correspondeu em um aumento de apenas 1,5 vez ou 48% em relação ao valor de ISC encontrado para o solo natural. Tal comportamento observado em ambos os estudos reforçam a tendência de que estabilizantes enzimáticos apresentam resposta mais expressiva em ensaios de deformação e resistência axial, como no caso da RCS, do que em ensaios de penetração, especialmente após imersão e saturação em água por períodos de tempo significativos, como no caso do ISC.

O trabalho de Sampaio (2019) avaliou 2 tipos diferentes de solo tratados com a solução EMC² sob diferentes energias de compactação e tempos de cura. A autora observou que os maiores ganhos de resistência à compressão simples (RCS) foram na ordem de 27% para o solo 1 e de 141% para o solo 2. No entanto, diferente do que fora observado até então neste presente trabalho, em que o aumento da RCS foi mais expressivo nas dosagens mais elevadas e com maiores tempo de cura, no estudo de Sampaio (2019) os maiores ganhos de resistência obtidos para o solo 1 (mais argiloso) se deram em menores tempos de cura (3 dias), caindo com o decorrer do tempo de cura, enquanto que para o solo 2 (mais arenoso) o maior ganho de resistência se deu na maior dosagem e tempo de cura estudados pela autora.

Com isso, o estudo de Sampaio (2019) indicou que o ganho de resistência mecânica de um solo depende significativamente do tipo de solo analisado e sua composição e que não é em todos os casos que a RCS de um solo aumenta com o tempo de cura, podendo inclusive diminuir seu valor com no decorrer do tempo de cura, dependendo do tipo de solo. Neste trabalho, o solo analisado, apesar de apresentar melhoras iniciais nos parâmetros de resistência mecânica em amostras de solo tratado sem cura, os melhores resultados foram alcançados ao final dos períodos monitorados, de 28 dias para RCS e ISC, e de 7 dias para o Módulo de Resiliência (MR).

No estudo de Huss (2018), foram testadas diversas soluções químicas, como o Ecolopavi, EMC² e Terrazyme, em um mesmo solo, obtendo-se melhorias variáveis dependendo da formulação. Huss (2018) observou que as misturas com EMC² apresentaram redução de resistência ao longo do tempo, com desempenho inferior ao obtido para formulações com Ecolopavi e Terrazyme, exceto em alguns casos específicos. Além disso, quando se analisa apenas o comportamento da RCS, em relação ao tempo de cura, observa-se no trabalho de Huss (2018) um comportamento menos linear do que o observado no presente trabalho, em que o autor observa quedas no valor de RCS para determinadas formulações, como no caso do EMC², enquanto que no presente trabalho o aumento da concentração e do tempo de cura sempre acarreta maiores ganhos de RCS, não ocorrendo o mesmo, porém, para os resultados de ISC e MR no presente trabalho. Com isso, a partir do observado por Huss (2018) e neste trabalho, é possível se afirmar que a influência do estabilizante a ser utilizado nos parâmetros de compactação e resistência mecânica está intimamente ligada ao tipo e composição do solo, podendo ser observados comportamentos diferentes, a depender da interação da substância com as partículas do solo.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da estabilização química, a partir da adição do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC², sobre propriedades mecânicas de um solo oriundo da zona rural da cidade de Guaratinguetá (SP), de forma a verificar a viabilidade de sua aplicação como pavimentos de estradas rurais não pavimentadas.

Para isso, foram analisados parâmetros de compactação, como a umidade ótima ($w_{ótima}$) e massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$); resistência à compressão simples (RCS); índice de suporte Califórnia (ISC); e módulo de resiliência (MR), comparando-se os resultados obtidos para o solo natural e para misturas de solo tratado com a solução enzimática em diferentes dosagens e tempos de cura.

