

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

GABRIELA OLIVEIRA VICENTE

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CELULOSE PARA
APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

**Ilha Solteira
2022**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GABRIELA OLIVEIRA VICENTE

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CELULOSE PARA
APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Dissertação de Mestrado Acadêmico apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de conhecimento: Engenharia de construção civil

Orientador: Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima.

Coorientador: Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima.

**Ilha Solteira
2022**

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V632e Vicente, Gabriela Oliveira.
Estabilização de solo com adição de resíduo de celulose para aplicação em
pavimentação rodoviária / Gabriela Oliveira Vicente. – Ilha Solteira: [s.n.], 2022
66 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia de Construção
Civil, 2022

Orientador: Mauro Mitsuuchi Tashima
Co-orientador: Jairo Salim Pinheiro De Lima
Inclui bibliografia

1. Estabilização. 2. Cinza de eucalipto. 3. Solo laterítico. 4. Sustentabilidade.

Raiane da Silva Santos

Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
11.948-1-0009



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CELULOSE
PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

AUTORA: GABRIELA OLIVEIRA VICENTE

ORIENTADOR: MAURO MITSUUCHI TASHIMA

COORIENTADOR: JAIRO SALIM PINHEIRO DE LIMA

**Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL,
área: Estruturas pela Comissão Examinadora:**

Prof. Dr. JAIRO SALIM PINHEIRO DE LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr.ª NATÁLIA DE SOUZA CORREIA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos

Ilha Solteira, 30 de novembro de 2021

Dedicatória

Dedico esta pesquisa a meus pais Aldo Vicente Filho e Maria Lúcia Oliveira Vicente, com muita gratidão a todo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por guiar meu caminho e me manter firme na caminhada, por tudo conquistado até hoje.

Ao orientador Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima e ao coorientador Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima pela oportunidade em realizar esta pesquisa, obrigada pela confiança depositada em mim. Agradeço pelos grandes ensinamentos compartilhados, por toda ajuda e paciência e prontidão.

Aos meus pais Aldo Vicente Filho e Maria Lúcia Oliveira Vicente que nunca mediram esforços para me ajudar, por acreditarem em mim e sempre incentivar meus sonhos, por todo amor e carinho.

Ao meu irmão Guilherme de Oliveira Vicente e esposa Aline Gabrielle Mendes, por todo amor, carinho, incentivo e parceria durante toda essa caminhada.

A Igor Seicho Kiyomura por me acompanhar durante todos esses anos e por todo apoio nesta trajetória, carinho e atenção dedicados a mim.

Ao amigo Gean Pereira da Silva Junior pela ajuda em laboratório e parceria dentro e fora da universidade. Aos amigos de faculdade: Camila Sakamoto, João Vitor Berti, Mariana Trevisan, Rodrigo Bispo, por toda ajuda e amizade.

A todos os amigos que mesmo longe se fizeram presentes em minha vida durante este período.

Ao técnico de laboratório Ozias Porto por todo auxílio na execução dos ensaios desta pesquisa e aos demais técnicos pelo auxílio na utilização do laboratório durante aulas e demais atividades.

A Universidade estadual paulista “Júlio de Mesquita Filho” por toda infraestrutura concedida para realização desta pesquisa.

A empresa FIBRIA, atual Suzano por todo material doado.

À Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo nº 88882.433548/2019-01.

RESUMO

Estabilização é um método que visa melhorar a qualidade do solo aumentando a sua estabilidade, criando um esqueleto mineral estável por meio de correção granulométrica. O crescimento de indústria de celulose nos últimos anos aumentou também a quantidade de resíduos gerados que, por sua vez, acarretam consequências ao meio ambiente, necessitando de aterros ou de alternativas para descarte, reciclagem e reutilização. Esta pesquisa tem como propósito analisar a estabilização granulométrica de um solo laterítico colapsível do município de Ilha Solteira - São Paulo, Brasil, com adição de cinza de cavaco de eucalipto (CCE) provinda da indústria de celulose e sua possível aplicação em camadas de pavimentos. Foram moldados corpos-de-prova, sem adição de cinza para manter o controle das condições naturais do solo, e amostras com 10, 20, 30, 40, 50 e 60% de adição de cinza em relação ao peso do solo seco. Tanto para o solo quanto para a cinza foram realizados ensaios de caracterização. Posteriormente os corpos-de-prova de solo natural e com adição de cinza foram testados à compactação mini-Proctor e mini-CBR. O ensaio de mini-CBR demonstrou que as amostras com 10, 40 e 50% de adição de cinza aumentaram a capacidade suporte do solo em respectivamente 29, 22 e 5%. Para o mesmo ensaio após submersão em água, os resultados foram mais significativos sendo este ganho percebido nas amostras com 10, 30, 40, 50 e 60% de adição em respectivamente 7, 72, 181, 226 e 112%. A expansão calculada apresentou valores baixos, sendo quase nulos para todas as amostras. A melhora na capacidade suporte elevou a viabilidade de uso do solo com adição de 10% de cinza o solo se tornou viável a ser aplicado em camadas de sub-base estabilizadas granulometricamente.

Palavras chaves: Capacidade suporte. Mini-Proctor. Mini-CBR. Cinza de cavaco de eucalipto.

ABSTRACT

Stabilization is a method that aims to improve soil quality by increasing its stability, creating a mineral balance through granulometric correction. The growth of recent years has also increased the amount of waste generated, which, in turn, has consequences for the environment, requiring recycling and reuse of alternatives for disposal. The purpose of this study is to analyze the granulometric stabilization of a later collapsible soil in the municipality of Ilha Solteira - São Paulo, Brazil, with the addition of eucalyptus chip ash (ECC) from the cellulose industry and its application in pavement layers. Specimens were molded without the addition of ash to maintain control with 10, 20, 30, 40, 50 and 60% of ash addition in relation to the dry soil weight. For both soil and ash, characterization tests were carried out. Subsequently, the specimens of natural soil and with the addition of ash were tested for mini-Proctor and mini-CBR compaction. The developed mini-CBR test that as a sample with 10, 40 and 50% of ash addition increased the carrying capacity of the soil by 29, 22 and %. For the same test, submersion in water, the results were more, respectively, weight gain after the test 30, 40% addition in 6, 72, 26, 181, 112%. To almost all presented for all values, being almost all presented. The gray capacity in the carrying capacity goes to the viability of land use with the addition of 10% of soil makes it viable to be applied in granulometric stabilized sub-base layers.

Keywords: Support capacity. Mini-Proctor. Mini-CBR. Eucalyptus chip ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa Pedológico São Paulo - microrregião Ilha Solteira	15
Figura 3 - Tipos de pavimentos. a) Rígido b) Flexível	22
Figura 4 - Distribuição da área com plantios de eucalipto, por estado.	23
Figura 5 - Principais produtores mundiais de celulose.....	24
Figura 6 - Processo Kraft.....	25
Figura 7 - Resíduos gerados por processos em fabricas de celulose.....	26
Figura 8 - Localização coleta solo. a) Mapa Brasil b) São Paulo e microrregiões c) Ponto de coleta e estudo.	27
Figura 9 - Cinza de eucalipto. a) Sem processo de moagem. b) Após o processo de moagem	28
Figura 10 - Procedimentos laboratoriais	29
Figura 11 - Difração laser.....	31
Figura 12 – Amostras levadas a estufa	32
Figura 13 - Equipamento para compactação em miniatura	33
Figura 14 - Corpos-de-prova em 5 teores diferentes de umidades.....	33
Figura 15 - Prensa de CBR para ensaio de resistência a penetração.	35
Figura 16 - Ensaio mini CBR. a) Ruptura sem imersão. b) Ruptura com imersão/expansão do solo	36
Figura 17 - Curva granulométrica do solo.....	37
Figura 18 -Limite de Liquidez do solo.	38
Figura 19 - Difratograma do solo.	39
Figura 20 - Granulometria a laser da cinza de eucalipto	41
Figura 21 – Leitura inicial e leitura final do frasco.	41
Figura 22 - Curva de compactação mini-Proctor, solo sem adição de cinza.....	42
Figura 23 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 10% de cinza	42
Figura 24 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 20% de cinza.	43
Figura 25 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 30% de cinza.	43
Figura 26 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 40% de cinza.	44
Figura 27 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 50% de cinza.	44
Figura 28 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 60% de cinza.	44
Figura 29 - Granulometria Solo e CCE	46
Figura 30 - Curvas mini-Proctor de todas as amostras testadas.	46
Figura 31 - Curvas típicas de compactação de solos brasileiros	47
Figura 32 - Gráfico Carga x Penetração (MINI-CBR).....	48
Figura 33 - Mini-CBR sem imersão.	49
Figura 34 - Gráfico de comparação mini-CBR	49
Figura 35 - Curvas carga versus penetração (submerso).....	51
Figura 36 - Mini-CBR com submersão.	51
Figura 37 - Gráfico de comparação mini-CBR.	52
Figura 38 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_0.	53
Figura 39 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_10.	53
Figura 40 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_20.	54
Figura 41 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_30.	54
Figura 42 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_40.	55

Figura 43- Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_50.	55
Figura 44 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_60.	56
Figura 45 - Comparação Mini-CBR com e sem imersão.	56
Figura 46 – Expansão.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem de cinza adicionada as amostras	32
Tabela 2 - Limites de Atterberg.....	38
Tabela 3 - Composição química do solo (FRX).....	39
Tabela 4 - Composição química da cinza de eucalipto (FRX).....	40
Tabela 5 - Valores de umidade ótima e massa específica de todas as amostras.....	45
Tabela 6 - Coeficiente de variação mini-CBR sem imersão.....	50
Tabela 7 - Coeficiente de variação mini-CBR com imersão	52
Tabela 8 - Valores de RIS (%).....	57
Tabela 9 - Dados obtidos compactação.	59
Tabela 10 - Parâmetros DNIT	59

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	14
2.1.	OBJETIVO GERAL	14
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICO	14
3.	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1.	SOLO	15
3.2.	SOLO COLAPSÍVEL	16
3.3.	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	17
3.3.1.	Estabilização de solo com materiais alternativos	17
3.3.2.	O Conceito de estabilização de solos	18
3.3.3.	Estabilização mecânica	19
3.4.	PAVIMENTO	21
3.5.	PRODUÇÃO DE CELULOSE NO BRASIL	23
3.5.1.	Plantio e processo Kraft	23
3.5.2.	Resíduos gerados pela produção de celulose	25
4.	MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1.	MATERIAL	27
4.1.1.	Solo	27
4.1.2.	Cinza de eucalipto	28
4.2.	MÉTODOS	28
4.2.1.	Procedimentos laboratoriais	28
4.2.2.	Classificação e caracterização do solo	29
4.2.3.	Caracterização da cinza de eucalipto	30
4.2.3.1.	<i>Ensaio realizados</i>	30
4.2.3.2.	<i>Granulometria a laser</i>	31
4.2.3.3.	<i>Determinação da massa específica</i>	31
4.2.4.	Preparação das amostras	31
4.2.5.	Ensaio de compactação em miniatura – Mini-Proctor	32
4.2.6.	Ensaio de compactação – mini CBR e expansão	34
5.	RESULTADOS	37
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	37
5.1.1.	Solo	37
5.1.2.	Cinza	40

5.1.2.1. <i>Fluorescência de raio X</i>	40
5.2.2.2. <i>Granulometria a laser</i>	40
5.1.2.3. <i>Massa Específica</i>	41
5.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – MINI PROCTOR	42
5.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – MINI-CBR	48
5.3.1. Procedimentos MINI-CBR.....	48
5.3.2. Mini-CBR sem imersão	48
5.3.3. Mini-CBR com imersão	50
5.3.4. Mini-CBR com e sem imersão comparação	53
5.3.5. Relação de perda de suporte após a imersão	57
5.4. ENSAIO DE EXPANSÃO	58
5.5. APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS	58
6. CONCLUSÕES.....	60
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento significativo do setor agroindustrial no Brasil, um problema atual é a grande produção de resíduos e rejeitos, que por muitas vezes não possuem descarte correto, ou necessitam de grandes espaços para serem armazenados e descartados de maneira correta, gerando assim alto custo para manuseio e tratamento.

O setor de produção de celulose além de consumir recursos naturais gera grande quantidade de resíduos (TALUKDAR, 2015). Este setor tem sido observado na última década devido ao grande volume de resíduos gerados (KINUTHIA, 2016). O Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo, sendo fabricadas 21 milhões de toneladas por ano (IBÁ, 2021).

Neste processo de produção são gerados diversos tipos de resíduos: sólidos, líquidos e gasosos. Entende-se resíduos como os materiais que podem possuir capacidade de reutilização e aplicação, e rejeitos aqueles sem qualquer possibilidade de uso, sendo estes descartados.

Cada etapa da produção de celulose gera determinado tipo de resíduo. Os resíduos sólidos podem-se classificar como matérias orgânicas (fibras celulósicas) e inorgânicas (lama cal, grits e dregs). Muitas vezes o descarte e a destinação final destes materiais configuram-se em grandes dificuldades para as empresas.

A utilização de resíduos em outros processos construtivos possibilita minimizar os impactos ambientais gerados pelo seu simples descarte. Reduzir as pressões sobre os aterros e sobre novas jazidas e áreas de empréstimos são ganhos ambientais primários. Além disso, reaproveitar resíduos da produção industrial é vantajoso para as empresas pois reduz o número de viagens (para exportar rejeitos e importar matérias-primas) e, neste caso, poderá ainda melhorar a qualidade de solos locais para a pavimentação de estradas.

Estudos veem sendo realizados a fim de minimizar os impactos e propor alternativas de usos para estes materiais. Uma das possibilidades é a utilização de resíduos agroindustriais originados de setores de consumo, como a fabricação de celulose, em produtos para a estabilização de solos para a pavimentação rodoviária.

Técnicas de estabilização de solo utilizando outros tipos de materiais, de origem orgânica ou inorgânica veem sendo cada vez mais estudadas a fim de suprir essa dificuldade em encontrar materiais de qualidade para execução de estradas.

O solo é muito utilizado para fins de pavimentação por conta da facilidade e disponibilidade, principalmente em pavimentos de baixo custo. Mas nem todo tipo de solo está adequado para ser utilizado em pavimentos, sendo necessárias melhorias para atingir as necessidades exigidas. Um método para o tratamento do solo é a estabilização que pode ser mecânica, granulométrica e/ou química.

Uma grande dificuldade encontrada para empregar solos na construção de estradas é a disponibilidade de materiais, tanto em quantidade e qualidade, preferencialmente próximos às regiões onde serão executadas as obras. Esta carência de materiais traz possibilidades de estudos para melhoria das características do solo utilizando materiais alternativos, para viabilizar o uso em camadas de pavimentos.

A presente pesquisa analisará a utilização de resíduo agroindustrial, cinza de cavaco de eucalipto gerado da queima de biomassa em caldeira, adicionados a um solo do interior de São Paulo. Será analisada possível aplicação em camadas de pavimentos e a viabilidade da utilização destes resíduos como agentes estabilizantes físico granulométrico.

Assim, o trabalho tem por objeto primário não apenas avaliar a possível melhoria na qualidade do solo estabilizado, mas também discutir ganhos ambientais resultantes do seu aproveitamento na construção de estradas e do menor volume de rejeitos descartados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a estabilização física e mecânica de solo, adicionando cinza de cavaco de eucalipto proveniente de indústria de celulose, para aplicação em camadas de pavimentos rodoviários.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- determinar as características físicas do solo;
- determinar características físicas e químicas da cinza de eucalipto;
- analisar a proporção ideal entre solo e cinza de eucalipto;
- avaliar a resistência à penetração dos corpos-de-prova com diferentes porcentagens de adição de cinza;
- analisar a expansão do solo e das misturas estabilizadas;
- avaliar possível aplicabilidade do solo estabilizado com cinza.

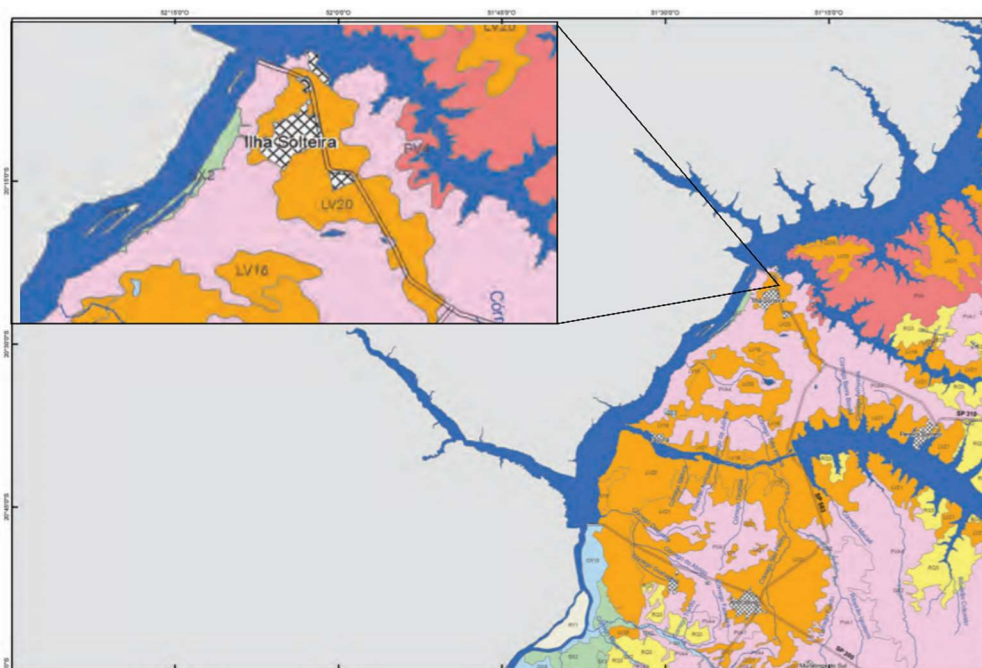
3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. SOLO

O solo torna-se o material de extrema importância na pavimentação, pois se faz presente na fundação do pavimento (subleito) e pode ser utilizado nas demais camadas, sendo o solo considerado um material solto, provenientes do intemperismo e da degradação de rochas (CNT, 2017).

