

Estabilização Química de Solos de Regiões de Planície Inundável: Estudo de Caso da Rodovia Transpantaneira

Guilherme Melo Scheifer

Graduando em engenharia civil, UFMT, Cuiabá, Brasil, guilhermescs@hotm.com

Alex Neves Junior

Professor de engenharia civil, UFMT, Cuiabá, Brasil, alex.junior@ufmt.br

Glauco Fabrício Bianchini

Professor de engenharia civil, UFMT, Cuiabá, Brasil, glaucobf@yahoo.com.br

Verlei Oliveira dos Santos

Engenheiro Civil, PPG/UNB, Brasil, verleioliveira@gmail.com

RESUMO: Nas regiões Centro Oeste e Norte do Brasil, a presença das bacias hidrográficas do Alto Paraguai e Amazonas resulta em extensas áreas de planície inundável. Estas regiões sofrem com a ocorrência anual de estações de seca e cheia, que saturam o solo e prejudicam a trafegabilidade nas rodovias. A Rodovia transpantaneira, localizada no Pantanal mato-grossense, é um exemplo de estrada que utiliza este solo de baixa qualidade geotécnica em seus aterros. O estudo em questão buscou avaliar a estabilização deste solo, essencial para o transporte da produção pecuária e turismo da região. Para isso, foram coletadas amostras de solo em um trecho crítico da rodovia e caracterizado para obtenção de seus parâmetros de resistência e expansibilidade. A metodologia aplicada envolveu a mistura do solo in natura com aditivos químicos como a cal dolomítica, a cal calcítica e o biochar, em diferentes teores e energia de compactação. Como resultado, a cal calcítica não estabilizou o solo, enquanto o biochar e a cal dolomítica em determinados teores e sobre determinadas energias de compactação tiveram valores de expansão menor que 2% e Índice de suporte Califórnia maior que 6% sendo soluções para estabilizar o solo da rodovia transpantaneira.

PALAVRAS-CHAVE: Rodovia transpantaneira, Estabilização de solos, Cal dolomítica, Cal Calcítica e Biochar.

ABSTRACT: In the Central West and North regions of Brazil, the presence of the Alto Paraguai and Amazonas river basins results in extensive areas of floodplain. These regions suffer from the annual occurrence of dry and flood seasons, which saturate the soil and hinder trafficability on the highways. The transpantaneira Highway, located in the Mato Grosso Pantanal, is an example of a road that uses this soil of low geotechnical quality in its embankments. The study in question sought to evaluate the stabilization of this soil, essential for the transport of livestock production and tourism in the region. For this, soil samples were collected in a critical section of the highway and characterized to obtain their resistance and expansibility parameters. The applied methodology involved mixing the natural soil with chemical additives such as dolomitic lime, calcitic lime, and biochar, in different contents and compaction energy. As a result, calcitic lime did not stabilize the soil, while biochar and dolomitic lime at certain contents and under certain compaction energies had expansion values less than 2% and California Bearing Ratio greater than 6%, being solutions to stabilize the soil of the transpantaneira Highway.

KEYWORDS: transpantaneira Highway, Soil Stabilization, Dolomitic lime, Calcitic Lime, Biochar

1 INTRODUÇÃO

A ênfase deste estudo recai sobre a rodovia não pavimentada transpantaneira (MT-060), que desempenha um papel crucial e diversificado. Esta via é essencial para o transporte eficiente da produção pecuária e para as tradicionais "comitivas" de vaqueiros. Além disso, a transpantaneira é um importante atrativo turístico, permitindo que visitantes apreciem a biodiversidade única da região. Assim, a rodovia serve tanto como rota turística quanto como meio vital para o transporte pecuário.

Os principais processos de formação do solo na planície do Pantanal estão ligados ao hidromorfismo, uma situação em que a aeração é insuficiente devido à presença excessiva de água. Assim, os solos do Pantanal, influenciados pela composição do material original e pelo ciclo de inundações recorrentes, apresentam características distintas. Estas vão desde uma extrema escassez de bases trocáveis até uma saturação muito alta de sódio, de uma composição predominantemente arenosa até a presença de grandes quantidades de argilas expansivas e mudanças bruscas de textura em profundidade (Santos *et al.*, 1997).

