



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

RHAYANE FARIA LEANDRO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM REJEITOS DE CELULOSE PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Ilha Solteira - SP

2023

RHAYANE FARIA LEANDRO

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM REJEITOS DE CELULOSE PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção de grau de
Engenheiro Civil.

Orientador

Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima

Ilha Solteira - SP

2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L437e Leandro, Rhayane Faria.
Estabilização de solos com rejeitos de celulose para uso em pavimentação rodoviária / Rhayane Faria Leandro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
63 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Jairo Salim Pinheiro de Lima
Inclui bibliografia

1. Pavimentação rodoviária. 2. Cinza de cavaco de eucalipto. 3. Estabilização de solos. 4. Solo não laterítico.


Raiane da Silva Santos

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURSO: ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSPORTES
REALIZADA EM: 19-01-2023
DISCENTE: Rhayane Faria Leandro

COMISSÃO EXAMINADORES

1. Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima – UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador).
2. Prof. Ms. Alan Henrique Vicentini – UNESP/FE Ilha Solteira (Examinadora).
2. Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima – UNESP/FE Ilha Solteira (Examinador).

Título do trabalho: Estabilização de solos com rejeitos de celulose para uso em pavimentação rodoviária.


Local: Unesp, Departamento de Engenharia Civil.
Horário de início: 10 h

Em sessão pública, após exposição em torno de 40 (quarenta minutos), a discente foi arguida oralmente, e no final da exposição foi **"APROVADA"** pelos membros componentes da Comissão Examinadora. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA, a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo discente.

Ilha Solteira, 19 de janeiro de 2023.


Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima
UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador)


Prof. Ms. Alan Henrique Vicentini
UNESP/FE Ilha Solteira (Examinador)


Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima
UNESP/FE Ilha Solteira (Examinador)

Ciente: 
Discente: Rhayane Faria Leandro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Simone e Reginaldo, que são a minha base e nunca mediram esforços para me oferecer tudo que eu pudesse precisar, e ainda um pouco mais. Sou muito grata em poder contar com tanto apoio, paciência, amor e carinho, sem eles nada disso seria possível.

Ao meu namorado, Rhuan, que esteve do meu lado desde o início, me ajudando a superar cada desafio, acreditando nos meus sonhos e tornando tudo mais leve.

Ao meu irmão, Eduardo, que sempre acreditou em mim, me apoiando e incentivando a conquistar sempre o melhor.

As minhas avós por sempre me apoiarem e torcerem por mim.

Ao meu professor orientador, Jairo, pela confiança e por transmitir seu amplo conhecimento, me fazendo refletir sobre cada situação estudada e sempre disponível a ajudar.

Ao técnico de laboratório Ozias, por estar sempre de prontidão e oferecer todo apoio e auxílio para realização dos ensaios.

Ao Programa de Educação Tutorial – PET, a Alicerce Empresa Júnior e ao Centro Acadêmico da Engenharia Civil “Augusto Carlos Vasconcelos”, grupos que participei durante a graduação, e que foram extremamente importantes para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos professores que tanto me ensinaram durante toda essa trajetória.

Aos amigos que tive a honra de fazer nesse período, em especial Eduarda, Stefanny e Tainá, que compartilharam comigo cada batalha, me auxiliando a vencer cada fase, e vivendo momentos inesquecíveis, que serão guardados com muito carinho no meu coração.

RESUMO

A estabilização de solos são métodos físicos, químicos e mecânicos para melhorar a qualidade de materiais para a pavimentação. Esta pesquisa analisa a estabilização de um solo de comportamento não laterítico siltoso do município de Ilha Solteira – São Paulo, para uso em pavimentação rodoviária, utilizando como agregado estabilizante um rejeito da produção de celulose: a cinza do cavaco de eucalipto (CCE). Inicialmente foi utilizada a metodologia MCT para a classificação do solo. Foram moldados corpos-de-prova com a adição de 10, 30 e 60% do agregado e também corpos-de-prova com o solo in natura para serem usados como referência. Todos eles foram submetidos à compactação mini-Proctor e mini-CBR com e sem imersão. Os resultados encontrados foram não lineares, com pequeno aumento na capacidade de suporte na amostra com 10% de agregado, queda na amostra com 30% de agregado, e aumento significativo na amostra com 60% de agregado. O valor da expansão teve pequeno aumento na amostra com 10% de agregado, e diminuição acentuada nas amostras com 30% e 60% de agregado, portanto a adição do agregado tornou o solo menos expansivo. Os resultados dos ensaios com as misturas de solo-cinza não foram animadores. Mesmo assim, em razão da energia de compactação empregada e das propriedades alcançadas, é possível empregar estes materiais em pavimentação como enchimento de aterro, subleito e regularização de subleito. Além disso, é possível empregá-lo na estrutura do pavimento como reforço do subleito.