A redução da $w_{ótima}$ e o aumento da $\rho_{d,máx}$, observados nos ensaios de compactação, em geral se intensificando conforme com o incremento do teor de estabilizante, evidenciaram maior eficiência de compactação e melhor arranjo estrutural entre as partículas do material tratado com a solução. Além disso, tal comportamento confirma o efeito de lubrificação das partículas e a redução da tensão superficial da água proporcionada pelas enzimas, conforme descrito na literatura técnica.

Os aumentos observados nos valores de RCS, ISC e MR, que se intensificaram conforme incremento do teor de estabilizante e tempo de cura, indicam que o produto contribui para a formação de ligações mais estáveis entre as partículas do solo, conferindo-lhe maior coesão e rigidez, além de melhorar a capacidade de suporte do material e aumentar a rigidez elástica recuperável do material, de forma a gerar um melhor desempenho frente às solicitações repetidas de tráfego.

Desse modo, pode-se concluir que a adição do estabilizante a base de enzimas do tipo EMC² promoveu melhorias significativas no comportamento geotécnico e mecânico do solo analisado, especialmente nas dosagens de 1/15 e 1/8, apresentando-se como uma alternativa tecnicamente viável, para a construção e manutenção de estradas rurais não pavimentadas.

Ressalta-se ainda que, além da melhora nas propriedades mecânicas, o uso do aditivo possibilita economia de recursos naturais, devido a redução do consumo de água para compactação do solo, cuja diminuição verificada na umidade ótima torna-se significativa para grandes volumes de solo, na ordem de metros cúbicos.

Todavia, esses valores ainda podem ser considerados baixos, frente a valores usualmente adotados em projetos e manuais de pavimentação brasileiros. Assim, para seu uso como camada de rolamento em estradas rurais não pavimentadas, ou para seu uso como

camadas de base e sub-base em estradas pavimentadas de baixo volume de tráfego, o uso do solo estudado neste trabalho deve ser usado com cautela, estudando-se as solicitações dos veículos sobre a via e adotando-se espessuras de camadas adequadas, de forma que esse material possa responder de forma adequada, sem deformações excessivas.

Além disso, como visto nos resultados apresentados, maiores concentrações do aditivo enzimático promove um aumento nos parâmetros de resistência mecânica do solo tratado. Assim, o uso de concentrações superiores às aqui estudadas, desde que seja economicamente e ambientalmente viável, podem promover maiores ganhos nas capacidades de suporte e elásticas do solo, tornando esse material capaz de suportar as solicitações de tráfego sobre a via, de forma a substituir com eficiência o uso de solos granulares mais nobres, frequentemente escassos e de alto custo.

Cabe-se observar que o tipo e a composição do solo podem, também, interferir nos processos de cimentação e cura do material a ser estabilizado, podendo-se obter resultados mais ou menos satisfatórios do que os aqui observados. Dessa forma, o uso do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² deve ser acompanhado de ensaios de laboratório que avaliem sua influência nos parâmetros de compactação e resistência do solo a ser tratado com a enzima. Essa verificação é fundamental para se analisar a eficácia do produto para o solo a ser tratado, considerando que diferentes composições granulométricas e mineralógicas podem promover distintos níveis de interação com a solução estabilizadora.

Também é válido e importante se atentar ao controle de umidade e compactação do solo estabilizado, uma vez que foi observado que variações mínimas no valor do teor de umidade geram significativo impacto negativo nos parâmetros de resistência mecânica, especialmente valores de umidade acima do teor de umidade ótima encontrada no ensaio de Proctor.