O Pantanal apresenta duas estações climáticas bem distintas, sendo uma delas notadamente caracterizada por um período chuvoso (Fonseca *et al.*, 2012). Durante esse período de elevado índice pluviométrico, o solo da rodovia tende a se expandir, afetando a trafegabilidade da rodovia aumentando consideravelmente os riscos de atolamentos para os veículos que circulam pela região, conforme evidenciado na figura 1.



Figura 1. Trecho da rodovia transpantaneira, Fonte: Arquivo pessoal (2023)

O contrato de manutenção atual para a rodovia transpantaneira utiliza o encascalhamento, um método que aplica uma camada de cascalho à superfície da estrada. Este método, apesar de melhorar a trafegabilidade e a resistência do pavimento, apresenta desafios de durabilidade. Com o tempo, o cascalho penetra nas camadas inferiores devido ao tráfego de veículos e à expansão do terreno, perdendo sua funcionalidade. Portanto, apesar de suas vantagens, o encascalhamento tem limitações em termos de durabilidade e manutenção a longo prazo.

A estabilização de solos, conforme definida por Vargas (1981), é um processo pelo qual se confere ao mesmo, maior resistência estável às cargas ao desgaste ou à erosão, pela compactação, correção de sua granulometria e plasticidade ou de adição de substâncias que lhe confirmam coesão, proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos. A aplicação deste conceito à manutenção da transpantaneira pode ser uma estratégia eficaz. Com a estabilização adequada, a estrada pode continuar a servir efetivamente às suas múltiplas funções, beneficiando tanto a economia local quanto a preservação do meio ambiente.

A delicadeza do ecossistema do Pantanal, sua biodiversidade e seu status como patrimônio natural mundial reforçam a importância de abordagens sustentáveis para a estabilização da rodovia transpantaneira, uma vez que pavimentar a rodovia causaria um grande impacto ambiental ao ecossistema da região. A incorporação de materiais de estabilização adequados não apenas aprimorará as condições viárias, mas também contribuirá para a preservação da integridade ecológica da região, minimizando impactos negativos. A abundância e baixo custo do solo como material de pavimentação, no entanto, não garantem sempre suas propriedades adequadas para suportar as cargas do pavimento. Nesses casos, a estabilização do solo se torna necessária, visando atender às especificações do projeto (Makusa, 2013; Santos, 2012).

Essa perspectiva encontra respaldo no estudo de Simonetti (2010), intitulado "Estudo de Impactos Ambientais Gerados pelas rodovias: Sistematização do Processo de Elaboração de EIA/RIMA", que ressalta os impactos ambientais relacionados às rodovias e reforça a importância de considerar alternativas sustentáveis, alinhando-se com a abordagem proposta neste trabalho.

A estabilização química de solos é uma técnica comprovada para aumentar a durabilidade das rodovias. De acordo com Firoozi *et al.* (2017), a adição de agentes aglutinantes como cal, cimento e subprodutos industriais como cinzas volantes e escória ao solo resulta em propriedades geotécnicas aprimoradas. Isso inclui

um aumento na resistência do solo, durabilidade, rigidez e uma redução na plasticidade do solo e no potencial de expansão/encolhimento. Manzoor e Yousuf (2020) também observaram que a adição de cal ao solo pode aumentar a resistência, durabilidade e resistência à fadiga do solo, enquanto reduz a plasticidade, compressibilidade e densidade seca.

Este estudo levanta a hipótese sobre a viabilidade de alcançar a estabilização química do solo na rodovia não pavimentada transpantaneira (MT-060) por meio da aplicação da cal dolomítica, cal calcítica ou biochar como agentes de estabilização. O principal objetivo é avaliar essas opções de uso individual para testar sua eficácia na estabilização do solo. Para isso, se fez necessário compreender geotecnicamente o tipo de solo do pantanal, a fim de entender suas características e propriedades. Em seguida, foi definido um teor ótimo de dosagem de cada um desses materiais separadamente com o solo o qual obtemos os melhores resultados em termos de estabilização e capacidade de suporte.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

2.1.1 Amostras do solo da rodovia transpantaneira

Foram coletadas amostras de solo no KM 95,9 da rodovia transpantaneira, o marco utilizado como KM 0 foi o portal da transpantaneira, esse ponto foi escolhido por ser um ponto que apresentam péssimas condições de trafegabilidade.

