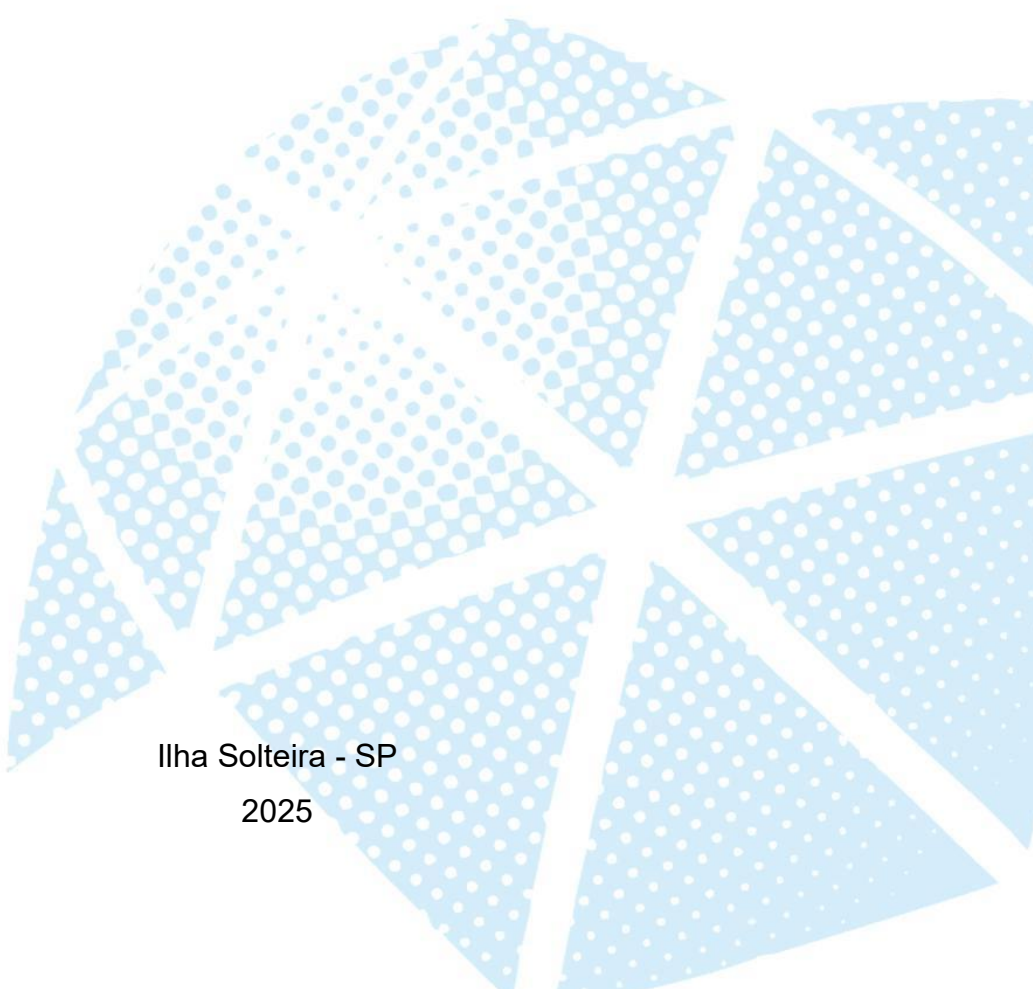


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LUIZA YASHIMA ALDUINO

**ESTUDO DA LOGÍSTICA DE TRANSPORTES DE MISTURAS ESTABILIZADAS
DE SOLO-CINZA PARA PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

Ilha Solteira - SP
2025



UNESP – ENGENHARIA CIVIL – ÁREA DE TRANSPORTES

LUIZA YASHIMA ALDUINO

**ESTUDO DA LOGÍSTICA DE TRANSPORTES DE MISTURAS ESTABILIZADAS
DE SOLO-CINZA PARA PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Jairo Salim
Pinheiro de Lima

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Alduino, Luiza Yashima.
A365e Estudo da logística de transportes de misturas estabilizadas de solo-cinza para pavimento rodoviário / Luiza Yashima Alduino. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
47 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Jairo Salim Pinheiro de Lima

Inclui bibliografia

1. Massa específica aparente solta. 2. Misturas estabilizadas. 3. Cinza de cavaco de eucalipto. 4. Movimentação de terra.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa contribui com o avanço técnico e científico na área de transportes ao explorar o uso de solo laterítico estabilizado com a cinza de cavaco de eucalipto (CCE), promovendo o aproveitamento de resíduos industriais e o desenvolvimento da estrutura rural, sobretudo em estradas florestais. Em relação ao aspecto social, o estudo propõe soluções acessíveis e de menor impacto ambiental, contribuindo para obras mais sustentáveis. A redução no número de viagens necessárias para o transporte dos materiais otimiza a logística da movimentação dos materiais, com potencial de redução de custos nas obras.

A pesquisa apresenta inovação ao adaptar métodos simples de ensaio para determinar a massa específica aparente solta, o que pode ser replicado em diferentes contextos, até mesmo no local da obra. Do ponto de vista educacional, o trabalho pode servir como referência para futuros trabalhos acadêmicos que envolvam a reutilização de resíduos, práticas sustentáveis na engenharia ou o estudo da massa específica aparente solta de solos estabilizados. Quanto à inserção regional e nacional, a proposta se relaciona com realidades locais, especialmente regiões produtoras de celulose, promovendo alternativas de valorização dos resíduos gerados nesse setor. Importante ressaltar que o Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo (IBÁ, 2022). Por fim, o estudo tem potencial de internacionalização por abordar temáticas de interesse mundial, como a gestão de resíduos, a eficiência logística e a sustentabilidade em obras de infraestrutura.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research contributes to technical and scientific advancement in the transportation field by exploring the use of lateritic soil stabilized with eucalyptus wood chip ash (WCA), promoting the reuse of industrial waste and the development of rural infrastructure, especially on forest roads. From a social perspective, the study proposes accessible solutions with lower environmental impact, contributing to more sustainable construction practices. The reduction in the number of trips required for

material transportation optimizes logistics, with potential cost savings in construction projects.

The research presents innovation by adapting simple testing methods to determine the loose bulk density, which can be replicated in different contexts, including directly on construction sites. From an educational standpoint, the study may serve as a reference for future academic work involving waste reuse, sustainable engineering practices, as well as the study of loose bulk density in stabilized soils. In terms of regional and national relevance, the proposal aligns with local conditions, particularly in pulp producing regions, by promoting alternatives for adding value to the waste generated in this sector. It is worth noting that Brazil is the second largest pulp producer in the world (IBA, 2022). Finally, the study has international potential as it addresses globally relevant topics, such as waste management, logistics efficiency and sustainability in infrastructure projects.

FOLHA DE APROVAÇÃO

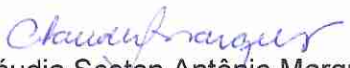
Aluna: Luiza Yashima Alduino

Título: Estudo da logística de transporte de mistura estabilizada de solo-cinza para pavimento rodoviário.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA


Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima
UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)


Prof. Dra. Cláudia Scoton Antônio Marques
UNESP – Campus de Ilha Solteira


Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

30/06/2025

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais e ao meu eu do futuro, que olhará para trás com orgulho da jornada trilhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar e iluminar meu caminho com fé, força e sabedoria.

Aos meus pais, Rita e Wilian, por serem a base de tudo na minha vida.

À minha irmã, Eloíza, pela companhia, carinho e por sempre acreditar em mim.

Ao meu padrinho, Silvino, por todo incentivo e apoio.

Aos meus familiares e amigos, que sempre torceram por mim.

Ao meu orientador, Jairo Salim Pinheiro de Lima, por todo suporte, paciência e pelos valiosos ensinamentos que me forneceu ao longo da realização desse trabalho.

Ao técnico do laboratório, Ozias Porto, por todo auxílio durante a execução dos ensaios.

À Unesp de Ilha Solteira e a todos que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista.

“Tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá!” (Ayrton Senna).

