

IARA SILVA SAMPAIO

**ESTABILIZAÇÃO ENZIMÁTICA DE SOLO PARA PAVIMENTO DE
ESTRADAS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S192e Sampaio, Iara Silva, 1993-
2019 Estabilização enzimática de solo para pavimento de estradas
florestais / Iara Silva Sampaio. – Viçosa, MG, 2019.
xii, 49 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos Cardoso Machado.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 46-49.

1. Estradas florestais. 2. Pavimentos. 3. Solos -
Compactação. 4. Solos - Propriedades plásticas. 5. Solos -
Análise. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência
Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22. 634.9383

IARA SILVA SAMPAIO

**ESTABILIZAÇÃO ENZIMÁTICA DE SOLO PARA PAVIMENTO DE
ESTRADAS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de janeiro de 2019.


Dario Cardoso de Lima


Cláudio Henrique de Carvalho
Silva
(Coorientador)


Carlos Cardoso Machado
(Orientador)

Dedico este trabalho à minha família, minha maior fonte de forças e sabedoria. Dedico ainda àqueles que, também tão importantes, acreditaram que tudo seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e por guiar os meus caminhos. Aos meus pais Sandra e Antônio, e ao meu irmão Gabriel, por serem a melhor parte de quem sou, a minha maior fonte de força, por me apoiarem em todos os dias, em cada momento difícil, por acreditarem e confiarem junto comigo e às vezes por mim que todas as vitórias seriam alcançadas e que tudo ficaria bem. Ao Lucas, meu companheiro, melhor amigo, parceiro de lutas e até mesmo estagiário. Sem seu apoio, dedicação e paciência, os dias teriam sido muito mais difíceis. Serei eternamente grata por todos os momentos compartilhados. Aos meus amigos, que acompanharam todas as dificuldades, e que acreditaram em mim, nas minhas vontades, nos meus planos. Sem eles, teria sido mais difícil chegar até aqui. À Universidade Federal de Viçosa, por proporcionar momentos de conhecimento inigualáveis. Ao professor Carlos Cardoso Machado, por orientar com segurança e carinho todo este trabalho. Ao professor Cláudio Henrique de Carvalho Silva, pelos conhecimentos compartilhados. Ao professor Dario de Cardoso Lima, pelo suporte e pelo acompanhamento durante todo o trabalho, transmitindo tantos conhecimentos. Aos funcionários do LEC Giovani, Dedé e Marcelo, por todo o auxílio, todos os momentos de troca de conhecimento e pelo acolhimento. Ao CNPq pelo auxílio financeiro. A todos que passaram pelo meu caminho durante essa trajetória e contribuíram, cada qual a seu modo, para que este trabalho pudesse ocorrer.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIações	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Considerações gerais.....	5
2.2 Estradas não pavimentadas	6
2.3 Estabilização dos solos	9
2.3.1 Estabilização mecânica	9
2.3.2 Estabilização elétrica.....	10
2.3.3 Estabilização térmica	11
2.3.4 Estabilização química.....	11
2.3.4.1 Estabilização solo-EMC <i>Squared</i>	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 Materiais	16
3.1.1 Solo	16
3.1.2 EMC <i>Squared</i>	17
3.2 Métodos	18
3.2.1 Coleta dos solos em campo	18
3.2.2 Preparação das amostras de solo	18
3.2.3. Ensaio de caracterização dos solos.....	18
3.2.3.1 Análise granulométrica.....	18
3.2.3.2 Massa específica dos sólidos	19
3.2.3.3 Limite de Liquidez	19
3.2.3.4 Limite de Plasticidade	19

3.2.4	Classificação dos solos.....	19
3.2.4.1	<i>Transportation Research Board (TRB)</i>	20
3.2.4.2	Miniatura Compactado Tropical (MCT)	21
3.2.5	Preparação das misturas solo-EMC <i>Squared</i>	22
3.2.6	Ensaio de compactação.....	24
3.5.7	Ensaio de resistência à compressão simples	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Caracterização geotécnica dos solos.....	30
4.2	Compactação do solo e das misturas solo-EMC <i>Squared</i>	33
4.3	Resistência à compressão simples	37
5	CONCLUSÕES	44
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção de pavimento flexível em corte longitudinal.....	8
Figura 2. Ação do EMC <i>Squared</i> no solo.....	14
Figura 3. Solo 1, coletado na localidade “Cavalos”.....	16
Figura 4. Solo 2, coletado na localidade “Vila Secundina”.....	17
Figura 5. Ábaco para classificação MCT.....	22
Figura 6. Preparação da solução do EMC <i>Squared</i> a 5%.....	23
Figura 7. Fluxograma dos ensaios de compactação e resistência à compressão simples.....	24
Figura 8. Corpos de prova correspondentes à uma curva de compactação.....	25
Figura 9. Curva de compactação de um solo.....	26
Figura 10. Cura ao ar livre dos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão simples.....	27
Figura 11. Corpos de prova submetidos à prensa no ensaio de RCS.....	28
Figura 12. Corpos de prova após o rompimento pela prensa.....	28
Figura 13. Curva granulométrica do solo 1.....	30
Figura 14. Curva granulométrica do solo 2.....	31
Figura 15. Compactação do solo 1 (SOLO) e das misturas solo-EMC <i>Squared</i> (S+E) na energia normal.....	34
Figura 16. Compactação do solo 1 (SOLO) e das misturas solo-EMC <i>Squared</i> (S+E) na energia intermediária.....	35
Figura 17. Compactação do solo 2 (SOLO) e das misturas solo-EMC <i>Squared</i> (S+E) na energia normal.....	35

Figura 18. Compactação do solo 2 (SOLO) e das misturas solo-EMC <i>Squared</i> (S+E) na energia intermediária.....	36
Figura 19. Ganho de RCS (%) do solo 1 nas energias normal (A) e intermediária (B).....	40
Figura 20. Ganho de RCS (%) do solo 2 nas energias normal (A) e intermediária (B).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos solos: <i>Transportation Research Board</i>	21
Tabela 2. Granulometria dos solos 1 e 2 em seu estado natural.	30
Tabela 3. Limites de Consistência e massa específica dos sólidos dos Solos 1 e 2 em seu estado natural.	32
Tabela 4. Classificação TRB e MCT dos solos estudados.....	32
Tabela 5. Teor de umidade ótimo e peso específico aparente seco máximo dos solos naturais e misturas solo-EMC <i>Squared</i> nas energias normal e intermediária.....	34
Tabela 6. Resistência à compressão simples (kPa) dos solos 1 e 2, nas energias normal e intermediária, nas concentrações de 0 (solo natural), 1, 2 e 3% de solução enzimática e nos tempos de cura de 3, 7 e 12 dias.	37
Tabela 7. Ganho de resistência à compressão simples dos solos 1 e 2, nas energias normal e intermediária, nas concentrações de solução enzimática de 1, 2 e 3% em relação ao solo natural.	39

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMC	<i>Earth Materials Catalyst</i>
IP	ndice de Plasticidade
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compactado Tropical
NBR	Norma Brasileira
RCS	Resistência  Compressão simples
SSPCo	Soil Stabilization Products TM Co.
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Al	Alumínio
cm	Centímetro
Fe	Ferro
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kN/m ³	Quilonewton por metro cúbico
kPa	Quilopascal
W _{ot}	Umidade ótima
γ _{dmax}	Peso específico aparente seco máximo

RESUMO

SAMPAIO, Iara Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2019.
Estabilização enzimática de solo para pavimento de estradas florestais.
Orientador: Carlos Cardoso Machado. Coorientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

O presente trabalho aborda a avaliação do potencial do estabilizante enzimático EMC *Squared* na pavimentação de estradas florestais em dois solos residuais da Zona da Mata de Minas Gerais. No estudo, foram coletadas amostras dos solos e realizou-se um programa de ensaios de laboratório que compreendem: (i) caracterização geotécnica: ensaios de análise granulométrica, massa específica dos sólidos, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade; (ii) ensaios de compactação dos solos naturais e das misturas solo-EMC *Squared* nas concentrações de 1, 2 e 3% em relação à massa de solo seco, nas energias Proctor normal e intermediária; (iii) resistência à compressão simples dos solos naturais e das misturas solo-EMC *Squared* nas concentrações de 1, 2 e 3%, nos tempos de cura ao ar livre de 3, 7 e 12 dias, nas energias dos ensaios de compactação Proctor normal e intermediário. Os resultados mostram que, segundo as caracterizações e classificações realizadas, o solo 1 é predominantemente argiloso e o solo 2 é predominantemente arenoso. A adição da solução enzimática em todas as concentrações utilizadas neste estudo não alterou de forma significativa os resultados obtidos pelos ensaios de compactação nos dois solos nas energias de compactação utilizadas. De maneira geral, a adição da solução enzimática reduziu em pequenos níveis a umidade ótima dos solos. Nem todas as combinações de concentração de solução enzimática e tempos de cura resultaram em aumento da resistência à compressão simples em relação ao solo. Para o solo 1, argiloso, a cura de 3 dias apresentou maior ganho percentual de resistência tanto na energia normal quanto na intermediária. Para o solo 2, arenoso, em ambas as energias de compactação, a cura de 12 dias apresentou o maior ganho percentual de resistência. Este estudo reforça as teorias de que a ação de enzimas estabilizantes depende do tempo em que o agente estabilizante atinge os sítios de ligação dos solos. A estabilização química de solo para utilização em estradas florestais pode ser combinada a outros métodos de estabilização, garantindo de forma complementar maiores valores de resistência mecânica.

ABSTRACT

SAMPAIO, Iara Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2019. **Soil enzymatic stabilization for forest road pavement.** Advisor: Carlos Cardoso Machado. Co-advisor: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

The present study was developed to evaluate the potential of the EMC *Squared* enzymatic stabilizer in the paving of forest roads in two residual soils of the Zona da Mata of Minas Gerais. In the study, soil samples were collected, and a laboratory test program was carried out, which includes: (i) geotechnical characterization: particle size analysis, solids specific mass, Liquidity Limit and Plasticity Limit; (ii) compaction tests of soils and soil-EMC *Squared* mixtures at concentrations of 1, 2 and 3% related to soil dry mass in standard and intermediate Proctor compaction tests efforts; (iii) simple compressive strength of soils and soil-EMC *Squared* mixtures at concentrations of 1, 2 and 3%, at 3, 7 and 12 day outdoor cure times, in standard and intermediate Proctor compaction efforts. The results show that, according to characterizations and classifications, soil 1 is predominantly clayey and soil 2 is predominantly sandy. The addition of the enzymatic solution at all concentrations used in this study did not significantly alter the results obtained by the compaction tests in the two soils at the compaction energies used. In general, the addition of the enzymatic solution reduced in small levels the optimum humidity of the soils. Not all combinations of enzyme solution concentration and curing times resulted in increased simple compressive strength compared to soil. For soil 1, clayey, the 3-day cure presented the greatest strength gain in both compaction energies. For soil 2, sandy, also in both compaction efforts, the 12-day cure had the highest resistance gain. This study reinforces the theories that the action of soil stabilizing enzymes depends on the constitution of the clay fraction of the soils and the time in which the stabilizing agent reach the soil binding sites. The chemical stabilization of soil for use in forest roads can be combined with other stabilization methods, in order to reach higher mechanical strength.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As estradas são um dos componentes essenciais no setor florestal e seu planejamento de construção e manutenção é imprescindível para outras operações do setor (LOTFALIAN; BABADI; AKBARI, 2018). Elas são a via mais importante de acesso, sendo responsáveis pelo escoamento da mão-de-obra e dos meios de produção necessários (CARMO et al., 2013).