2.1.2 Cal dolomítica

Nessa pesquisa foi utilizada uma cal dolomítica hidratada CH III adquirida comercialmente, a qual evidencia em suas especificações técnicas que não tem toxicidade às plantas e animais.

2.1.3 Cal calcítica

Nessa pesquisa foi utilizado cal calcítica adquirida comercialmente, a qual evidencia em suas especificações técnicas que não tem toxicidade às plantas e animais.

2.1.4 Biochar

O biochar, também conhecido como carvão vegetal agrícola, é um resíduo sólido enriquecido em carbono, resultante da pirólise de biomassa, um processo que envolve a decomposição térmica na ausência ou mínima presença de oxigênio (Schena, 2019). O Brasil, como expressivo produtor agrícola, tem explorado alternativas para lidar com a considerável geração de biomassa residual, oriunda dos processos de colheita e processamento no setor (Mourad *et al.*, 2004).

A utilização do biochar abrange diversas aplicações, destacando-se seu emprego como combustível e aditivo para o solo, promovendo uma renovação nos teores de carbono e nitrogênio (Schena Thiago, 2019). Essa versatilidade se estende à capacidade do biochar em aumentar significativamente a retenção de água no solo, chegando a até 25% a mais do que em solos não tratados com esse material (Mollinedo *et al.*, 2015).

O potencial do biochar vai além das questões agronômicas, apresentando-se como uma solução para desafios globais, como a degradação de solos, escassez de alimentos e a redução das emissões de gases de efeito estufa (Rezende *et al.*, 2011). Em virtude dos benefícios citados o uso do biochar como agente estabilizante de solos ocasionaria um aumento pela demanda do produto e por consequência um possível aumento na produção do mesmo o que resultaria em impactos ecológicos positivos.

A origem do biochar que foi utilizado nos ensaios é proveniente da empresa SP Pesquisas em Mogi-Mirim e produzida através do processo térmico onde ocorre a combustão controlada das cascas secas do arroz por cerca de quinze minutos à temperatura aproximada dos quatrocentos graus Celsius.

2.2 Método

Foi realizado uma caracterização geotécnica, sendo feito a preparação das amostras, a análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, ensaios de compactação, expansão e CBR para as amostras de solo coletadas no KM 95,9 da rodovia transpantaneira. O solo da rodovia foi analisado in natura e com o acréscimo de 3%, 6% e 9% para cada agente estabilizador, de modo que esses teores foram escolhidos baseados nos trabalhos de Salomão (2005), Ferreira (2006) e Silva (2006) que utilizaram a cal como agente estabilizante. Esse teor também foi utilizado para o biochar para ser possível uma análise da sua eficiência como um agente estabilizante em comparação à cal. Dessa maneira, foi possível mensurar o impacto desses materiais nas propriedades mecânicas do solo. Após avaliação dessas propriedades foi feita uma análise sobre o custo da manutenção da rodovia utilizando os métodos que funcionaram para estabilizar o solo da rodovia.

Para o processo de preparação de amostras de solo, inicialmente realizou-se a pesagem e identificação de cada amostra. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem ao ar até atingirem uma proximidade da umidade higroscópica. Posteriormente, procedeu-se ao destorroamento utilizando um almofariz e ao quartejamento para separar grãos maiores dos menores, conforme a NBR 6457:2016.

A determinação do teor de umidade é um processo que envolve a secagem da amostra ao ar até que esteja próxima da umidade higroscópica. Em seguida, é identificada a umidade ótima presumível e escolhido o método mais adequado para a determinação precisa. Os ensaios relacionados à determinação do teor de umidade foram realizados de acordo com a norma de preparação de amostras, a NBR 6457:2016.