Palavras-chave: Pavimentação rodoviária, cinza de cavaco de eucalipto, estabilização de solos, solo não laterítico.

ABSTRACT

Soil stabilization are physical, chemical and mechanical methods to improve the quality of paving materials. This research analyzes the stabilization of a soil of non-lateritic silty behavior in the municipality of Ilha Solteira - São Paulo, for use in road paving, using a waste from pulp production as a stabilizing aggregate: eucalyptus chip ash (ECC). Initially, the MCT methodology was used for soil classification. Specimens were molded with the addition of 10, 30 and 60% of the aggregate and also specimens with the soil in natura to be used as a reference. All of them were submitted to mini-Proctor and mini-CBR compaction with and without immersion. The results found were non-linear, with a small increase in carrying capacity in the sample with 10% aggregate, a decrease in the sample with 30% aggregate, and a significant increase in the sample with 60% aggregate. The expansion value had a small increase in the sample with 10% aggregate, and a sharp decrease in the samples with 30% and 60% aggregate, so the addition of aggregate made the soil less expansive. The results of tests with soil-ash mixtures were not encouraging. Even so, due to the compaction energy employed and the properties achieved, it is possible to use these materials in paving as filler in landfills, subgrade and subgrade regularization. In addition, it can be used in the pavement structure as reinforcement for the subgrade.

Keywords: Road paving, eucalyptus chip ash, soil stabilized, non-lateritic soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Camadas do pavimento	12
Figura 2	- Razão de produção Celulose/Papel no Brasil	18
Figura 3	- Coleta de solo	20
Figura 4	- Cinza de eucalipto moída	21
Figura 5	- Procedimentos realizados	22
Figura 6	- Corpos-de-prova em imersão	23
Figura 7	- Gráfico para classificação de solos	25
Figura 8	- Preparação das amostras	26
Figura 9	- Preparação das amostras para ensaio mini-proctor	27
Figura 10	- Equipamento para compactação do ensaio mini-proctor	28
Figura 11	- Corpos-de-prova após compactação no mini-proctor	29
Figura 12	- Prensa de CBR para ensaio de resistência a penetração	30
Figura 13	- Leitura da penetração no ensaio mini-CBR	31
Figura 14	- Corpos-de-prova em imersão para mini-CBR	32
Figura 15	- Mini-proctor (solo in natura)	34
Figura 16	- Mini-proctor (10% de agregado)	35
Figura 17	- Mini-proctor (30% de agregado)	36
Figura 18	- Mini-proctor (60% de agregado)	36
Figura 19	- Mini-proctor (todas as amostras)	37
Figura 20	- Corpo-de-prova expulsando água	38
Figura 21	- Corpos-de-prova após mini-CBR de ruptura imediata	39
Figura 22	- Carga x penetração do ensaio mini-CBR sem imersão	40
Figura 23	- Mini-CBR sem imersão	41
Figura 24	- Carga x penetração do ensaio mini-CBR com imersão	42
Figura 25	- Mini-CBR com imersão	43
Figura 26	- Comparação mini-CBR com e sem imersão (amostra do solo in natura)	44
Figura 27	- Comparação mini-CBR com e sem imersão (amostra com 10% de agregado)	45
Figura 28	- Comparação mini-CBR com e sem imersão (amostra com 30% de agregado)	45

Figura 29	- Comparação mini-CBR com e sem imersão (amostra com 60% de agregado)	46
Figura 30	- Comparação mini-CBR com e sem imersão.	47
Figura 31	- Expansão	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Ranking dos maiores produtores de celulose no mundo em 2020	18
Tabela 2	- Teor de umidade do solo adotada na compactação mini-MCV	23
Tabela 3	- Coeficientes encontrados na classificação MCT	34
Tabela 4	- Resultados do mini-proctor	37
Tabela 5	- Variação percentual de mini-CBR sem imersão	41
Tabela 6	- Variação percentual de mini-CBR com imersão	43
Tabela 7	- Variação percentual entre o ensaio mini-CBR sem x com imersão de cada amostra (%)	47
Tabela 8	- Valores de RIS (%)	48
Tabela 9	- Dados obtidos nos ensaios de compactação	49
Tabela 10	- Parâmetros para materiais em pavimentação	50