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar a massa específica aparente solta de misturas estabilizadas de solo laterítico com cinza de cavaco de eucalipto (CCE), e avaliar o consumo de cinza na construção de uma camada estabilizada de pavimento rodoviário de estrada florestal. Para determinar a massa específica aparente solta da mistura, foram empregados moldes cilíndricos de diferentes tamanhos e calculado o número de viagens necessárias para o transporte do material. O estudo incluiu a revisão bibliográfica e análise de normas técnicas da ABNT e do DNIT, ensaios laboratoriais com solo de comportamento laterítico e cinza da queima da biomassa de eucalipto. Também foram calculados os volumes transportados e a sua relação com o desempenho em campo. A mistura com 10% de CCE apresentou melhor desempenho. A massa específica aparente solta média do solo-cinza foi de 1,268 g/cm³. Os cálculos consideram uma camada de pavimento com 15 cm de espessura, 6 m de largura e 1 km de extensão. Para o transporte dos materiais adotou-se um caminhão com capacidade volumétrica de 8 m³. O número de viagens necessárias para transportar os insumos e construir a camada é de 732 viagens para o caso da mistura com 10% de cinza, e 878 viagens para o solo *in natura*. O uso de CCE em misturas estabilizadas é uma alternativa econômica e ambientalmente viável para a pavimentação, reduzindo o número de viagens, o consumo de recursos naturais e contribuindo para a valorização de resíduos industriais.

Palavras-chave: massa específica aparente solta; misturas estabilizadas; cinza de cavaco de eucalipto; movimentação de terra.

ABSTRACT

The objective of this study is to determine the loose bulk density of stabilized mixtures of lateritic soil with eucalyptus wood chip ash (WCA), and to evaluate the ash consumption in the construction of a stabilized pavement layer on a forest road. To determine the loose bulk density of the mixture, cylindrical molds of different sizes were used and the number of trips required for material transportation was calculated. The study included a literature review and an analysis of technical standards from ABNT and DNIT, as well as laboratory tests using lateritic soil and ash from the combustion of eucalyptus biomass. Transported volumes and their relationship to field performance were also measured. The mixture containing 10% WCA showed the best performance. The average loose bulk density of the soil-ash mixture was 1.268 g/cm³. The calculations considered a pavement layer 15 cm thick, 6 m wide, and 1 km long. A truck with an 8 m³ capacity was used for material transportation. The number of trips required to transport the materials and construct the layer was 732 for the 10% ash mixture and 878 for the natural (untreated) soil. It can be inferred that the use of WCA in stabilized mixtures is an economically and environmentally viable alternative for road paving, by reducing the number of trips, the consumption of natural resources, and contributing to the salvaging of industrial waste.

Keywords: loose apparent bulk density; stabilized mixtures; eucalyptus wood chip ash; earthmoving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de pavimentos flexíveis e rígidos.....	20
Figura 2 – Camadas do solo.....	21
Figura 3 – Ábaco para a classificação TRB.....	28
Figura 4 – Ábaco para a classificação MCT.....	29
Figura 5 – Pesagem e armazenamento do solo.....	31
Figura 6 – Preparação da mistura solo-cinza.....	31
Figura 7 – Moldes cilíndricos.....	32
Figura 8 – Molde cilíndrico menor para determinar a massa específica aparente solta.....	33
Figura 9 – Molde cilíndrico maior para determinar a massa específica aparente solta.....	33
Figura 10 – Molde mini-CBR em determinação a massa específica aparente solta.....	34
Figura 11 – Molde CBR em determinação da massa específica aparente solta.....	34
Figura 12 – Molde CBR em determinação da massa específica aparente solta da cinza.....	35
Figura 13 – Variáveis do equacionamento.....	36
Figura 14 – Distância de descarregamento do material da obra.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica aparente solta da mistura para diferentes tipos de moldes.....	38
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CCE	Cinza de Cavaco de Eucalipto
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MCV	Miniatura Compactado Valor
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de Vinila
TRB	<i>Transportation Research Board</i>

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	PAVIMENTO RODOVIÁRIO.....	19
3.2	SOLO.....	20
3.2.1	Classificação do solo	20
3.2.2	Perfis do solo	21
3.2.3	Solos de comportamento laterítico.....	22
3.3	SOLOS SOLTOS E COMPACTADOS.....	22
3.3.1	Solos soltos	22
3.3.2	Solos compactados	23
3.4	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	23
3.4.1	Conceitos	23
3.4.2	Benefícios da estabilização com adição de cinzas	24
3.5	CINZAS.....	24
3.5.1	Produção de celulose no Brasil	24
3.5.2	Cinza de cavaco de eucalipto (CCE)	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1	COLETA DO SOLO E DA CINZA	27
4.2	METODOLOGIA.....	27
4.2.1	Análise granulométrica	27
4.2.2	Limites físicos.....	27
4.3	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	28
4.3.1	Classificação TRB	28
4.3.2	Classificação MCT	29
4.4	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DO SOLO.....	30
4.5	ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM ADIÇÃO DE CINZA.....	30
4.6	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DA MISTURA	32
4.7	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DA CINZA.....	35

4.8	CÁLCULO DO NÚMERO DE VIAGENS.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA	38
5.2	CÁLCULO DO NÚMERO DE VIAGENS.....	39
6	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação é um dos elementos de maior custo quando se leva em consideração o valor total da construção rodoviária, uma vez que nessa etapa é realizado o transporte de grande massa de solo por um percurso longo na obra (LIMA, 2003).

Em construções de rodovias, o transporte dos materiais se dá desde jazidas distantes até áreas de empréstimo próximas ao local da obra. E em terraplenagem, os materiais podem apresentar três características principais quanto a sua estrutura: natural, empolado ou compactado. Cada um destes “estados” implica em condições típicas de umidade e massa específica. Assim, os materiais podem apresentar massa específica natural – quando *in natura* nas jazidas e áreas de empréstimos; empolada – quando são transportados, destorroados, umedecidos e homogeneizados; compactada – quando submetidos aos efeitos da compactação. Nos três casos, o fator determinante é o volume de vazios (ar mais água).

Quando o material está em seu estado solto, o volume de vazios de ar incorporado implica em importante aumento do seu volume. Este aumento é chamado empolamento. O conceito de empolamento se refere ao aumento do volume que o solo sofre quando é escavado e deixa sua condição natural e durante esse processo, as partículas do solo se reorganizam, resultando em um aumento do volume de vazios (MOURA, 2022). Portanto, este fator está relacionado à massa específica solta do material, que permite calcular o volume solto dos materiais empregados em pavimentação. O volume solto (também chamado carga-paga) determina o número de viagens necessárias para transportar o material desde a sua origem até o local da obra.

É importante destacar que nem todos os materiais *in natura* registram qualidades adequadas à aplicação em pavimentação rodoviária. E as técnicas de estabilização podem ser alternativas para potencializar alguns destes materiais, sobretudo os solos locais.

A estabilização de solos pode adotar diferentes técnicas (mecânica, física ou química), de acordo com os materiais, equipamentos e aplicações. Dentre os materiais com bons argumentos (financeiros, ambientais e estratégicos) para estabilizar solos, destacam-se os rejeitos da produção industrial. Assim, ao introduzir

rejeitos para estabilizar solos, deve-se considerar o empolamento como um dos aspectos a serem avaliados, além das suas propriedades e características.

Os rejeitos de cinza da queima da biomassa do eucalipto são subprodutos da geração de energia. A lama-cal (também chamada lama de cal) é outro tipo de rejeito da produção de celulose. IBÁ (2022) e Bellote (1998) destacam, respectivamente, que o Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo e que a cada 100 toneladas de celulose produzida, são geradas 48 toneladas de resíduos. Esses resíduos podem conter elementos capazes de contribuir para melhorar propriedades mecânicas dos solos. Por outro lado, eles podem conter substâncias prejudiciais ao meio ambiente e contaminar o solo, ar e água. Vale destacar que a evolução nas técnicas de produção e o aproveitamento destes materiais em outras cadeias produtivas resultam em volume de rejeitos cada vez menor.