No ensaio de análise granulométrica, conforme a NBR 7181:2016 da ABNT, o material foi submetido ao peneiramento inicial, passando pela peneira de 2,0 mm, e a umidade foi determinada através da pesagem e secagem do material em estufa. Após essa etapa, o material passado na peneira de 2,0 mm foi submetido à sedimentação, onde foi adicionado um defloculante e deixado em repouso por pelo menos 12 horas. Durante esse período, leituras do densímetro foram realizadas em intervalos específicos. Após a sedimentação, o material foi submetido a um peneiramento final, seguido de lavagem e secagem dos materiais retidos nas peneiras de 0,075 mm e 2,0 mm. Os cálculos subsequentes envolvem a obtenção da massa total da amostra seca, as porcentagens passantes em diferentes peneiras e os diâmetros máximos das partículas em suspensão, relacionando os diâmetros de partículas com as porcentagens passantes. Esse processo visa fornecer informações precisas sobre a distribuição granulométrica do solo, sendo fundamental para diversas aplicações em engenharia e geotecnia.

Os limites de Atterberg avaliados foram o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), conforme as normas NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016, respectivamente. O LL determina a umidade na transição do solo entre os estados plástico e semilíquido. O LP identifica a umidade na transição entre os estados plástico e semiplástico. A diferença entre LL e LP é chamada Índice de Plasticidade (IP), utilizado para classificar os solos: solos com IP alto são argilosos, enquanto solos com IP baixo são mais arenosos.

Com as amostras preparadas, procedeu-se aos ensaios de compactação, realizados com energia Proctor normal e intermediária, conforme a NBR 7182:2016. Antes da moldagem dos cilindros, foram separadas 5 amostras de 6 quilos de solo in natura e 15 amostras de 6 quilos de solo para cada agente estabilizante. Dentre essas 15 amostras, separaram-se 5 para cada um dos teores citados anteriormente, e os materiais foram adicionados. Após a homogeneização com o solo, foi realizado o ensaio de compactação, moldando-se cinco cilindros com teores crescentes de umidade para gerar a curva de compactação. Em seguida, foi calculada a densidade seca do solo, traçando uma curva que relaciona o teor de água com a densidade seca, com o objetivo de determinar a densidade seca máxima e o teor de água ótimo. Esse procedimento ajuda a entender as características de compactação do solo e a identificar o ponto ótimo de densidade seca máxima, eliminando vazios de ar para uma densidade ideal.

Após a compactação, procedeu-se com o ensaio de expansão e índice de suporte Califórnia (CBR), conforme a NBR 9895:2016. Os cinco cilindros com solo in natura foram submersos em água por 96 horas, e tiveram suas leituras de expansão retiradas a cada 24 horas, sendo posteriormente submetidos à penetração pela prensa conforme especificado pela norma. Entretanto, os cilindros com misturas, após a compactação, foram ensacados por 96 horas para que a reação do material com o solo ocorresse. Após esse período, esses cilindros foram submersos por 96 horas e posteriormente submetidos à penetração pela prensa conforme especificado pela norma. Os cálculos de expansão e CBR foram realizados de acordo com a norma.

Também foi realizada uma análise de custo para a aplicação destes métodos de estabilização. A análise considerou uma pista com 10 metros de largura e a mistura do solo com agentes estabilizantes em uma

espessura de 20 centímetros, abrangendo um trecho de 10 km, do KM 95 ao KM 105.. Para o desenvolvimento desse orçamento, foi utilizado o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT para o estado de Mato Grosso, tendo como data base outubro de 2023. Através desse sistema, foi montada uma composição considerando os custos dos materiais, equipamentos e mão de obra para realização de cada método. Além disso, foi feito um comparativo em relação ao custo benefício dos métodos propostos nessa pesquisa e o método utilizado atualmente na rodovia.

3 RESULTADOS

A análise granulométrica foi feita para o solo in natura, através dos resultados foi constatado que o solo do KM 95,9 é em maior parte composto por areia, silte e argila (Tabela 1). Os ensaios de limites de Atterberg resultaram em um limite de liquidez de 48,6%, limite de plasticidade de 26% resultando em um índice de plasticidade de 22,6% e índice de grupo 10. Com os dados obtidos nesses ensaios foi utilizado o sistema de classificação de solos Highway Research Board (HRB) adotado pela Associação Americana de Oficiais de rodovias e Transportes Estaduais (AASHTO) e através dele foi possível classificar o solo da rodovia transpantaneira como um solo grupo A-7-6, com predominância de material argiloso e comportamento geral fraco a pobre para uso em uma camada de subleito.