A região onde foi realizado o estudo da presente pesquisa (Figura 1) apresenta solos com características de latossolo, solos minerais, homogêneos com pouca diferença entre horizontes. Quanto a cor e textura pode ser considerado um latossolo vermelho distroférico típico com textura argilosa. Outra característica da região de estudo é a colapsividade do solo.

Figura 1- Mapa Pedológico São Paulo - microrregião Ilha Solteira



Fonte: ROSSI (2017). Adaptado.

Conforme Oliveira *et al.* (2021) solos argilosos podem ser usados em vários tipos de obras. Solos compactados, podem ser encontrados em camadas de pavimento rodoviário, barragens, aterros como barreiras impermeáveis.

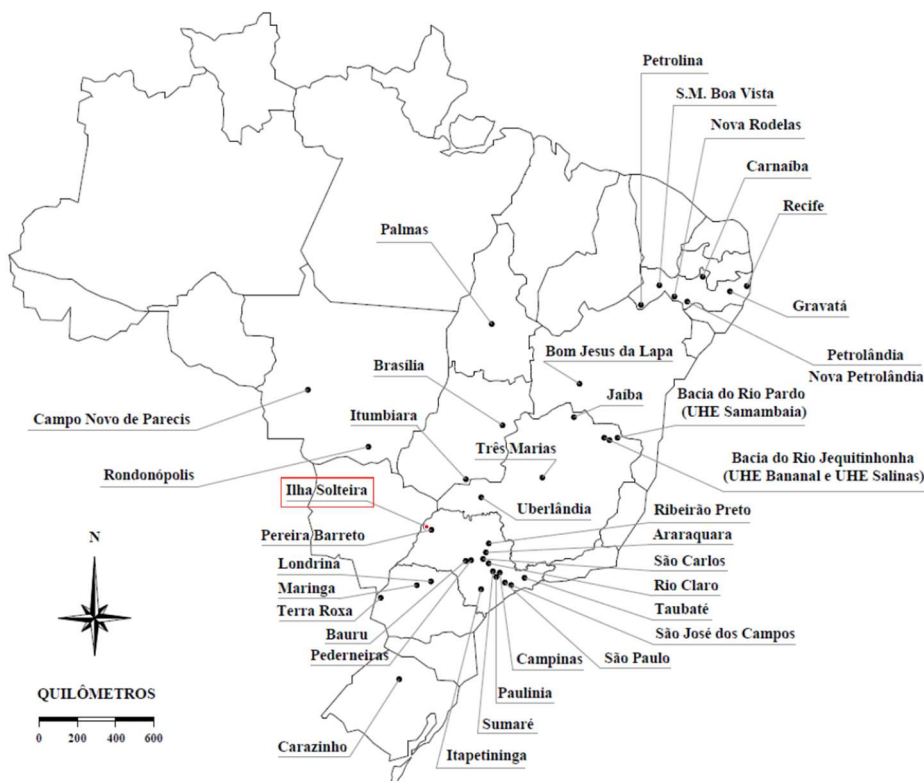
3.2. SOLO COLAPSÍVEL

Solos colapsíveis são solos não saturados, que submetidos a umedecimento sofrem perda de volume por conta do rearranjo de suas partículas podendo sofrer ruptura, independente da adição de carregamento conforme definido por Cintra (1998).

Para Ferreira (2005), a colapsividade do solo ocorre por conta de alguns fatores tais como umidade, mineral argílico, tensão vertical, estrutura, massa específica aparente seca máxima, entre outros. Eventualmente podem ocorrer por conta da estrutura porosa instável, solo não saturado e a presença de agentes cimentantes.

Solos colapsíveis são encontrados em vários países como África do Sul, Angola, Argentina, Brasil, entre outros, muito comum em países com clima quente (LOLLO, 2008). No Brasil existem alguns locais onde pode-se encontrar este tipo de solo, sendo um dos pontos localizado na cidade da presente pesquisa, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2.1 - Solos colapsíveis ocorrência Brasil



Fonte: SAAB (2016). Adaptado.

Quando um solo não saturado está sujeito a variações de umidade, especialmente por conta das condições climáticas, ele apresenta mudanças na resistência ao cisalhamento e

inconstância volumétrica, gerando assim fenômenos como o colapso. Os solos que podem apresentar tal comportamento são caracterizados com uma estrutura fofa, com baixo grau de saturação (CHAGAS *et al*, 2019).

O colapso provoca uma redução abrupta do índice de vazios gerando assim recalques no solo que podem causar danos em edificações que neles se apoiarem. Isso pode acontecer devido ao umedecimento do solo com uma estrutura metaestável (que possui a capacidade de perder estabilidade por perturbações) mesmo que não ocorra acréscimo de tensões ou sobrecarga, ocasionando assim a ruptura dos vínculos entre as partículas deste solo (DUDLEY, 1970).

Além dos danos ocasionados nas fundações o colapso pode ocasionar danos em pavimentos, deslizamentos de taludes e até a sua própria ruptura, recalques diferenciais, desabamento de túnel, entre outros. Este tipo de solo pode ser formado por aterros mal compactados, depósitos aluvionares residuais (ARAKI, 1997).

Visto o comportamento do solo colapsível se faz necessário buscar alternativas para o tratamento afim de diminuir a compressibilidade, e a estabilização torna-se uma possibilidade para obter tal melhoria.

3.3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

3.3.1. Estabilização de solo com materiais alternativos

A utilização de materiais alternativos como agentes estabilizantes em solos vem sendo amplamente estudado, visto suas contribuições significativas para a melhoria das características do solo. Além disso, implicam vantagens ambientais uma vez que o aproveitamento de resíduos diminui a pressão por áreas de aterros e depósitos e as suas consequências ambientais.

Machado *et. al.* (2003) analisou a influência de tratamento térmico em resíduos da agroindústria (grits), utilizando mufla e temperatura de 200 a 600 °C. Posteriormente adicionou 10% de grits. A amostra tratada a 600 °C apresentou ganho de resistência mecânica em relação a amostra referência.

Em seu estudo Mishra (2012) utilizou cinzas volantes disponíveis em seu local de pesquisa misturadas a cal para melhorar a resistência de um solo argiloso. A proporção avaliada pelo autor foi de 2 e 3% de cal e 30% de cinza, obtendo significativo de aumento de CBR. As amostras utilizando 2% de cal + 30% de cinza e 3% de cal + 30% de cinza tiveram valores de

CBR igual a 48 e 56% respectivamente, superiores ao solo referência que atingiu o valor de 2,3%.

Machado e Portugal (2012) analisaram a influência do resíduo grits em dois solos típicos de Minas Gerais, utilizando 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28% em relação ao solo seco. As frações estudadas de solo eram correspondentes a argila e silte, areia e pedregulho. As energias de compactação adotadas no ensaio Proctor foram: intermediária e modificada. Com o ensaio de CBR os mesmos autores notaram que a menor fração obteve melhor desempenho em relação ao ganho de resistência mecânica em 60% nas misturas com grits processados.

Silva (2017) avaliou a substituição parcial de solo por cinza de cavaco de eucalipto (CCE) para possível aplicação como reforço de base e sub-base de pavimentos. A substituição por CCE foi feita nas proporções de 0, 5, 10, 15 e 20% em relação a massa do solo seco. Foram obtidos aumentos nos resultados na porcentagem de 15%, sendo os valores de CBR o dobro da amostra referência.

Lima (2019) em seu estudo, analisou a possibilidade de aplicar cinza do bagaço cana de açúcar na estabilização química de solo para pavimentos. Foram feitas amostras de solo + cinza + cal, sendo 5% cinza, variando a porcentagem de cal de 1 a 2% alcançou valores de CBR de 78 e 83% respectivamente, ambos superiores à amostra referência (40%). Tais estudos, evidenciam a viabilidade de uso e aplicação de resíduos na melhoria das características do solo.

Baracho e Correia (2021) fez a avaliação das propriedades de um solo laterítico com diversas adições (5%, 10%, 15% e 20%) de cinza de bagaço de cana em relação ao solo seco, foi observado que a adição de cinza aumentou a resistência mecânica tendo um ganho significativo aos 28 dias de cura do solo e diminuiu sua plasticidade.

3.3.2. O Conceito de estabilização de solos

A estabilização é um tratamento utilizado para melhorar a capacidade suporte do solo. Em regiões onde o solo natural não atinge características necessárias para suportar determinadas cargas, podem ser feitas estabilizações nos mesmos. Além da aplicação em pavimentos, a estabilização de solos pode ser aplicada a fundações e em contenções de talude (VENDRUSCROLO, 2003).

Para realizar a estabilização de um solo vários fatores devem ser levados em consideração como: as propriedades do solo estudado, custos que envolvem o processo, significância das melhorias, técnica que será aplicada e os custos a curto e a longo prazo. Os principais tipos de estabilização, são: mecânico, físico e químico.

Azevedo (2010) sugere que quando os materiais disponíveis para a execução do pavimento não suprirem as exigências, pode-se avaliar a possibilidade de mudança destes materiais por outro que atenda as exigências necessárias, alterações dos projetos de dimensionamento do pavimento e estabilização deste material, utilizando métodos químicos ou mecânicos.

Para Pinto (2008) a estabilização tem como objetivo de melhorar as propriedades do solo como durabilidade, resistência entre outras, com base em procedimentos naturais ou artificiais, proporcionando assim melhorias na qualidade e no tempo de vida útil da obra.

Conforme Villibor (1982), a compactação pode ser considerada um tipo de estabilização, porém faz-se constituinte de qualquer processo de estabilização, realizado após a mistura do solo ao material estabilizante.

3.3.3. Estabilização mecânica

Conforme Villibor (1982), estabilização mecânica ou granulométrica, baseia-se na mistura entre solos, nas devidas proporções com o objetivo de aumentar sua estabilidade em relação ao solo de origem.

A estabilização mecânica é feita por meio da distribuição adequada dos grãos contendo vários diâmetros diferentes. A princípio este método é utilizado para que os vazios dos grãos maiores sejam preenchidos com grãos médios que, por sua vez, são preenchidos pelos miúdos. Com isso é possível obter uma estrutura densa pois aumenta-se a massa específica conferindo ao solo maior resistência e impermeabilidade (SENÇO, 2001).

O processo de compactação do solo tem como objetivo melhorar a integração entre as partículas reduzindo os índices de vazios, diminuindo sua fase gasosa sem variações consideráveis da quantidade de água. Após a compactação o solo demonstra melhoras em suas características, como aumento na capacidade suporte do solo, diminuição da permeabilidade e compressibilidade (CRUZ, 2004).

A estabilização mecânica é um procedimento para melhorar a resistência dos materiais, podendo ser eles naturais ou misturados a outros materiais, por meio de compactação utilizando a energia adequada, a fim de obter características necessárias de durabilidade e estabilidade (DNIT, 2010).

O processo de estabilização mecânica tem por finalidade remover o máximo possível de ar e aumentar a densidade do material, ocorre uma redistribuição das partículas que alteram a sua estrutura. Da compactação é possível obter melhorias nas características do material, tais como aumento de resistência e compressibilidade, diminuição da porosidade, permeabilidade (HOUBEN e GUILLAUD, 1994).

Segundo Murrieta (2018) ao compactar o solo ocorre um aumento e estabilidade da resistência, reduz permeabilidade e a deformabilidade, pois aplicam-se técnicas que diminuem os vazios e aumentam a sua massa específica aparente seca máxima.

Além da estabilização mecânica pode-se utilizar estabilização física e mecânica para melhoria do solo.

➤ Estabilização Física

Para Oliveira (1994) a estabilização física altera as propriedades do solo agindo na textura (mistura de solos com diversas frações granulométricas). Outras técnicas podem compreender tratamentos térmicos (secagem ou congelamento), tratamento elétrico e eletro-osmose.

Métodos deste tipo de estabilização alteram propriedades do solo por meio de reações físicas que podem utilizar eletricidade e calor. Por outro, lado estes métodos têm como desvantagem o custo elevado para execução, sendo foco de aperfeiçoamento e estudos ao longo do tempo. São divididos em estabilização por térmica (aquecimento e congelamento) e electro-osmose (CRUZ, 2004).

Este tipo de estabilização visa modificar as propriedades do solo de maneira a alterar a textura dele, alterando sua granulometria, uma das técnicas é a adição de fibras que podem ser metálicas, sintéticas vegetais ou minerais (PINTO, 2008)

➤ Estabilização Química

Estabilização química é um método em que se adiciona ao solo materiais que produzem reações químicas capazes de melhorar as suas características, como a resistência, e a permeabilidade. Os estabilizantes tradicionalmente empregados são cimento, cal, cinza, escória.

No processo de estabilização química são adicionados ao solo outros materiais (ativadores), que por sua vez modificam propriedades do solo, por reação físico-química entre as partículas ou formando uma matriz que reveste as partículas (HOUBEN e GUILLAUD, 1994).

De acordo com Cruz (2004) na estabilização química ocorrem reações entre o solo, a água e os materiais estabilizadores, melhorando as características deste solo. Algumas vantagens de utilizar este tipo de estabilização:

- diminui a perda (desgaste) de materiais pelo tráfego e erosões;
- reduz os custos de agregados (transporte, distribuição e compra);
- proteção de jazidas e materiais nobres.

3.4. PAVIMENTO

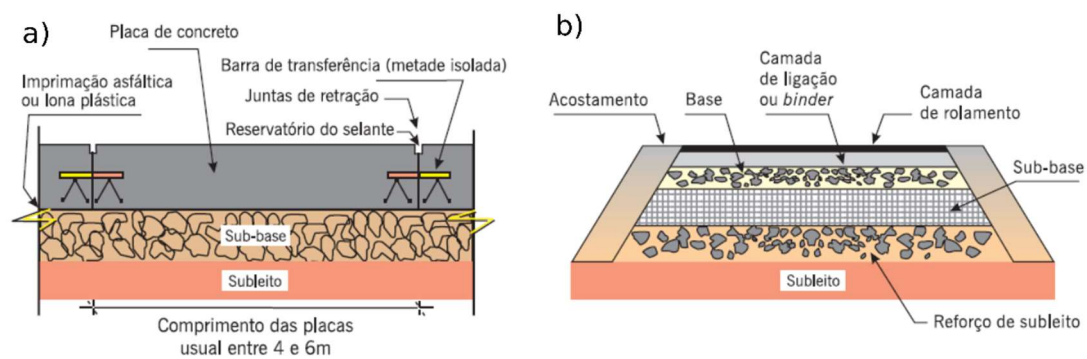
O pavimento rodoviário é constituído por múltiplas camadas de determinadas espessuras, executadas acima de uma superfície final de terraplanagem, formando assim uma estrutura. As camadas do pavimento têm como função resistir a esforços provenientes do tráfego de veículos e de ações do tempo promovendo ao usuário conforto, economia segurança e boas condições de rolamento. A matéria-prima utilizada para a confecção destas camadas é o solo (BERNUCCI et. al, 2008).

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes- DNIT (2006) os pavimentos podem ser classificados em três tipos: flexíveis, semirrígidos ou rígidos, sendo:

- Flexível: onde as cargas aplicadas a ele se distribuem de maneira similar entre todas as camadas, que sofrem deformação elástica.
- Semirrígidos: a base deste tipo de pavimento é feita com materiais com características cimentícias.
- Rígidos: a camada de revestimento é bem mais rígida se comparada com as demais, e ela é capaz de absorver as tensões aplicadas ao pavimento.

Os diferentes tipos de pavimentos se diferenciam na estrutura e nas camadas que os constituem, como demonstrado na Figura 3.

Figura 2 - Tipos de pavimentos. a) Rígido b) Flexível



Fonte: BERNUCCI et. al (2008).

DESCRIÇÃO DAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS

- Subleito: não é camada, mas a fundação do pavimento e de extrema importância pois receberá o peso da estrutura e as demais cargas aplicadas, é necessário que se faça uma análise rigorosa quanto ao solo que será utilizado;
- Reforço de subleito: camada executada sobre o subleito quando há necessidade de reforçá-lo caso tenha baixa capacidade suporte, ou para diminuir a espessura da camada de sub-base;
- Sub-base: camada que complementa a base e desempenha funções similares às do reforço do subleito.
- Base: camada executada acima da sub-base, subleito ou reforço de subleito. Possui a função de absorver cargas e distribuir devidamente as demais camadas subjacentes a ela;
- Revestimento ou camada de rolamento.