As estradas não pavimentadas não possuem a camada selante que confere estabilidade e resistência às pistas de rolamento. Elas são construídas seguindo o relevo local, com menor escala de planejamento e, muitas vezes, não seguindo projetos geométricos específicos. Segundo a Confederação Nacional do Transporte, 87,6% da malha rodoviária brasileira é não pavimentada (CNT, 2016). A ausência de pavimentação facilita processos de erosão e desgaste pelo tráfego de veículos.

A construção e a manutenção das estradas não pavimentadas estão sob responsabilidade, na maioria das vezes, de órgãos municipais e das empresas florestais. A falta de recursos financeiros públicos suficientes para o investimento neste setor e a falta de conhecimento técnico para a realização das operações necessárias faz com que as atividades relacionadas às estradas ocorram de forma adaptada à realidade de equipamentos e conhecimento técnico dos responsáveis. A necessidade crescente do escoamento da produção florestal também aumentou a demanda de construção e manutenção das vias não pavimentadas (SILVA et al., 2011).

A importância das estradas não pavimentadas tem sido acentuada ao longo do tempo, gerando melhorias no gerenciamento de gastos com esse setor, além de incentivar a busca pela redução de efeitos nocivos ao meio ambiente. O investimento na infraestrutura dessas estradas aumenta a produtividade do transporte de produtos, reduz custos e melhora a qualidade de vida nas comunidades (DIAS et al., 2015).

Embora ocorram em grandes extensões no Brasil, as estradas não pavimentadas ainda requerem pesquisas visando encontrar as melhores alternativas que combinem a

disponibilidade técnica e de recursos (OLIVEIRA et al., 2013). O conhecimento sobre a dinâmica de construção das estradas e sobre as propriedades do solo torna-se imprescindível quando o objetivo é a busca pela construção de vias que resistam melhor às condições intensas às quais são submetidas.

A construção das estradas é uma das etapas mais onerosas da produção florestal. De todo o orçamento destinado a este setor, 10% do custo é direcionado ao planejamento de estradas, 20% aos projetos de drenagem, 30% às operações de terraplanagem e 40% à pavimentação (MACHADO, 2013). Assim, a camada de rolamento representa economicamente a maior etapa da construção das estradas, incentivando a busca pelas melhores técnicas que envolvam ganhos nas propriedades mecânicas e a otimização dos custos de construção.

Os materiais utilizados na construção de pavimentos de estradas devem apresentar características de resistência mecânica aos esforços causados pelo tráfego de veículos. Segundo Machado (2013), os solos superficiais apresentam grandes variações em sua composição e em seu comportamento de resistência mecânica em função do teor de umidade.

A grande variabilidade de comportamento dos solos levou ao desenvolvimento de técnicas que possibilitassem o emprego destes materiais com características desfavoráveis na construção de estradas. As técnicas de estabilização modificam artificialmente o solo, conferindo-lhe a capacidade de resistir a ações erosivas e aos esforços e desgastes gerados pelo tráfego de veículo em situações adversas (MACHADO, 2013). De forma geral, as técnicas de estabilização de pavimento buscam a melhoria das propriedades de resistência mecânica, compressibilidade e expansibilidade dos solos, resultando em materiais mais duráveis e menos permeáveis.

A estabilização dos solos pode ser realizada de forma mecânica, química, elétrica e térmica. As estabilizações mecânica e química apresentam, geralmente, os resultados mais satisfatórios quando empregados nas estradas rurais e florestais. A estabilização mecânica introduz melhorias no comportamento dos solos através da realização de mudanças no seu sistema trifásico. A estabilização química produz alterações na massa do solo através da inclusão de aditivos, que conferem propriedades predeterminadas ao solo (MACHADO, 2013).

A escolha da melhor técnica de estabilização deve levar em consideração as propriedades do solo utilizado, além da disponibilidade de recursos técnicos e financeiros, para que sua aplicação resulte em ganhos satisfatórios de propriedades mecânicas dos solos.

1.2 Justificativa

Nas estradas não pavimentadas não existe a camada selante de mistura betuminosa ou concreto de cimento Portland, que confere maior resistência e durabilidade às mesmas. Desse modo, estas estradas sofrem em maior escala os danos causados pela erosão e pelo tráfego de veículos comerciais.

O fato de que a grande maioria das estradas brasileiras não é pavimentada incentiva a busca por melhorias da camada de rolamento das mesmas. As empresas e o setor privado buscam novas técnicas de estabilização que associem melhorias na resistência mecânica e nos custos de construção e manutenção.

A estabilização dos solos pode ocorrer de diversas formas, e a escolha da técnica mais adequada deve considerar as características do solo a ser utilizado e a finalidade para a qual as estradas serão construídas.

A estabilização química, utilizada no presente estudo pode promover melhorias nas características do solo e é uma alternativa ao ganho de resistência mecânica para a utilização como pavimento em estradas florestais.

1.3 Objetivos

O presente trabalho direcionou-se à avaliação do potencial do estabilizante enzimático EMC *Squared* na pavimentação de estradas não pavimentadas em dois solos residuais da Zona da Mata de Minas Gerais, com a avaliação do teor de solução enzimática e do tempo de cura nas misturas solo-EMC *Squared* e no solo através da resistência à compressão simples.

Os objetivos específicos foram estabelecidos, como segue:

- (i) Caracterização geotécnica das amostras de solos;
- (ii) Compactação do solo e das misturas solo-EMC *Squared* nas concentrações de 1, 2 e 3% de solução enzimática em relação à massa de solo seco, nas energias dos ensaios Proctor normal e intermediário;
- (iii) Análise da resistência à compressão simples do solo e das misturas solo-EMC *Squared* nas concentrações de 1, 2 e 3% de solução enzimática, nos tempos de cura de 3, 7 e 12 dias, nas energias dos ensaios de compactação Proctor normal e intermediário.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

O solo é um recurso natural renovável em velocidade reduzida, encontrado em diferentes posições na paisagem terrestre. Ele recebe definições diversas de acordo com a área de estudo que o utiliza.

A Ciência do Solo define o solo como corpo natural de recobrimento da superfície terrestre, constituído por minerais, materiais orgânicos e seres vivos que possui potencial para o desenvolvimento das raízes (EMBRAPA, 1999). Na Engenharia Civil, ele é definido como todo material da crosta terrestre escavável por meio de equipamentos que não necessitem da utilização de explosivos para sua extração (VARGAS, 1981). Já na Engenharia Rodoviária, o solo é considerado o material orgânico ou inorgânico, parcialmente cimentado ou não consolidado, encontrado na superfície terrestre (DNIT, 2006).

O solo origina-se da decomposição das rochas pelo processo de intemperismo. Ele é denominado residual quando permanece no mesmo local em que ocorreu seu processo de formação. O solo é denominado transportado ou sedimentar quando ocorre a deposição de partículas de rochas transportadas de seu local de origem por forças externas, como a água, o vento e a gravidade (VARGAS, 1981). A estrutura do solo é resultado da formação de agregados e é avaliada pela distribuição desses agregados em diferentes diâmetros de peneiras, quando em contato com a água (SILVA et al., 2014).

O comportamento geotécnico dos solos pode ser diferenciado ainda pelas regiões onde estão localizados. O estudo geotécnico dos solos tropicais não pode ser realizado através dos procedimentos tradicionais de classificação (NOGAMI; VILLIBOR, 1994), uma vez que a formação deste solo é associada ao processo intenso de intemperismo (KER, 1997), diferentemente dos solos de regiões temperadas, cuja caracterização é englobada por metodologias consolidadas e tradicionais. Os solos tropicais apresentam características obtidas através dos processos pedológicos e

geológicos típicos das regiões úmidas, e podem ser divididos em solos lateríticos e saprolíticos (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Os solos lateríticos são materiais altamente intemperizados, ocupam camadas mais superficiais e são característicos de áreas bem drenadas. A fração argila deste solo é constituída de argilominerais e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. São caracterizados pela presença de quartzo e outros minerais química e mecanicamente resistentes em sua composição. Os solos saprolíticos são originados da decomposição de uma rocha consolidada, com traços de cor e textura da rocha matriz. Sua composição mineralógica é variável e está altamente relacionada ao tipo de rocha matriz (LOVATO, 2004).

Os principais mecanismos de classificação dos solos são o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o *Transportation Research Board* (TRB), ambos desenvolvidos para solos de regiões temperadas. O sistema Miniatura Compactado Tropical (MCT) foi desenvolvido em 1981 por Nogami e Villibor com o objetivo de classificar adequadamente os solos tropicais, que, quando classificados pelas demais metodologias, não apresentavam desempenho satisfatório no campo.

2.2 Estradas não pavimentadas

A descoberta e o uso da roda foram, indiscutivelmente, grandes passos para a construção e a melhoria das estradas. Ao longo da história, os registros mostram sua utilização por volta de 3000 a.C., com a construção e o uso das estradas de terra na Mesopotâmia. No Brasil, sua existência iniciou-se em 1524, com a descoberta de uma trilha indígena, chamada Peabiru, com mais de 1200 km de extensão (MACHADO, 2013).

As estradas atendem às necessidades do transporte de cargas e da circulação de pessoas, desempenhando importante papel nos âmbitos econômico e social. Essa demanda por vias de circulação impulsionou a adequação da sociedade na construção de estradas em maior quantidade, com maior nível de qualidade (ARRIVABENI, 2017).

No Brasil, o primeiro sistema de transporte a se destacar foi a navegação costeira, seguido pelo transporte ferroviário até o avanço do cenário da utilização das rodovias. O incentivo da indústria automobilística e as políticas de subsídios a partir de 1950 foram as principais causas deste desenvolvimento do transporte rodoviário (CNT, 2013). Além disso, o transporte rodoviário apresenta o menor custo de aquisição de frota, justificando seu desenvolvimento acelerado e seu consequente predomínio no Brasil.

A malha rodoviária do Brasil encontra-se em ampliação lenta e constante. Entretanto, a proporção de vias pavimentadas é muito inferior às vias não pavimentadas. Do total de 1.720.701 km de rodovias brasileiras, 1.507.248 km correspondem às estradas sem pavimento, e apenas 213.453 km correspondem a estradas pavimentadas. A proporção de 87,6% de estradas não pavimentadas traz grandes impactos na segurança e conforto dos condutores, além de ser grande influência no desgaste dos veículos, nas velocidades desenvolvidas e nos tempos de viagem (CNT, 2018). Diferentemente das pavimentadas, as estradas não pavimentadas estão em sua maioria sob a jurisdição dos governos municipais (CNT, 2016).

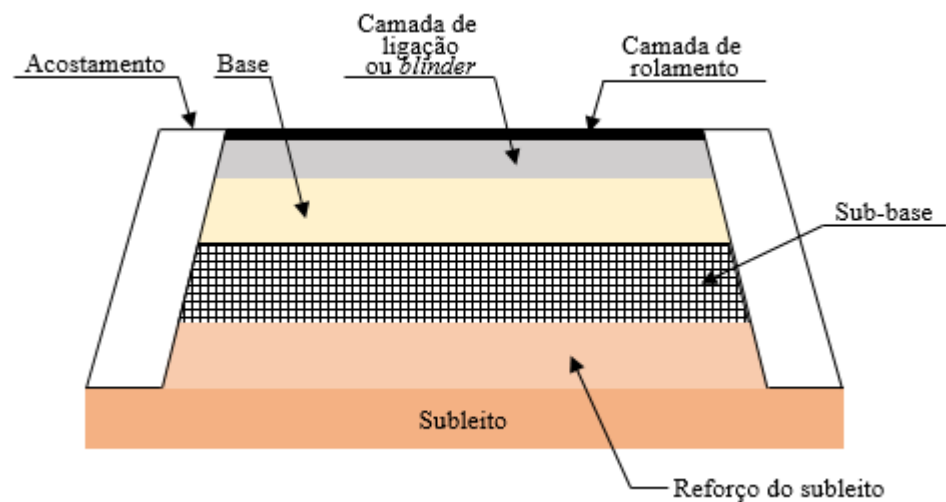
As estradas são classificadas, segundo o DNIT (2006), de acordo com seu tipo de superfície, podendo ser:

- Estrada pavimentada: é revestida com concreto betuminoso ou concreto de cimento Portland, permitindo o tráfego de veículos durante o ano inteiro. O pavimento é uma estrutura de camadas de materiais de diferentes resistências que, quando colocados em contato, resultam em um grau elevado de complexidade que atuam na resultante de cargas impostas pelo tráfego;
- Estrada com revestimento primário: apresenta uma camada de solo com características adequadas para oferecer uma superfície de rolamento que permita o tráfego de veículos durante o ano inteiro. São utilizados materiais selecionados, oriundos de jazidas, espalhados uniformemente sobre a terraplanagem concluída;
- Estrada sem revestimento: não possui nenhum tipo de revestimento, a camada de rolamento é composta apenas pelo solo de subleito onde a

estrada é construída e, portanto, apresenta limitações severas de tráfego de veículos durante a época chuvosa.