A utilização dos rejeitos como material estabilizante em obras civis (estradas e barragens, por exemplo) pode ser uma alternativa para melhorar a qualidade de solos, notadamente dos solos locais. O maior aproveitamento de solos locais implica em menor volume de materiais importados, reduzindo, portanto, o número e a distância de viagens para o movimento de terra nas atividades de terraplenagem. E ainda diminui a pressão sobre novas jazidas e áreas de empréstimo. Por outro lado, também permite transformar um rejeito em resíduo (insumo para a construção), aumentando o tempo de vida útil de aterros e áreas de depósitos destes materiais. Resultando “ganhos” ambientais em ambas alternativas.

Este trabalho visa contribuir para o planejamento das atividades logísticas em serviços de terraplenagem, utilizando solos estabilizados com cinza da queima da biomassa de eucalipto. Neste caso, buscam-se determinar o valor da massa específica aparente solta dos materiais e estimar o número de viagens necessárias para construir uma camada de pavimento rodoviário.

Os ensaios para determinar a massa específica aparente solta da mistura estabilizada de solo-cinza foram realizados com formas cilíndricas com diferentes tamanhos. Além dos moldes indicados na norma NRB 16972 (ABNT, 2021), empregaram-se cilindros típicos dos ensaios CBR e mini-CBR. Este procedimento visa avaliar a possibilidade de empregar moldes menores e comuns em laboratórios, de modo a reduzir o volume necessário de material, facilitando o seu manejo (em laboratório e em campo).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir para o planejamento das atividades logísticas em serviços de terraplenagem, utilizando solos estabilizados com cinza da queima da biomassa de eucalipto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o valor da massa específica aparente solta dos materiais;
- Avaliar a possibilidade de empregar moldes menores e comuns em laboratórios, de modo a reduzir o volume necessário de material, facilitando seu manejo (em laboratório e em campo);
- Estimar o número de viagens necessárias para construir uma camada de pavimento rodoviário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Os pavimentos rodoviários são estruturas compostas por múltiplas camadas, onde a camada superior é o revestimento diretamente exposto ao tráfego e às condições climáticas. A qualidade do pavimento depende de dimensionamento preciso, que considere todas as propriedades de cada camada, a permeabilidade e o tráfego previsto, além da seleção e dosagem adequada dos materiais utilizados, garantindo o melhor desempenho possível (BERNUCCI, 2008).

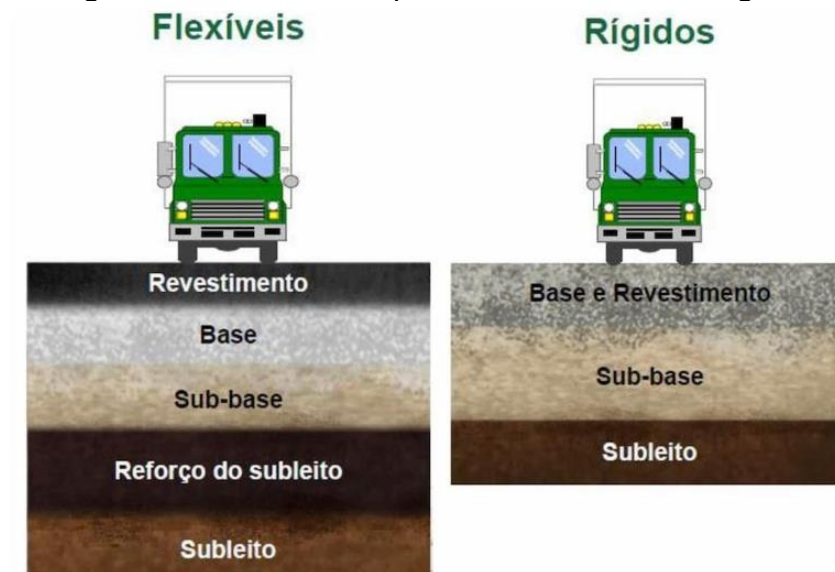
Os solos são muito utilizados em pavimentação como material de aterro, no subleito e nas camadas das estruturas. Eugênio, Rodgher e Marco (2024, p. 2), estimam que “cerca de 90% dos solos do estado de São Paulo apresentam comportamento laterítico”. Salienta-se que este foi o tipo de solo empregado no presente trabalho.

Os pavimentos podem ser classificados como rígidos, semirrígidos ou flexíveis (DNIT, 2006). Estruturas de pavimentos flexíveis são compostas por várias camadas que atuam em conjunto para distribuir as cargas aplicadas pelos veículos. Essas camadas incluem o subleito, o leito, a regularização, o reforço do subleito, a sub-base, a base e o revestimento com asfalto (MACIEL; GACHET, 2022), como mostra a Figura 1.

Os pavimentos semirrígidos são aqueles que apresentam situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis e base com materiais de características cimentícias.

Ainda pela Figura 1, a estrutura de um pavimento rígido, que inclui subleito, sub-base, base e placa de concreto como base e revestimento. Esse tipo de pavimento possui alta rigidez, o que lhe permite absorver a maior parte das tensões provocadas pelo tráfego. Como resultado, a placa de concreto, que é a camada mais próxima à superfície, absorve diretamente os esforços dos veículos, reduzindo significativamente a solicitação nas camadas inferiores (DNIT, 2006).

Figura 1 – Estrutura de pavimentos flexíveis e rígidos



Fonte: MASTER PLATE.

3.2 SOLO

3.2.1 Classificação do solo

O método *Transportation Research Board* (TRB) é um dos mais utilizados no Brasil para classificar solos para pavimentação (PRASS *et al.*, 2019). Este método se fundamenta na granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade e foi desenvolvido para analisar materiais utilizados como base e sub-base de pavimentos (ALMEIDA, 2004).

Na classificação TRB, os solos são divididos em grupos e subgrupos. Os grupos A-1, A-2 e A-3 se referem aos “solos granulares” e os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 se referem aos solos “silto-argilosos”, também chamados “solos finos” (ALMEIDA, 2004).

Ao comparar os resultados obtidos por essa classificação, apropriada para regiões de clima temperado, com resultados encontrados em campo, notaram-se divergências. Tal discrepância precipitou o desenvolvimento de um novo método de classificação, típico para solos intemperizados em regiões de clima tropical. Essa nova metodologia é conhecida como MCT (Miniatura Compactada Tropical) (PRASS *et al.*, 2019).

O MCT emprega parâmetros obtidos em corpos-de-prova compactados pelo método mini-MCV, e do ensaio de perda de massa por imersão (Pi). Neste caso, os

solos são classificados em dois grupos principais quanto ao seu comportamento: lateríticos; e não lateríticos e sete subclasses correspondentes (DNIT, 2006).

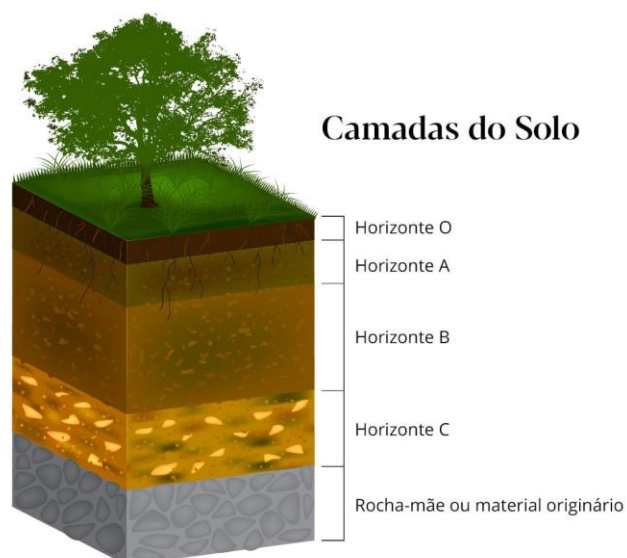
3.2.2 Perfis do solo

Os solos são formados da interação simultânea e integrada de diferentes fatores, como material de origem, clima, organismos, relevo e tempo. Esses elementos atuam de forma conjunta e contínua, promovendo a transformação da rocha em solo.

Durante esse processo, ocorrem diversas transformações, incluindo adições, perdas, transportes e modificações químicas e físicas, que resultam na formação de perfis de solo com camadas distintas, caracterizadas por variações de cor, espessura, granulometria, teor de matéria orgânica e conteúdo de nutrientes (LIMA; LIMA; MELO, 2007). Essas camadas de solos são chamadas de horizontes (Figura 2) e podem ser divididos da seguinte forma:

- O - Resíduos orgânicos (folhas, galhos, flores e frutos);
- A - Horizonte mineral mais rico em matéria orgânica e com grande atividade biológica;
- B - Horizonte mineral com máxima expressão de cor e estrutura;
- C - Rocha intemperizada (alterada);
- R - Rocha não intemperizada (não alterada).