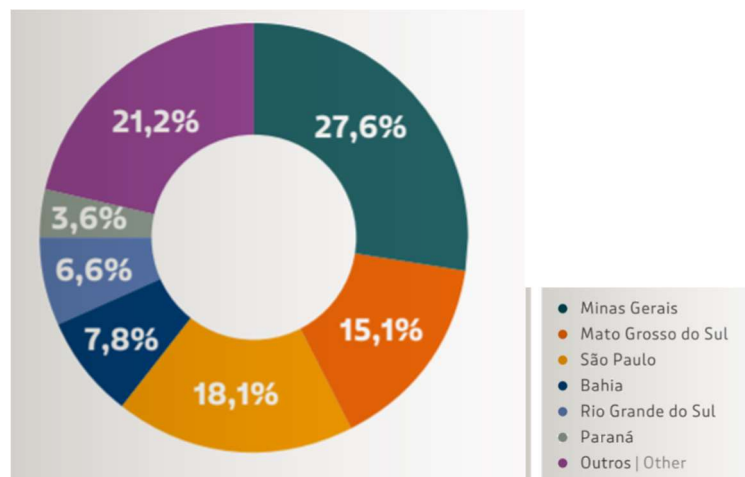
Os materiais utilizados para a execução do pavimento passam por métodos de caracterização e as suas propriedades que devem ser adequadas às solicitações de cada camada.

3.5. PRODUÇÃO DE CELULOSE NO BRASIL

3.5.1. Plantio e processo Kraft

O plantio de eucalipto no Brasil vem crescendo anualmente em média 1,1% nos últimos sete anos, sendo um destaque nesta produção o estado do Mato Grosso do Sul com crescimento de 7,4% ao ano (IBÁ, 2021). Os maiores estados produtores de eucalipto podem ser observados na Figura 4.

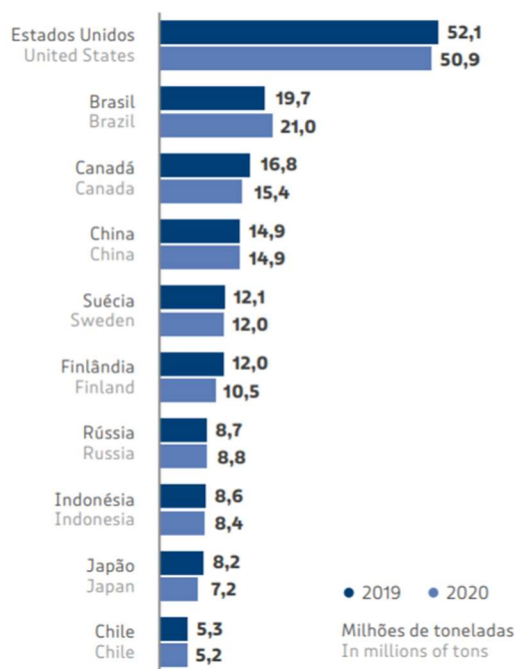
Figura 3 - Distribuição da área com plantios de eucalipto, por estado.



Fonte: IBÁ (2020).

O Brasil se tornou o segundo maior produtor mundial de celulose no ano de 2018 (Figura 5) e manteve essa posição em 2020. Atualmente o País produz 21,0 milhões de toneladas, e é considerado também o maior exportador deste insumo, visto que exporta 75% da produção e apenas 25% são consumidos no mercado doméstico (IBÁ, 2021).

Figura 4 - Principais produtores mundiais de celulose.



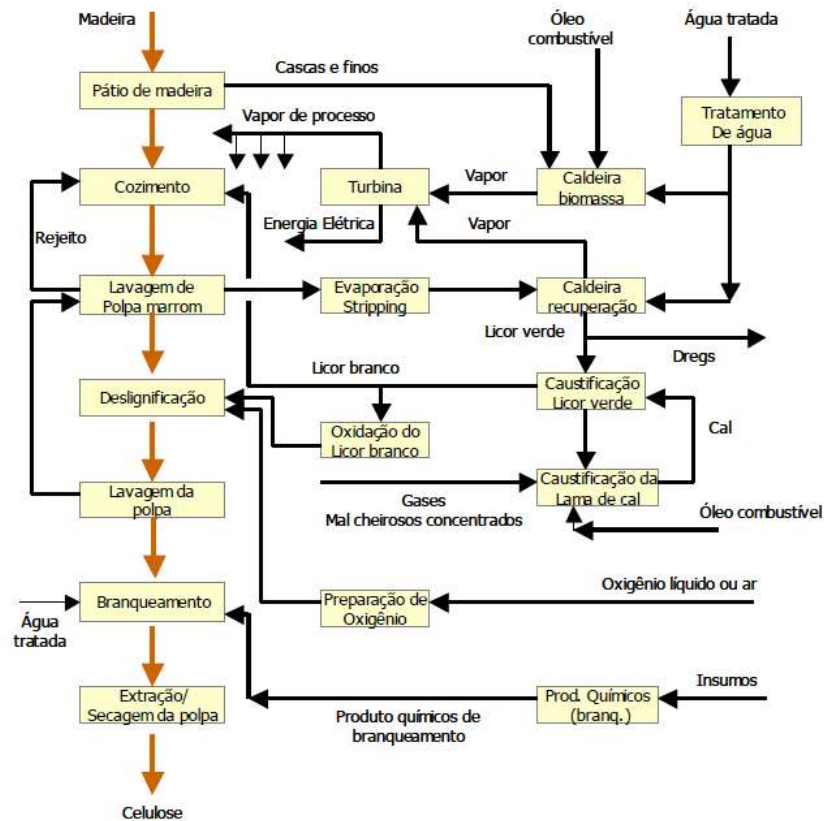
Fonte: IBÁ (2021).

O processo Kraft de produção de celulose é considerado o mais eficaz, sendo empregado em 90% de toda a produção de celulose no Brasil. Esse método se fundamenta na deterioração e extração da lignina da madeira, que tem como função primordial unir e fortalecer as fibras. A transição de madeira para polpa celulósica ocorre depois da separação das fibras. Nesta fase são aplicadas substâncias químicas e energia térmica que ocasionam a degradação e solubilização da lignina, e que mantem a união entre as fibras (MIELI, 2007).

O processo kraft tem como objetivo diluir a lignina para desprender as fibras, sem que ocorra a destruição da celulose e hemicelulose (carboidratos presentes). No cozimento são utilizados hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) para que ocorra esta reação (D'ALMEIDA, 1988).

As principais etapas do processo Kraft são: preparação da madeira, cozimento kraft dos cavacos, recuperação do licor negro, branqueamento da celulose, secagem. (MIELI, 2007). As etapas constituintes do processo Kraft, estão demonstradas na Figura 6.

Figura 5 - Processo Kraft



Fonte: PIOTTO (2003).

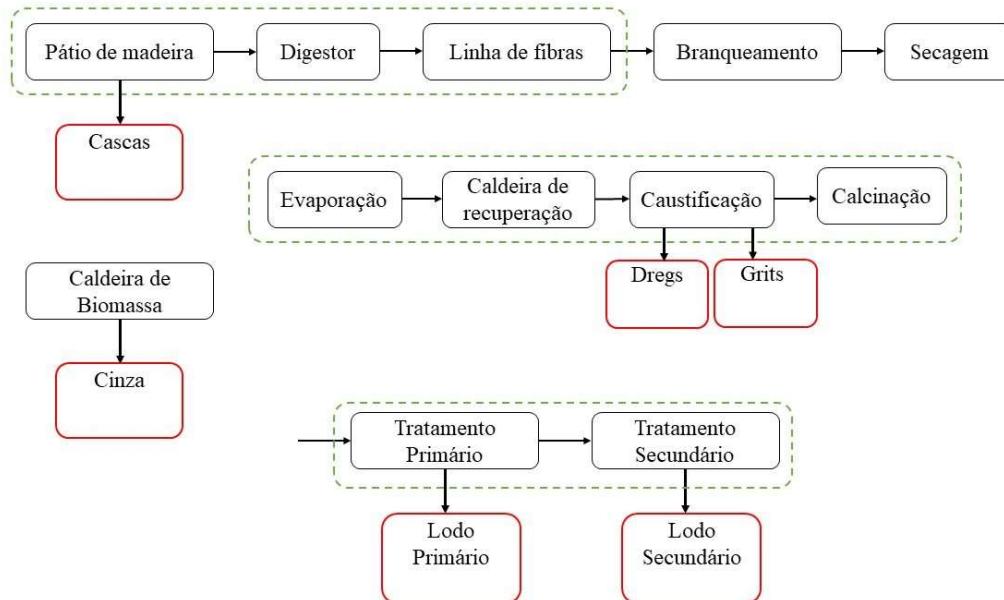
3.5.2. Resíduos gerados pela produção de celulose

Segundo ABNT (NBR – 10004:2004) resíduos sólidos podem ser originados em indústrias, residências, comércios, hospitais, setores agrícolas e de varrição. A classificação dos resíduos depende da sua origem, características e de seu impacto ao meio ambiente e à saúde humana.

Geralmente em processos que utilizam madeira como insumo principal, como no caso da indústria de celulose, são gerados resíduos com teor significativo de matéria orgânica, como casca, lama cal, lodo ativado, cinza de caldeira de queima de biomassa, dregs e grits (BELLOTE *et al.*, 1998).

De acordo com Guerra (2007) a cada toneladas de celulose produzida no Brasil, gera-se 0,8 t de resíduos sólidos. Nas fábricas de celulose são gerados resíduos orgânicos ou inorgânicos. Alguns resíduos pelo processo Kraft são: cascas, cinzas, dregs, grits, lodo primário e lodo secundário, como demonstrado na Figura 7.

Figura 6 - Resíduos gerados por processos em fabricas de celulose.



Fonte: Adaptado de MIELI (2007).

Nolasco *et al.* (2000) estimam que dentre todos os resíduos gerados pela indústria de celulose estima-se que 24% seja cascas, 17% lodos primários e ativos, 14% Dregs e Grits e 11% cinza segundo Sendo esses valores variáveis de acordo com cada indústria.

Conforme Almeida (2019) os resíduos gerados pela empresa por empresas do setor de papel e celulose, podem ser classificados como Classe II-A- Não Inertes, tendo como algumas propriedades a solubilidade em água, biodegradabilidade e combustibilidade.

A biodegradabilidade da cinza permite que ela tenha a capacidade de ser absorvida de forma rápida pela natureza, ou seja causa ao meio ambiente menores impactos ambientais. Sendo assim, candidata a ser utilizada nos estudos de estabilização dos solos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

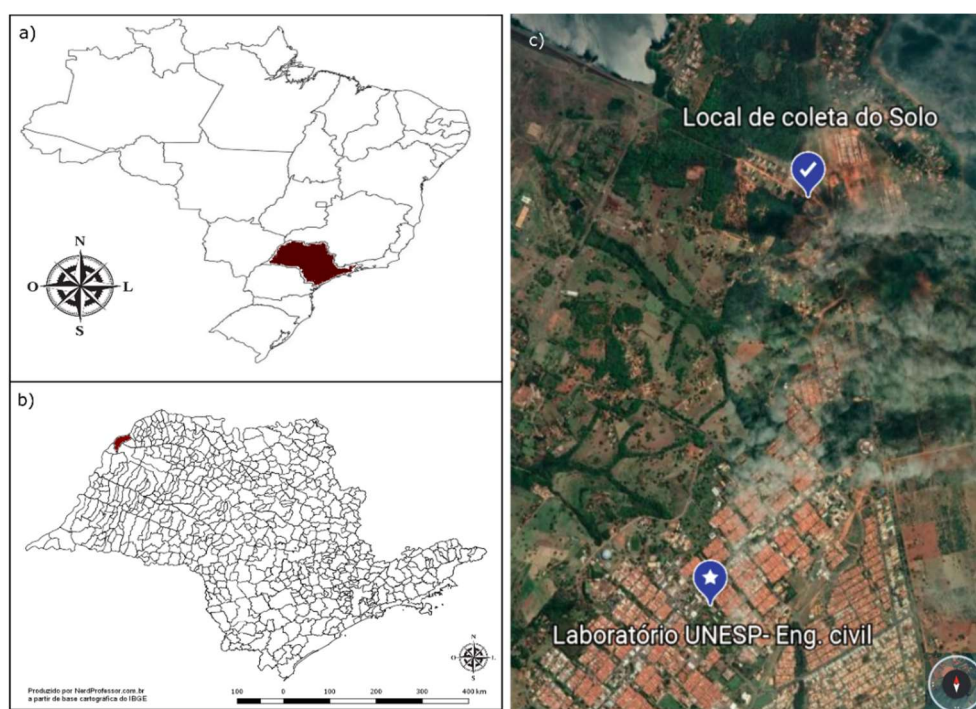
4.1. MATERIAL

4.1.1. Solo

As amostras de solo utilizadas nesta pesquisa são originadas de uma área de empréstimo, localizada na latitude $20^{\circ}23'53.3''\text{S}$ e longitude $51^{\circ}20'01.9''\text{W}$, no município de Ilha Solteira – SP.

A jazida do material de empréstimo é identificada como Torre, demonstrada na Figura 8. O ponto de coleta do solo se encontra a 4,32 km de distância do local de estudo (Laboratório UNESP- Eng. Civil), figura 8c.

Figura 7 - Localização coleta solo. a) Mapa Brasil b) São Paulo e microrregiões c) Ponto de coleta e estudo.



Fonte: Google Earth. Acesso em 25 de agosto de 2021.

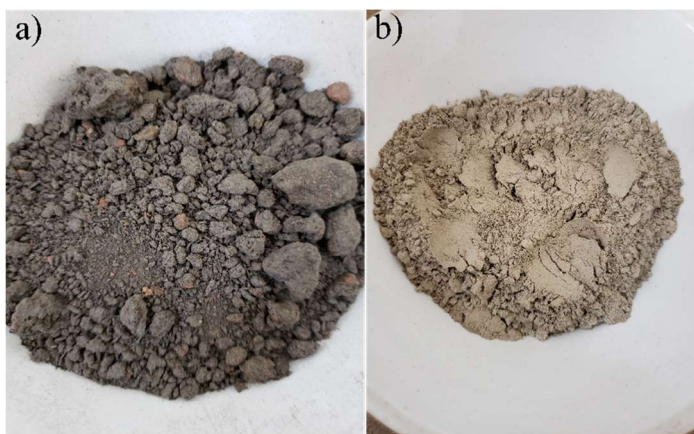
Trata-se de um solo colapsível, laterítico, arenoso fino, característico da região. Amostras de solo retirados da mesma área de empréstimo foram objeto de estudo de Yacoub (2017).

4.1.2. Cinza de eucalipto

A cinza de cavaco de eucalipto foi fornecida pela empresa Fibria – Papel e Produtos Florestais, atual Suzano S.A., localizada no município de Três Lagoas -MS, 67 km distante do local de estudo.

O resíduo passou por processo de moagem no Laboratório de Engenharia Civil – FEIS/UNESP. O equipamento empregado nesse processo foi o moinho de bolas. Cada ciclo de moagem durou 50 minutos e eram utilizados para que ocorresse a quebra das partículas de cinza. Foram utilizados 66,5 kg de esferas de ferro que na medida que rotacionava o moinho e em contato com o material quebravam em menores partículas, diminuindo a granulometria. Em cada remessa eram colocados 15 kg de cinza de cavaco de eucalipto. A cinza antes e após o este processo está demonstrada na Figura 9.

Figura 8 - Cinza de eucalipto. a) Sem processo de moagem. b) Após o processo de moagem



Fonte: Elaboração da própria autora.

Água: Em todo o processo de fabricação dos corpos-de-prova foi utilizada água tratada provinda do sistema de abastecimento local.

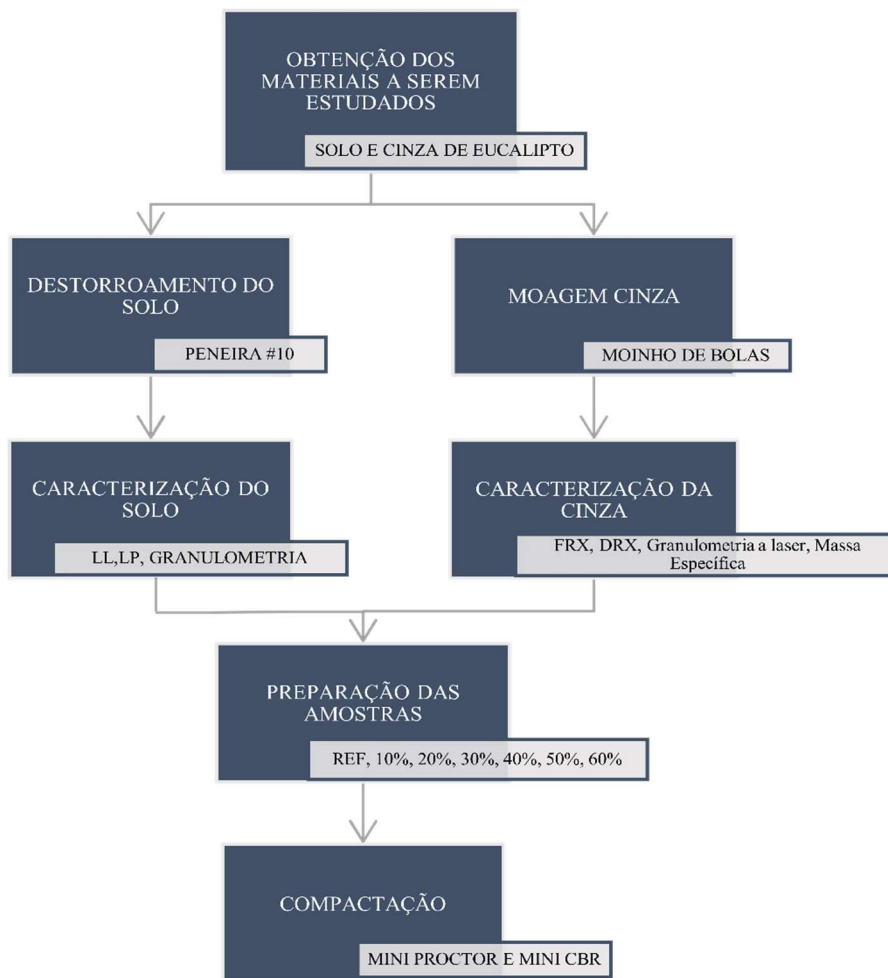
4.2. MÉTODOS

4.2.1. Procedimentos laboratoriais

A metodologia se baseou em ensaios usualmente realizados na área de geotecnia para definir parâmetros de classificação e caracterização do solo, além de ensaios físico-químicos. Para caracterização da cinza também foram feitos ensaios físico-químicos.