As estradas de pavimento flexível são constituídas de múltiplas camadas (Figura 1), construídas sobre uma superfície que previamente passou pela terraplanagem e se destina a resistir a esforços do tráfego e do clima em qualquer época do ano, garantindo conforto e segurança aos seus usuários (BERNUCCI et al., 2006).

Figura 1. Seção de pavimento flexível em corte longitudinal.



Fonte: Bernucci et al. (2006).

As estradas não pavimentadas não possuem essa camada asfáltica responsável por selar a estrutura da estrada e conferir maior resistência e durabilidade. Desta forma, o revestimento primário ou o solo de subleito precisam resistir diretamente aos esforços causados pelo tráfego de veículos. Além disso, a ausência da camada selante expõe o solo aos riscos de erosão. O tratamento das vias através de processos de estabilização torna-se justificável nesses casos, buscando-se minimizar os desgastes e aumentar a durabilidade dessas estradas. (ARRIVABENI, 2017).

2.3 Estabilização dos solos

Os materiais utilizados na pavimentação devem apresentar características mecânicas que possam resistir aos esforços cisalhantes causados pelas rodas dos veículos. Na natureza, materiais com a granulometria ideal, que apresentem menor volume possível de espaços vazios, são cada vez mais difíceis de se encontrar.

A falta de solos com as características geotécnicas exigidas pelos órgãos rodoviários brasileiros somada à necessidade da existência de estradas transitáveis durante todo o ano representam parte importante da problemática enfrentada pelo setor de transportes no Brasil. Estes fatos dão suporte à necessidade da busca de materiais e técnicas alternativas de construção de estradas (MACHADO et al., 2003).

A escassez de solos com as características mais adequadas à pavimentação impulsionou a busca por pesquisas que envolvem processos de estabilização, viabilizando a utilização de solos com características desfavoráveis a este fim (MACHADO, 2013).

A estabilização dos solos, tratando-se de estradas, busca conferir a capacidade de resistir às ações erosivas naturais e aos esforços causados pelo tráfego intenso de veículos (TRINDADE et al., 2005a). Ela também pode ser definida como qualquer modificação artificial relacionada ao solo, a fim de possibilitar seu emprego em pavimentos rodoviários, adquirindo características desejáveis de acordo com os parâmetros inerentes aos projetos de construção de estradas (MACHADO, 2013). Esse autor refere que, sob o prisma da energia aplicada no processo, existem quatro modalidades de estabilização de solos para pavimentos rodoviários: mecânica, elétrica, térmica e química. Comumente em estradas, empregam-se as estabilizações mecânica e química.

2.3.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica introduz melhorias no comportamento do solo através de modificações no seu sistema trifásico. Ela pode ser feita pelo rearranjo de

partículas através da compactação ou pela adição ou retirada de partículas através da correção granulométrica (MACHADO, 2013).

Na estabilização mecânica, o arranjo entre as partículas do solo e sua granulometria são alterados de modo que o ar é expulso dos espaços vazios do solo, que tem sua estrutura reorganizada (GONDIM, 2008).

A compactação, comumente empregada neste método de estabilização, aumenta a resistência ao cisalhamento, reduz a compressibilidade e a permeabilidade, e aumenta a resistência à erosão do solo. Essas alterações ocorrem pela expulsão do ar dos poros em um processo artificial de curta duração (TRINDADE et al., 2008). Entretanto, a compactação unicamente não estabelece o processo de estabilização. Ela é associada a outros métodos de forma complementar.

A estabilização granulométrica consiste na alteração das propriedades do solo a partir da adição ou remoção de partículas do mesmo, obtendo material de maior estabilidade em relação ao de origem. A distribuição granulométrica é obtida pela determinação dos tamanhos das partículas e suas proporções de ocorrência no solo. A utilização de solos como base granular para pavimentação deve seguir normas específicas do DNIT (2006).

2.3.2 Estabilização elétrica

Nesta forma de estabilização, ocorre a passagem de corrente elétrica pelo solo. O adensamento de solos arenosos ocorre por descargas sucessivas de alta tensão, e de solos argilosos ocorre por regime contínuo de baixa tensão. Este método é pouco desenvolvido na literatura e baseia-se em fenômenos de eletrosmose, eletrofosforese e consolidação eletroquímica, todos de baixa aplicação em pavimentação rodoviária (MACHADO, 2013).

2.3.3 Estabilização térmica

Este método de estabilização pode ocorrer por congelamento, aquecimento e termoosmose.

A estabilização por congelamento altera a textura do solo, alcançando melhorias em seu comportamento, ainda que temporárias. A estabilização por aquecimento promove o rearranjo da rede cristalina dos minerais constituintes do solo, e a estabilização por termoosmose promove a difusão de um fluido no meio poroso do solo através do gradiente de temperatura (MACHADO, 2013).

2.3.4 Estabilização química

A estabilização química remonta às origens das estradas, na Roma antiga, e ganhou cenário durante a Segunda Guerra Mundial, em que as pesquisas de estabilização dos solos foram incentivadas de forma a suprir as necessidades militares e civis (MACHADO, 2013).

A estabilização química pode ser definida como qualquer procedimento em que um material químico, cimentante ou não, é adicionado ao solo com o objetivo de gerar melhorias em suas propriedades do ponto de vista da engenharia (PATRÍCIO, 2015).

Dentre as formas de ação da estabilização química, Lima et al. (2003) citam quatro mecanismos diversos: (i) a substituição de moléculas de água e cátions adsorvidos por cátions hidro-repelentes; (ii) o estabelecimento de ligações reforçadas entre agregados de partículas pela adição de ligantes; (iii) a floculação e (iv) a dispersão.

Lambe e Michaels (1954) *apud* Emmert (2010) citam três mecanismos essenciais para que ocorra a modificação das propriedades do solo pela utilização de estabilizantes químicos: (i) a retirada de água adsorvida e a consequente eliminação da carga superficial dos solos, tornando suas partículas hidrofóbicas. Estes compostos são denominados agentes impermeabilizantes; (ii) o aumento da eletronegatividade da superfície da partícula ou da espessura da membrana aquosa, potencializando a repulsão entre partículas. Esses compostos são denominados agentes dispersantes; (iii)

a eliminação da repulsão eletrostática, facilitando o processo de coesão entre as partículas. Esses compostos são denominados agentes agregantes ou floculantes.

A estabilização química tem sido muito empregada na construção de estradas florestais e vicinais, com a finalidade de minimizar a utilização de recursos de jazidas. Esta minimização reduz consideravelmente custos de transporte e impactos ambientais gerados na exploração destes materiais (TRINDADE et al., 2005b).

Atualmente, existe uma grande diversidade de aditivos químicos destinados à estabilização de solos. Eles são compreendidos desde os produtos tradicionais de estabilização, como cal e cimento, até os produtos não tradicionais, que englobam os produtos patenteados desenvolvidos exclusivamente para este fim e os resíduos industriais diversos.

Os estabilizantes químicos tradicionais são o cimento, a cal e as misturas betuminosas. Esta categoria de estabilizantes é frequentemente estudada em laboratório e em campo.

A estabilização solo-cimento conjuga solo, cimento e água em proporções determinadas em laboratório. Pequenas quantidades de cimento (entre 1 e 2%) já são suficientes para reduzir a expansibilidade do solo, aumentar sua capacidade de suporte e torna-lo mais trabalhável.

A estabilização solo-cal, por exemplo, reduz consideravelmente os fenômenos de expansão e contração, e aumenta a resistência mecânica após a compactação e os períodos de cura adequados. Essa forma de estabilização também aumenta a durabilidade do material quanto mais se aumenta o tempo de cura.

A mistura solo-cal-cimento também é utilizada satisfatoriamente na estabilização de solos para fins de pavimentação, sendo que a estabilização solo-betume é satisfatória para solos granulares, granulares finos, areias e cascalhos, promovendo aglutinação e aumentando a cimentação. Em solos argilosos, o betume bloqueia os espaços vazios causando a impermeabilização sem comprometer a compactação e o teor de umidade (PEREIRA, 2005).

Os estabilizantes não tradicionais de origem industrial são normalmente de baixo custo e resultantes de processamentos industriais. São, geralmente, resíduos

industriais que, quando incorporados ao solo, trazem melhorias em suas propriedades físicas e mecânicas. São exemplos de coprodutos não-tradicionais: licor negro Kraft, lignina, alcatrão de madeira, escória e grits (MACHADO, 2013).

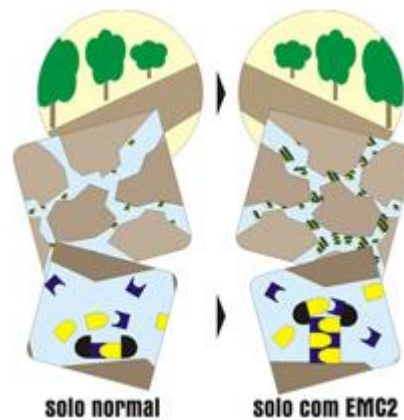
Os estabilizantes não-tradicionais comerciais existem no mercado em grande diversidade. Alguns produzidos no Brasil e outros importados, buscam estratégias específicas para a promoção de seus benefícios. São produtos patenteados cuja ação é descrita por seus fabricantes e pelos ensaios realizados em laboratório e em campo. São exemplos de produtos não-tradicionais comerciais: Con-Aid, Ionic Soil Stabilizer (ISS 2500), Permazyme, Consolid, DS 328, Dynacal, Enzymatic, Terra fix, RBI Grade 81 e EMC *Squared* (MACHADO, 2013).

2.3.4.1 Estabilização solo-EMC *Squared*

O EMC *Squared*, cuja sigla origina-se do termo *Earth Materials Catalyst*, é constituído por enzimas obtidas por processos de fermentação que catalisam e aceleram reações químicas. Produzido pela Soil Stabilization Products TM Co. (SSPCo) da Califórnia, é distribuído no Brasil pela Base Forte.

Segundo o fabricante, o produto apresenta-se na forma de líquido superconcentrado, formulado para melhorar as propriedades dos materiais terrosos, melhorando sua cimentação e conferindo maior estabilidade e capacidade de suportar maiores cargas. As enzimas presentes em sua composição, quando incorporadas ao solo em contato com a água, catalisam reações que geram produtos químicos que microencapsulam e estabilizam as partículas minerais (Figura 2).

Figura 2. Ação do EMC *Squared* no solo.



Fonte: Base Forte (2018).

O desenvolvimento do produto justifica-se na escassez de suprimentos agregados, no aumento das distâncias e nos custos de transporte destes materiais. Além disso, a problemática do transporte em longas distâncias e os impactos ambientais de qualidade do ar impulsionaram o desenvolvimento do EMC *Squared* (SSPCo, 2018).