Figura 2 – Camadas do solo



Fonte: Floresta Portuguesa (2021).

3.2.3 Solos de comportamento laterítico

Os solos de comportamento laterítico são solos superficiais que derivam da intensa ação do intemperismo na camada superior do subsolo, resultando no acúmulo de óxido de ferro e óxido de alumínio (ZORZI, 2008). São típicos de regiões tropicais bem drenadas, geralmente de cor avermelhada e possuem alta agregação dos finos. Os solos de comportamento laterítico também apresentam variação em sua granulometria, que podem abranger areias com poucos finos argilosos até argilas com até mais de 50% de silte.

Na engenharia para fins rodoviários, os solos de comportamento lateríticos apresentam a característica de, ao serem compactados e perderem umidade, manter a sua resistência e apresentar baixa suscetibilidade à erosão (MARANGON, 2004). Além disso, eles registram baixa expansão e podem ser usados até como base de pavimento (VILLIBOR E NOGAMI, 2009).

3.3 SOLOS SOLTOS E COMPACTADOS

3.3.1 Solos soltos

Os solos soltos, comumente extraídos de áreas de empréstimo, são amplamente utilizados na construção civil, desde que selecionados com critérios rigorosos para atender as exigências de resistência e compactação (DAS; KHALED, 1985).

Embora configurem alternativas viáveis para aterros, esses solos apresentam desafios, como baixa capacidade de suporte de carga. Para superar tais limitações, é necessário aplicar técnicas de compactação que aumentem a sua densidade, melhorando a estabilidade e a capacidade de carga (LOPES, 2024).

O transporte dos solos é uma importante etapa da construção de rodovias. Quando os materiais são retirados da sua origem para o transporte, eles alteram o seu estado natural para o estado solto, agregando características de empolamento. O fator determinante são os vazios de ar que impõem significativo aumento de volume. Este volume solto – também chamado carga pago – é determinante para definir a quantidade de viagens para transportar o material e essencial para dimensionar corretamente a quantidade de material necessária em projetos de aterros, estradas e fundações.

3.3.2 Solos compactados

A compactação de solos diz respeito à diminuição do seu volume, resultante da diminuição dos vazios de ar. Algumas características importantes em obras de terra, como permeabilidade, deformabilidade e resistência ao cisalhamento são influenciadas negativamente pelo aumento do índice de vazios. Por isso, quando se levam em consideração as obras de engenharia civil, a compactação surge como forma de melhorar as características dos solos (CRISPIM, 2007).

Em obras de pavimentação, a compactação é essencial para a distribuição uniforme das cargas aplicadas sobre a superfície. A compactação pode empregar várias técnicas que incluem métodos dinâmicos, com vibrações ou impactos, e métodos estáticos, com pressão constante. Para cada técnica, os equipamentos também variam. Os equipamentos mais comuns são os rolos compactadores, placas vibratórias e compactadores de percussão (PAVSINAL, 2024).

Tanto em campo quanto em laboratório, a eficiência da compactação é influenciada por diversos fatores, como o teor de umidade do solo, a granulometria do material e a energia aplicada.

3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

3.4.1 Conceitos

A estabilização é uma técnica utilizada para melhorar as propriedades e características dos solos, tornando-os mais adequados para utilização em obras de pavimentação. Esse processo pode ser feito por métodos mecânicos, químicos ou granulométricos (LAUFER, 1967; MOUSAVI *et al.*, 2017). Para MEDINA *et al.* (2005) a compactação implica processos de impacto, vibração e pressão no solo.

A estabilização mecânica é o método mais utilizado na construção de estradas, e envolve a compactação do solo para reduzir os vazios de ar, aumentar a densidade e minimizar a percolação de água, tornando-o mais resistente à erosão e deformações.

Villibor (1982), citado por Leandro (2023), considera que a estabilização por correção granulométrica se refere à mistura de dois ou mais tipos de solos visando obter um material homogêneo com o objetivo principal de melhorar a estabilidade do solo e aumentar a sua resistência mecânica.

A estabilização química utiliza aditivos como cimento, cal ou produtos industriais para modificar a estrutura do solo e aumentar a sua capacidade de suporte e durabilidade (MAKUSA, 2013).

A cinza de cavaco de eucalipto pode ser utilizada como estabilizante de solos por meio da estabilização granulométrica. A mistura pode ser aplicada em camada de reforço de subleito e camada final de aterro (SILVA *et al*, 2020).

3.4.2 Benefícios da estabilização com adição de cinzas

A estabilização de solos com adição de resíduos industriais pode apresentar diversos benefícios, como a redução do descarte em aterros, melhoria das propriedades do solo, redução de custos relacionados ao manejo dos materiais, ampliação do uso de solos locais e a menor necessidade de transporte de materiais (ESCOBAR e LIMA, 2025). Além disso, evita que o seu descarte inadequado resulte na contaminação da água, do solo e do ar.

SILVEIRA (2015, p. 27, apud Siqueira, 2011; Sundstron, 2012; Oliveira, 2011) sugere que o uso desses resíduos na pavimentação pode gerar vantagens tanto para a indústria quanto para o setor de construção civil. Entre estas vantagens destaca-se a redução de custos, dado que a substituição de agregados convencionais por resíduos pode diminuir as despesas com extração e o transporte de materiais naturais. Ademais, essa prática contribui para a preservação de jazidas de recursos não renováveis e minimiza o impacto ambiental causado pela disposição de resíduos.

Outro benefício é a possibilidade de valorização dos rejeitos, que passam a ser considerados matérias-primas secundárias em processos produtivos, como na fabricação de cimento Portland pozolânico, bases estabilizadas e solos modificados para rodovias, pistas e edificações, além de atuar como fíler em misturas betuminosas (SILVEIRA, 2015). Esse reaproveitamento também reduz a necessidade de infraestrutura para estocagem e destinação final dos resíduos.

3.5 CINZAS

3.5.1 Produção de celulose no Brasil

De acordo com o Relatório Anual de 2023 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), em 2022 o Brasil bateu o recorde de produção com 25 milhões de

toneladas de celulose. O setor planta, colhe e replanta em uma área de 9,94 milhões de hectares e cresce cada vez mais. Apenas no primeiro trimestre de 2023 a produção aumentou 2,6% em comparação com 2022.

Por outro lado, toda essa produção gera grande quantidade de rejeitos, como casca, lama de cal, lodo biológico, resíduo celulósico e cinza de caldeira pela queima da biomassa. Para cada 100 toneladas de celulose produzida são gerados em torno de 48 toneladas de resíduos (BELLOTE *et al.*, 1998).

Parte dos rejeitos da produção de celulose destina-se a regular a acidez de solos em áreas de cultivo. Outra porção é disposta em aterros sanitários. Neste caso, as instalações exigem cuidados especiais devido ao risco de contaminação, além de consequências ambientais, sociais e econômicas desfavoráveis. Assim, usar parte desses rejeitos como estabilizante em solos pode constituir opção viável em vários setores da construção como, por exemplo, em pavimentação rodoviária.

3.5.2 Cinza de cavaco de eucalipto (CCE)

Resende (2013) estudou o efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar e avaliou que a CCE possui granulometria heterogênea, com alto teor de carbono e elementos químicos como cálcio e ferro.

Silva *et al.* (2020) estudaram a influência da adição de CCE na capacidade de suporte de solo em camadas de pavimentos. Estes autores demonstram que misturas com maiores porcentagens de cinza (acima de 10%) podem ser promissoras para aplicação em pavimentos. Os mesmos estudos indicaram efeitos positivos nos parâmetros de compactação com adição de até 10% cinza de cavaco de eucalipto no solo seco e que misturas com 5% não prejudicam a resistência do solo.