Previamente, os materiais objeto deste estudo foram caracterizados e classificados individualmente e posteriormente foram realizados ensaios nas amostras de solo com adição de cinza nas seguintes porcentagens 10, 20, 30, 40, 50 e 60%. A Figura 10 resume as principais etapas da metodologia adotada.

Figura 9- Procedimentos laboratoriais



Fonte: Elaboração da própria autora.

4.2.2. Classificação e caracterização do solo

Para a caracterização deste solo foram coletadas amostras deformadas para serem ensaiadas. Após a coleta foi realizado o destorroamento para melhor uniformização do solo. Posteriormente, foi feito um peneiramento utilizando a peneira ASTM #10 (American Society for Testing and Materials) correspondente a malha de 2,0 mm. Após o preparo, o solo foi submetido aos ensaios de caracterização:

- Limite de Plasticidade - NBR 7180 (ABNT, 2016);
- Determinação do Limite de Liquidez - NBR 6459 (ABNT, 2016),
- Análise granulométrica NBR 7181 (ABNT, 2016);
- Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão (DNER ME 254/97);
- Solo compactação em miniatura (DNER 228/94).

Além dos ensaios geotécnicos, o solo foi submetido a outros ensaios físico-químicos de caracterização:

- **Difração de raio X (DRX):** técnica simples e rápida, utilizada para identificar fases cristalinas presentes nos materiais. (ALBERS, *et.al.*, 2002).

- **Fluorescência de raio X (FRX):** a Espectrometria de Fluorescência de raio X é um método que pode ser qualitativo ou quantitativo. O ensaio se baseia na medida das intensidades de raios X emitidos pelos componentes da amostra. Ocorre uma incitação com raio X provenientes de uma fonte, por meio de linhas espectrais caracteriza cada elemento presente nas amostras. As intensidades destas linhas estão relacionadas com a concentração de cada elemento químico da amostra (BOUMANS, 1989).

A FRX permite identificar e quantificar os elementos químicos e as suas proporções presentes em uma determinada amostra.

4.2.3. Caracterização da cinza de eucalipto

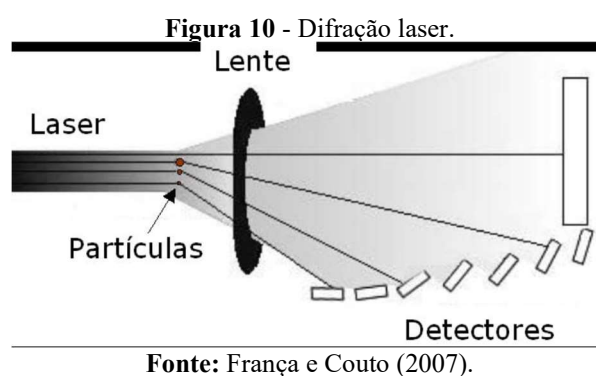
4.2.3.1. Ensaio realizados

As amostras de cinza de eucalipto foram caracterizadas após o processo de moagem (citada no item 4.1.2). A caracterização foi feita por meio dos ensaios:

- Granulometria a laser;
- Fluorescências de Raios-X (FRX);
- Determinação de massa Específica - NBR 16605 (2017).

4.2.3.2. Granulometria a laser

Para França e Couto (2007), o objetivo deste ensaio é determinar o diâmetro e o tamanho de partículas, por meio da medida dos ângulos de difração do raio laser que por sua vez tem relação com o diâmetro das partículas do material a ser ensaiado. Após o laser ser lançado, detectores (que servem para espalhar a luz) emitem sinal a um computador que faz a leitura dos dados e os cálculos necessários e posteriormente gera os resultados. Na Figura 11 é esquematizado o processo de difração a laser.



4.2.3.3. Determinação da massa específica

Foram separados 60g de cinza para utilização no ensaio de massa específica, o líquido utilizado foi querosene. O cálculo para determinação da massa específica consiste em uma relação entre a massa e a diferença de volume deslocado no frasco, demonstrado na Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V1' - V2'} \quad [1]$$

Sendo:

ρ = massa específica do material (g/cm³);

m = massa do material ensaiado (g);

v = volume deslocado no frasco (cm³);

V2' - V1' = São os valores corrigidos de v1 e v2, respectivamente a partir da calibração da escala do frasco (cm³).

4.2.4. Preparação das amostras

Inicialmente foram retiradas amostras do solo puro (sem adição de cinza), e levadas à estufa a 105° C por 24 horas para a obtenção do teor de umidade da amostra.

Em seguida começou a preparação das amostras a serem estudadas, demonstradas na Tabela 1. Cada amostra foi preparada individualmente seguindo o mesmo procedimento. Inicialmente foi adicionado a cada amostra de solo a porcentagem de cinza referente ao solo seco e homogeneizado manualmente. Após a adição de cinza foram medidos os teores de umidade de cada amostra, demonstrados na Figura 12.

Para cada amostra foram realizadas 3 repetições e considerando o valor médio entre elas.

Tabela 1 - Porcentagem de cinza adicionada as amostras

Amostra	AM_0	AM_10	AM_20	AM_30	AM_40	AM_50	AM_60
% de cinza adicionada	0	10	20	30	40	50	60

Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 11 – Amostras levadas a estufa



Fonte: Elaboração da própria autora

4.2.5. Ensaio de compactação em miniatura – Mini-Proctor

Após a preparação a mistura da cinza ao solo, foram adicionadas as proporções de água necessária para atingir cinco teores diferentes de umidades crescente a cada 1,5% (9,0%, 10,5%, 12,0%, 13,5% e 15,0%). As amostras com todas as umidades foram armazenadas individualmente dentro de sacos plásticos para garantir que não houvesse perda de umidade durante 24 horas até o início da compactação.

Após este período os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de mini-Proctor utilizando o equipamento demonstrado na Figura 13. Foi utilizada energia intermediária de compactação.

Figura 12 - Equipamento para compactação em miniatura



Fonte: Elaboração da própria autora.

Após a compactação realizada de acordo com o ensaio Solos - compactação em equipamento miniatura (DNER-ME 228/94), os corpos-de-prova com todas as umidades (Figura 14) foram levados a estufa por 24h para que fossem obtidos os parâmetros para cálculo de massa específica e do teor de umidade ótima de cada amostra.

Figura 13 - Corpos-de-prova em 5 teores diferentes de umidades.



Fonte: Elaboração da própria autora.

4.2.6. Ensaio de compactação – mini CBR e expansão

4.2.6.1. Mini-CBR

Após a obtenção das curvas de compactação e os seus valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótima para cada amostra, foi realizado o ensaio de mini-CBR. Foram moldados corpos-de-prova correspondentes às umidades ótimas (w_{ot}) de cada amostra e para cada uma delas foram compactadas 03 unidades (repetições). O procedimento deste ensaio foi realizado seguindo a norma técnica: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão (DNER-ME 254/97).

O ensaio de Mini-CBR segue os mesmos princípios do CBR tradicional, tendo como vantagem o corpo-de-prova com tamanho reduzido, diminuindo assim a quantidade de material a ser ensaiado, aumentando a facilidade de manuseio e mantendo os parâmetros necessários para análise.

4.2.6.2. Método de cálculo - Mini-CBR

Após a compactação, o corpo-de-prova, ele é submetido ao ensaio de penetração do solo. No equipamento de mini-CBR (Figura 15), são lidas as medidas de penetração, em milímetros. Conforme o pistão penetra no solo, a uma determinada velocidade, fazem-se as leituras correspondentes a penetrações. A penetração multiplicada pela constante do anel dinamométrico resulta nos valores de carga, demonstrado na Equação 2.

$$Carga = Deformação \times k \quad [2]$$

Sendo:

Carga = correspondente à penetração (kgf);

Deformação = leitura do anel dinamométrico (mm);

K = constante do anel = 1,905.

Figura 14- Prensa de CBR para ensaio de resistência a penetração.



Fonte: Elaboração da própria autora.

O ensaio de penetração mini-CBR gera gráficos de carga (abscissa) x penetração (ordenada). Nogami (1972) estudou treze tipos de solos típicos do estado de São Paulo correlacionando os ensaios de Mini-CBR com CBR utilizando energia normal de compactação e posteriormente energia intermediária. A correlação resultou nas equações 3 e 4.

$$\log_{10}(\text{Mini} - \text{CBR1}) = -0,254 + 0,896 \times \log_{10}C1 \quad [3]$$

$$\log_{10}(\text{Mini} - \text{CBR2}) = -0,356 + 0,937 \times \log_{10}C2 \quad [4]$$

Sendo:

(Mini-CBR1) = correspondente a penetração de 2,0 mm, dado em %;

(Mini-CBR2) = correspondente a penetração de 2,5 mm, dado em %;

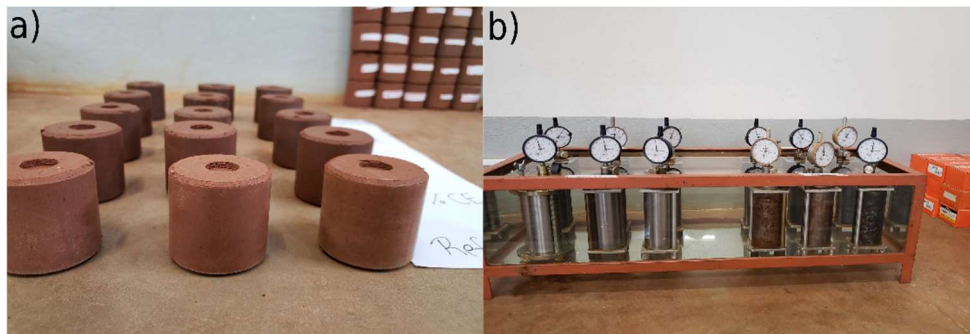
C1 = carga correspondente a penetração de 2,0 mm, em kgf;

C2 = carga correspondente a penetração de 2,5 mm, em kgf;

O valor de Mini-CBR é o maior entre o Mini-CBR1 e Mini-CBR2.

Na Figura 16 é possível observar os corpos-de-prova após a ruptura imediata e as demais amostras submersas para ensaio posteriormente.

Figura 15- Ensaio mini CBR. a) Ruptura sem imersão. b) Ruptura com imersão/expansão do solo



Fonte: Elaboração da própria autora.

4.2.6.3. Método de cálculo – Expansão

Para o cálculo da expansibilidade do solo foi utilizada a Equação 5, conforme descrito na norma (DNER-ME, 1997), sendo:

$$E = \frac{(Li-Lf) \times 100}{Ai} \quad [5]$$

Sendo:

E = Expansão, expressa em %, com aproximação de 0,1;

Li = leitura inicial do extensômetro (mm);

Lf = leitura final do extensômetro (mm);

Ai = altura inicial do corpo-de-prova, em milímetros, com aproximação de 0,01 mm, obtida na compactação do corpo-de-prova.

4.2.6.4. Relação entre Índices Suportes (RIS)

É a relação que indica a perda de capacidade suporte entre a amostra com e sem imersão. É um método utilizado para avaliar o solo e sua aplicabilidade em camadas de base de um pavimento.

O RIS foi um método proposto por VILLIBOR e NOGAMI (1982), usando o modelo reduzido de compactação para cálculo (Mini-CBR). O RIS foi criado inicialmente foi criada para amostras submetidas às energias de Proctor normal, intermediária e modificada, na sua

umidade ótima. Valores de RIS > 50% correspondem a um solo laterítico e RIS < 50% solos não lateríticos.

O valor de RIS é dado pela equação 6:

$$RIS (\%) = \frac{\text{Mini-CBR imerso}}{\text{Mini-CBR sem imersão}} * 100 \quad [6]$$

Sendo:

Mini-CBR imerso = valor de Mini-CBR em condições imersas, dado em %.

Mini-CBR sem imersão = valor de Mini-CBR em condições sem imersão, dado em %.

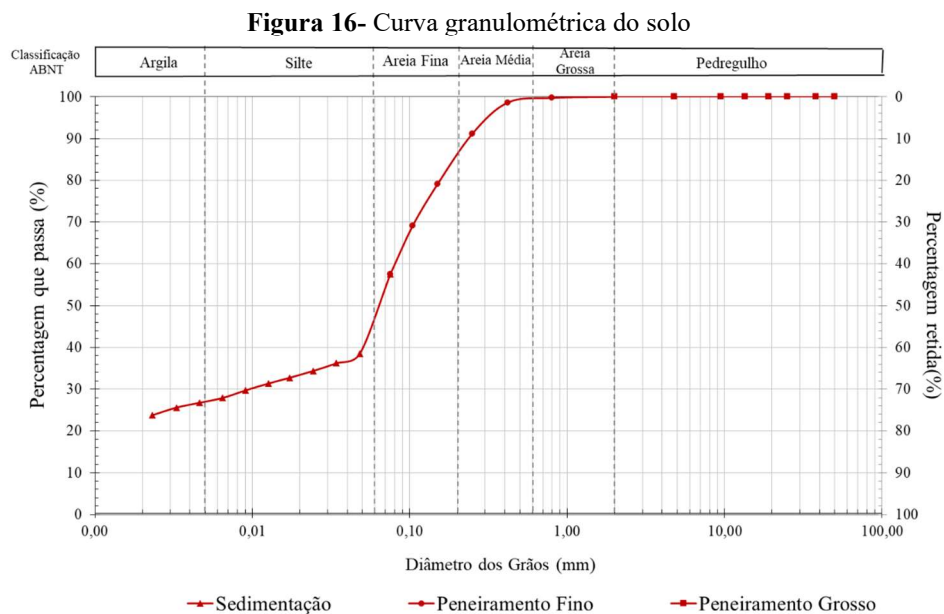
5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1. Solo

5.1.1.1. Granulometria, Limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade

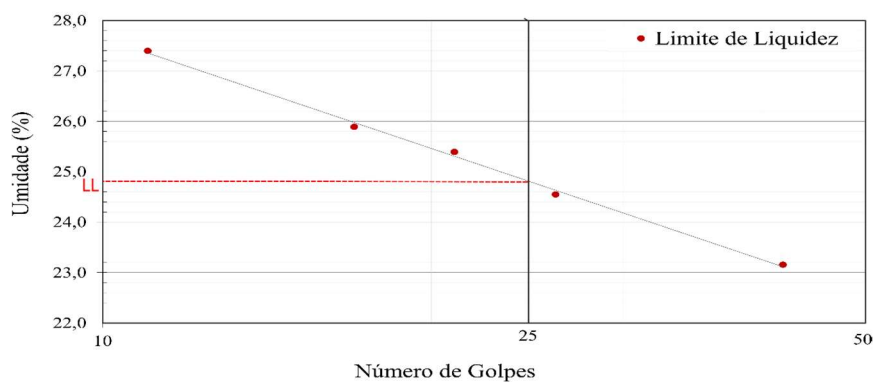
Pelo ensaio de granulometria e sedimentação, o solo apresentou em suas frações 60% de areia (sendo 1,3% areia média e 58,7% areia fina), 27% de argila e 13% de silte, como pode ser observado na Figura 17.



Fonte: Elaboração da própria autora.

O coeficiente de uniformidade do solo foi calculado, seu valor foi 0 (zero), que corresponde a um solo uniforme, ou seja, a maioria dos grãos possuem a mesma dimensão. As propriedades plásticas (Figura 18) estão relacionadas à composição química e mineralógica, determinam a capacidade de moldagem de um solo. Os valores obtidos de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade foram respectivamente: 24,8%, 16,8% e 8,0%, correspondentes a um solo arenoso fino com média plasticidade, demonstrados na Tabela 2.

Figura 17 -Limite de Liquidez do solo.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 2 - Limites de Atterberg.