Ainda segundo a SSPCo (2018), a utilização do sistema EMC *Squared* é mais econômica que os métodos tradicionais de estabilização com cimento, cal ou betume. Segundo essa publicação, as aplicações do produto também se tornam mais econômicas em relação aos citados métodos de estabilização, uma vez que o EMC *Squared* apresenta-se em forma de líquido superconcentrado, de fácil transporte e aplicação. Como principais características do produto, segundo o fabricante, seguem-se:

- Boa aceitabilidade ambiental, por não ser perigoso, corrosivo e inflamável. Pode, inclusive, ser utilizado em áreas naturais e protegidas;
- Facilidade de manuseio, reduzindo custos de frete e de equipamentos de proteção individual;
- Redução de custos de construção e manutenção de estradas por substituir a ação de materiais agregados de alto custo e que requerem grande número de viagens de caminhão para seu transporte;

- Sua utilização pode reduzir a poeira nos casos de solos de partículas finas.

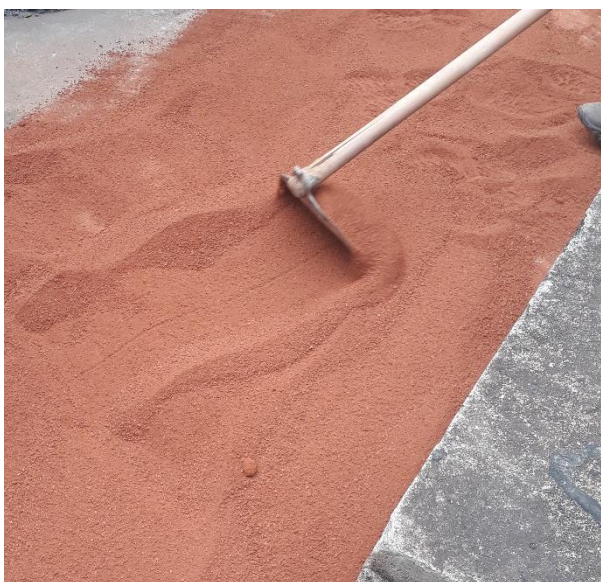
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

Os dois solos estudados nesta pesquisa foram coletados na Universidade Federal de Viçosa. O solo 1 (Figura 3), solo residual maduro de aspecto argiloso, foi coletado na localidade denominada “Cavalos”, cujas coordenadas aproximadas segundo o software *Google Earth* são 20°45'08.77''S e 42°51'29.73''O. O solo 2 (Figura 4), solo residual jovem de aspecto arenoso, foi coletado na localidade denominada “Vila Secundina”, cujas coordenadas aproximadas são 20°45'48.09''S e 42°51'29.71''O.

Figura 3. Solo 1, coletado na localidade “Cavalos”.



Fonte: Fotografia da autora.

Figura 4. Solo 2, coletado na localidade “Vila Secundina”.



Fonte: Fotografia da autora.

3.1.2 EMC *Squared*

O produto utilizado neste trabalho foi o EMC *Squared*. Este constitui uma solução enzimática produzida pela *Soil Stabilization Products TM Co.* da Califórnia, apresenta-se como composto orgânico superconcentrado e é composto por enzimas advindas de processos de fermentação. Segundo o fabricante, o produto atua no solo através da microencapsulação de suas partículas minerais e o mesmo advoga que a sua utilização em estradas não-pavimentadas reduz os desgastes causados pela perda de material por abrasão e poeira, aumenta a capacidade de carga do solo e diminui os afundamentos das trilhas de roda e corrugações. O fabricante assume ainda que sua aplicação é segura e ambientalmente correta, dispensando cuidados especiais em seu manuseio (BASE FORTE, 2018).

3.2 Métodos

3.2.1 Coleta dos solos em campo

Para a execução deste estudo, os solos foram coletados manualmente em seus locais de origem e armazenados em embalagens plásticas. Posteriormente, foram transportados para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC), no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais.

3.2.2 Preparação das amostras de solo

Os ensaios de laboratório dos solos em análise foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UFV.

A preparação dos solos ocorreu através da secagem dos mesmos ao ar, destorroamento com soquete de madeira, homogeneização com peneira nº 4 (4,8 mm) e armazenamento em embalagens plásticas devidamente identificadas. A umidade higroscópica dos solos foi determinada de acordo com a norma estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6457:2016 (ABNT, 2016a).

3.2.3. Ensaios de caracterização dos solos

Os ensaios de caracterização do solo seguiram as normas da ABNT e foram desenvolvidos para alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

3.2.3.1 Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica determina as proporções percentuais de areia, silte e argila dos solos utilizados. Com os resultados deste ensaio, é construída a curva granulométrica de cada solo, que auxilia na caracterização geotécnica dos

mesmos. Este ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7181:2016 (ABNT, 2016d).

3.2.3.2 Massa específica dos sólidos

A determinação da massa específica dos solos resulta na densidade real dos sólidos presentes na amostra. O ensaio é realizado com os sólidos passantes na peneira de 2 mm de abertura. Este ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 6458:2017 (ABNT, 2017).

3.2.3.3 Limite de Liquidez

O Limite de Liquidez (LL) representa o teor de umidade em que o solo, em seu estado plástico, perde a capacidade de fluidez. Este ensaio é realizado com a utilização do aparelho Casagrande, e o limite de liquidez propriamente dito é obtido pela umidade correspondente à 25 golpes no aparelho. Este ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 6459:2016 (ABNT, 2016b).

3.2.3.4 Limite de Plasticidade

O Limite de Plasticidade (LP) representa o teor de umidade necessário para que o solo, em seu estado semissólido, possa ser rolado sobre uma placa de vidro formando um cilindro de 3 mm de diâmetro até que forme trincas ou se rompa. Este ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7180:2016 (ABNT, 2016c). O Índice de Plasticidade é obtido através da diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade.

3.2.4 Classificação dos solos

Os sistemas de classificação dos solos fornecem as características gerais dos solos e procuram antever o comportamento dos mesmos em relação às solicitações às

quais serão submetidos (EMMERT e PEREIRA, 2016). As classificações TRB (*Transportation Research Board Classification*) (DNIT, 2006) e MCT (Miniatura Compactado Tropical) (NOGAMI; VILLIBOR, 1995) são utilizadas na classificação dos solos para pavimentação rodoviária.

3.2.4.1 *Transportation Research Board (TRB)*

Essa classificação reúne os solos em grupos e subgrupos em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. O grupo do solo é determinado por processo de eliminação da esquerda para a direita no quadro de classificação (Tabela 1). O primeiro grupo em que os valores do solo coincidir, a partir da esquerda, é a classificação correta deste solo.

Tabela 1. Classificação dos solos: *Transportation Research Board*.

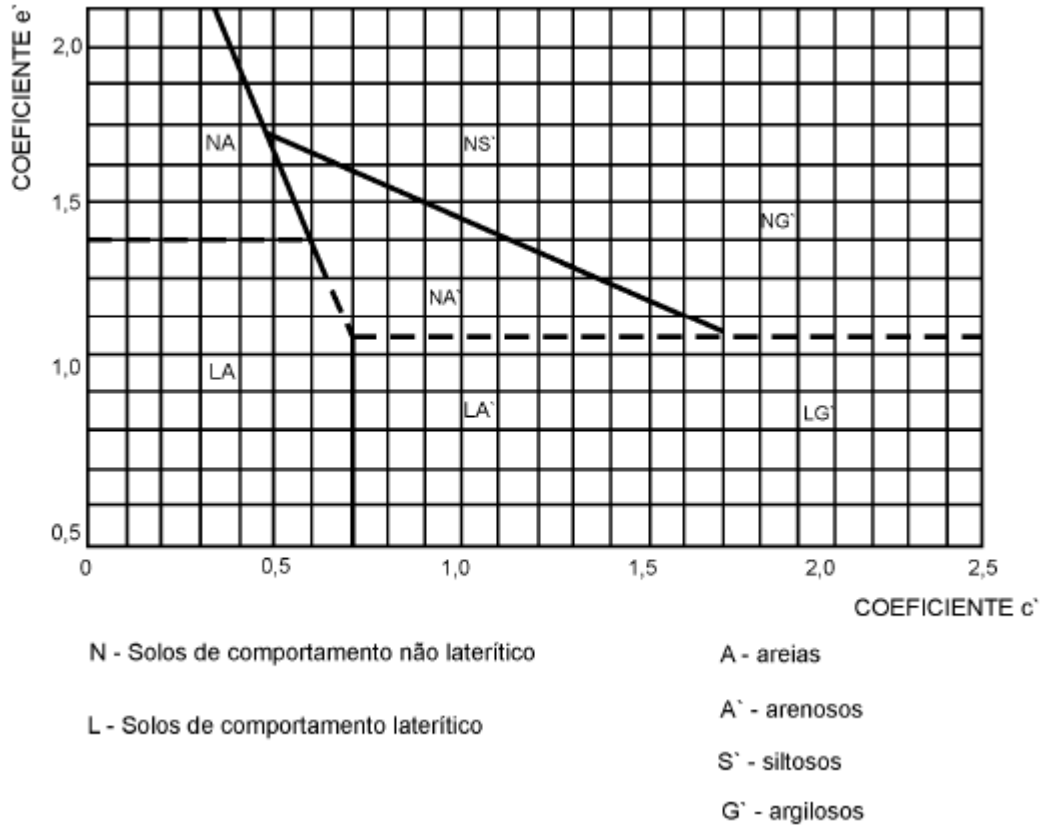
CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N° 200							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passando na peneira											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 máx.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira N° 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006).

3.2.4.2 Miniatura Compactado Tropical (MCT)

Desenvolvido com a finalidade de caracterizar melhor os solos tropicais, essa metodologia avalia as propriedades dos solos segundo sua capacidade de suporte, coeficiente de penetração d'água, coesão, contração, curvas de compactação, expansão e permeabilidade. Essa classificação permite retratar o solo quanto ao seu comportamento nas classes laterítico (L) ou saprolítico ou não laterítico (NL) e em sete subclasses correspondentes (Figura 5). (DNIT, 2006).

Figura 5. Ábaco para classificação MCT.



Fonte: DNIT (2006).

3.2.5 Preparação das misturas solo-EMC *Squared*

Inicialmente, foi preparada a solução enzimática a 5% de concentração, conforme recomendação do fabricante. A solução foi preparada utilizando-se 50 ml da solução concentrada de EMC *Squared* e 950 ml de água destilada (Figura 6). Esta solução foi utilizada em todos os ensaios de solo-EMC *Squared*.

Figura 6. Preparação da solução do EMC *Squared* a 5%.



Fonte: Fotografia da autora.

Para os ensaios de compactação e resistência à compressão simples, foi calculada a massa seca dos solos e, em seguida, o volume de água necessário para realização da compactação. O volume de solução a ser incorporado no solo foi calculado com base na massa úmida de solo utilizada em cada ensaio, seguindo o manual de recomendação do fabricante. O volume de solução calculado foi, então, descontado do volume de água necessário para a realização dos ensaios.