Outro ponto a se destacar é que um possível fator limitante ao uso do estabilizante à base de enzimas do tipo EMC² seria a saturação de água no solo, conforme visto nas figuras 34(a) e 34(b). Quantidades excessivas de água em grandes períodos de tempo podem acarretar diluição da solução enzimática e dos produtos das reações de cura e cimentação do solo, podendo diminuir ou até anular seu efeito estabilizante. Dessa forma, áreas planas e de baixa cota, para onde escoar e se acumula a água das chuvas e, portanto, com solo extremamente úmido e até saturado em determinadas épocas do ano, não são recomendadas a receber o produto sem outras técnicas e soluções que impermeabilize o material estabilizado, isolando-o do excesso de água, que tende a reduzir ou até anular o efeito estabilizante da solução EMC². Com base no que foi observado, recomenda-se que o uso do solo estabilizado com o aditivo

estudado seja feito em locais onde se tenha boas condições de drenagem, o que pode ser um importante aliado na viabilização de seu uso em campo.

6 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de investigações complementares, de forma a ampliar a compreensão do comportamento do solo tratado com o estabilizante a base de enzimas do tipo EMC², abrangendo:

- Ensaios de módulo de resiliência (MR) em tempos de cura superiores a 7 dias, a fim de avaliar a evolução das propriedades elásticas em longo prazo;
- Estudos comparativos entre diferentes tipos de solos e condições de compactação, considerando solos arenosos, argilosos e lateríticos;
- Estudos comparativos entre o uso da solução enzimática EMC² com outras enzimas e com produtos tradicionais utilizados na estabilização de solos, como cal e cimento, em diferentes tipos de solo, de forma a se comparar os resultados alcançados com cada produto e a interação de cada solução com o tipo de granulometria e composição do solo;
- Avaliação do desempenho do solo estabilizado sob condições reais de campo, com monitoramento do comportamento estrutural e da durabilidade em estradas experimentais;
- Análise microestrutural (MEV ou DRX) para compreender os mecanismos físico-químicos de interação entre as enzimas e as partículas minerais do solo;
- Estudo da viabilidade econômica e ambiental da aplicação do produto em larga escala, considerando custos de execução, manutenção e ciclo de vida do pavimento;
- Estudos em dosagens superiores, de forma a melhor se compreender o comportamento do solo estabilizado e a evolução dos parâmetros físicos de compactação e resistência mecânica;
- Estudos da formulação à base de enzimas estudada associada a outras soluções de estabilização, como geossintéticos e a inclusão de outros resíduos ou subprodutos de baixo custo, como a cal;
- Ensaios de resistência à compressão simples (RCS), índice de suporte Califórnia (ISC) e módulo de resiliência (MR) em diferentes teores de umidade, especialmente teores ligeiramente menores que o teor de umidade ótima, a fim de se avaliar a influência do desvio de umidade na resistência mecânica do solo;

- Ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, conforme NBR 13554/1996 Solo-cimento – ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, de forma a se analisar aspectos de durabilidade das misturas.
- Ensaios de absorção de água, conforme NBR 13555 (ABNT, 2012), para se avaliar a influência do produto na capacidade do solo em absorver água.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: solo: Índice de Suporte Califórnia: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: solo: determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: solo-cimento: ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13555**: solo-cimento: determinação da absorção d'água. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BASE FORTE. **EMC squared**: biocatalisador estabilizante de solos. Paraná, 2023

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. v.1

CARVALHO, M. E. Moradores reclamam de estradas rurais de Guaratinguetá; prefeitura promete melhorias. **O Vale**. Guaratinguetá, p. 1-1. 08 mar. 2022.

CAVA, F. **Entenda a diferença entre o CBR e o módulo de resiliência**. Além da Inércia, 2021. Disponível em: <https://alemdainercia.com/2021/01/25/entenda-a-diferenca-entre-o-cbr-e-o-modulo-de-resiliencia/>. Acesso em: 31 out. 2025.

CONFERÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2022**. Brasília: CNT, 2022. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. Acesso em: 21 jun. 2023.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2018 – ME: solos: determinação do módulo de resiliência: método de ensaio.** Brasília: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 140/2022 – ES: pavimentação: sub-base de solo melhorado com cimento: especificação de serviço.** Brasília: DNIT, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 143/2022 – ES: pavimentação: base de solo-cimento: especificação de serviço.** Brasília: DNIT, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 172/2016 – ME: solos: determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: método de ensaio.** Brasília: DNIT, 2016.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação: projeto de pavimentos.** Brasília: DNIT, 2018.