Limites de Atterberg	Teor de umidade (%)
Limite de liquidez	24,8
Limite de plasticidade	16,8
Índice de plasticidade	8,0

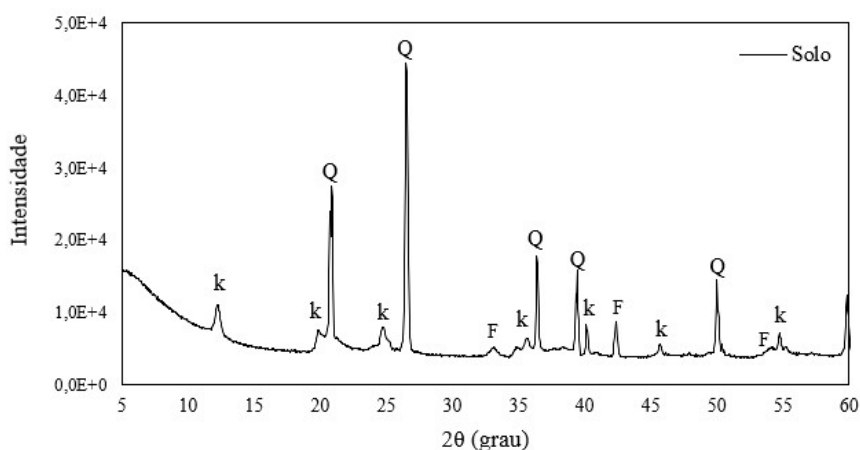
Fonte: Elaboração da própria autora.

Pela classificação TRB (Transportation Research Board) que leva em consideração o ensaio de granulometria, limite de liquidez, índice de plasticidade e o índice de grupo, solo pode ser considerado como A-4. Neste caso, um solo silteoso, e de comportamento de fraco a pobre como subleito.

5.1.1.2. Difração de raio -X (DRX) e Fluorescência de raio X (FRX)

O resultado referente ao ensaio de DRX do solo está demonstrado na Figura 19. Foram identificados picos de elementos como feldspato (F), caulinita (k) e majoritariamente quartzo (Q). Uma vez que o solo apresenta 60% de areia em sua composição, esse comportamento (formando picos) era esperado.

Figura 18 - Difratoograma do solo.



Fonte: Yacoub, 2017. Adaptado.

Do ensaio de FRX foi possível observar que o solo é composto majoritariamente por óxidos como: dióxido de silício (SiO_2), óxido alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e dióxido de titânio (TiO_2). Todos os óxidos encontrados no solo estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do solo (FRX).

Óxidos	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	ZrO_2	K_2O	Cr_2O_3	SO_3	MnO	CaO	PF
(%)	56,46	23,92	11,3	3,15	0,15	0,11	0,06	0,05	0,05	0,02	4,7

Fonte: Elaboração da própria autora.

Dos ensaios de DRX e FRX é possível observar características compatíveis a um solo laterítico. Sendo composto por quartzo e caulinita, segundo Nogami e Villibor (1995) a presença deste argilomineral associado ao óxido de ferro é característico de solos lateríticos.

5.1.2. Cinza

5.1.2.1. Fluorescência de raio X

Os valores obtidos no ensaio FRX para a cinza estão listados na Tabela 4, podendo ser observada a presença principalmente de dióxido de silício (SiO₂), relacionada a fase cristalina do quartzo, normalmente produzido durante o processo de combustão da biomassa, óxido de cálcio (CaO) e óxido sulfúrico (SO₃) em sua composição. Observa-se também que o teor de álcalis equivalente (Na₂O_{eq}) = 1,89%, levando em consideração o teor de óxido e potássio.

Tabela 4 - Composição química da cinza de eucalipto (FRX)

Óxidos	SiO ₂	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	ZrO ₂	V ₂ O ₅
(%)	71,26	17,47	3,65	2,92	2,87	0,67	0,57	0,35	0,12	0,03	0,03

Fonte: Elaboração da própria autora.

Nota: * Na₂O_{eq} = 0,658*K₂O + Na₂O.

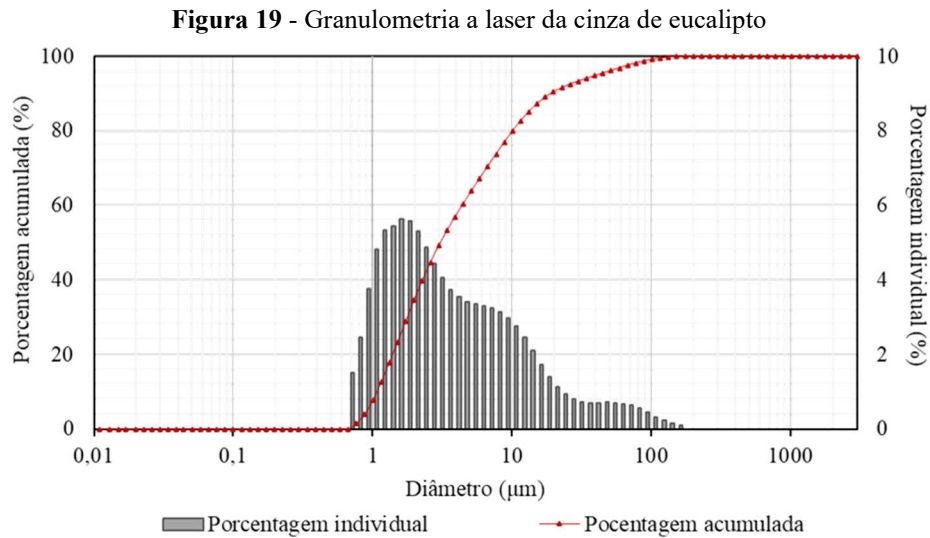
FRANÇA *et. al.* (2016) analisaram a composição química da cinza de eucalipto pelo método de fluorescência de raio x e encontraram predominantemente SiO₂ (64,41%), Cao (15,02%). Os resultados que corroboram os resultados encontrados na presente pesquisa.

5.1.2.2. Granulometria a laser

Alguns parâmetros necessários para análise granulométrica a laser foram obtidos da Figura 20, sendo eles:

- D (v, 0,1) = 3,4 µm;
- D (v, 0,5) = 29,98 µm;
- D (v, 0,9) = 121,84 µm;
- Diâmetro médio = 9,052 µm.

A curva de frequência pode ser classificada como trimodal, possuindo três picos



Fonte: Elaboração da própria autora.

De acordo com a Figura 19 a cinza de eucalipto apresentou granulometria muito fina, sendo encontrado para o D50 valor médio de 0,030 mm valor próximo ao encontrado por FRANÇA *et. al.* (2016), no valor de 0,022mm. Isto demonstra que esta cinza possui a capacidade de preencher vazios por possuir diâmetros inferiores àqueles encontrados no solo podendo melhorar a densidade das amostras.

5.1.2.3. Massa Específica

A massa específica foi calculada pela Equação que relaciona a massa do ensaio e o volume deslocado (Figura 21). O valor encontrado foi de 2,62 g/cm³.

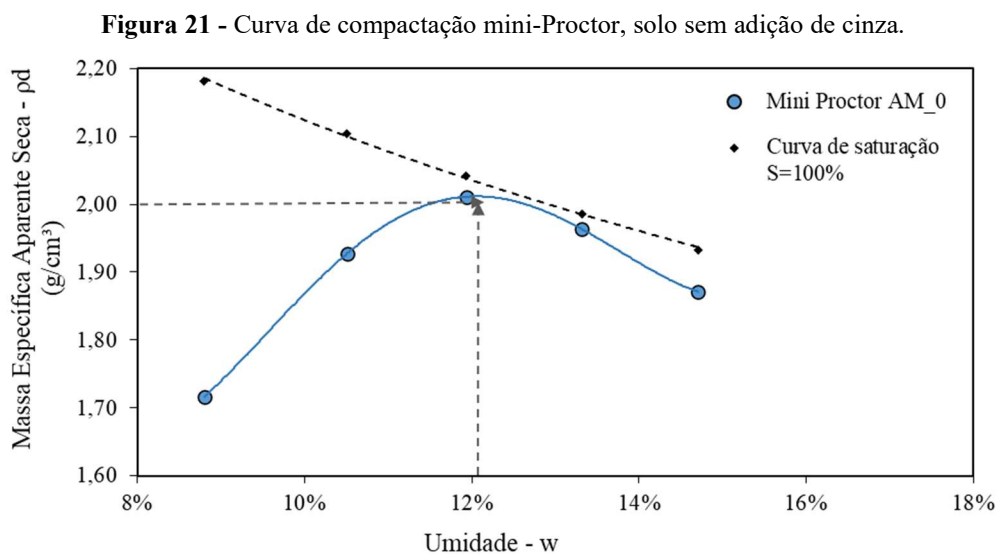
Figura 20 – Leitura inicial e leitura final do frasco.



Fonte: Elaboração da própria autora.

5.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – MINI PROCTOR

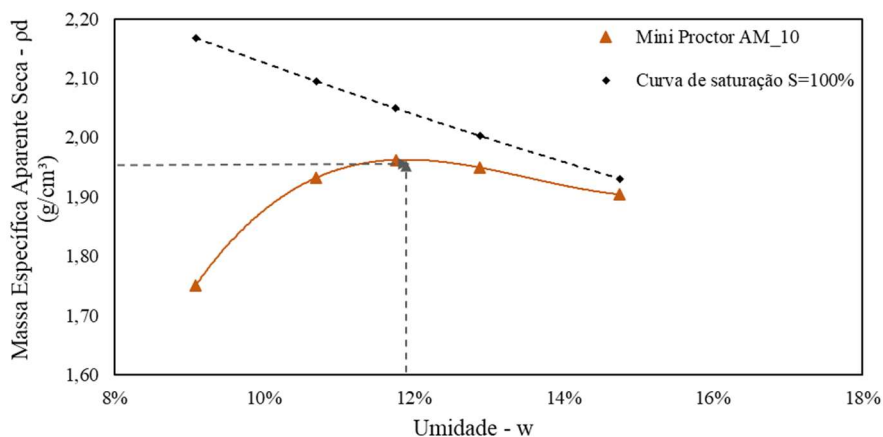
A Figura 22 representa a curva de compactação do solo sem adição de cinza, usado como referência para análise. No ponto de inflexão da curva é possível obter o valor do teor de umidade ótima correspondente à massa específica aparente seca máxima. Os valores medidos foram, respectivamente: 12,20% e 2,00 g/cm³.



Fonte: Elaboração da própria autora.

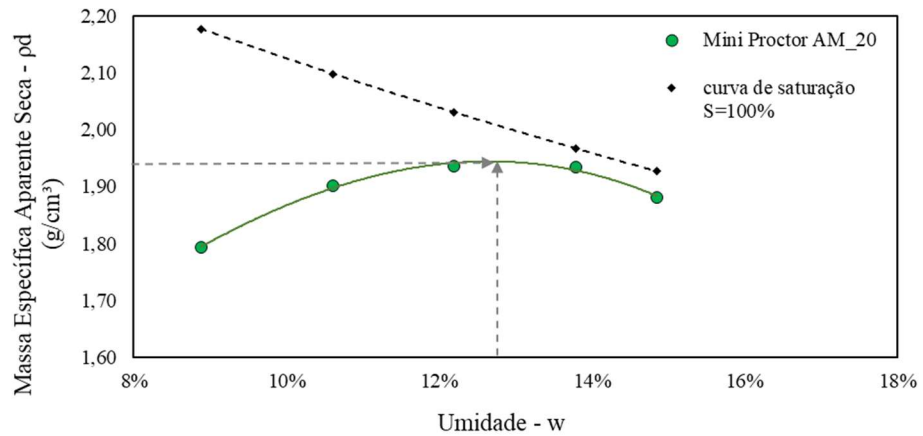
As curvas de compactação correspondentes as amostras com adição de cinza podem ser observadas nas Figuras 23 a 28. Para todas as amostras foi utilizado energia intermediária de compactação.

Figura 22 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 10% de cinza



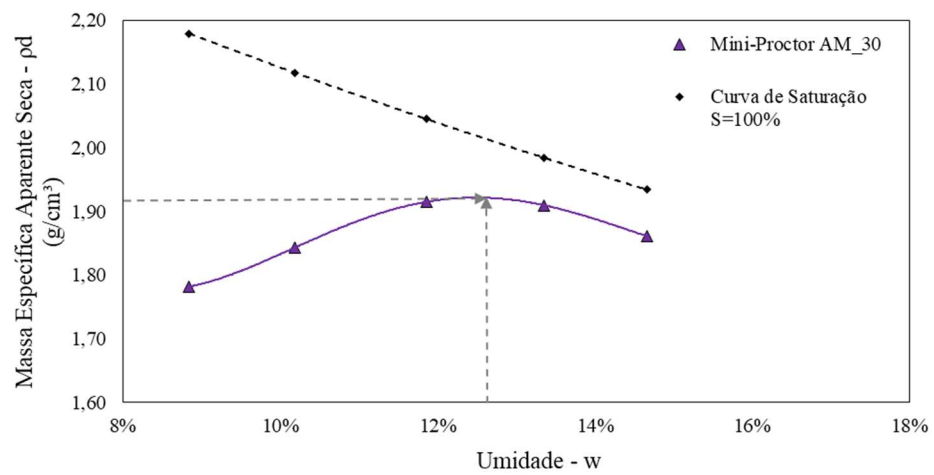
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 23 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 20% de cinza.



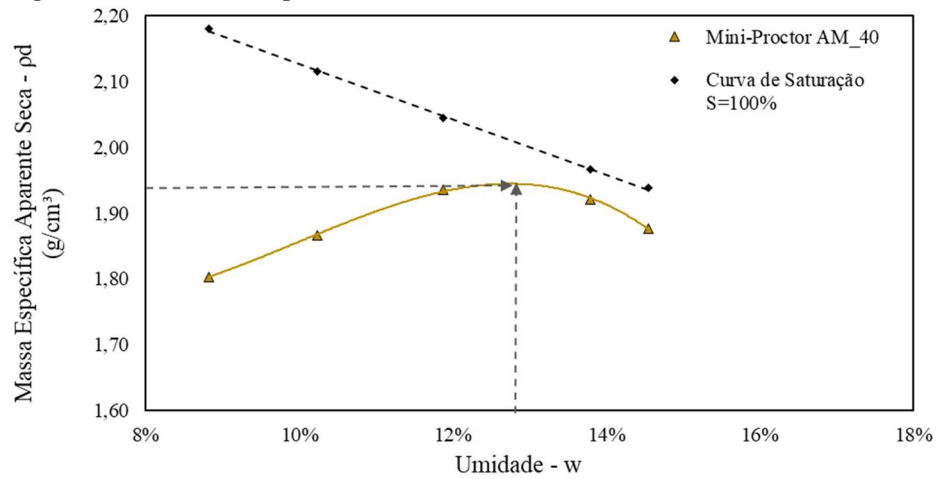
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 24 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 30% de cinza.



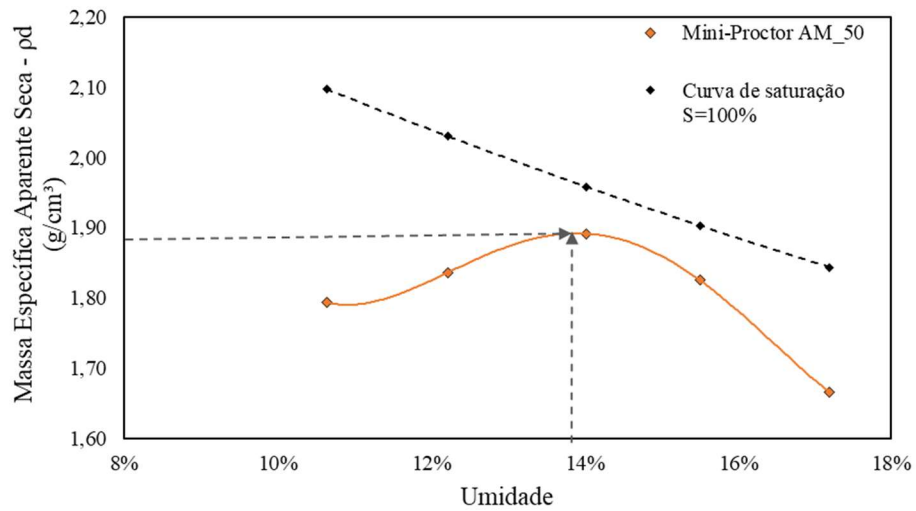
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 25- Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 40% de cinza.



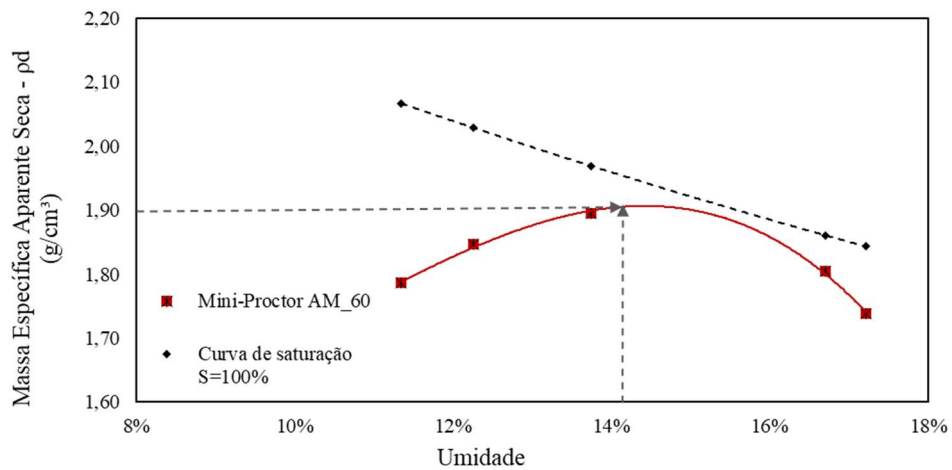
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 26 - Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 50% de cinza.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 27- Curva de compactação mini-Proctor, amostra com adição de 60% de cinza.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Os valores obtidos nas curvas de compactação estão resumidos na Tabela 5. É possível observar que houve uma pequena queda nos valores de ρ_{dmax} mas ainda assim, mantendo os valores próximos à referência. Os valores de umidade ótima das amostras tiveram aumentos consecutivos à medida que se acrescentava cinza na mistura, exceto pela amostra com 10% de adição de cinza que apresentou uma pequena queda. Os maiores acréscimos observados aconteceram nas amostras AM_50 e AM_60.