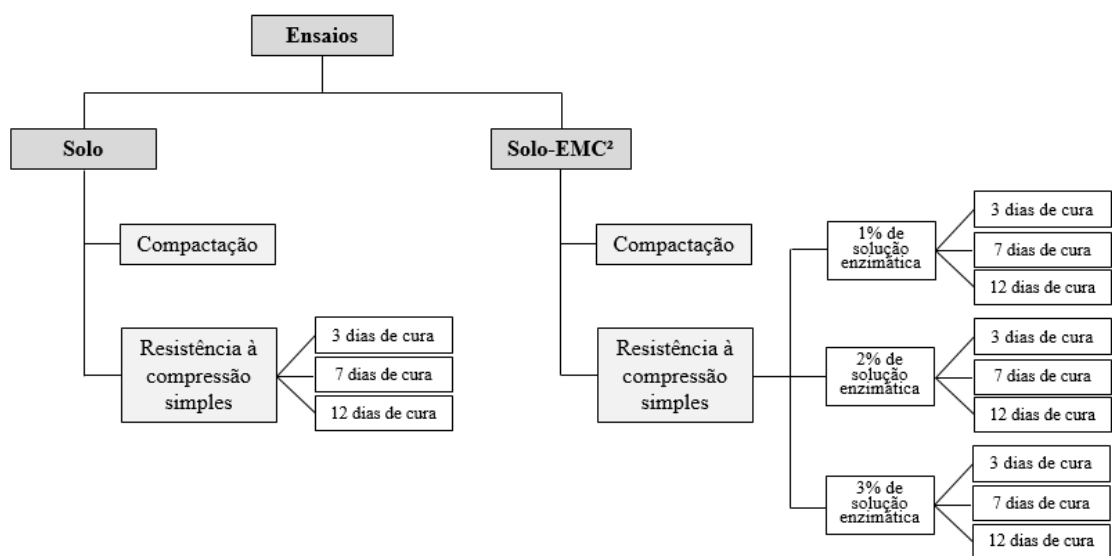
As dosagens de soluções a serem incorporadas nos solos foram determinadas em três proporções definidas para este estudo: 1%, 2% e 3% de solução enzimática em relação à massa seca de solo, sendo 2% a proporção de solução enzimática recomendada pelo fabricante.

Segundo o manual fornecido pelo fabricante, o EMC *Squared* necessita de tempo de cura para que ocorra a ação enzimática. Para o ensaio de resistência à compressão simples, foram testados, além do tempo de cura ao ar livre recomendado pelo fabricante de 7 dias, outros dois tempos de cura: 3 dias e 12 dias. A adoção de

tempos de cura diferentes da recomendação do fabricante permite avaliar a influência deste fator no ganho de resistência do solo.

A Figura 7 traz o fluxograma do programa de ensaios de compactação e resistência à compressão simples.

Figura 7. Fluxograma dos ensaios de compactação e resistência à compressão simples.



Fonte: Ilustração da autora.

3.2.6 Ensaio de compactação

A compactação reduz índices de vazios do solo através da lubrificação das partículas devido à adição de água. O ensaio de compactação estabelece que a energia de compactação e o teor de umidade influenciam na massa específica do solo (SILVA et al., 2016).

O objetivo dos ensaios de compactação é a determinação do teor de umidade ótimo (w_{ot}) e do peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) em cada energia de compactação utilizada.

A compactação foi realizada com o solo e as misturas de solo-EMC *Squared* nas concentrações de solução de 1, 2 e 3%. Os ensaios foram realizados segundo a norma ABNT NBR 7182/2016 (ABNT, 2016e).

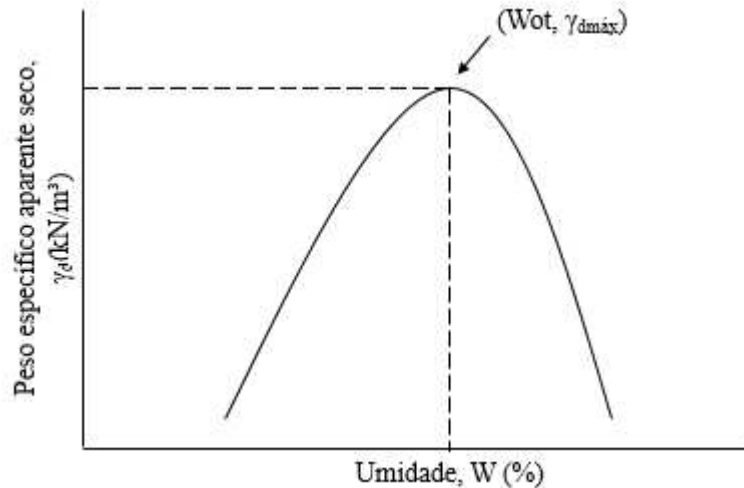
O ensaio de compactação foi feito com os solos previamente homogeneizados. Os teores de água e solução enzimática foram calculados considerando a umidade higroscópica e a massa de solo seco anteriormente medidos. Para cada tratamento, os solos foram separados em cinco quantidades iguais, e cada uma dessas partes representa um dos cinco pontos da curva de compactação (Figura 8). Refere-se que esta curva é composta por dois pontos no ramo seco, um ponto próximo à umidade ótima e dois pontos no ramo úmido (Figura 9) (TRINDADE et al., 2008). Para a construção desta curva, aumentou-se a umidade entre cada ponto de 2% em 2%, para que o primeiro ponto ficasse aproximadamente com 4% abaixo da umidade ótima e os três últimos pontos na proximidade e após o teor ótimo de umidade da curva de compactação.

Figura 8. Corpos de prova correspondentes à uma curva de compactação.



Fonte: Fotografia da autora.

Figura 9. Curva de compactação de um solo.



Fonte: Trindade et al. (2008).

A incorporação da solução enzimática no solo foi realizada imediatamente antes da realização dos ensaios de compactação, para que a ação do tempo de cura da enzima fosse minimizada e as condições de campo fossem reproduzidas.

Neste ensaio as energias utilizadas foram dos ensaios de compactação Proctor normal e intermediário e o cilindro utilizado possui 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura. Na energia normal, foi utilizado o soquete de 2,5 kg e foram aplicados 26 golpes por camada, em três camadas de solo. Na energia intermediária, foi utilizado o soquete de 4,54 kg e foram aplicados 21 golpes por camada, em três camadas de solo. Foram retiradas três cápsulas de solo de cada compactação realizada para a determinação da umidade dos mesmos.

3.5.7. Ensaio de resistência à compressão simples

Os corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão simples foram moldados em cilindro de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, segundo a norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994). Os corpos de prova foram moldados na umidade ótima e

peso específico aparente seco máximo determinados no ensaio de compactação, nas energias normal e intermediária. Foram feitas três repetições para cada um dos tempos de cura e concentrações de EMC *Squared* definidos neste estudo.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos passaram pelo processo de cura ao ar livre (Figura 10), que ocorreu no Laboratório de Engenharia Civil, em local coberto e arejado, obedecendo-se à metodologia recomendada pelo fabricante (BASE FORTE, 2018). Os corpos de prova de solo e de solo-EMC *Squared* foram identificados e passaram pelo processo de cura durante 3, 7 e 12 dias.

Figura 10. Cura ao ar livre dos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão simples.



Fonte: Fotografia da autora.

Os corpos de prova foram levados à prensa para a compressão simples após os tempos de cura predefinidos neste estudo (Figura 11). A velocidade de ruptura utilizada foi de 1 mm/min. À medida em que ocorria o rompimento dos corpos de prova (Figura 12), eram obtidos os valores da pressão aplicados sobre os mesmos e o deslocamento. A resistência à compressão simples foi obtida através da média dos valores dos três corpos de prova de cada tratamento.

Figura 11. Corpos de prova submetidos à prensa no ensaio de RCS.



Fonte: Fotografia da autora.

Figura 12. Corpos de prova após o rompimento pela prensa.



Fonte: Fotografia da autora.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado segundo a norma ABNT NBR 12770/1992 (ABNT, 1992).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização geotécnica dos solos

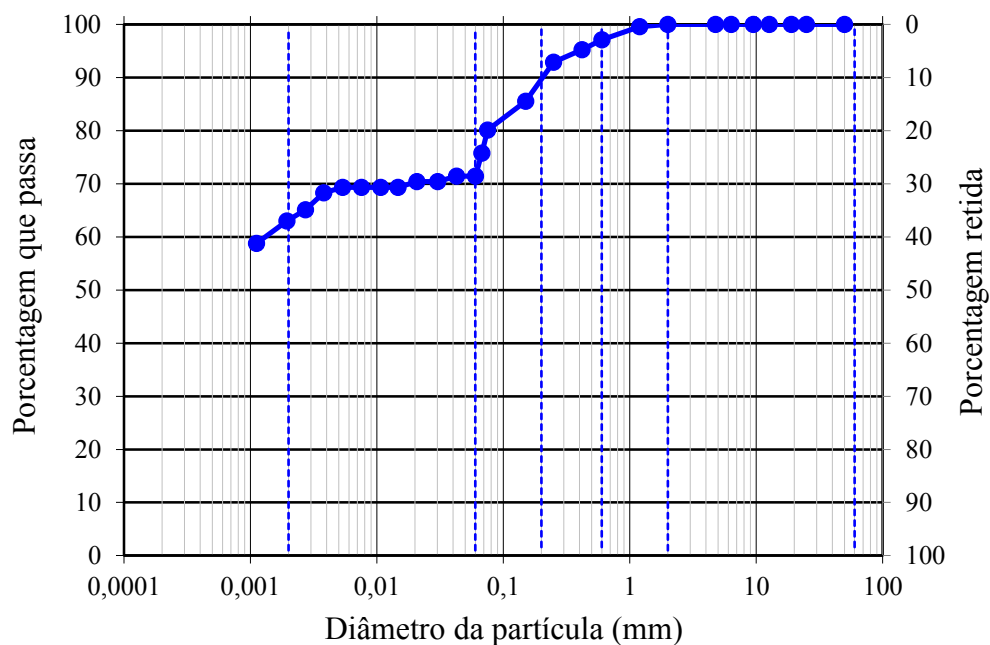
A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de granulometria dos dois solos em estudo. As Figuras 13 e 14 mostram as curvas granulométricas dos solos 1 e 2, respectivamente, segundo a escala granulométrica adotada pela ABNT (1995).

Tabela 2. Granulometria dos solos 1 e 2 em seu estado natural.

Solo	Composição Granulométrica (%)		
	Argila	Silte	Areia
1	63	8,4	28,6
2	5,5	19,1	75,4

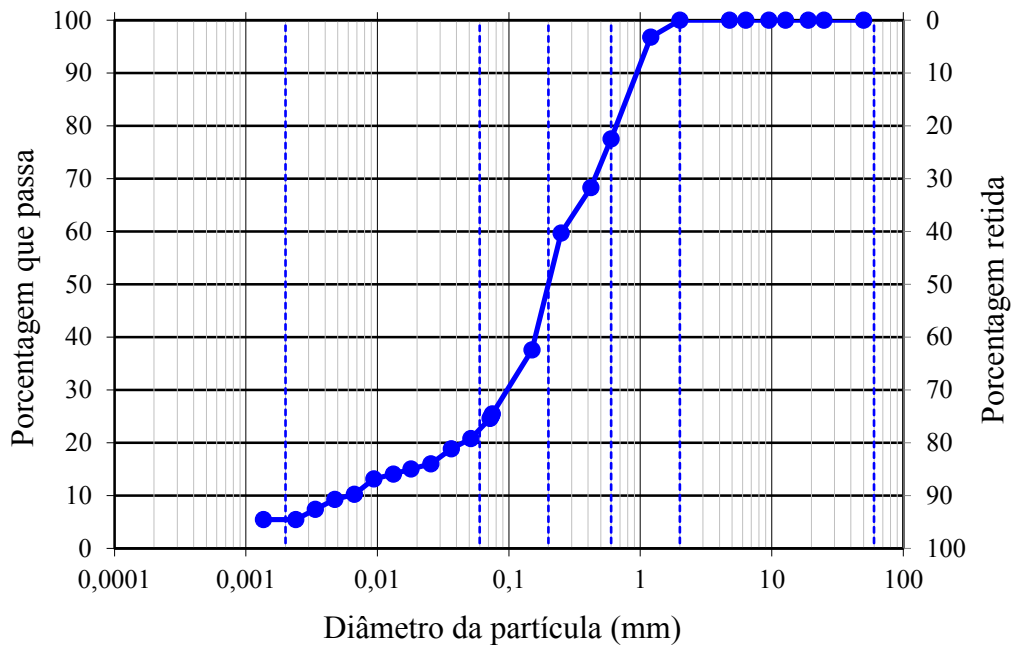
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 13. Curva granulométrica do solo 1.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 14. Curva granulométrica do solo 2.