FERRI, S. **Contribuições ao estudo do comportamento mecânico de solos de subleito para fins de projeto de pavimentos asfálticos.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Manual para utilização do método mecanístico-empírico MeDiNa: apresentação dos programas.** Rio de Janeiro: COPPE/IPR, 2020.

HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L. **Factors influencing the resilient response of granular materials.** Highway Research Record, n. 345, p. 15–31, 1971.

HUSS, F. de O. **Estabilização química de solos para fins rodoviários.** 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estradas vicinais: manual técnico para conservação e recuperação.** São Paulo: Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo, 1985. 129p.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics.** New York: John Wiley & Sons, 1979.

LEÃO, M. F. **Fundamentos da mecânica dos solos.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

LIU, W. *et al.* Experimental study and prediction model of dynamic resilient modulus of compacted subgrade soils subjected to moisture variation. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, Nanquim, v. 41, n. 1, p. 175–183, 2019.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated soil mechanics.** Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.

MACÊDO, V. C. **Modelo composto para determinação do módulo de resiliência de solos tropicais**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1996.

MATTOS, H. **Mecânica dos solos aplicada à pavimentação**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

NORBACK, C. **Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de solos e misturas solo-brita**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

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

PEREIRA, C. R. B. **Avaliação de erodibilidade em um solo do bairro Pingo de Ouro, Guaratinguetá/SP**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2022.

PEREIRA, R. S. *et al.* Uso do resíduo industrial grits em pavimentos de estradas florestais: influência do período de cura na resistência mecânica e expansão de misturas solo-grits compactadas. **Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 795-802, 2006.

PEZO, R. F. *et al.* **Resilient modulus of subgrade soils and untreated base materials for mechanistic pavement design**. Vicksburg: U.S. Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station, 1992.

PINTO, S. Coeficientes de Poisson e módulo de resiliência de solos para pavimentos. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 41–52, 2006.

RAFIQUE, U. *et al.* Application of bioenzymatic soil stabilization in comparison to macadam in the construction of transport infrastructure. **Journal of Environmental Biology**, Lucknow, v. 37, p. 1209-1215, 2016.

RAHMAN, M. M. *et al.* Effect of moisture content on subgrade soils resilient modulus for predicting pavement rutting. **Geosciences**, Basel, v. 13, n. 4, art. 103, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/13/4/103>. Acesso em: 17 out. 2025.

SAMPAIO, I. S. **Estabilização enzimática de solo para pavimento de estradas florestais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

SANTOS, L. R. dos *et al.* Estabilização de Solos com um Aditivo a Base de Enzimas para fins Rodoviários. **Engineering And Science**, Cuiabá, v. 3, n. 7, p. 1-11, 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/6930>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SANTOS, W. C. dos. **Análise de patologias de estradas vicinais para proposta de intervenção mínima visando a sua perenização**. 2011. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do de Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá, 2011.

Disponível em:

https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121058/santos_wc_tcc_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 jun. 2023.

SEED, H. B. *et al.* Resilient behavior of granular materials under repeated loading. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Nova York, v. 88, n. SM1, p. 39–53, 1962.

STABILIZATION PRODUCTS LLC. **EMC SQUARED® system**: advanced stabilization technology. 2020. Disponível em: <https://www.stabilizationproducts.net/docs/18778.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2023.

SUPORTE. **Compactação de solos**: ensaios geotécnicos: o ensaio e as energias de compactação. 2025. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/compactacao-de-solos-ensaios-geotecnicos-o-ensaio-e-as-energias-de-compactacao/68/>. Acesso em: 24 out. 2025.

UZAN, J. Characterization of granular material. **Transportation Research Record**, Washington, DC, n. 1022, p. 52–59, 1985.