Tabela 5 - Valores de umidade ótima e massa específica de todas as amostras

Amostra	W ótim	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
AM_0	12,20%	2,000
AM_10	11,90%	1,962
AM_20	12,70%	1,944
AM_30	12,77%	1,919
AM_40	12,75%	1,945
AM_50	13,90%	1,877
AM_60	14,10%	1,899

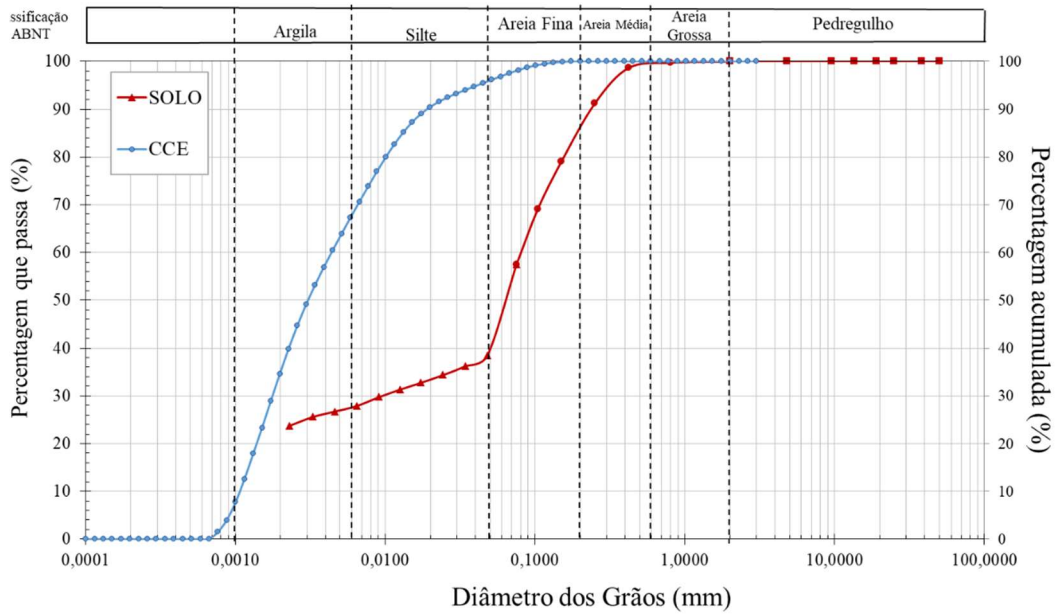
Fonte: Elaborado pela própria autora

Pela Figura 29 é possível observar a granulometria do solo em comparação com da CCE, utilizando a classificação da ABNT pode-se notar que a cinza possui granulometria semelhante à das argilas e siltes, grãos mais finos que do solo.

Por apresentar tal distribuição granulometria, à medida em que se aumentava a quantidade de cinza adicionada ao solo, acontecia um rearranjo da estrutura, ou seja, a cinza envolveu os grãos maiores de solo aumentando a sua área superficial.

Conseqüentemente para este aumento da área superficial dos grãos houve acréscimo na quantidade necessária de água para obter os parâmetros de compactação da mistura e quanto maior a área superficial maior a capacidade a união entre as partículas.

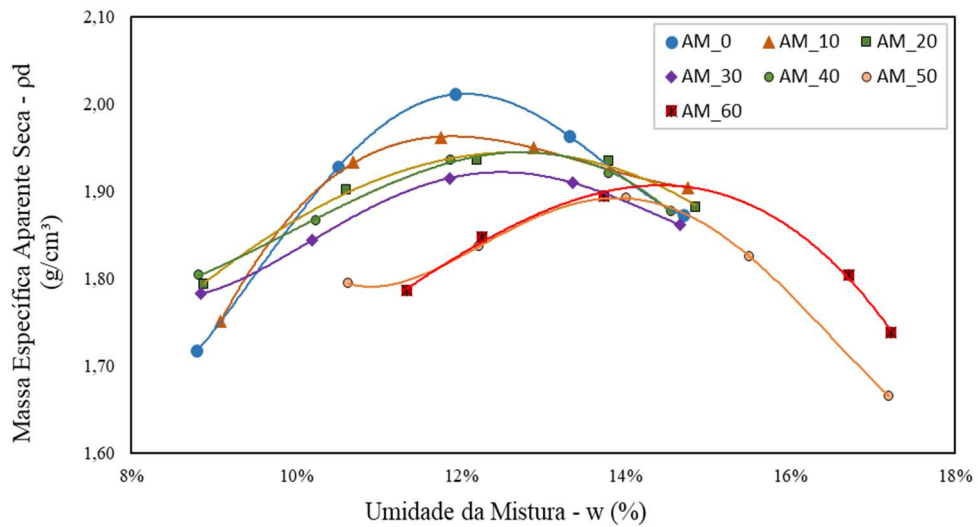
Figura 28 - Granulometria Solo e CCE



Fonte: Elaborado pela própria autora

A Figura 30 inclui todas as curvas geradas no ensaio mini-Proctor. Pode-se notar que houve um deslocamento das curvas para o ramo úmido à medida que aumentava a quantidade de cinza adicionada.

Figura 29 - Curvas mini-Proctor de todas as amostras testadas.

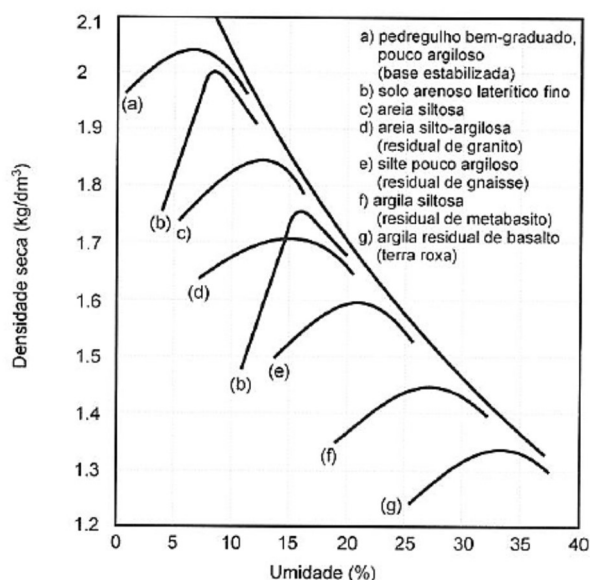


Fonte: Elaborado pela própria autora.

Esse deslocamento das curvas implicou na diminuição da massa específica aparente seca máxima e aumento no teor da umidade ótima, demonstrando que ocorreu uma alteração na estrutura física do solo, mudando o seu comportamento do mesmo à compactação.

A mudança no comportamento das curvas relativa ao aumento na adição de cinza ao solo pode ser relacionada na Figura 31, uma vez que se acrescentaram particulados finos ao solo, as curvas tenderam a modificar de um solo arenoso laterítico fino (b) para o comportamento de areia siltosa (c) conforme PINTO (2006).

Figura 30 - Curvas típicas de compactação de solos brasileiros



Fonte: PINTO (2006)

Comportamento este também observado por Yacoub (2017) em seu trabalho, que analisou a adição de cinza de casca de arroz ao solo em diversas proporções (2 a 14%), na medida em que se aumentava a quantidade de CCA adicionada ao solo houve uma diminuição da massa específica aparente seca máxima e aumento do teor de umidade.

A CCA assim como a CCE apresentou granulometria mais fina que o solo preenchendo parte dos vazios existentes.

5.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – MINI-CBR

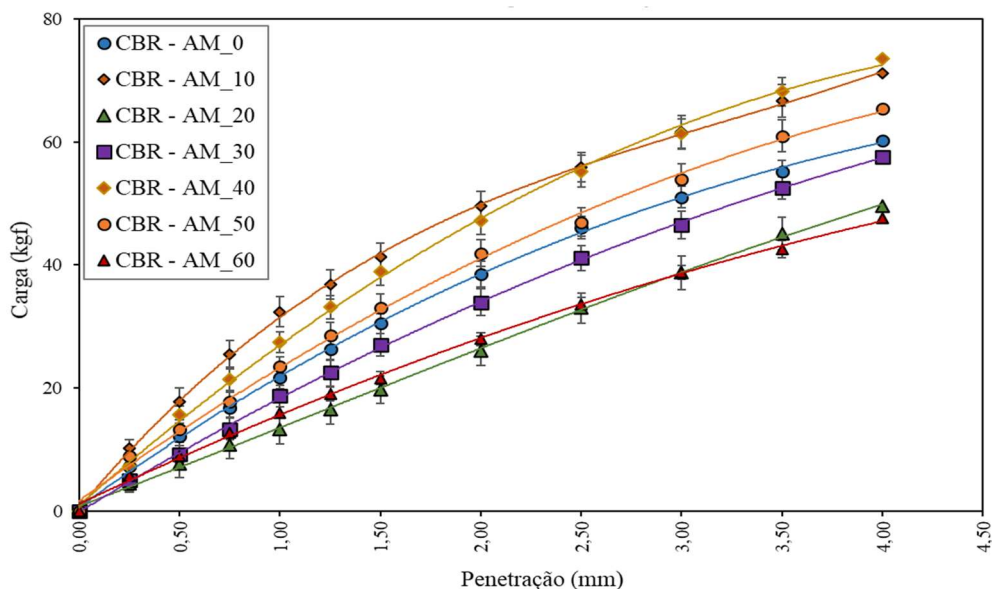
5.3.1. Procedimentos Mini-CBR

Após a obtenção dos parâmetros de compactação (ρ_{dmax} e Wot) (Tabela 5), foram moldados novos corpos-de-prova e submetidos ao ensaio de mini-CBR para avaliar a sua capacidade de suporte. Neste caso, foram adotados dois procedimentos metodológicos para a ruptura das amostras: imediatamente após a compactação, e após 24 horas submerso, para medir a expansão das amostras. Para cada mostra foram moldados três corpos-de-prova.

5.3.2. Mini-CBR sem imersão

Os corpos-de-prova foram preparados e imediatamente submetidos ao ensaio de mini-CBR, portanto sem imersão. A Figura 32 apresenta as curvas de penetração versus carga, geradas das leituras feitas no equipamento. Todas as amostras apresentaram uma conformação entre si, demonstrando comportamento similar entre as curvas.

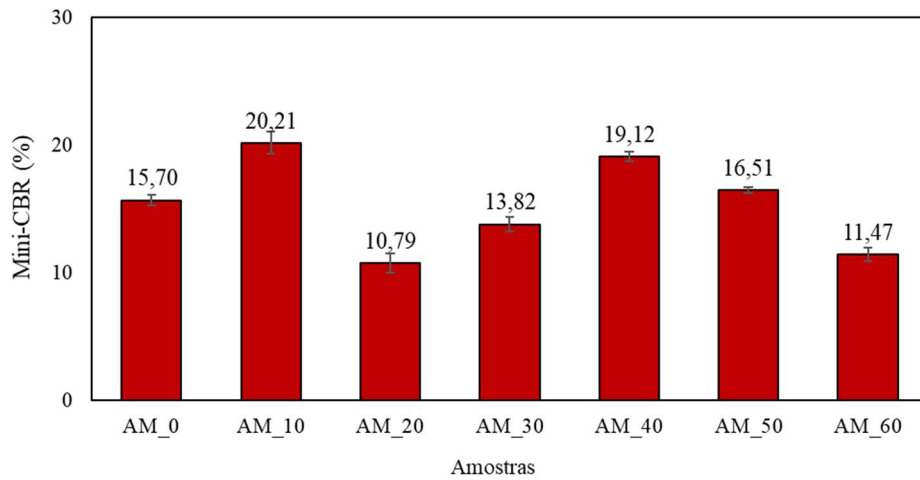
Figura 31 - Gráfico Carga x Penetração (MINI-CBR)



Fonte: Elaborado pela própria autora

As curvas permitem observar que algumas amostras obtiveram maiores valores de carga (AM_10, AM_40 e AM_50) em relação à curva referência (AM_0) as demais abaixo deste valor. Este comportamento refletiu nos valores finais de mini-CBR, apresentados na Figura 33.

Figura 32 - Mini-CBR sem imersão.

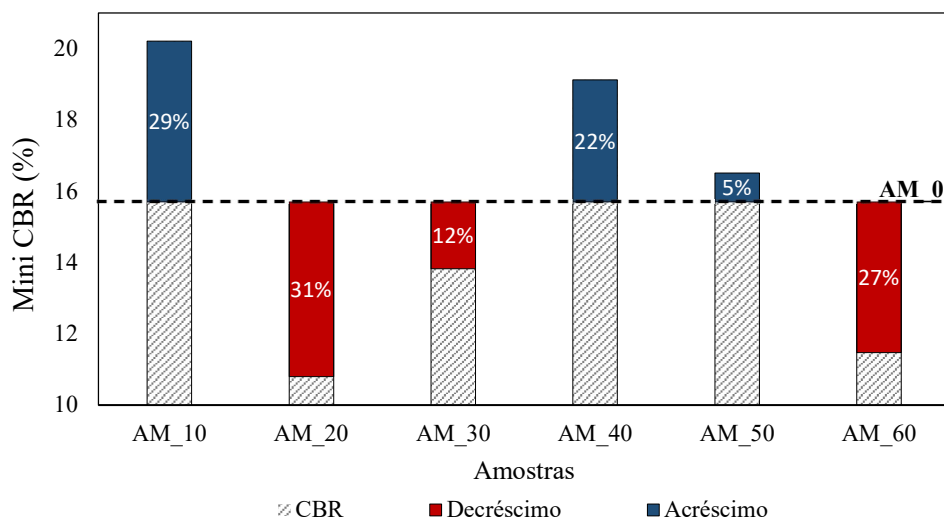


Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os valores de mini-CBR sem imersão calculados estão demonstrados na Figura 31. É possível perceber que não houve tendência linear nos resultados. As amostras AM_10, AM_40 e AM_50 apresentaram valores de mini-CBR superiores ao valor de AM_0, enquanto as amostras AM_20, AM_30 e AM_60 inferiores à referência. O maior valor de mini-CBR encontrado foi para a amostra AM_10 e o menor AM_60.

Os valores de ganhos e perdas do mini-CBR para cada amostra são analisados pelo gráfico de comparação, Figura 34.

Figura 33 - Gráfico de comparação mini-CBR



Fonte: Elaborado pela própria autora

As amostras AM_10, AM_40 e AM_50 apresentaram aumento no valor de mini-CBR respectivamente de 29, 22 e 5% em relação à amostra AM_0. As demais amostras AM_20, AM_30 e AM_60 obtiveram queda na ordem de 31, 12 e 27%.

Os coeficientes de variação foram calculados. Pela tabela 6 é possível observar que houve baixa dispersão entre os dados para todas as amostras analisadas, ou seja, o grau de variação entre as amostras e sua média foram baixos. O maior valor encontrado referente aos dados da AM_20.

Tabela 6 - Coeficiente de variação mini-CBR sem imersão

Amostra	CBR (CP1)	CBR (CP2)	CBR (CP3)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
AM_0	15,95	15,53	15,62	15,70	0,41	2,6
AM_10	19,10	20,7	20,82	20,21	0,86	4,25
AM_20	11,67	10,32	10,38	10,79	0,77	7,10
AM_30	14,34	13,52	13,60	13,82	0,59	4,27
AM_40	18,90	19,17	19,28	19,12	0,38	1,98
AM_50	16,42	26,51	16,60	16,51	0,24	1,48
AM_60	11,88	11,23	11,29	11,47	0,53	4,58

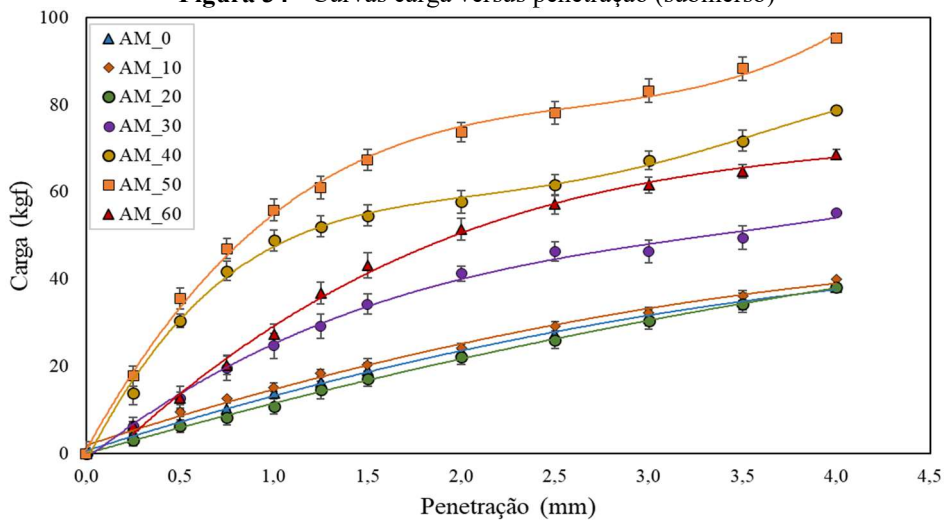
Fonte: Elaborado pela própria autora

5.3.3. *Mini-CBR com imersão*

Os corpos-de-prova foram preparados e posteriormente colocados em submersão em água por 24 horas para serem submetidos ao ensaio de mini-CBR.