Fonte: Elaborada pela autora.

O solo 1 apresentou grande quantidade de finos, uma vez que a argila e o silte somaram 71,4% da sua constituição granulométrica. A parte mais fina, em maior quantidade, reforça a constituição argilosa do solo, classificado como argilo-areno-siltoso.

O solo 2 apresentou-se majoritariamente composto por areia, sendo classificado geotecnicamente como areno-silto-argiloso.

Os resultados dos ensaios de limites de consistência (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade) e de massa específica dos sólidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Limites de Consistência e massa específica dos sólidos dos Solos 1 e 2 em seu estado natural.

Solo	Limite de Liquidez – LL (%)	Limite de Plasticidade – LP (%)	Índice de Plasticidade – IP (IP = LL-LP)	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)
1	74,2	36,67	37,53	2,750
2	25,35	17,52	7,83	2,629

Fonte: Elaborada pela autora.

Os Limites de Liquidez e Plasticidade dependem fundamentalmente do teor e do tipo de argila presente no material. De maneira geral, solos com altos valores de liquidez estão associados a materiais expansivos, que apresentam alta suscetibilidade ao aumento de volume (VARGAS, 1981).

A classificação dos solos foi realizada com base nas informações obtidas nos ensaios de granulometria, limites de consistência e propriedades plásticas dos solos em estudo. A Tabela 4 apresenta os resultados comparativos das classificações dos solos segundo as metodologias TRB e MCT.

Tabela 4. Classificação TRB e MCT dos solos estudados.

Solo	Classificação	
	TRB	MCT
1	A-7-5 (20)	LG'
2	A-2-4 (0)	NA'

Fonte: Elaborada pela autora.

O solo 1 foi classificado através da metodologia TRB como pertencente ao grupo A-7-5, que corresponde a materiais sujeitos a elevadas mudanças de volume devido à sua plasticidade acentuada. O solo 2 foi classificado através desta mesma metodologia como pertencente ao grupo A-2-4, que engloba os materiais como pedregulho e areia grossa. Este grupo apresenta teor de silte mais elevado que os primeiros grupos da classificação TRB (DNIT, 2006).

De acordo com a classificação MCT, o solo 1 foi classificado como LG', que é o grupo formado por argilas e argilas arenosas constituintes do horizonte B dos solos podologicamente conhecidos como latossolos e argissolos. Segundo esta metodologia, o solo 2 foi classificado como NA', que é o grupo das areias, siltes e misturas entre esses dois constituintes em que os grãos são constituídos por quartzo e mica, essencialmente. Este grupo possui baixos teores de finos (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

4.2 Compactação do solo e das misturas solo-EMC *Squared*

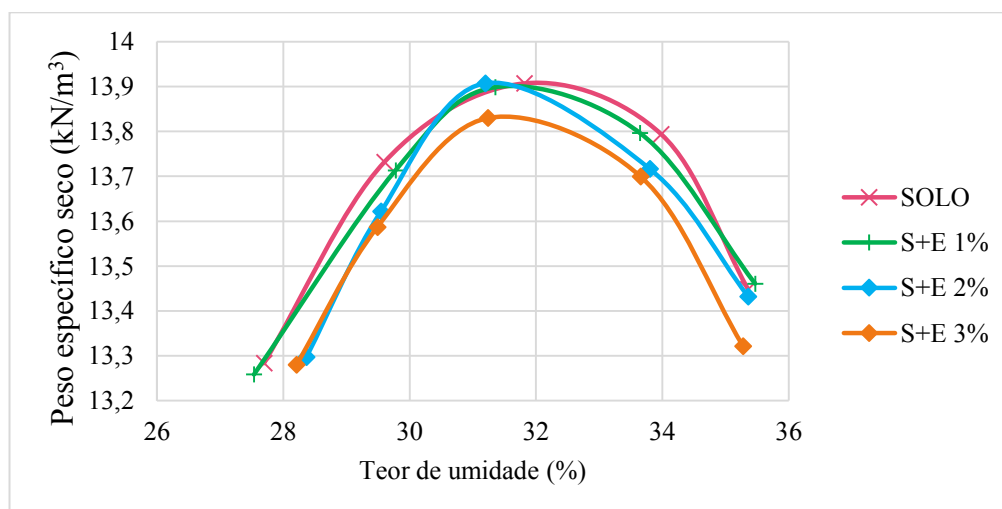
Os teores ótimos de umidade ótimos (w_{ot}) e os pesos específicos aparentes secos máximos (γ_{dmax}) determinados pelo ensaio de compactação do solo e solo-EMC *Squared*, nas energias normal e intermediária, estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5. Teor de umidade ótimo e peso específico aparente seco máximo dos solos e misturas solo-EMC *Squared* nas energias normal e intermediária.

Solo	Energia de compactação	Concentração de solução enzimática no solo	γ_{dmax} (kN/m ³)	W _{ot}
1	Normal	solo	13,91	31,81
		1%	13,90	31,35
		2%	13,91	31,20
		3%	13,83	31,24
	Intermediária	solo	14,70	29,82
		1%	14,73	29,49
		2%	14,79	29,48
		3%	14,73	29,49
2	Normal	solo	16,94	16,42
		1%	16,81	15,71
		2%	16,88	15,46
		3%	16,84	15,76
	Intermediária	solo	17,95	13,47
		1%	17,95	13,58
		2%	17,52	13,57
		3%	17,88	13,34

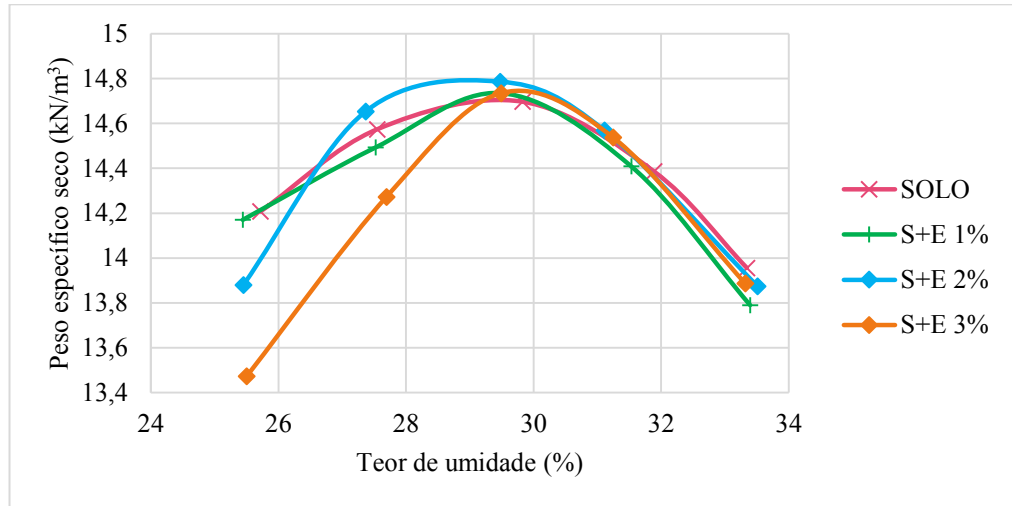
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 15. Compactação do solo 1 (SOLO) e das misturas solo-EMC *Squared* (S+E) na energia normal.



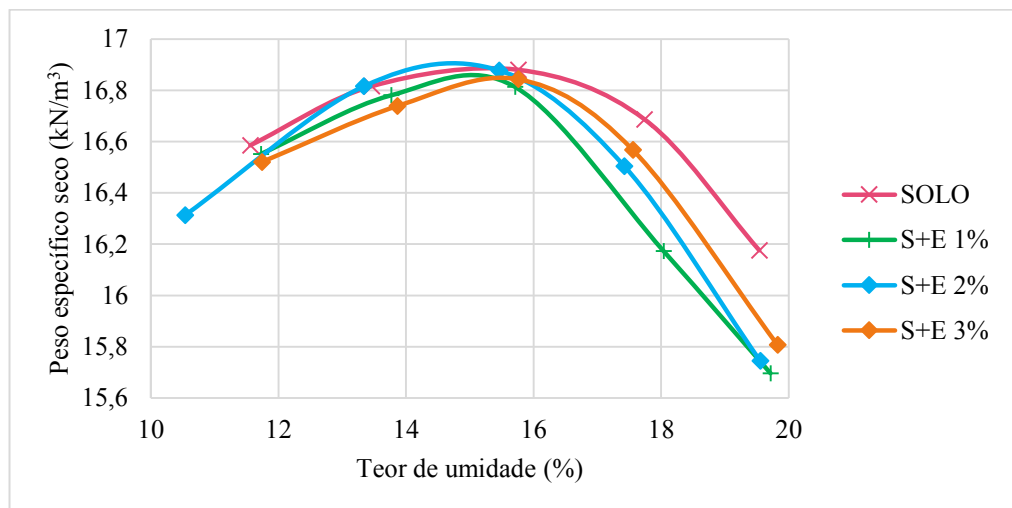
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 16. Compactação do solo 1 (SOLO) e das misturas solo-EMC *Squared* (S+E) na energia intermediária.



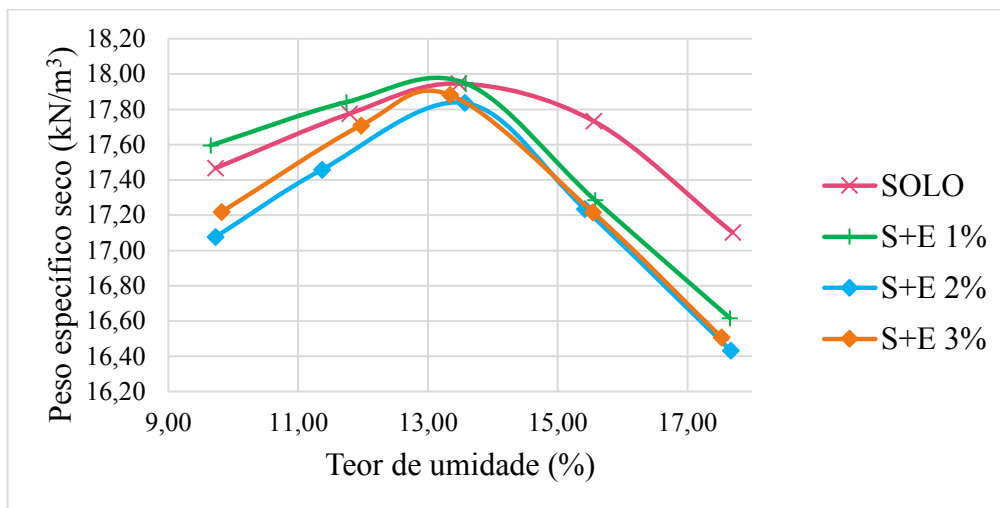
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 17. Compactação do solo 2 (SOLO) e das misturas solo-EMC *Squared* (S+E) na energia normal.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 18. Compactação do solo 2 (SOLO) e das misturas solo-EMC *Squared* (S+E) na energia intermediária.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para os dois solos estudados e as duas energias de compactação empregadas, tanto o solo quanto as misturas solo-EMC *Squared* em 1, 2 e 3% de concentração apresentaram comportamento semelhante tanto nos ramos secos, nas umidades ótimas e nos ramos úmidos das curvas de compactação.