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Pavimento	12
3.1.1 Definição	12
3.1.2 Subleito	13
3.1.3 Regularização	13
3.1.4 Reforço do subleito	13
3.1.5 Sub-base	13
3.1.6 Base	13
3.1.7 Revestimento	14
3.2 Solo	14
3.3 Estabilização de solos	14
3.3.1 Definição	14
3.3.2 Estabilização mecânica	15
3.3.3 Estabilização por correção granulométrica	15
3.3.4 Estabilização química	15
3.4 Solos tropicais	15
3.5 Solo de comportamento não laterítico	16
3.5.1 Definição	16
3.5.2 Características do solo de comportamento não laterítico	16
3.6 Agregados	16
3.7 Resíduos e rejeitos	17
3.8 Produção de celulose	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Materiais	20
4.1.1 Solo	20
4.1.2 Cinza de eucalipto moída	20
4.1.3 Água	21
4.2 Métodos	21
4.2.1 Procedimentos laboratoriais	21
4.2.2 Classificação MCT do solo	22
4.2.3 Análise da cinza de eucalipto	25

4.2.4	Preparação das amostras	25
4.2.5	Ensaio de compactação em miniatura – Mini-Proctor	26
4.2.6	Ensaio mini CBR e expansão	29
4.2.6.1	Mini CBR	29
4.2.6.2	Relação entre Índices Suportes (RIS)	33
5.	RESULTADOS	34
5.1	Caracterização do solo – Classificação MCT	34
5.2	Ensaio de compactação – Mini-proctor	34
5.3	Ensaio de compactação – mini-CBR	39
5.3.1	Preparação para compactação	39
5.3.2	Mini-CBR sem imersão	39
5.3.3	Mini-CBR com imersão	41
5.3.4	Comparação entre com ensaio mini-CBR <i>com e sem</i> imersão	44
5.3.5	Relação de perda de suporte após a imersão	47
5.4	Expansão	48
5.5	Aplicação em pavimentos	49
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
6.1	Conclusões	51
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	APÊNDICES	55

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é o meio mais utilizado pelo Brasil. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019) a utilização de rodovias responde por 61,1% do transporte de cargas, e 92,2% do transporte de passageiros.

O Brasil possui imensa extensão de malha rodoviária, mas, ao contrário do que se imagina apenas 12,4% dessas vias são pavimentadas, existindo 1.349.938 km de rodovias sem pavimentação. Nestes casos, o tráfego ocorre em superfícies precárias, tornando necessário encontrar formas sustentáveis para a execução e a manutenção de novas construções.

A produção de celulose envolve um processo químico denominado Kraft, que resulta na geração de resíduos como: os Dregs (RD), Grits (RG) e Lama da cal (RLC) (FIORESE, 2009). O volume de rejeitos da indústria de celulose aumenta a cada ano, tornando indispensáveis alternativas adequadas para a sua destinação final.

Visando sanar os dois problemas citados, nessa pesquisa foi estudada a possibilidade de aproveitamento desse rejeito para reforçar solos com baixa capacidade de suporte. A avaliação se dá por meio de testes e análises físicos e mecânicos.

Para a realização desse estudo, foi utilizado o conceito de estabilização granulométrica do Manual de Pavimentação (DNIT, 2016), onde foram misturadas amostras do solo in natura com o rejeito a ser estudado. Analisando os resultados obtidos quanto a sua resistência e expansão. Comparando os resultados das misturas solo-rejeito com o solo in natura, é possível aferir se estes materiais colaboram para melhorar as propriedades do solo.

Embora os “ganhos” sejam limitados, percebemos melhoras no valor do CBR para as misturas com dosagens de 10% e 60% e piora na mistura com 30% em relação ao solo in natura. De acordo com os resultados obtidos e as referências do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), é possível empregar estes materiais em pavimentação como enchimento de aterro, subleito e regularização de subleito. Além disso, é possível empregá-lo na estrutura do pavimento como reforço do subleito.

2. OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa é estudar a estabilização de solos de comportamento não laterítico para uso em pavimentação rodoviária, utilizando rejeitos da produção de celulose como agregado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

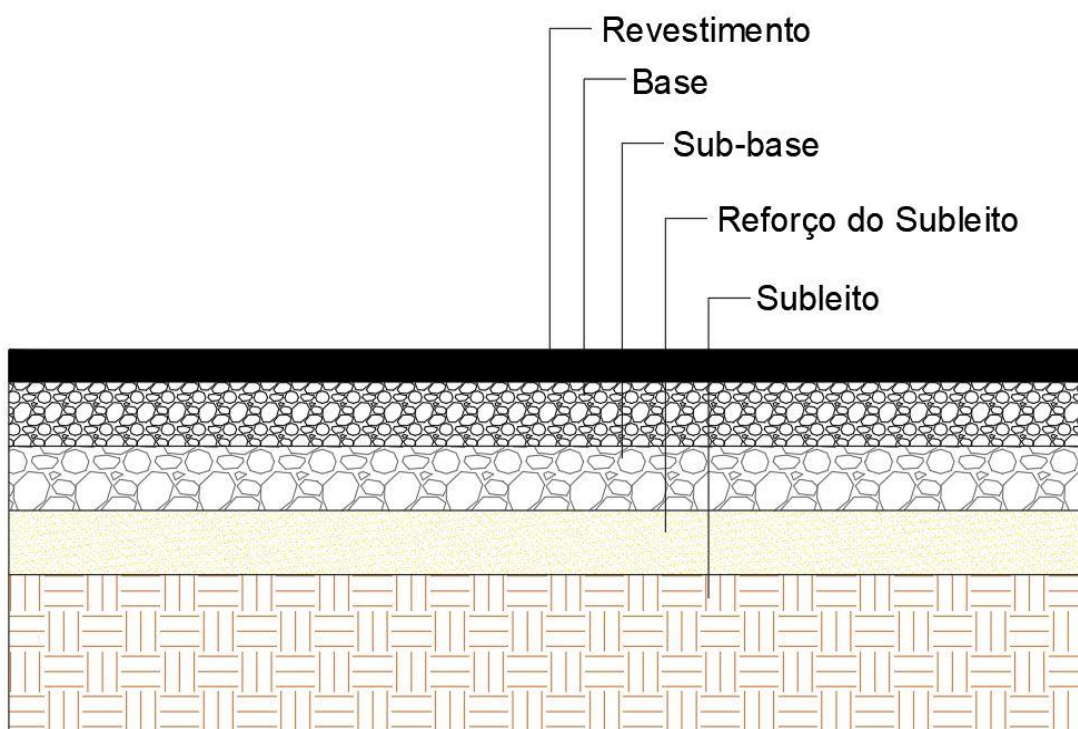
3.1 Pavimento

3.1.1 Definição

Pavimento é a estrutura destinada a resistir aos esforços causados pelo tráfego e distribuí-los, resistir também aos desgastes causados pelos esforços horizontais, tornando aquela superfície mais durável. O pavimento é subdividido em camadas, tendo cada uma delas a sua função específica (SENÇO, 2007).

Para o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2006) as camadas do pavimento são divididas em revestimento, base, sub-base, reforço de subleito, e temos também o subleito, que não é considerado pavimento. Podemos observar a ordem em que essas camadas se apresentam na Figura 1.

Figura 1 – Camadas do pavimento



Fonte: Felipe Cava (2021).

3.1.2 Subleito

Subleito é o maciço de terra que serve de fundação para o pavimento ou revestimento (DNER, 2017). No caso das estradas de terra, o subleito é a própria superfície de tráfego. E esta plataforma pode ainda receber uma camada de material com propriedades superiores às do solo, para torná-la mais resistente ao tráfego e às intempéries, é o chamado revestimento primário.

3.1.3 Regularização

Regularização é a camada superior ao subleito, destinada a conformá-lo, transversal e longitudinalmente, com o projeto. Essa camada também pode ser chamada de preparo do subleito (SENÇO, 2007).

3.1.4 Reforço do subleito

É a camada destinada a melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e de reduzir a espessura da sub-base (DNER, 2017). O reforço do subleito possui espessura constante e é construído, se necessário, em cima da regularização. É uma parte constituinte do pavimento e tem funções de complemento da sub-base que, por sua vez, tem funções de complemento da base (SENÇO, 2007).

3.1.5 Sub-base

Sub-base é a camada de correção do subleito e complementar à base, com as mesmas funções desta, e executada quando, por razões de ordem econômica e técnica, for conveniente reduzir a espessura de base (DNER, 2017).

Com exceção nos pavimentos de estrutura invertida, o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores às do material de reforço, e assim, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base (SENÇO, 2007).