Estudos de Vicente (2020) sobre resíduo da indústria de celulose para aplicação em pavimentos mostram que misturas de solo com adição de 10, 40 e 50% de CCE apresentaram aumento na capacidade de suporte e na proporção de 60% de cinza a expansão do solo foi reduzida, tornando-se quase nula. O estudo sugere que o resíduo pode ser uma alternativa viável e sustentável para estabilização de solos em pavimentação.

E o estudo de solo-cinza de eucalipto para pavimentos rodoviários de Escobar e Lima (2025) obteve resultados que indicaram que a cinza atua como fíler,

preenchendo os vazios do solo e contribuindo para a estabilização. O estudo concluiu que o uso de CCE na estabilização de solos é uma boa alternativa para aplicação em sub-bases de pavimentos rodoviários. A autora mediu propriedades do solo *in natura* e de misturas estabilizadas com 10% e 20% de cinza. A dosagem com 10% de cinza foi a mais eficiente, aumentando a resistência e a capacidade de suporte do solo, diminuindo a expansão e mantendo a sua boa trabalhabilidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 COLETA DO SOLO E DA CINZA

O solo utilizado do presente estudo foi coletado em jazida localizada em Ilha Solteira - SP, coordenadas: 20°23'53.3"S e 51°20'01.9"W. Após a coleta, o material passou por destorroamento manual e peneiramento em malha de 2,0 mm (ASTM #10).

A cinza de cavaco de eucalipto utilizada neste estudo foi disponibilizada pela empresa Suzano S.A., localizada na cidade de Três Lagoas, no estado do Mato Grosso do Sul, a aproximados 66 km de Ilha Solteira.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), foi realizada por Lopes (2023) para determinar a distribuição dos tamanhos das partículas que compõem a amostra de solo, utilizando os métodos de peneiramento e sedimentação. O método de peneiramento foi aplicado para partículas maiores que 0,074 mm, com o auxílio de um agitador mecânico, enquanto o método de sedimentação foi utilizado para as partículas menores que 0,074 mm, em água destilada.

De acordo com Vicente (2020), a cinza do cavaco de eucalipto analisada por granulometria a laser apresentou partículas significativamente mais finas do que as do solo. Essa diferença de granulometria permite que as partículas de cinza se acomodem entre os grãos maiores do solo, atuando como um material de preenchimento. Esse efeito favorece uma compactação mais eficiente, reduzindo os vazios e contribuindo para o aumento da densidade da mistura solo-cinza. Essa característica é benéfica para aplicações em pavimentação, especialmente quando se busca melhorar a estabilidade e resistência do solo.

4.2.2 Limites físicos

Os limites físicos (ou limites de Atterberg) definem as transições de consistência dos solos, sendo normatizados pelas NBR 6459 (ABNT, 2016) (limite de

liquidez) e NBR 7180 (ABNT, 2016) (limite de plasticidade). O limite de liquidez é obtido ao determinar o teor de umidade para que uma amostra de solo homogeneizada e posicionada na concha do aparelho de Casagrande, feche uma ranhura de 2mm com 25 golpes. O limite de plasticidade corresponde ao teor de umidade em que a amostra, ao ser moldada manualmente sobre uma placa de vidro, começa a apresentar fissuras. Com esses valores, calcula-se o índice de plasticidade (IP) do solo, conforme Equação (2), que indica a sua sensibilidade à variação de umidade.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

4.3 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

4.3.1 Classificação TRB

A classificação TRB (*Transportation Research Board*) é um sistema que categoriza os solos com base em suas características granulométricas e consistência, considerando parâmetros como o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), e índice de grupo (IG).

O solo usado já analisado foi classificado como A-4 (4) (LOPES, 2023), a partir do ábaco representado na Figura 3. A categoria A-4 (4) indica que o solo é predominantemente silteoso, com granulação fina e características típicas de solos não plásticos ou com baixa plasticidade.

Figura 3 – Ábaco para a classificação TRB

Grupo ou classificação		% passa na # 10	% passa na # 40	% passa na # 200	Índice de plasticidade	Limite de liquidez	Índice de grupo
A-1	A-1a	≤ 50	≤ 30	≤ 15	≤ 6	-	0
	A-1b	≤ 50	≤ 30	≤ 25	≤ 6	-	0
A-3		≥ 50	≥ 51	≤ 10	NP	-	0
A-2	A-2-4	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≤ 10	≤ 40	0
	A-2-5	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≤ 10	≥ 41	0
	A-2-6	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≥ 11	≤ 40	≤ 4
	A-2-7	≥ 50	≥ 51	≤ 35	≥ 11	≥ 41	≤ 4
A-4		≥ 50	≥ 51	≥ 36	≤ 10	≤ 40	≤ 8
A-5		≥ 50	≥ 51	≥ 36	≤ 10	≥ 41	≤ 12
A-6		≥ 50	≥ 51	≥ 36	≥ 11	≤ 40	≤ 16
A-7	A-7-5	≥ 50	≥ 51	≥ 36	≤ LL - 30	≥ 41	≤ 20
	A-7-6	≥ 50	≥ 51	≥ 36	> LL - 30	≥ 41	≤ 20

Fonte: DNIT (2006).

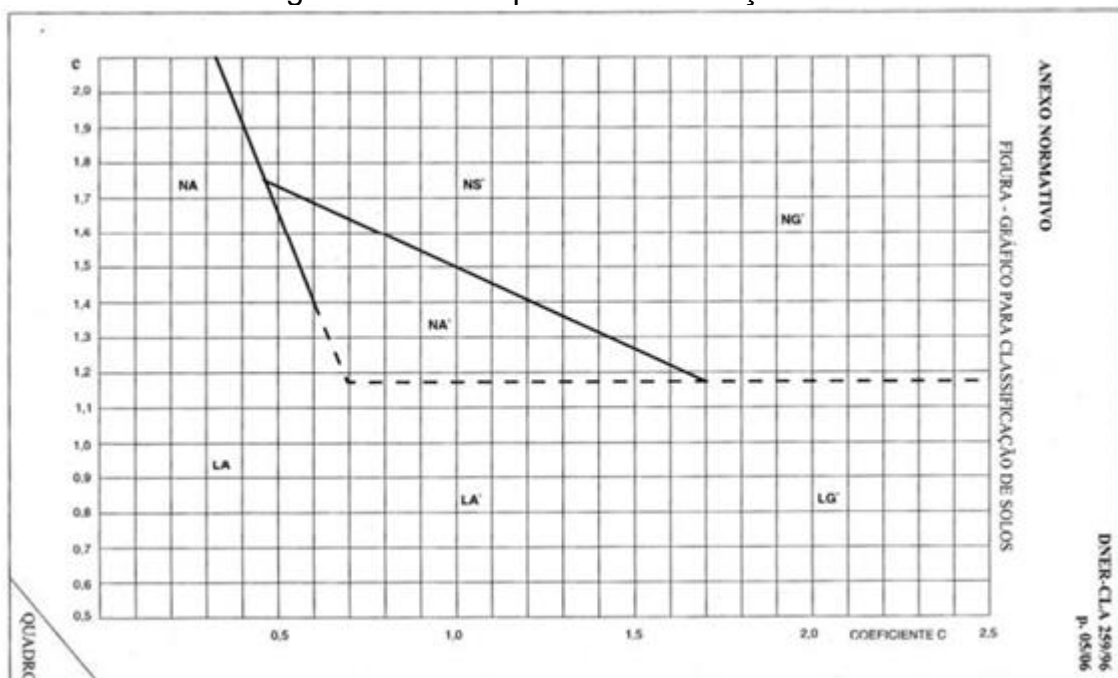
4.3.2 Classificação MCT

O ensaio mini-MCV (Miniatura Compactado Valor) foi realizado para avaliar as propriedades do solo, seguindo o procedimento estabelecido em DNIT ME 258 (2023). Esse método é uma versão adaptada do ensaio MCV proposto por Parsons em 1976, e permite determinar os coeficientes empíricos c' e d' , além do índice e' , utilizados para a classificação MCT (Miniatura Compactado Tropical) dos solos. Os resultados obtidos por Lopes (2023) foram:

- coeficiente c' : 1,25;
- coeficiente d' : 77 kg/m³;
- perda de massa por imersão (P_i): 50%;
- índice e' : 0,912.