Tabela 1. Composição granulométrica AASHTO

Composição Granulométrica (%)	
Pedregulho (%)	0
Areia Grossa (%)	3,9
Areia Fina (%)	41,4
Silte + Argila (%)	54,7

Foi realizado ensaios de compactação, com energia proctor normal e intermediário para cada teor e mistura citada anteriormente (Tabela 2). É possível observar que as misturas ocasionam um aumento na umidade ótima (Hot) e um decréscimo na massa específica aparente máxima do solo seco (γ_{max}).

Tabela 2. Resultados os ensaios de compactação

Amostra	Energia de compactação	Hot (%)	γ_{max} (g/cm ³)
Solo Natural	Proctor Normal	14,02	1,494
Solo-Cal Dolomítica 3%	Proctor Normal	27,73	1,323
Solo-Cal Dolomítica 6%	Proctor Normal	28,71	1,334
Solo-Cal Dolomítica 9%	Proctor Normal	29,53	1,334
Solo-Calcítica 3%	Proctor Normal	23,58	1,484
Solo-Calcítica 6%	Proctor Normal	24,69	1,534
Solo-Calcítica 9%	Proctor Normal	24,51	1,534
Solo-Biochar 3%	Proctor Normal	23,56	1,463
Solo-Biochar 6%	Proctor Normal	23,59	1,411
Solo-Biochar 9%	Proctor Normal	26,17	1,397
Solo Natural	Proctor Intermediário	14,78	1,597
Solo-Cal Dolomítica 3%	Proctor Intermediário	27,75	1,484
Solo-Cal Dolomítica 6%	Proctor Intermediário	28,63	1,47
Solo-Cal Dolomítica 9%	Proctor Intermediário	29,41	1,459
Solo-Calcítica 3%	Proctor Intermediário	22	1,578
Solo-Calcítica 6%	Proctor Intermediário	23,1	1,541
Solo-Calcítica 9%	Proctor Intermediário	24,04	1,519
Solo-Biochar 3%	Proctor Intermediário	24,01	1,49
Solo-Biochar 6%	Proctor Intermediário	23,7	1,483
Solo-Biochar 9%	Proctor Intermediário	25,55	1,454

Após o ensaio de compactação foi realizado os ensaios de expansão e California Bearing Ratio (CBR), devido à ausência de normas específicas para o caso da rodovia não pavimentada transpantaneira, foi utilizado

como critério de aceitação valores de expansão menores que 2% e de CBR maiores que 6% conforme norma do DNIT 108:2009 que trata sobre aterros, e determina esses valores para camada final de aterro. Na tabela 3 são apresentados os resultados obtidos nesses ensaios, os valores em vermelho não são aceitos de acordo com a norma.

Tabela 3. Resultados os ensaios de expansão e CBR

Amostra	Energia de compactação	Expansão	CBR (%)
Solo Natural	Proctor Normal	✖3,71	✖0,98
Solo-Cal Dolomítica 3%	Proctor Normal	✓0,13	✖1,96
Solo-Cal Dolomítica 6%	Proctor Normal	✓0,14	✓6,34
Solo-Cal Dolomítica 9%	Proctor Normal	✓0,08	✓13,08
Solo-Cal Calcítica 3%	Proctor Normal	✓1,93	✖3,21
Solo- Cal Calcítica 6%	Proctor Normal	✓1,96	✖4,62
Solo- Cal Calcítica 9%	Proctor Normal	✓1,62	✖5,01
Solo-Biochar 3%	Proctor Normal	✖2,54	✖2,94
Solo-Biochar 6%	Proctor Normal	✖2,22	✖3,26
Solo-Biochar 9%	Proctor Normal	✓1,41	✓6,16
Solo Natural	Proctor Intermediário	✖4,88	✖1,31
Solo-Cal Dolomítica 3%	Proctor Intermediário	✓0,97	✓10,95
Solo-Cal Dolomítica 6%	Proctor Intermediário	✓0,09	✓29,49
Solo-Cal Dolomítica 9%	Proctor Intermediário	✓0,04	✓29,37
Solo- Cal Calcítica 3%	Proctor Intermediário	✖3,25	✖2,33
Solo- Cal Calcítica 6%	Proctor Intermediário	✖2,10	✖4,66
Solo- Cal Calcítica 9%	Proctor Intermediário	✓1,71	✖2,99
Solo-Biochar 3%	Proctor Intermediário	✓0,53	✖3,54
Solo-Biochar 6%	Proctor Intermediário	✓1,78	✖5,50
Solo-Biochar 9%	Proctor Intermediário	✓0,84	✓9,08