3.1.6 Base

Base é a camada destinada a resistir aos esforços verticais causados pelos veículos, distribuindo-os ao subleito, e sobre a qual se constrói o revestimento (DNER, 2017).

O pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito (SENÇO, 2007).

3.1.7 Revestimento

O revestimento, também chamado de capa de rolamento, é a camada mais acima do pavimento, que recebe diretamente as ações verticais e horizontais do tráfego. O revestimento visa melhorar as condições do rolamento quanto ao conforto e segurança, e aumentar a durabilidade da estrutura resistindo ao desgaste (SENÇO, 2007).

3.2 Solo

Nogami e Villibor (1995) definem o solo como material natural não consolidado, ou seja, constituído de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos relativamente suaves, como dispersão em água com uso de aparelho dispersor de laboratório. O solo pode ser escavado com equipamentos comuns de terraplanagem. É, portanto, um material solto, proveniente do intemperismo e da degradação de rochas ou de decomposição de vegetais (CNT, 2017).

Quando o solo é utilizado como material de construção civil, como na pavimentação, ele se condiciona como material para a construção, sendo necessários estudos e análises de controle da qualidade durante a sua utilização (SENÇO, 2007).

O solo é importante na pavimentação e pode ser utilizado em quase todas as camadas, com destaque para o subleito (a fundação do pavimento).

3.3 Estabilização de solos

3.3.1 Definição

Estabilização é um processo para preservar e suplementar as propriedades de resistência de solos, ajudando a melhorar a qualidade do pavimento, e maximizando a adequação deste para um determinado uso. Esse processo pode ser feito por métodos mecânicos, químicos ou granulométricos (LAUFER, 1967; MOUSAVI et al., 2017).

3.3.2 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica visa melhorar as características do solo por meio do rearranjo das partículas, diminuindo o índice de vazios entre os grãos, realizada por processos de impacto, vibração e pressão no solo (VARGAS, 1977).

3.3.3 Estabilização por correção granulométrica

É a combinação de dois ou mais tipos de solos em proporções adequadas para obter um material homogeneizado, bem graduado, com limitada porcentagem de partículas finas, melhorando a resistência do solo, diminuindo a quantidade de vazios devido ao preenchimento pelos grãos menores, e aumentando a resistência mecânica (VILLIBOR, 1982).

3.3.4 Estabilização química

É uma técnica que melhora as propriedades físicas e mecânicas do solo, mudando a sua estrutura. Neste caso são empregados aditivos que causarão reações químicas. Com a adição de estabilizadores ao solo natural, as reações químicas ajudam a atingir a umidade ótima para uma boa compactação, promovendo o preenchimento dos poros, assegurando a melhoria das propriedades do solo, e alcançando a resistência exigida em projeto (MAKUSA, 2013; MEDINA, 1987).

Brito e Paranhos (2017) sugerem que os métodos de estabilização podem ser usados separadamente, mas, o mais comum na prática, é a combinação entre mais de um método. A escolha do tipo de solução para estabilizar o solo depende do tipo e das propriedades do solo disponível, da finalidade de aplicação do solo, das exigências de projeto e da viabilidade técnica e econômica das opções disponíveis.

3.4 Solos tropicais

Para Nogami e Villibor (2009), o solo tropical apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação de processos geológicos e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985).

A classificação dos solos tropicais (miniatura, compactado, tropical – MCT) proposta por Nogami e Villibor (1995) divide os solos em dois grandes grupos: os de comportamento laterítico e aqueles de comportamento não laterítico. O método de classificação MCT é descrito na norma técnica: DNER-CLA 259/96 (1996).

3.5 Solo de comportamento não laterítico

3.5.1 Definição

Os solos de comportamento não lateríticos (antes chamados saprolíticos) resultam da decomposição e/ou desagregação in situ da rocha (considerada material consolidado da crosta terrestre), mantendo, ainda de maneira nítida, a estrutura (ou fábrica) da rocha que lhe deu origem (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985).

Este tipo de solo é genuinamente residual, razão pela qual é designado ainda como residual ou solo residual jovem. As camadas que os solos não lateríticos constituem em suas condições naturais são designadas horizonte saprolítico (NOGAMI e VILLIBOR, 2009).

3.5.2 Características do solo de comportamento não laterítico

Estudos realizados por Nogami e Villibor (2009) demonstraram que o solo de comportamento não laterítico apresenta expansão muito alta e alta sensibilidade à presença de sobrecarga, pois a sua retirada pode aumentar em até 5 vezes os valores da expansão.