Com base nesses parâmetros e no ábaco representado na Figura 4, o solo foi classificado como LA' (Laterítico Arenoso), tratando-se, portanto, de um solo com características lateríticas e com significativa fração de areia. Esse tipo de solo é conhecido por sua alta resistência e estabilidade, características importantes para aplicação em camadas de pavimentos.

Figura 4 – Ábaco para a classificação MCT



Fonte: DNER-CLA 259/96 (1996).

4.4 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DO SOLO

Para determinar a massa específica aparente solta do solo, foram utilizados quatro conjuntos de corpos-de-prova com diferentes tamanhos, formas e materiais, seguindo as normas NBR 7251 (ABNT, 1982), DNER-ME 152 (1995), e NBR 16972 (ABNT, 2021). As amostras foram preparadas com diferentes teores de umidade (variando de 6% a 18%) para simular condições encontradas em campo durante escavação e transporte.

Os moldes utilizados incluem formatos cúbicos de madeira e metal, cilíndricos de PVC e moldes empregados nos ensaios de compactação Proctor e mini-Proctor.

Os procedimentos incluíram a preparação prévia do solo, homogeneização manual e estocagem por 24 horas para garantir a integração dos materiais. Os corpos-de-prova foram moldados com altura de queda controlada para evitar inconsistências nos resultados.

De acordo com os procedimentos descritos, Lopes (2023) observou que os valores de massa específica aparente solta (ρ) e massa específica aparente solta seca (ρ_d) variaram de acordo com o tipo de molde e teor de umidade. De forma geral, observou-se que a massa específica do solo tende a aumentar com o aumento do teor de umidade até um certo ponto, seguido por redução, caracterizando o comportamento típico de solos de comportamento laterítico.

Os resultados evidenciam a importância da escolha adequada do molde para a determinação precisa da massa específica aparente solta, influenciando diretamente os parâmetros de projeto para a aplicação em obras de pavimentação e terraplenagem.

4.5 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM ADIÇÃO DE CINZA

O ensaio para a estabilização do solo de comportamento laterítico com adição da CCE foi realizado no laboratório de pavimentação da FEIS. Inicialmente, coletaram-se aproximados 20.000g de solo de comportamento laterítico, que foram devidamente separadas em sacos plásticos (Figura 5), para preservar a sua umidade natural. Essa etapa é fundamental para garantir que o teor de umidade do solo não seja alterado antes do início dos ensaios, preservando as suas condições de campo.

Figura 5 – Pesagem e armazenamento do solo



Fonte: Próprio autor (2025).

Para determinar o teor de umidade natural do solo, uma amostra representativa foi separada e submetida à secagem em estufa até massa constante. O teor de umidade obtido após a secagem foi de 0,9%.

Em seguida, adicionaram-se 10% de cinza ao solo – melhor dosagem, de acordo com Escobar e Lima (2025). A cinza incorporada ao solo foi devidamente estimada e homogeneizada, conforme a Figura 6. Destaca-se que foi realizada a mistura até que o solo e a cinza não se distinguíssem mais. Esse processo de estabilização é essencial para garantir que as amostras apresentem as características desejadas para os ensaios de massa específica aparente solta.

Figura 6 – Preparação da mistura solo-cinza



Fonte: Próprio autor (2025).

As misturas de solo-cinza foram estocadas em local controlado, assegurando que as condições de umidade e temperatura fossem preservadas até o momento dos ensaios.

4.6 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DA MISTURA

Alduino, Lopes e Lima (2023), concluíram que é possível medir a massa específica aparente solta de solos de comportamento laterítico e não laterítico empregando moldes com diferentes formas, tamanhos e materiais. O trabalho sugere que dentre os moldes avaliados, o cilíndrico é o mais adequado para realizar as medições.

Então, para determinar a massa específica aparente solta da mistura solo-cinza com teor de umidade natural neste estudo, foram utilizados apenas os moldes cilíndricos de PVC (NRB 16972, 2021) com os dois tamanhos. Também, e de maneira complementar, foram realizados testes adicionais empregando cilindros dos ensaios de mini-CBR e CBR (Figura 7).

Figura 7 – Moldes cilíndricos

MOLDES	MATERIAL	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	VOLUME (cm³)	FOTO
Cilíndrico menor	PVC	22,10	26,80	10280,38	
Cilíndrico maior	PVC	26,30	28,30	15374,03	
Mini-CBR	Metal	5,00	13,00	255,25	
CBR	Metal	15,00	17,74	3134,92	

Fonte: Próprio autor (2025).

As Figuras 8, 9, 10 e 11, mostram etapas do ensaio em cada tipo de molde. A mistura foi despejada com altura de queda controlada, a fim de evitar inconsistências nos resultados. Depois, a massa foi nivelada com o auxílio de uma régua, de modo a preencher todo o volume do molde. Destaca-se que o ensaio foi repetido três vezes para cada um dos moldes.

Figura 8 – Molde cilíndrico menor para determinar a massa específica aparente solta



Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 9 – Molde cilíndrico maior para determinar a massa específica aparente solta



Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 10 – Molde mini-CBR em determinação a massa específica aparente solta



Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 11 – Molde CBR em determinação da massa específica aparente solta



Fonte: Próprio autor (2025).

O cálculo da massa específica aparente solta é feito conforme a Equação (2).

$$\rho = \frac{M_S}{V_{CP}} \quad (2)$$

Sendo ρ a massa específica aparente solta, em g/cm³; M_S a massa solta da mistura solo-cinza, em g; e V_{CP} o volume do corpo-de-prova, em cm³.

4.7 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA DA CINZA

Repetiu-se o mesmo procedimento citado no item anterior, mas dessa vez para determinar a massa específica aparente solta da cinza pura, utilizando-se o cilindro CBR, como observado na Figura 12.

Figura 12 – Molde CBR em determinação da massa específica aparente solta da cinza



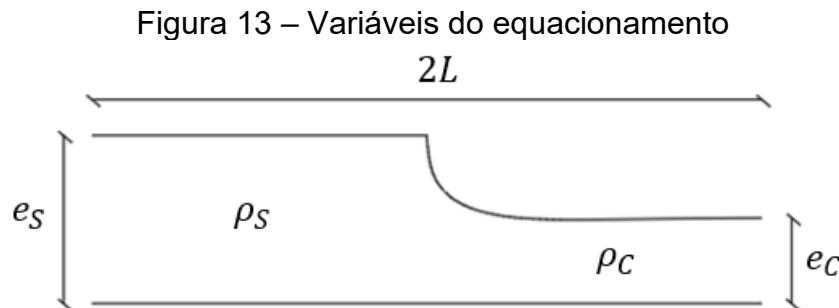
Fonte: Próprio autor (2025).

4.8 CÁLCULO DO NÚMERO DE VIAGENS

Em pavimentação, a determinação do número de viagens necessárias para transportar o material até o local da obra é fundamental para planejar as operações e a logística, além de evitar perdas de materiais. Para tanto, é necessário conhecer parâmetros relacionados à geometria do trecho da via em construção e propriedades dos materiais empregados. Como, por exemplo:

- $2L$: largura da plataforma (m);
- E : extensão do trecho (m);
- e_s : espessura da camada solta (cm);
- e_c : espessura da camada compactada (cm);
- ρ_s : massa específica aparente solta (g/cm^3);
- ρ_c : massa específica aparente compactada (g/cm^3);
- q : capacidade da caçamba.

A Figura 13 permite identificar as variáveis relacionadas ao cálculo do número de viagens.



Fonte: Próprio autor (2025).

A largura da plataforma ($2L$) foi admitida e tomada como referência características típicas de estradas florestais. A extensão (E) é de 1 km, de maneira a melhor indicar o consumo de cinza por trecho construído; neste caso: por quilômetro. A massa específica aparente compactada (ρ_c) deriva de estudos de Escobar e Lima (2025). A espessura da camada compactada (e_c) equivale à espessura mínima de camada granular quando se adota o método do DNIT (2006) para dimensionar pavimentos. A massa específica aparente solta (ρ_s) corresponde ao valor para a

mistura solo-cinza. O caminhão transportador tem caçamba basculante com capacidade para 8m³.