As curvas de penetração versus carga das amostras submersas estão demonstradas na Figura 35. Diferentemente das amostras sem submersão, estas amostras não apresentaram conformidade entre si, não obtendo o mesmo comportamento observado anteriormente.

Figura 34 - Curvas carga versus penetração (submerso)

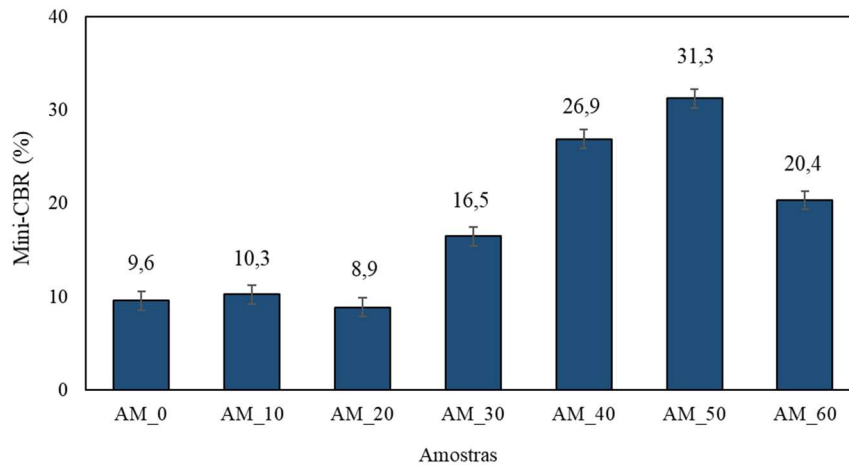


Fonte: Elaborado pela própria autora

As curvas que mais se assemelharam ao comportamento da AM_0 foram as AM_10 e AM_20. As demais obtiveram deslocamento superiores ao valor da amostra referência.

Os valores finais de mini-CBR submerso estão demonstrados na Figura 36. Assim como previsto com as curvas de penetração, os valores de mini-CBR não apresentaram tendência linear de ganho ou perda entre si.

Figura 35 - Mini-CBR com submersão.



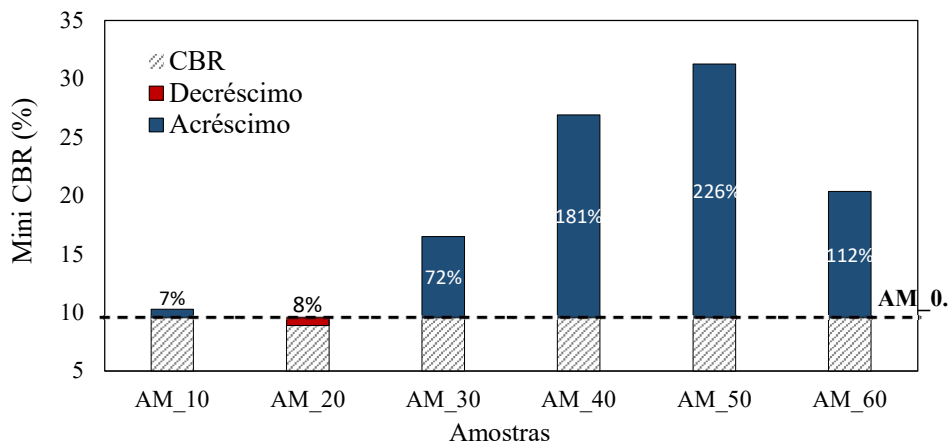
Fonte: Elaborado pela própria autora.

As amostras AM_10 e AM_20 obtiveram valores próximos à referência. As demais amostras (AM_30, AM_40, AM_50 e AM_60) apresentaram valores superiores à AM_0.

Na Figura 37 é possível observar que todas as amostras obtiveram ganhos significativos, exceto a AM_20 que teve queda em 8% do valor de mini-CBR. As demais amostras (AM_10,

AM_30, AM_40, AM_50 e AM_60) tiveram respectivamente aumento de 7, 72, 181, 226 e 112%.

Figura 36 - Gráfico de comparação mini-CBR.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os coeficientes de variação calculados estão descritos na Tabela 7, onde é possível observar que houve baixa dispersão entre os dados para todas as amostras analisadas, sendo o maior valor encontrado referente aos dados da AM_40.

Tabela 7 - Coeficiente de variação mini-CBR com imersão

Amostra	CBR (CP1)	CBR (CP2)	CBR (CP3)	Média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação (%)
AM 0	9,46	9,77	9,52	9,58	0,35	3,66
AM 10	10,19	10,40	10,24	10,28	0,29	2,82
AM 20	8,60	9,34	8,65	8,86	0,56	6,37
AM 30	16,66	16,04	16,76	16,49	0,55	3,31
AM 40	29,72	21,11	29,88	26,91	1,96	7,30
AM 50	33,67	26,24	33,86	31,36	1,83	5,85
AM 60	20,73	19,51	20,84	20,36	0,75	3,69

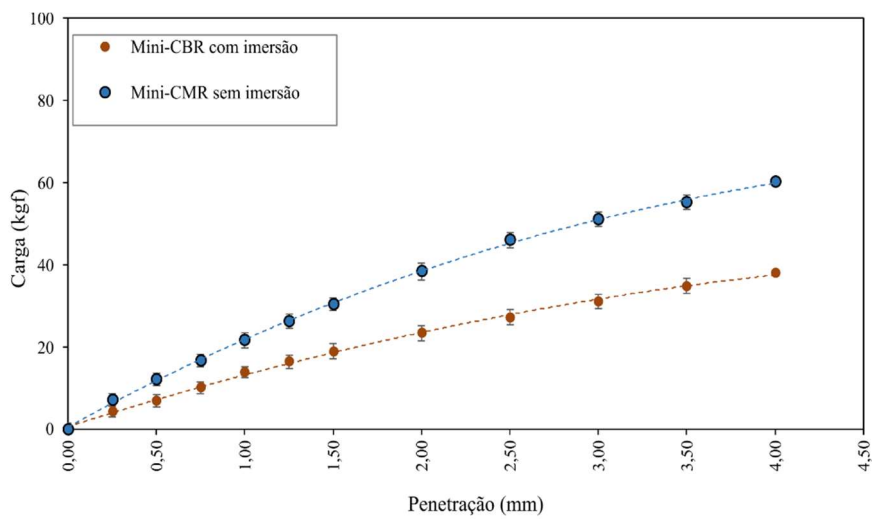
Fonte: Elaborado pela própria autora

5.3.4. Mini-CBR com e sem imersão comparação

As curvas de carga para determinar os valores de mini-CBR, com e sem imersão, estão individualmente demonstradas nas Figuras 38 a 43, para melhor observação do comportamento individual das amostras.

A Figura 38 demonstra a comparação da amostra AM_0. É possível observar que as curvas apresentaram comportamento similar entre si, sendo a curva do ensaio com imersão inferior a curva correspondente à ruptura imediata.

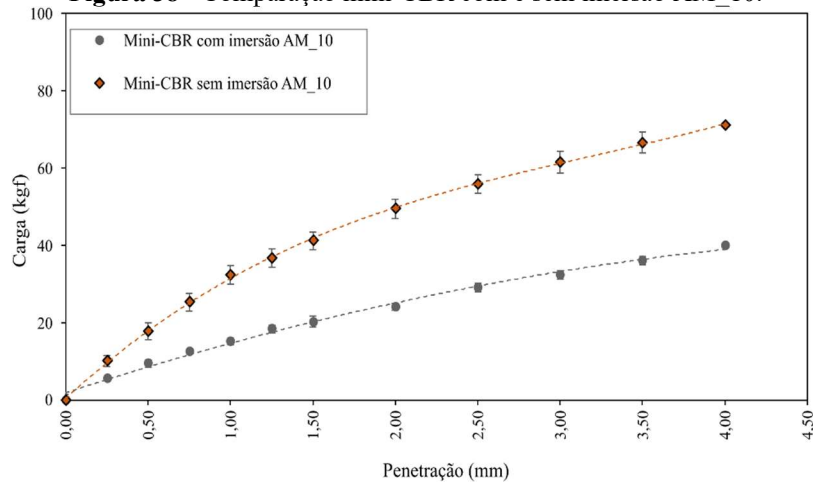
Figura 37 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_0.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Assim como a AM_0 a AM_10 apresentou comportamento similar entre as curvas, conforme demonstrado na figura 39.

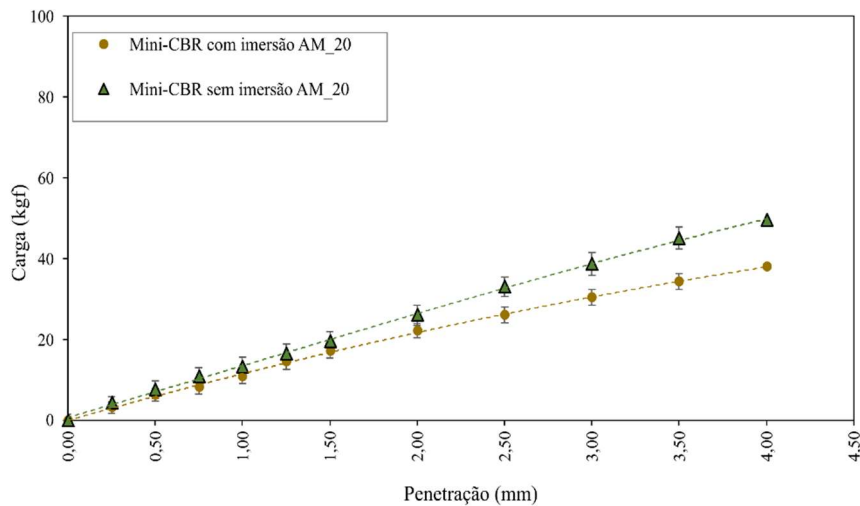
Figura 38 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_10.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

As curvas referentes a AM_20 estão demonstradas na Figura 40. Diferentemente das amostras anteriores, a AM_20 não apresentou diferença significativa entre as curvas, porém apresentou comportamento similar entre si.

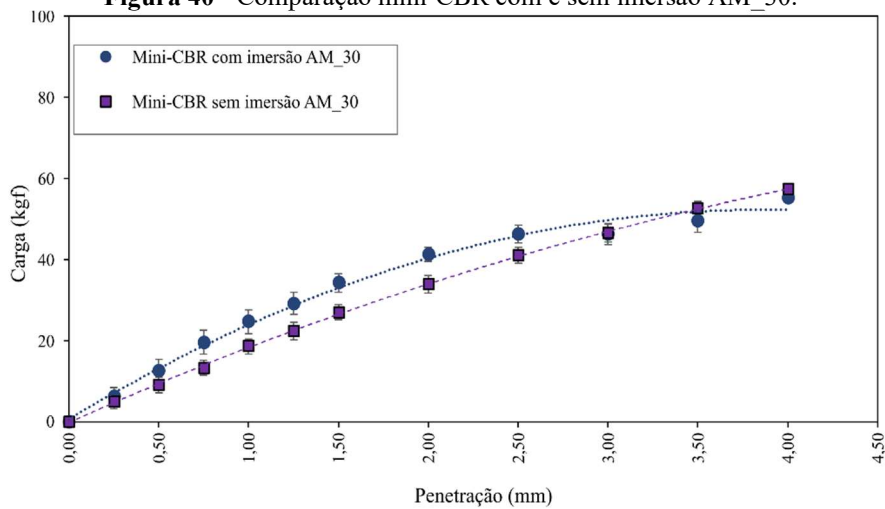
Figura 39 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_20.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

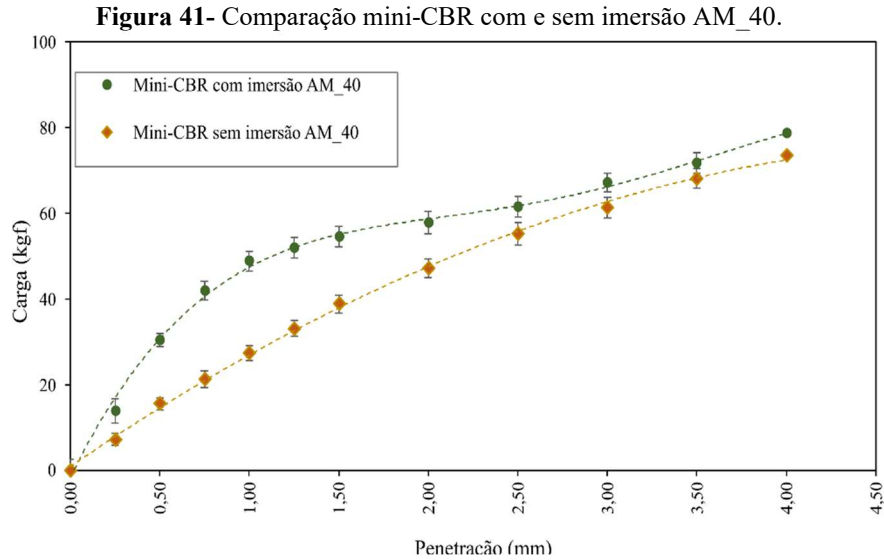
Na Figura 41 estão demonstradas as curvas referentes a AM_30. Diferente das curvas anteriores, o comportamento alterou e não se manteve linearidade entre as curvas sendo observado nos pontos principais (2,0 e 2,5mm), valores superiores para a amostra submersa.

Figura 40 - Comparação mini-CBR com e sem imersão AM_30.



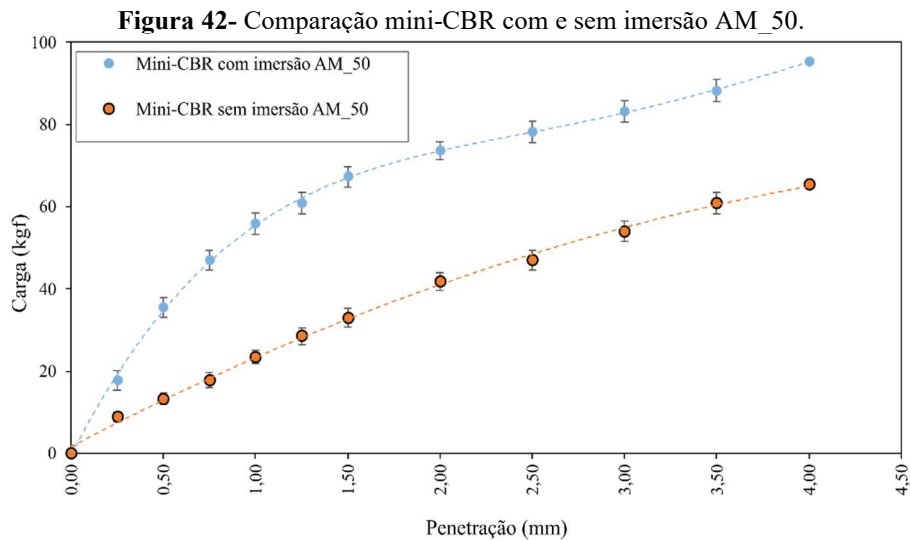
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Assim como na amostra anterior a amostra AM_40 (Figura 42), não se obteve comportamento similar entre as curvas e demonstrou valores superiores para as amostras submersas em relação as sem submersão.



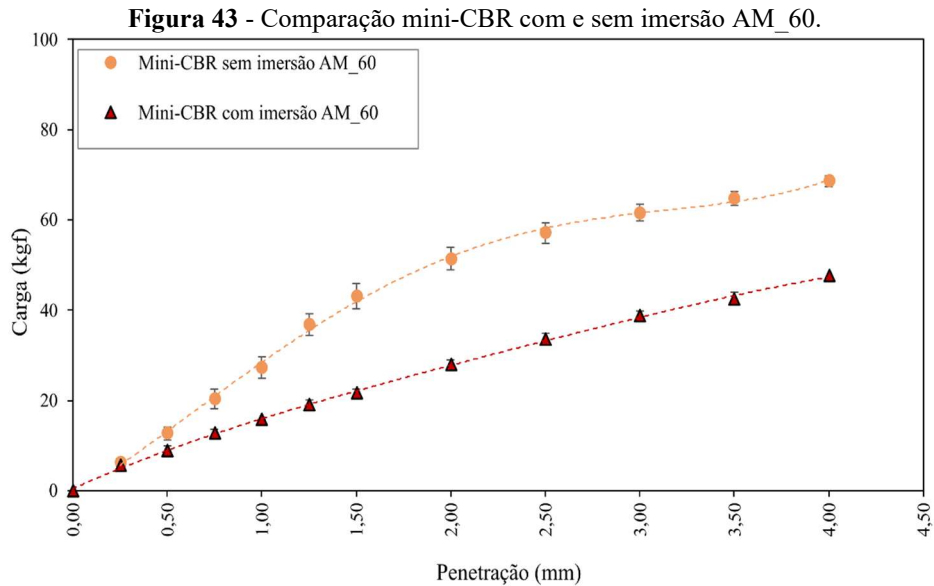
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Na amostra AM_50 (Figura 43), as curvas não apresentaram conformidade entre si. Comparando-se as curvas se obteve um crescimento constante das cargas, sendo aumento significativo na carga para os pontos principais de leitura em comparação com as demais amostras.