A partir dos resultados de CBR e expansão citados acima foi definido que os com capacidade para estabilizar a rodovia são: o Biochar no teor de 9% com energia de compactação proctor normal e intermediário, a Cal Dolomítica nos teores de 6% e 9% com energia de compactação proctor normal e 3%, 6% e 9% com energia de compactação proctor intermediário. Dessa forma, a seguir será apresentada os custos para a execução desses métodos na prática, entretanto não foi possível definir um preço para o uso do biochar, pois ele é produzido para dar destinação a resíduos agrícolas não sendo possível assim obter um valor comercial do mesmo para a utilização no orçamento.

Nessa análise de custo é possível comparar o custo da estabilização utilizando solo-cal dolomítica com o processo de manutenção em vigência na rodovia que é o encascalhamento.

Tabela 4. Resumo dos custos de manutenção

Item	Energia de compactação	Custo para manutenção do KM 95 a 105	Custo por KM
Encascalhamento	Normal	R\$ 2.408.105,81	R\$ 240.810,58
Solo-Cal Dolomítica 6%	Proctor Normal	R\$ 1.868.717,00	R\$ 186.871,70
Solo-Cal Dolomítica 9%	Proctor Normal	R\$ 2.890.281,75	R\$ 289.028,18
Solo-Cal Dolomítica 3%	Proctor Intermediário	R\$ 1.233.221,00	R\$ 123.322,10
Solo-Cal Dolomítica 6%	Proctor Intermediário	R\$ 2.103.585,00	R\$ 210.358,50
Solo-Cal Dolomítica 9%	Proctor Intermediário	R\$ 2.962.481,75	R\$ 296.248,18

A partir das informações da tabela 4 em relação aos custos de cada teor e considerando as melhorias na resistência do solo e na diminuição da expansão o teor de 3% com compactação proctor intermediário é o que apresenta o menor custo atendendo as especificações da norma. Embora apresente uma expansão maior e um C.B.R menor do que os teores de 6% e 9% sobre a mesma compactação intermediária os resultados obtidos com esse teor é satisfatório para uma rodovia não pavimentada. Comparando os custos para executar os diferentes métodos de manutenção no mesmo trecho da rodovia transpantaneira é evidenciado que o custo para

estabilizar a rodovia pode ser menor ou próximo do custo para realizar o encascalhamento, além disso os métodos de estabilização resultam em melhores condições de trafegabilidade da rodovia, mesmo durante os períodos chuvosos, e maiores períodos entre as manutenções na rodovia.

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa avaliou a estabilização química do solo da rodovia transpantaneira (MT-060) através da adição de cal dolomítica, cal calcítica e biochar, visando melhorar as propriedades mecânicas e reduzir a expansão do solo sem impactos negativos, preservando a sustentabilidade da região e melhorando a infraestrutura rodoviária e turística. Inicialmente, foi realizada uma caracterização geotécnica do solo in natura, identificando-o como argiloso tipo A-7-6, com alta expansão e baixo C.B.R.

A mistura solo-cal dolomítica em teores de 3%, 6% e 9% ocasionou aumento da resistência e redução da expansão, com melhores resultados em 9% de cal e compactação intermediária com uma expansão de 0,08% e C.B.R de 13,08%. A cal calcítica, melhorou as propriedades, mas não atingiu os requisitos mínimos de C.B.R em nenhum teor. O biochar também melhorou as propriedades mecânicas e reduziu a expansão, com melhores resultados em 9% de biochar e compactação intermediária expansão de 0,84% e C.B.R de 9,08%.