O solo de comportamento não laterítico apresenta valores de capacidade de suporte em condições imersas nitidamente inferiores aos apresentados pelos solos lateríticos. Por sua vez, esses solos são mais permeáveis do que os correspondentes aos solos lateríticos (NOGAMI e VILLIBOR, 2009).

3.6 Agregados

Para Senço (2007), agregados são materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, com propriedades adequadas a compor camadas ou misturas para utilização nos mais diversos tipos de obras. Do ponto de vista de agregados destinados à pavimentação, o seu emprego destina-se a misturas betuminosas, concreto de cimento, bases de calçamentos, lastros de obras e outros.

Os agregados podem resultar de rochas fragmentadas em britadores, seixos rolados encontrados nos leitos atuais dos rios e em antigos leitos, em jazidas resultantes de alterações de rocha, de escórias de alto-forno (SENÇO, 2007).

A utilização de materiais alternativos como agregados é amplamente estudada, visando atender a necessidade de encontrar formas sustentáveis para executar novas construções.

3.7 Resíduos e rejeitos

Resíduo pode ser definido como qualquer matéria que é descartada ou abandonada ao longo de atividades industriais, comerciais, domésticas ou outras; ou, ainda, como produtos secundários para os quais não há demanda econômica e para os quais é necessária disposição (BOSCOV, 2008).

Os resíduos podem se apresentar sob a forma de sólidos, semissólidos, líquidos e gases. Segundo a norma brasileira NBR 10.004, "Classificação de resíduos sólidos", recebem essa denominação os resíduos nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades da comunidade, de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (BOSCOV, 2008). A classificação dos resíduos depende da sua origem, características e do seu impacto ao meio ambiente e à saúde humana.

O rejeito é um tipo específico de resíduo, em que todas as possibilidades de reaproveitamento ou reciclagem foram esgotadas e não houver solução final para o item ou parte dele e, portanto, as únicas destinações plausíveis são encaminhá-lo para um aterro sanitário licenciado ambientalmente ou incineração (VGR, 2020).

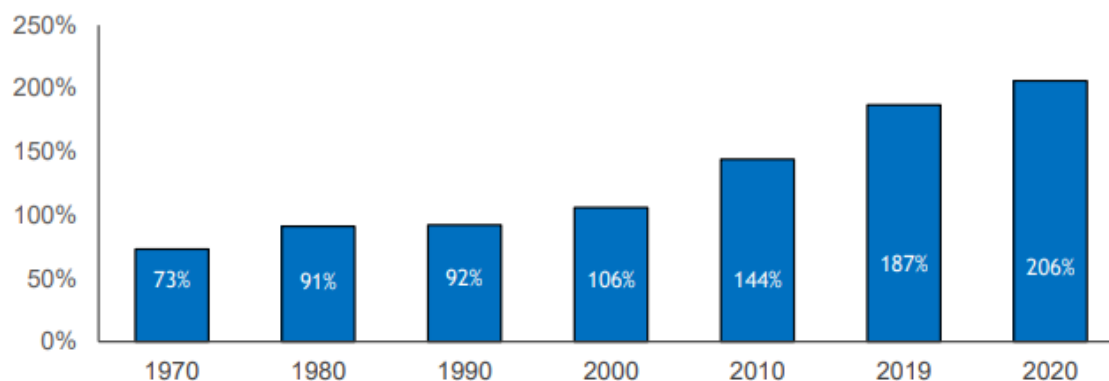
A cinza do cavaco de eucalipto (CCE), material utilizado como agregado para estabilizar o solo nesse estudo, é um rejeito da produção de celulose, portanto descartado em aterros ou em áreas de cultivo. O desafio então é torná-lo resíduo, viabilizando o seu aproveitamento como material de construção para estabilizar solos em construção de estradas.

3.8 Produção de celulose

A indústria de papel e celulose vem aumentando bastante a sua produção, como observamos na Figura 2. O consumo energético do setor passou de 5% do consumo final industrial em 1970 para 16% em 2020, com um crescimento médio do consumo de 5,4% a.a. (1970 a 2020) (EPE, 2020).

Mesmo com a eclosão da pandemia do Covid-19, a produção de celulose no Brasil cresceu 6,6% em 2020 em relação a 2019, confirmando a resiliência do setor às demandas do novo formato de consumo dos diversos setores econômicos. O país se manteve como o segundo maior produtor mundial, atingindo 21,0 milhões de toneladas fabricadas, atrás apenas dos Estados Unidos (Tabela 1) (IBA, 2021).