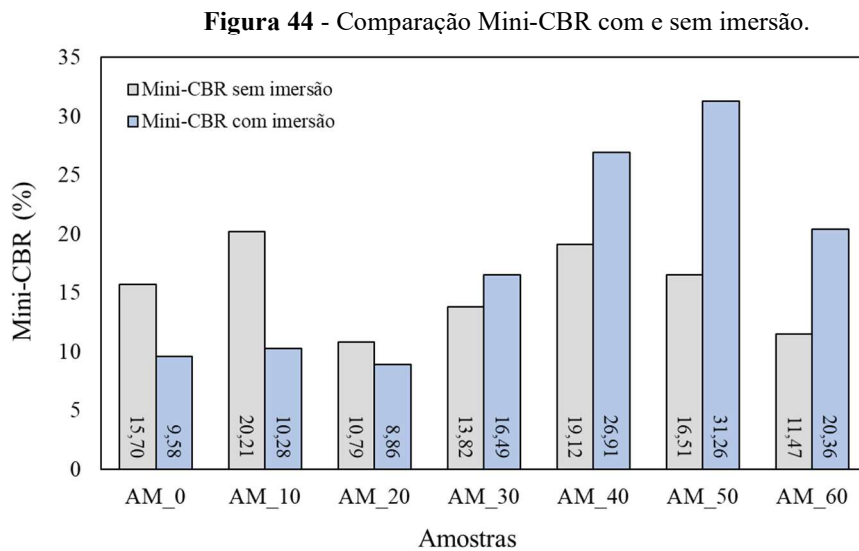
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Na Figura 44 estão demonstradas as curvas da AM_60. Na curva da amostra submersa não houve crescimento constante para todos os pontos de leitura, mas teve aumento significativo nos pontos principais em comparação com a curva sem submersão.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Estes comportamentos refletiram nos valores finais de mini-CBR. Na figura 45 estão descritos os valores de mini-CBR com e sem imersão sendo possível observar que as amostras AM_0, AM_10 e AM_20 apresentaram comportamento esperado em relação aos valores obtidos, tendo resultados superiores para o ensaio sem imersão.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Neste caso, diferentes das anteriores, as amostras AM_30, AM_40, AM_50 e AM_60 apresentaram comportamento contrário, obtendo valores maiores para o ensaio submerso em relação ao ensaio imediato.

As quedas nos valores de Mini-CBR das amostras AM_0, AM_10 e AM_20 foram de respectivamente 39, 49 e 18% e os ganhos para das amostras AM_30, AM_40, AM_50 e AM_60 de 19, 41, 89 e 78%.

5.3.5. Relação de perda de suporte após a imersão

Os valores de RIS foram calculados para cada amostra e estão resumidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de RIS (%)

Amostra	Mini-CBR		RIS (%)
	Sem imersão	Com imersão	
AM_0	15,70	9,58	61,04
AM_10	20,21	10,28	50,87
AM_20	10,79	8,86	82,14
AM_30	13,82	16,49	119,29
AM_40	19,12	26,91	140,74
AM_50	16,51	31,26	189,36
AM_60	11,47	20,36	177,56

Fonte: Elaborado pela própria autora

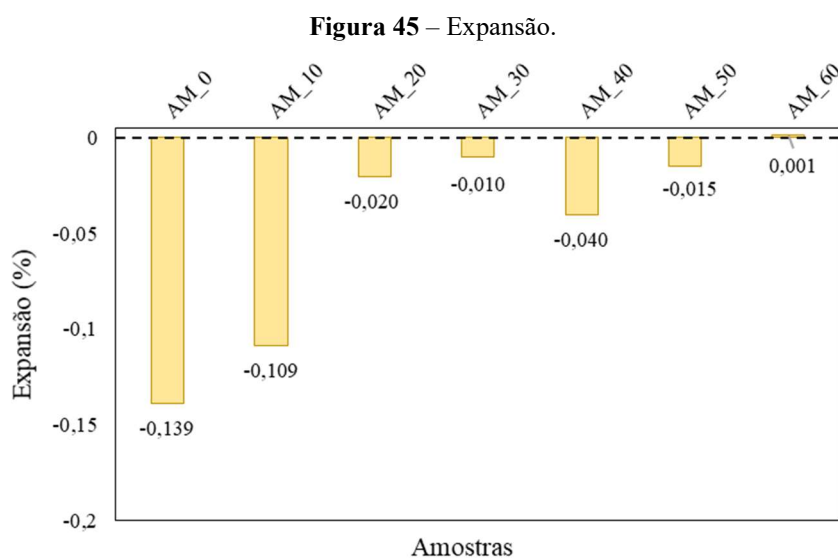
As amostras AM_0, AM_10 e AM_20 confirmaram uma pequena perda da resistência por imersão.

Todas as amostras apresentaram valores superiores a 50%, destaque para as amostras AM_30, AM_40, AM_50 e AM_60 que obtiveram aumento de valor de mini-CBR após a submersão, como descrito no item anterior.

5.4. ENSAIO DE EXPANSÃO

O ensaio de expansão foi realizado com os mesmos corpos-de-prova ensaiados no mini CBR com submersão. O tempo de imersão foi de 20 horas, com leituras iniciais, intermediárias e finais.

Os valores de expansão estão apresentados na Figura 46. É possível observar que à medida que aumenta a quantidade de cinza adicionada, a expansão diminui, tornando-se quase nula.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Dado o caráter laterítico do solo estudado, todas as amostras se apresentaram pouco expansivas, com expansão inferior a 1%

De acordo com as recomendações do DNIT (2006), a expansão obtida por todas as amostras não impede a utilização como material para pavimentação.

5.5. APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS

Todos os valores obtidos nos procedimentos de compactação e mini CBR estão demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados obtidos compactação.

Amostra	Parâmetros de compactação		Mini- CBR (%)		Expansão (%)
	pd máx (g/cm ³)	W _{ot} (%)	Sem imersão	Com imersão	
AM_0	2,000	12,20%	15,70	9,58	-0,139
AM_10	1,962	11,90%	20,21	10,28	-0,109
AM_20	1,944	12,70%	10,79	8,86	-0,020
AM_30	1,919	12,77%	13,82	16,49	-0,010
AM_40	1,945	12,75%	19,12	26,91	-0,047
AM_50	1,877	13,90%	16,51	31,26	-0,015
AM_60	1,899	14,10%	11,47	20,36	0,001

Fonte: Elaborado pela própria autora

Para que o solo esteja apto para ser aplicado em camadas de pavimentos deve-se levar em consideração condições estipuladas mínimas descritas na Tabela 10.

Tabela 10- Parâmetros DNIT

Camada	Norma	CBR	Expansão
Base estabilizada granulometricamente	DNIT 141/2010	≥ 80%	≤ 0,5%
Sub-base estabilizada granulometricamente	DNIT 139/2010	≥ 20%	≤ 1,0 %

Fonte: DNIT (2010). Adaptado

Relacionando os dados obtidos nas Tabela 8 e 9, é possível observar que:

- nenhuma das amostras satisfaz as exigências de valor mínimo de CBR para camadas de base;
- para camadas de sub-base apenas a amostra com 10% de adição de cinza (am_10), satisfaz os parâmetros necessários para utilização;
- o solo sem adição de cinza não apresenta os valores mínimos necessários para aplicação em camadas pavimentos.

Tendo em vista os aspectos observados a adição da cinza de eucalipto se torna vantajosa quando adicionada ao solo pois aumentou a sua capacidade suporte.

6. CONCLUSÕES

A cinza de cavaco de eucalipto apresentou granulometria inferior ao do solo estudado, sendo possível preenchedor dos vazios. Dos ensaios de compactação realizados, é possível observar que na medida em que se adicionou a cinza de cavaco de eucalipto, aumentou-se o teor de umidade ótima de compactação do solo, possivelmente pelo aumento da área superficial dos grãos.

Com o aumento da umidade ótima e diminuição da massa específica aparente seca máxima, o solo com adições de cinza demonstrou comportamento de um solo argiloso, por conta do aumento de grãos mais finos de cinza que foram adicionados.

Os resultados obtidos no ensaio de mini-CBR demonstraram que a adição de cinza de cavaco de eucalipto foi positiva no desempenho mecânico do solo. As amostras com adição de 10, 40 e 50% obtiveram ganhos de respectivamente de 4,51; 3,42 e 0,81%, no valor de CBR, em relação ao solo puro sem adição de cinza em sua composição.

Para mini-CBR utilizando amostra submersas, o resultado foi mais expressivo, sendo o ganho de CBR obtido nas amostras com 10, 30, 40, 50 e 60% de adição de cinza, com aumento de respectivamente 0,7; 6,9; 17,3; 21,7 e 10,8%.

Todas as amostras com adição de cinza apresentaram uma diminuição dos valores de expansão em relação ao solo referência, tornando quase nula para amostra com 60% de adição de cinza.

O acréscimo de cinza de cavaco de eucalipto apresentou melhora na capacidade suporte do solo para a amostra com 10% de adição, tornando o solo utilizável em camadas de sub-base estabilizadas granulometricamente.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo da viabilidade da adição de cinza ao solo como material estabilizante, os ensaios realizados puderam trazer alguns parâmetros de comparação, sendo necessários outros ensaios para melhor compreensão dos resultados obtidos até o momento desta pesquisa.

Algumas sugestões de futuros ensaios para complementar a presente pesquisa:

- ✓ Classificação MCT – Ensaios Geotécnicos – Perda de Massa por Imersão (PI), para uma melhor análise da estabilidade do solo à ação da água e expansibilidade do solo;
- ✓ Ensaio de Adensamento Edométrico – para determinar parâmetros de compressibilidade e coeficiente de adensamento do solo e das amostras com adição de cinza, e estudo da colapsividade com todas as amostras;
- ✓ Ensaio de Cisalhamento Direto para determinar parâmetros geotécnicos importantes tais como coesão e ângulo de atrito para melhor compreensão da estabilização das misturas.

Possíveis análises e estudos futuros com base no do estudo apresentado:

- ✓ Análise de viabilidade de utilização deste solo com adição de cinza para outros fins de utilização em outras obras de estabilização tais como taludes, fundações.
- ✓ Aplicação da metodologia usada na presente pesquisa utilizando outros tipos de solos.
- ✓ Utilização de dosagens intermediárias das porcentagens de cinzas adicionadas ao solo, a fim de obter parâmetros mais precisos do comportamento geral das misturas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. ABNT, 2016. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez, ABNT, 2016. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 7181**: Solo: análise granulométrica, ABNT, 2016. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica, ABNT, 2017. 4p.
- ALBERS, A. P. F. *et al.* Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, São Paulo, v. 48, n. 305, p. 34-37, 2002.
- ALMEIDA, A. A. R. de. **Avaliação técnica, econômica e ambiental do aproveitamento de lodos como combustível em fábrica de celulose**. 2019. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2019.
- ALVES, E. D. *et al.* Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p. 205-218, 2015.
- AZEVEDO, A. L. C. de. **Estabilização de solos com adição de cal**: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- ARAKI, M. S. **Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal**. 1997. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1997.
- BARACHO, Gabriela Oliveira; DE SOUZA CORREIA, Natalia. **Viabilidade de misturas de solo laterítico argiloso com cinza do bagaço da cana para construção de estradas rurais**. *Revista Geama*, v. 7, n. 2, p. 21-27, 2021.
- BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. da; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. de C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, v.37, p.99 - 106. 1998.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* Introdução. *In*: BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás Abeda, 2008. v. 504, cap 1, p. 9-24.

BOUMANS, P.; KLOCKENKÄMPER, R., eds, - Total reflection X-ray fluorescence spectrometry. Proc; of the Second Workshop on TXRF, Dortmund, 1989.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. *In*: CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C. S.; BRUM, I. A. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**: Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001, cap.6, p. 188-227.

CHAGAS, G. da S.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. de A. Avaliação da compactação como melhoramento de um solo silto, argiloso, colapsível, um partidor da realização de ensaios oedométricos e provas de carga diretas. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 6, n. 1, p. 3-19, 2019.

CINTRA, J.C.A. **Fundações em solos colapsíveis**. São Carlos: Ed. Rima, 1998.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT – **Anuário CNT do Transporte**: estatísticas consolidadas.4.ed. Brasília: CNT, 2019. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/>. Acesso em: 24 de nov. 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Transporte Rodoviário**: Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? Brasília: CNT, 2017. Disponível em: <https://cnt.org.br/por-que-pavimentos-rodovias-nao-duram>. Acesso em: 24 de nov. 2020.

CRUZ, M. de L. S.da. **Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento**. 2004.240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Guimarães, PT, 2004.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER-ME 228/94**: Solos - compactação em equipamento miniatura. Mato Grosso: DNER/DrDTc, 1994. 14 p.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER 254/94**: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão. Rio de Janeiro: DNIT, 1994, 14p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR. Publ. 720, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR Publ. 719, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 141/2010 – ES**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DUDLEY, J. H. Review of collapsing soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Ann Arbor, v. 96, p. 925 - 947, 1970.

D'ALMEIDA, M. L. O. Celulose e papel. *In*: SENAI; IPT. **Tecnologia de fabricação de pasta celulósica**. 2. ed. Sao Paulo: Escola SENAI Theobaldo de Nigris, 1988. v. 1, cap. 3., 1988. 559 p.

FRANÇA, D. F. S. *et. al.* Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, p. 153 - 166, 2016.

FERREIRA, S. R. M. **Solos Colapsíveis do Nordeste. Geotecnia do Nordeste**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2005.

GUERRA, M. A. de S. L. **Avaliação de indicadores biológicos e físicoquímicos no composto orgânico produzido a partir de resíduos da indústria de celulose**. 2007. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Campus de Viçosa, Faculdade de Engenharia Florestal - UFV, Viçosa, MG, 2007.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth Construction: A Comprehensive Guide**. London: Intermediate Technology Publications, 1994. 73 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ – **Relatório Anual 2020**. São Paulo: IBÁ Disponível em: < <https://iba.org/publicacoes>>. Acesso em 8 de dezembro de 2020.

KINUTHIA, JM. Sustentabilidade do papel usado na construção. *In*: Sustentabilidade dos Materiais de Construção . Cambridge: Publicação Woodhead, 2016. p. 567 - 596.

LAFLEUR, J.D.; DAVIDSON, D.T.; KATTI, R.T; GURLAND, J. **Relationship between the Califórnia Bearing Ratio and Iowa Bearing Value, in methods for testing engineering soils**. Ames: Iowa State University, 1960.

LIMA, Ricardo Paganelli de *et. al.* **Estabilização de Solo Laterítico Utilizando Resíduo de Cana de Açúcar (cinza)**. 2019. 136f. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, 2019.

LOLLO, J. A. **Solos Colapsíveis: Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. Marília: Editora Cultura Acadêmica - UNESP, 2008.

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**. Revista *Árvore*, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 543-550, 2003.

MACHADO, C. C.; PORTUGAL, C. R. M. **Comportamento geotécnico de misturas granulométricas de solo-grits**. Revista *Árvore*, Viçosa, MG v. 36, n. 3, p. 519-526, 2012.

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

MIELI, JCA. **Sistemas de avaliação ambiental na indústria de celulose e papel**. 2007. 99p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2007.

MISHRA E. N. K. **Strength Characteristics of Clayey Sub-Grade Soil Stabilized with Fly Ash and Lime for Road Works**. Indian Geotechnical Journal, Heidelberg, v 42 n. 3, p.206 - 211, Set, 2012.

NOGAMI, J.S. Determinação do Índice de Suporte Califórnia com equipamento de dimensões reduzidas (ensaio Mini-CBR). *In: REUNIÃO DAS ADMINISTRAÇÕES RODOVIÁRIAS*, 2., 1972, Brasília. **Anais [...]** Brasília.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR D.F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Ed Villibor, 1995.

OLIVEIRA, L.C.D. de. **A estabilização de solos aplicada a habitação, um estudo de misturas solo-cimento**. Resumo da tese de Mestrado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1994.

Oliveira, N.M.; Dias Neto, S.L.S; Ferraz, R.L.; Pitanga, H.N.; Silva, T.O.; Barbosa, P.S.A. & Lima, D.C. 2021. **Influência da Estrutura na Curva Característica de Retenção e no Comportamento Colapsível de um Solo Tropical**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 44, DOI 1982-3908_2021_44_35335

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. Dissertação de Mestrado, 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC Rio. Rio de Janeiro, 2008.

ROSSI, M. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. **Instituto Florestal**, São Paulo, v. 1, p. 118, 2017.

SAAB, Alfredo Lopes. **Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado**. Dissertação de Mestrado, 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, 2016.

SANTOS NETO, P. M. **Mecânica dos solos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 376 p.

SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SENÇO, Wlastermiler. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. V. 2. São Paulo: Editora PINI, 2001.

SILVA, Mateus Justino da. **Reforço de solos utilizados em base e sub-base de pavimentos rodoviários com cinza com alto teor de cálcio**. 2017. 96 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017

SOLIZ, Valeria Vaca Pereira. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

TALUKDAR, D. K. A study of paper mill lime sludge for stabilization of village road sub-base. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, Raipur, v. 5, n. 2, p. 389-393, 2015.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VILLIBOR, D. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. São Carlos: Gráfica EESC – USP, 1982.

YACOUB, J. D. **Melhoria do comportamento colapsível de um solo arenoso fino com uso de cinza de casca de arroz**. 2017. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2017.