Em termos de custo, a cal dolomítica em 3% com compactação intermediária foi o método mais econômico, sendo satisfatório para uma rodovia não pavimentada. A pesquisa concluiu que a cal dolomítica e o biochar são eficazes como agentes estabilizantes, oferecendo uma solução sustentável e economicamente viável para a manutenção da transpantaneira.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresse minha profunda gratidão a Deus por me proporcionar a oportunidade de alcançar este marco importante na minha vida. Agradeço aos meus pais, Claudio Daniel Scheifer e Wanete Melo Scheifer pela paciência e compreensão durante este período desafiador. Agradeço e à minha namorada, Jéssica Martins Lopes, que esteve ao meu lado durante as adversidades da jornada acadêmica e profissional, sempre me apoiando e incentivando a concluir esta jornada. Agradeço ao professores Alex Neves Junior e Glauco Fabrício Bianchini cuja orientação, contribuição e incentivo foram fundamentais para o meu trabalho. Sua disposição em esclarecer minhas dúvidas foi inestimável. Agradeço ao engenheiro civil Verlei Oliveira dos Santos, cujos comentários e colaborações valiosas contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço aos meus colegas da Ecoplan Engenharia pelo apoio constante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6457:2016: *Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 2016.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6459:2016: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2016.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7180:2016: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7181:2016: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 2016.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7182:2016: *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2016.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 9895:2016 - *Índice de suporte Califórnia*. Rio de Janeiro, 2016.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. DNIT 172/2016 – ME – *Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Brasília, 2016.

- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. DNIT 108/2009 – *Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço*. Norma Rodoviária, Rio de Janeiro, 2009.
- Ferreira, C. J. *Estabilização de solos com cal – uso da metodologia MCT*. Projeto Final, Publicação ENC. PF-012A/06 – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 150 p. 2006.
- Firoozi, Ali Akbar; Firoozi, Ali Asghar; Jafari, Mohammad Kazem. *Chemical stabilization of clayey soils*. International Journal of Civil Engineering, v. 15, n. 4, p. 595-604, 2017.
- Fonseca, E. M. *Caracterização geoambiental de parte da rodovia transpantaneira, dos impactos ambientais e a elaboração de práticas para um turismo sustentável no município de Poconé, MT*. UFMT, 2012.
- J. Mollinedo, T. E. Schumacher, R. Chintala, J. Anal. *Appl. Pyrolysis* 2015, 114, 100– 108.
- Makusa, G. P. *Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review*. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013.
- Manzoor, Rizwan; Yousuf, Adnan. *A review on different methods of activating bentonite*. Journal of Hazardous Materials, v. 393, p. 122383, 2020.
- Mourad, A.L.; Ambrogi, V.S.; Guerra, S.M.G. *Potencial de utilização energética de biomassa residual de grãos*. In: Encontro de energia rural, 2004.
- Rezende, E. I. P.; Angelo, L. C.; Dos Santos, S. S.; Mangrich, A. S. *Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono*. Revista Virtual de Química, UFF, 2011.
- Salomão, D. A. *Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação*. Projeto Final. Publicação ENC.PF-009A/05 – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, p. 63, 2005.
- Santos, E. M. R.; Duarte, M. N. Pedologia. In: *Plano de conservação da Bacia do Alto Paraguai - PCBAP: diagnóstico dos meios físico e biótico - meio físico*. Brasília, DF: PNMA, 1997. p.127-307. v.2, t.1.
- Santos, M. N. *Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra*. PUC – Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.
- Schena, T. *Aproveitamento dos Resíduos de Coco através da Pirólise: Uma Abordagem Analítica e Econômica*. UFRGS, Porto Alegre, 2019.
- Silva, M. T. De M. G. *Estabilização de Solos Finos com Cal para Fins de Pavimentação Rodoviária – Efeito da Carbonatação*. Projeto Final. Publicação ENC.PF-004A/06 – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, p. 89, 2006.
- Simonetti, H.; Alegre, P. *Estudo de impactos ambientais gerados pelas rodovias: sistematização do processo de elaboração de EIA/RIMA*. UFRGS, 2010.
- Vargas, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGrawHill do Brasil, 1981.