Com base nestes parâmetros foram calculados os demais fatores relacionados ao transporte dos materiais e à logística operacional dos serviços de construção. As etapas do equacionamento são descritas a seguir (Equações 2 a 5).

O cálculo do volume compactado (V_C).

$$V_C = e_C \cdot 2L \cdot E \quad (3)$$

Temos que:

$$\rho_S \cdot e_S = \rho_C \cdot e_C \quad (4)$$

Assim, é possível encontrar o valor de e_S e o volume solto (V_S) da mistura.

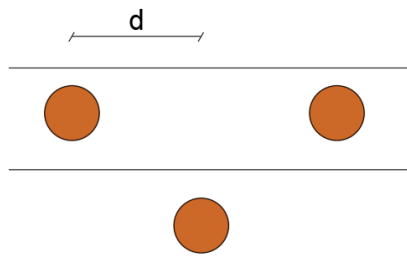
$$V_S = \frac{\rho_C \cdot e_C}{\rho_S} \cdot 2L \cdot E \quad (5)$$

Por fim, o número de viagens (N).

$$N = \frac{V_S}{q} \quad (6)$$

O número de viagens permite calcular a distância de descarregamento (d) do material no local da obra, de maneira a obter a espessura solta (e_S) capaz de resultar na dimensão da camada compactada (e_C) projetada. Desta forma, agilizam-se os serviços de construção. A Figura 14 é um croqui do descarregamento, em que a distância (d) é obtida pela Equação (7). Destaca-se que, tanto para o cálculo do número de viagens quanto para o cálculo da distância de descarregamento, foi considerada a mistura (solo-cinza) usinada.

Figura 14 – Distância de descarregamento do material da obra



Fonte: Próprio autor (2025).

$$d = \frac{E}{N} \quad (7)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOLTA

A Tabela 1 resume os resultados das medidas de massa específica aparente solta da mistura de solo de comportamento laterítico com adição de 10% de cinza e teor de umidade natural. Em todos os casos, M refere-se à massa de material para o molde empregado, V indica o volume do molde em ensaio e ρ corresponde à massa específica aparente solta da mistura. Dessa forma, ρ_{s1} , ρ_{s2} e ρ_{s3} representam a massa específica aparente solta da mistura encontrada em cada repetição do ensaio e ρ_s é a média desses resultados. “Cilíndrico maior e cilíndrico menor” correspondem aos moldes indicados em norma (NBR 16972, 2021).

Tabela 1 – Massa específica aparente solta da mistura para diferentes tipos de moldes

MOLDES	M (g)	V (cm ³)	ρ_{s1} (g/cm ³)	ρ_{s2} (g/cm ³)	ρ_{s3} (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
Cilíndrico menor	13080	10280	1,267	1,274	1,277	1,272
Cilíndrico maior	19295	15374	1,247	1,255	1,264	1,255
Mini-CBR	4096	3135	1,238	1,249	1,234	1,307
CBR	317	255	1,301	1,307	1,311	1,238

Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores de ρ_s nos ensaios em conformidade com a norma técnica mostram-se equivalentes, assim como o valor determinado com o molde do ensaio CBR. Nesta sequência, apenas o valor medido no cilindro mini-CBR apresentou dispersão significativa em relação aos demais. A massa específica aparente solta média foi de 1,268 g/cm³.

Também foi determinada a massa específica aparente solta da cinza pura utilizando o cilindro CBR. Os valores encontrados em cada repetição do ensaio foram igual à 1,019 g/cm³, 1,032 g/cm³ e 1,027 g/cm³ que resultou em um valor médio de 1,026 g/cm³.

5.2 CÁLCULO DO NÚMERO DE VIAGENS

Os parâmetros geométricos da via adotados neste trabalho, foram:

- $2L = 6 \text{ m}$;
- $E = 1 \text{ km}$;
- $e_c = 15 \text{ cm}$.

Para determinar o número de viagens do caminhão transportador, por quilômetro de via construído, adotaram-se:

- $\rho_c = 2,060 \text{ g/cm}^3$;
- $q = 8 \text{ m}^3$.

O valor de $2,060 \text{ g/cm}^3$ resulta de estudos de Escobar e Lima (2025), para teor de umidade ótima da mistura solo-cinza com 10% de cinza. O volume da caçamba é 8 m^3 e corresponde à capacidade volumétrica de um caminhão toco basculante e de porte médio (TRANSPORTES, 2013).

A massa específica aparente solta admitida nos cálculos corresponde ao valor médio dos ensaios (Tabela 1). Portanto, ρ_s da mistura solo-cinza é $1,268 \text{ g/cm}^3$. Assim, foi possível determinar o consumo de cinza em cada quilômetro de estrada construído e, da mesma forma, o número de viagens do caminhão.

Admitindo as condições previstas quanto a geometria do trecho e as propriedades geotécnicas dos materiais, cada quilômetro de estrada absorve $292,43 \text{ m}^3$ de cinza de biomassa de eucalipto, o que corresponde a aproximadamente $300,03$ toneladas, considerando a sua massa específica aparente solta de $1,026 \text{ g/cm}^3$. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), o Brasil produziu, em 2022, cerca de 25 milhões de toneladas de celulose.

Com base em comunicação pessoal (2025), empresa regional gera aproximados 80 kg de rejeitos para cada tonelada de celulose produzida. Deste montante, 5% correspondem à cinza da queima da biomassa. Daquele volume (5%), 20% são empregados em áreas de cultivos e 80% são despejados em aterros.

Considerando aquela produção de 25 milhões de toneladas, 80 kg de rejeito por tonelada e os 5% correspondentes ao rejeito de cinza, projeta-se uma geração anual de cerca de 600 mil toneladas de cinza. Deste montante, 480 mil toneladas

seriam depositadas em aterros e outras 120 mil toneladas empregados como adubo nas áreas de cultivos.

Observando as condições iniciais do pavimento e o emprego de misturas estabilizadas com 10% de cinza e tomando como exemplo que 10% desse volume anual de cinza fosse destinado à pavimentação, seria possível construir cerca de 200 km de estrada por ano, com o consumo médio de 300,03 toneladas de cinza por quilômetro. Observar que este aproveitamento equivale ao consumo de 0,05% do volume (total gerado), por km construído, demonstrando o potencial de aproveitamento sustentável do resíduo e os benefícios ambientais associados à redução do descarte em aterros.

O número de viagens para transportar o volume da mistura (solo-cinza) suficiente para construir um quilômetro de pavimento é de 366 viagens. Salienta-se que este valor corresponde ao caminhão carregado. Mas o planejamento deve considerar o ciclo de viagens e, portanto, incluir as viagens (de retorno) com o veículo vazio. Assim, o número total é: 732 viagens, para um total de volume solto igual a 2924,29 m³. A distância (d) de descarregamento na pista é 2,74 m.

Realizaram-se cálculos adicionais para o solo *in natura* nas mesmas condições geométricas da via. Neste caso, os valores admitidos para ρ_c e ρ_s resultam de estudos de Lopes (2023) e foram, respectivamente: 1,954 e 1,003 g/cm³. O volume solto calculado para este caso foi de 3506,68 m³. O número total de viagens (ida-e-volta) foi 878 viagens, equivalentes ao incremento aproximado de 20% por quilômetro, em relação às viagens com a mistura de solo-cinza. Neste caso, a distância de descarregamento na pista seria de 2,28 m.

O custo de uma viagem pode variar de acordo com diversos fatores, como a distância percorrida, condições das estradas, consumo de combustível, manutenção do veículo, pedágios e outros encargos operacionais. Para fins de exemplificação e para tornar mais visível os valores medidos, adotou-se o custo médio de R\$ 4,32 por quilômetro rodado, com base na tabela de preços unitários não desonerados do Departamento de Estradas de Rodagem do estado De São Paulo (2025).

Considerando uma distância de 5 km entre a jazida e o local da obra, o custo estimado por viagem seria, portanto, de aproximados R\$ 21,60. Com base na redução observada de 146 viagens ao utilizar a mistura estabilizada com cinza (de 878 para 732 viagens), o valor total reduzido por quilômetro de pavimentação seria da ordem de R\$ 3.153,60, representando uma economia de quase 17%.