Figura 2 – Razão de produção Celulose/Papel no Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020).

Tabela 1 – Ranking dos maiores produtores de celulose no mundo em 2020

País	Produção (10 ⁶ t)	% da produção
EUA	50,9	27,4%
Brasil	21,0	11,3%
Canadá	15,4	8,3%
China	14,9	8,0%
Suécia	12,0	6,5%
Finlândia	10,5	5,7%
Rússia	8,8	4,7%
Indonésia	8,4	4,5%
Japão	7,2	3,9%
Chile	5,2	2,8%

Fonte: IBÁ (2021) e FAO (2021)

O processo Kraft é dominante na produção de celulose, empregado em 90% de toda a produção de celulose no Brasil (CORREIA, 2010).

O Kraft se fundamenta na deterioração e extração da lignina da madeira, que tem como função principal 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, citado por VICENTE, 2021).

Assim como a maioria dos processos que utilizam madeira como principal insumo, a produção da celulose gera grande quantidade de 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). Cada tonelada de celulose produzida no Brasil, gera em torno de 0,8 tonelada de resíduos sólidos (GUERRA, 2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi retirado das margens de uma via pública, na Rua Jataí, no município de Ilha Solteira - SP com as coordenadas 20°25'20.9"S, 51°20'45.1". A coleta foi feita pela própria autora (Figura 3), seguido de peneiramento com a peneira ASTM #10 (American Society for Testing and Materials) correspondente a malha de 2,0 mm.

Figura 3 – Coleta de solo



Fonte: Acervo da autora (2022).

4.1.2 Cinza de eucalipto moída

O rejeito utilizado neste trabalho foi a cinza de cavaco de eucalipto devidamente moído (Figura 4). Este material foi fornecido pela empresa Fibria – Papel e Produtos Florestais, atual Suzano, localizada no município de Três Lagoas - MS.

O resíduo passou por processo de moagem no Laboratório de Engenharia Civil – FEIS/UNESP. O equipamento empregado foi o moinho de bolas. Cada ciclo de moagem durou 50 minutos suficiente para 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 do agregado. Em cada etapa eram colocados 15 kg de cinza de cavaco de eucalipto (VICENTE, 2021, p. 27).

Figura 4 - Cinza de eucalipto moída



Fonte: Acervo da autora (2022).

4.1.3 Água

A água empregada nas misturas foi a do abastecimento local do Câmpus Central da Unesp de Ilha Solteira- SP.