Nas figuras 15, 16, 17 e 18 pode-se observar discreto deslocamento do ponto de inflexão das curvas de compactação das misturas solo-EMC *Squared* para a esquerda no eixo das abcissas (teor de umidade). Isso mostra que a adição da solução enzimática ao solo e sua subsequente compactação, sem o processo de cura, não apresenta alterações significativas nos parâmetros de compactação dos solos.

4.3 Resistência à compressão simples

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples de cada solo estudado, nas energias normal e intermediária, nas concentrações de solução enzimática e nos tempos predefinidos na metodologia deste estudo estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6. Resistência à compressão simples (kPa) dos solos 1 e 2, nas energias normal e intermediária, nas concentrações de 0 (solo natural), 1, 2 e 3% de solução enzimática e nos tempos de cura de 3, 7 e 12 dias.

Energia de compactação	Concentração de solução enzimática no solo (%)	Tempo de cura (dias)	RCS (kPa)		
			Solo 1	Solo 2	
Normal	0	3	1485,9	103,2	
	0	7	1570,8	64,9	
	0	12	1196,2	54,9	
	1	3	1161,2	99,9	
	1	7	1476,7	134,9	
	1	12	1213,7	77,4	
	2	3	1800,5	89,9	
	2	7	1438,4	112,4	
	2	12	1438,4	92,4	
	3	3	1825,5	69,9	
	3	7	1405,9	106,5	
	3	12	1318,5	132,4	
	Intermediária	0	3	2082,7	188,1
		0	7	2354,9	187,3
		0	12	1904,5	124,9
1		3	2654,6	187,3	
1		7	2222,5	247,2	
1		12	2147,6	254,7	
2		3	1273,6	127,4	
2		7	1780,5	174,8	
2		12	2097,7	159,8	
3		3	1093,8	129,9	
3		7	2110,2	223,1	
3		12	2227,5	219,8	

Fonte: Elaborada pela autora.

O maior valor de resistência à compressão simples do solo 1, na energia normal, foi de 1825,5 kPa, obtido pela concentração de 3% de solução enzimática a 3 dias de cura. Para o mesmo solo e na energia intermediária, o maior valor encontrado foi de 2654,6 kPa, obtido pela concentração de 1% de solução enzimática para 3 dias de cura.

O maior valor de RCS do solo 2, na energia normal, foi de 134,9 kPa, obtido pela concentração de 1% de solução enzimática para 7 dias de cura. Para o mesmo solo e na energia intermediária, o maior valor encontrado foi de 254,7 kPa, para 12 dias de cura também obtido pela concentração de 1% de solução enzimática.

A avaliação da efetividade do produto EMC *Squared* é realizada observando-se o ganho de resistência à compressão dos solos com os teores de solução enzimática (1, 2 e 3%) em relação ao solo. É realizada a comparação da RCS de cada concentração de solução enzimática com a RCS do solo correspondente aos mesmos dias de cura da mistura solo-EMC *Squared*. Esta comparação é realizada individualmente para cada tipo de solo e energia de compactação utilizados neste trabalho. A Tabela 7 apresenta o ganho de RCS, em kPa e em %, dos dois solos utilizados neste estudo, nas energias de compactação normal e intermediária.

Tabela 7. Ganho de resistência à compressão simples dos solos 1 e 2, nas energias normal e intermediária, nas concentrações de solução enzimática de 1, 2 e 3% em relação ao solo natural.

Energia de compactação	Concentração de solução enzimática no solo (%)	Tempo de cura (dias)	Ganho RCS (kPa)		Ganho RCS (%)	
			Solo 1	Solo 2	Solo 1	Solo 2
Normal	1	3	-324,64	-3,35	-21,85	-3,24
		7	-94,05	69,92	-5,99	107,69
		12	17,48	22,48	1,46	40,91
	2	3	314,65	-13,34	21,18	-12,92
		7	-132,35	47,45	-8,43	73,08
		12	242,23	37,46	20,25	68,18
	3	3	339,63	-33,31	22,86	-32,27
		7	-164,82	41,60	-10,49	64,08
		12	122,36	77,41	10,23	140,91
Intermediária	1	3	571,87	-0,85	27,46	-0,45
		7	-132,35	59,93	-5,62	32,00
		12	243,08	129,86	12,76	104,00
	2	3	-809,11	-60,78	-38,85	-32,31
		7	-574,37	-12,49	-24,39	-6,67
		12	193,14	34,96	10,14	28,00
	3	3	-988,91	-58,29	-47,48	-30,98
		7	-244,73	35,81	-10,39	19,12
		12	322,99	94,90	16,96	76,00

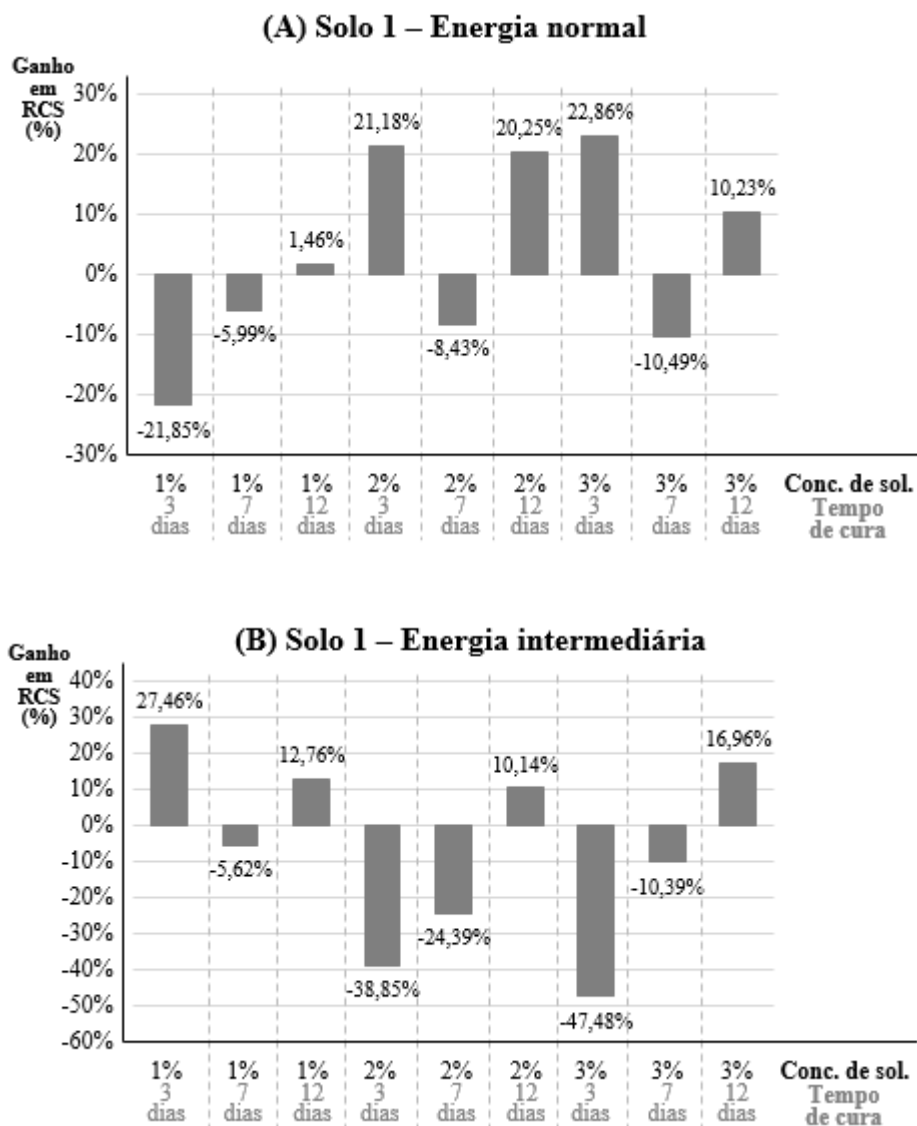
Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a Tabela 7, os valores negativos obtidos representam os tratamentos em que a adição da solução enzimática associada ao tempo de cura não promoveu maior resistência em relação ao solo em seu estado natural.

As figuras 19 e 20 apresenta o ganho percentual de resistência à compressão simples das misturas solo-EMC *Squared* em relação ao solo sem a presença da solução enzimática.

Figura 19. Ganho de RCS (%) do solo 1 nas energias normal (A) e intermediária (B).

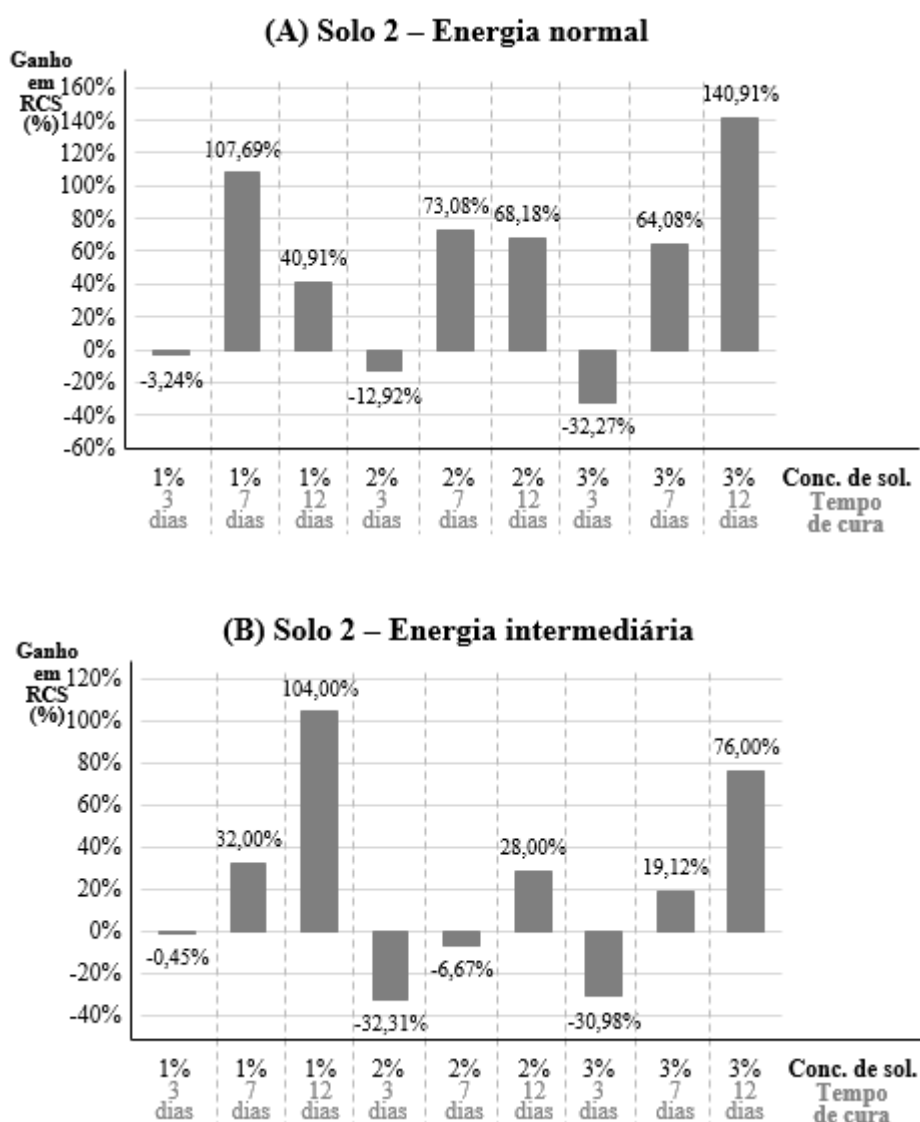
Ganhos percentuais de resistência à compressão simples das misturas solo-EMC *Squared* nas concentrações de 1, 2 e 3% nos tempos de cura de 3, 7 e 12 dias em relação ao solo sem a adição da solução enzimática. Figura representativa dos ganhos do solo 1 nas energias de compactação Proctor normal e intermediário.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 20. Ganho de RCS (%) do solo 2 nas energias normal (A) e intermediária (B).