O presente estudo permitiu novas abordagens para determinar a massa específica aparente solta de solos, com foco na aplicação em misturas estabilizadas com cinza para a construção de pavimentos rodoviários. Foi demonstrada a viabilidade da medição da massa específica aparente solta de solos com moldes menores, possibilitando ensaios mais rápidos e práticos.

Com a estabilização do solo de comportamento laterítico com 10% de cinza de cavaco de eucalipto foi possível ampliar o escopo da análise. O uso da mistura preservou a qualidade dos ensaios em moldes menores.

Considerando os parâmetros adotados para um trecho de estrada, cada quilômetro construído absorve 292,43 m³ de cinza de biomassa de eucalipto, correspondentes à dosagem de 10%. O aproveitamento de cinza como estabilizante de solos implica em menor consumo de material *in natura* e menor volume de rejeitos destinado ao aterro sanitário. Da mesma forma, o número de viagens por quilômetro é 732, quase 20% menor em relação ao transporte do solo *in natura*. O conjunto destes fatores implica ainda em economia nos custos operacionais e redução dos impactos ambientais.

6 CONCLUSÃO

Considerando que o Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo (IBÁ, 2022) e que a cinza de cavaco de eucalipto é um subproduto abundante e muitas vezes descartado de forma inadequada, a utilização desse resíduo como estabilizante representa uma solução viável para reduzir impactos ambientais e custos. Além disso, o menor número de viagens necessárias para transportar a mistura, quando comparado com o número de viagens necessárias para transportar o solo puro, implica em menor consumo de combustíveis e de emissões de gases poluentes.

Dessa forma, os resultados demonstram que a mistura pode ser uma alternativa eficiente para a pavimentação rodoviária, promovendo a preservação de recursos naturais e a valorização de resíduos industriais. Esta abordagem é uma alternativa que pode servir de base para projetos futuros. Além disso, a utilização de moldes cilíndricos menores reforça a importância de facilitar e agilizar ensaios e procedimentos em laboratório e em campo.

REFERÊNCIAS

- ALDUINO, L. Y.; LOPES, G. S.; LIMA, J. S. P. Massa específica aparente solta de solos com comportamento laterítico e não laterítico. In: II Congresso Latino-americano de Desenvolvimento Sustentável. UNESP – FEIS. 2023. **Anais...** Botucatu. 2023.
- ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro. 2021. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459**: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro. 2016. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180**: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 2016. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro. 2016. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro. 1982. 3p.
- BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, v.37, p.99-106. 1998.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Introdução. In: BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2008. 504p. cap 1, p.9-24.
- COMMITTEE ON TROPICAL SOLIS OF THE ISSMFE (1985). **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils**. Progress Report, 1982-1985. São Paulo: ABMS, 1985.
- CRISPIM, F. A. **Compactação de Solos: Influência de Métodos e de Parâmetros de Compactação na Estrutura dos Solos**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- DAS, Braja M.; Sobhan, Khaled. **Principles of Geotechnical Engineering**, 9th ed. Boston: Cengage Learning, 2013.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **TPU - Tabela de preços unitários não desonerados**. São Paulo. 2025. 31 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 152/95**: Brasília: DNER, Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. 1995. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.

DNER-CLA 259/96: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Brasília, 1996. 6 p.

DNIT 258/23 - ME: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Brasília, 2023. 22p.

ESCOBAR, M. S.; LIMA, J. S. P. **Solo-cinza para pavimentos rodoviários**. III ENCONTRO INTERNACIONAL EM DEMOCRACIA AMBIENTAL. São Carlos, SP. 2025.

EUGÊNIO, A. F. J. G.; RODGHER, S. F.; MARCO, G. **Estradas: análise do subleito e suas patologias aplicadas a rodovias**. Universidade de Araraquara, 2024.

FLORESTAS.PT. **Como se estudam e classificam os horizontes ou camadas do solo**. Florestas.pt, 2021. Disponível em: <https://florestas.pt/saiba-mais/como-se-estudam-e-classificam-os-horizontes-ou-camadas-do-solo/>. Acesso em: maio de 2025.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual de 2022**. São Paulo: IBÁ Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anualiba2022-compactado.pdf>> Acesso em: abril de 2025.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual de 2023**. São Paulo: IBÁ Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anualiba2022-compactado.pdf>. Acesso em: abril de 2025.

LAUFER, B. Chinese Clay Figures, Part 1: **Prolegomena on the History of Defensive Armor**. University of California. Kessinger Publishing: Whitefish, China, 1967.

LEANDRO, Rhayane Faria. **Estabilização de solos com rejeitos de celulose para uso em pavimentação rodoviária**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2023.

LIMA, R. X. **Logística da distribuição de materiais em pavimentação rodoviária: uma modelagem em programação matemática**. 2003. 288 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LIMA, V.C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **O solo no meio ambiente**: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2007. Acesso em: maio de 2025.

LOPES, Gabriel Souza. **Estudo da massa específica aparente solta de solos com comportamento laterítico**. 2024. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2024.

MACIEL, N. S.; GACHET, L. A. Contribuições para o dimensionamento de pavimentos revestidos de asfalto de alto desempenho – comparações entre softwares: ELSYM-5 e MEDINA. In: XXX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, 2022, Campinas. **Anais...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2022.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice**: State of the art review. Sweden: Lulea? University of Technology, 2013.

MARANGON, M. **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilização Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência**. Tese de Mestrado. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: COPPE/UFRJ, 2004.

MASTER PLATE. **Diferença entre pavimento rígido e flexível**. Disponível em: <https://masterplate.com.br/diferenca-entre-pavimento-rigido-e-flexivel/>. Acesso em: maio de 2025.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2005. hed by Kendall/Hunt Publishing Company.

MOURA, V. B. **Análise de custos em serviços de terraplenagem: estudo de caso na Barragem Alívio – Lajes/RN**. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2022.

MOUSAVI, S.E., KARAMVAND, A. **Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand**. Journal of Traffic and Transportation Engineering, (English Edition), Periodical Offices of Chang'an University, 2017.

PAVSINAL. **O que é processo de compactação de pavimento**. 2024. Disponível em: <https://pavsinal.com.br/glossario/o-que-e-processo-de-compactacao-de-pavimento/>. Acesso em: maio de 2025.

PRASS, A. S.; DALLA ROZA, A. E.; SANTOS, W. M.; SANTOS, B. G. S.; CRISPIM, F. A. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas a solos do município de Alta Floresta – MT. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais...** Balneário Camboriú, 10 a 14 de nov. 2019. Disponível em:

https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Solos%20e%20Concreto%20I/6_695_AC.pdf. Acesso em: maio de 2025.

RESENDE, Domingos Sávio de. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Centro Tecnológico (CETEC) / Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), 2013.

SILVA, I. S.; MARTINS, C. P.; RODRIGUEZ, T. T.; MONTEIRO, P. R.; CÂNDIDO, V. B. R. Influência da Adição de Cinza de Cavaco de Eucalipto na Capacidade de Suporte de Solo Residual para Aplicação em Camadas de Pavimentos. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Vol. 1, 2022, Campinas, SP. **Anais...** Campinas, 2020.

SILVEIRA, V. L. **Estabilização de solos com cinza de caldeira a coque para camadas de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2015. Trabalho de conclusão (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Ciência e Tecnologia, Ministério da Defesa, Exército Brasileiro.

SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de argamassas**. Dissertação (Engenharia Química). Universidade Federal do Pará – UFPA. Belém, 2011.

SUNDSTRON, M. G. **Caracterização e avaliação das cinzas da combustão de carvão mineral geradas na região do baixo Jacuí– RS**. Dissertação (Mestrado em Avaliação de impactos ambientais em mineração). Centro Universitário La Salle – UNILASALLE. Canoas, 2012

TRANSPONTES. **Caminhão Basculante**. 2013. Disponível em: <https://transponteslocoes.com.br/blog/caminhao-basculante/>. Acesso em: maio de 2025.

VICENTE, Gabriela Oliveira. **Estudo de resíduo da indústria de celulose para aplicação em pavimentos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2020.

VILLOBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. Arte & Ciência, São Paulo, 2009. 291p.

ZORZI, C. **Caracterização dos solos tropicais lateríticos para reforço de pavimentos**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2008.