Ganhos percentuais de resistência à compressão simples das misturas solo-EMC *Squared* nas concentrações de 1, 2 e 3% nos tempos de cura de 3, 7 e 12 dias em relação ao solo sem a adição da solução enzimática. Figura representativa dos ganhos do solo 2 nas energias de compactação Proctor normal e intermediário.



Fonte: Elaborada pela autora.

O solo 1 apresentou resposta positiva no ganho de resistência à compressão simples, na energia de compactação normal (Figura 19-A), na concentração de 1% no período de cura de 12 dias. Ao se aumentar a concentração de solução enzimática para

2%, valor recomendado pelo fabricante, os períodos de cura com resposta positiva foram de 3 e 12 dias. Na concentração máxima de solução utilizada neste trabalho, houve ganho de RCS nos períodos de cura de 3 e 12 dias. O ganho de RCS foi mais representativo (339,6 KPa ou 22,86%) utilizando-se a concentração de 3% de solução, em 3 dias de cura.

Na energia de compactação intermediária, o solo 1 (Figura 19-B) apresentou resposta positiva na concentração de 1% para os períodos de cura de 3 e 12 dias; 2% e 3% para o período de cura de 12 dias. O ganho de RCS foi mais representativo (571,91 KPa ou 27,46%) utilizando-se a menor concentração de solução enzimática no solo, em 3 dias de cura.

O solo 2 apresentou resposta positiva no ganho de resistência à compressão simples, na energia de compactação normal (Figura 20-A), nas concentrações de 1, 2 e 3% de solução enzimática no solo nos períodos de cura de 7 e 12 dias. O período de cura de 3 dias não foi suficiente para promover aumento da RCS em relação ao solo. O ganho de RCS foi mais representativo (77,41 KPa ou 140,91%) utilizando-se a concentração de 3% de solução, em 12 dias de cura.

A Figura 20-B apresenta a avaliação do solo 2 na energia intermediária, e pode-se observar que houve ganho de RCS na concentração de solução enzimática de 1% com 7 e 12 dias de cura, de 2% com 12 dias de cura e de 3% com 7 e 12 dias de cura. O emprego da solução enzimática no período de cura de 3 dias também não foi suficiente para promover aumento da RCS em relação ao solo. O ganho de RCS foi mais representativo (129,9 KPa ou 104%) utilizando-se a concentração de 1% de solução, em 12 dias de cura, sendo significativamente superior àquele relativo ao teor de 2% recomendado pelo fabricante.

De maneira geral, a utilização do produto EMC *Squared* apresentou mais respostas positivas de ganho de RCS no solo 2 em relação ao solo 1, tanto na energia de compactação normal quanto na intermediária.

Estudos realizados por Brazetti, Casagrande e Silva (2013) apontam que o tempo de ação necessário para a difusão das moléculas de enzima aos sítios reativos das moléculas do solo depende da mobilidade do produto, que ocorre no fluido

intersticial do solo. Assim, justifica-se a necessidade de menor tempo de cura para a obtenção dos resultados de maior efetividade do solo argiloso, que possui maior superfície específica. Em contrapartida, o solo arenoso apresentou melhores resultados de ganho de resistência no maior tempo de cura. Este solo apresenta partículas de maior diâmetro, fazendo com que o alcance dos sítios de adsorção ocorra em maiores períodos de tempo.

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram realizadas análises geotécnicas das propriedades de engenharia dos solos naturais e das misturas solo-EMC *Squared*. Com base nos resultados obtidos nos ensaios de caracterização, compactação e resistência à compressão simples, pode-se concluir que:

- Segundo as caracterizações e classificações realizadas, o solo 1 é caracterizado como argilo-areno-siltoso, apresentando alto teor de finos e baixa expansibilidade. O solo 2 é caracterizado como areno-silto-argiloso, sendo predominantemente composto por partículas de maior diâmetro;
- A adição da solução enzimática em todas as concentrações utilizadas neste estudo não alterou de forma significativa os resultados obtidos pelos ensaios de compactação nos solos 1 e 2 e nas energias de compactação normal e intermediária. De maneira geral, a adição da solução de EMC *Squared* reduziu em pequenos níveis a umidade ótima dos solos;
- Nem todas as combinações de concentração de solução enzimática e tempos de cura resultaram em aumento da resistência à compressão simples em relação ao solo. O solo 2 apresentou mais respostas positivas no ganho de resistência do que o solo 1;
- A concentração de 3% em 3 dias de cura promoveu maior ganho de RCS do solo 1 na energia normal, e 1% de concentração em 3 dias de cura para a energia intermediária;
- O maior ganho de RCS para o solo 2 na energia normal ocorreu utilizando-se a concentração de 3% em 12 dias de cura, e na energia intermediária ocorreu na concentração de 1% em 12 dias de cura;
- É importante ressaltar que a estabilização química de solo com fins de utilização em estradas florestais necessita ser combinada a outros métodos de estabilização. Estes métodos unidos devem garantir de forma complementar maiores valores de resistência dos solos tratados, justifiquem os investimentos em técnicas de estabilização e promovam melhorias nas características da camada de rolamento das estradas que não recebem o selamento asfáltico.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios CBR, para avaliar a influência da ação da água na resistência mecânica dos solos e misturas analisadas, e de durabilidade por molhagem e secagem (NBR 13554/1996 Solo-cimento - ensaio de durabilidade por molhagem e secagem), para analisar aspectos de durabilidade das misturas.

Avaliar a metodologia estudada trabalhando-se na energia Proctor modificada, como alternativa à energia de compactação empregada.

Ampliar a pesquisa em relação aos tipos de solo utilizados, abrangendo os estudos para solos com características e composições granulométricas diversas, incluindo solos com composições mineralógicas diferenciadas, em especial solos expansivos.

Avaliar os efeitos do EMC *Squared* nas propriedades hidráulicas do solo, através dos ensaios de permeabilidade e resistência à erodibilidade.

Realizar a avaliação da viabilidade econômica da utilização do EMC *Squared* em solos com alto teor de finos com base no menor desempenho em relação ao ganho percentual de resistência mecânica encontrado neste trabalho.

Realizar a avaliação da ação do produto em campo através da construção de um trecho experimental.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRIVABENI, B. S. **Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. 2017. 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 4 p., 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 18 p., 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 8 p., 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 8 p., 2016, Versão Corrigida 2:2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p., 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p., 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 13 p., 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 9 p., 2016e.

BASE FORTE. Paraná, 2018. Disponível em <
<http://www.baseforte.net/producto.html>> Acesso em: 08 de dezembro de 2018.

BERNUCCI, L.B; MOTTA, L.M.; CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 p.

BRAZETTI, R.; CASAGRANDE, M. D. T.; SILVA, B. de A. e. Enzimas para estabilização de solos: uma suspeita fundamentada. 19ª Reunião de Pavimentação Urbana. Cuiabá – MT. Julho de 2013.

CARMO, F. C. DE A. DO; FIEDLER, N. C.; LOPES, E. DA S.; PEREIRA, D. P.; MARIN, H. B.; SILVA, E. N. DA. Análise da densidade ótima de estradas florestais em propriedades rurais. **Cerne**, v. 19, n. 3 (2013), p. 451-459.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. 1ª edição. Campina Grande-Paraíba, Ed. Marconi, 1997, 310 p.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT de Transportes – Estatísticas Consolidadas 2016** – 2ª tiragem. Brasília: CNT, 2016.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2013: relatório gerencial**. 17 ed. Brasília, 2013, 386 p.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial**. 1 ed. Brasília, 2018, 405 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 228/94: **Solos – compactação em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1994.

DIAS, L. DE S.; SILVA, T. O. DA; PITANGA, H. N.; CASTRO, R. V. O.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Modeling a computer application for management of maintenance activities of unpaved roads. **Árvore**, v. 39, n. 4 (2015), p. 723-731.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Publicação IPR – 719. **Manual de pavimentação**. 3ª edição. Rio de Janeiro, 2006.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, p. 412, 1999.

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

EMMERT, F.; PEREIRA, R. S. Caracterização geotécnica de solos para estradas florestais: estudo de caso. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2 (2016), p. 601-613.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe - CE**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2008.

KER, J. C. **Latossolos do Brasil: uma revisão**. Belo Horizonte: Geonomos 5, p. 17-40, 1997.

LAMBE, T. W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chemical Engineering**, v.32, n.6, p.488-492, 1954.

LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SILVA, C. H. C.; PEREIRA, R. S.; TRINDADE, T. P.; BARBOSA, P. S. A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais. In: **Anais**. 6º Simpósio

Brasileiro sobre colheita e transporte florestal, Belo Horizonte, MG. Proceedings, Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF), p. 69-117, 2003.

LOTFALIAN, M.; BABADI, T. Y.; AKBARI, H. Impacts of soil stabilization treatments on reducing soil loss and runoff in cutslope of forest roads in Hyrcanian forests. *Catena*, v. 172 (2018), p. 158-162.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MACHADO, C. C. **Construção e conservação de estradas rurais e florestais**. Viçosa: UFV, 2013.

MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; PIRES, J. M. M. Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (Grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. *Árvore*, v. 27, n. 4 (2003), p. 543-550.

MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Características dos óxidos de Fe e de Al de diferentes classes de solos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v.25, 2001b, p.19-32.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Ed. Villibor, 1995. p. 169-196.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais. In: **X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**. 1994. p. 1293-1300.

OLIVEIRA, R. J. DE; GLERIANI, J. M.; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; CORDEIRO, S. A. Análise da trafegabilidade em estradas florestais utilizando métodos computacionais. *Árvore*, v. 37, n. 2 (2013), p. 355-360.

PATRICIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2015.

PEREIRA, R. S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos industriais de celulose para construção de estradas florestais**. 2005. 329 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2005.

SILVA, A. M. DA; LUCENA, L. C. DE F. L.; LUCENA, A. E. F. L.; CARVALHO, J. C. DE; FILHO, P. G. T. M. Estudo de parâmetros de compactação de solo para uso em pavimentos rodoviários. *Transportes*, v., n. 4 (2016), p. 95-103.

SILVA, A. S.; SILVA, I. DE F. DA; BANDEIRA, L. B.; DIAS, B. DE O.; NETO, L. DE F. DA S. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 10 (2014), p. 1738-1789.

SILVA, T. O. DA; CARVALHO, C. A. B. DE; LIMA, D. C. DE; CALIJURI, M. L. Condições de serventia de estradas não-pavimentadas: estudo de caso aplicado às vias do município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. **Maringá**, v. 33, n. 2 (2011), p. 171-177.

SSPCo. – SOIL STABILIZATION PRODUCTS COMPANY, INC. Califórnia, 2018. Disponível em < <http://www.sspco.com/emcsquared.html> > Acesso em: 08 de dezembro de 2018.

TRINDADE, T. P. da; LIMA, D. C. de; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B. de; FONTES, M. P. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CANESCHI, F. P. Influência do tipo de cura (selada e exposta) e da imersão em água na resistência mecânica de misturas solo-RBI Grade 81 com vistas a aplicações em estradas florestais. **Árvore**, v. 29, n. 4 (2005b), p. 601-606.

TRINDADE, T. P. da; LIMA, D. C. de; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B. de; FONTES, M. P. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; CANESCHI, F. P. Estudo da durabilidade de misturas solo-RBI Grade 81 com vistas à aplicação em estradas florestais e camadas de pavimento convencionais. **Árvore**, v. 29, n. 4 (2005a), p. 591-600.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos: fundamentos teóricos e práticos**. 1a ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. 95p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981.