4.2 Métodos

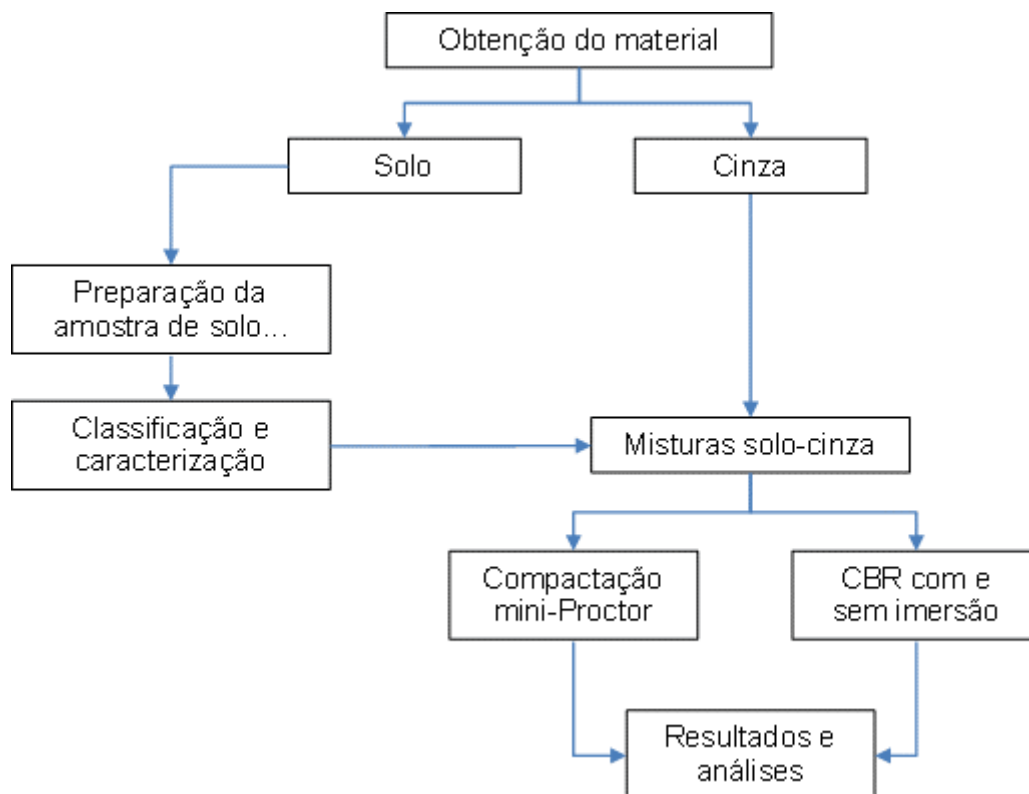
4.2.1 Procedimentos laboratoriais

Os procedimentos utilizados na pesquisa estão fundamentados nos ensaios tradicionais da mecânica dos solos, visando caracterizar e classificar os solos e as misturas com diferentes dosagens de cinza da biomassa de eucalipto.

O solo foi previamente estudado e classificado e os seus dados empregados como referência para as misturas. Foram avaliadas misturas com 10%, 30% e 60%

de cinza relativa à massa de solo, sem substituição de material. O fluxograma da Figura 5 exemplifica as etapas adotadas na pesquisa.

Figura 5 – Procedimentos realizados



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

4.2.2 Classificação MCT do solo

Após a coleta, o solo foi destorroado e peneirado na peneira ASTM #10 correspondente à malha de 2,0 mm, visando eliminar sólidos indesejados presentes e que poderiam atrapalhar os ensaios. Nas etapas seguintes foram realizados ensaios de classificação e caracterização.

a) Compactação mini-MCV

O ensaio de compactação mini-MCV (DNER-ME 258/94) tem o objetivo de determinar coeficientes empíricos utilizados na caracterização e classificação de solos tropicais.

O solo a ser estudado foi levado à estufa a 100° C por 24 horas para a determinação do teor de umidade. Foram, então, preparadas 5 amostras em diferentes teores de umidades, acrescentando-se 2 pontos percentuais entre uma e outra. A Tabela 2 resume os dados sobre o teor de umidade das amostras de solo.

Tabela 2 – Teor de umidade do solo adotada na compactação mini-MCV

Amostra	1	2	3	4	5
Umidade (%)	24	26	28	30	32
Peso do solo úmido (g)	200	200	200	200	200

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Cada uma das amostras foi compactada em um cilindro de 0,05m de diâmetro, envolto de vaselina, variando-se de maneira crescente o número de golpes até obter massa específica aparente máxima para cada teor de umidade. Após a compactação, foi feito o gráfico das curvas de deformabilidade para determinar o valor do coeficiente c' (coeficiente angular da parte mais inclinada e retilínea da curva para mini-MCV igual a 10).

b) Perda de massa por imersão

Neste caso foram utilizados as mesmas amostras e os mesmos teores de umidades do ensaio de compactação mini-MCV. Com a ajuda do extrator, os corpos-de-prova foram deslocados 10 mm para fora do cilindro e imersos em tanque de vidro com água, conforme a Figura 6.

O comportamento à imersão foi observado nos primeiros minutos. Após 24h de imersão, o material foi retirado do tanque e submetido a secagem em estufa com temperatura de 100°C. Assim, obtivemos a massa seca e a massa seca despreendida, podendo calcular a perda de massa por imersão P_i , conforme indicado na Equação 1.

Figura 6 – Corpos-de-prova em imersão



Fonte: Acervo da autora, 2022.

$$P_i = \frac{M_d * 100}{M_o} \quad (1)$$

Onde:

- P_i : perda de massa por imersão, expressa em porcentagem, com aproximação de uma unidade;
- M_d : massa de solo seco, da porção desprendida do corpo-de-prova, em gramas;
- M_o : massa de solo correspondente da 10 mm do corpo-de-prova, após a compactação, em gramas.

c) Índice d'

O índice d' corresponde ao coeficiente angular da parte retilínea (ou assimilável a uma reta) mais inclinada do ramo seco da curva de compactação correspondente a 10 golpes. Neste caso, foram traçadas curvas de compactação para as energias de 6, 8, 12 e 16 golpes do ensaio de compactação mini-MCV.

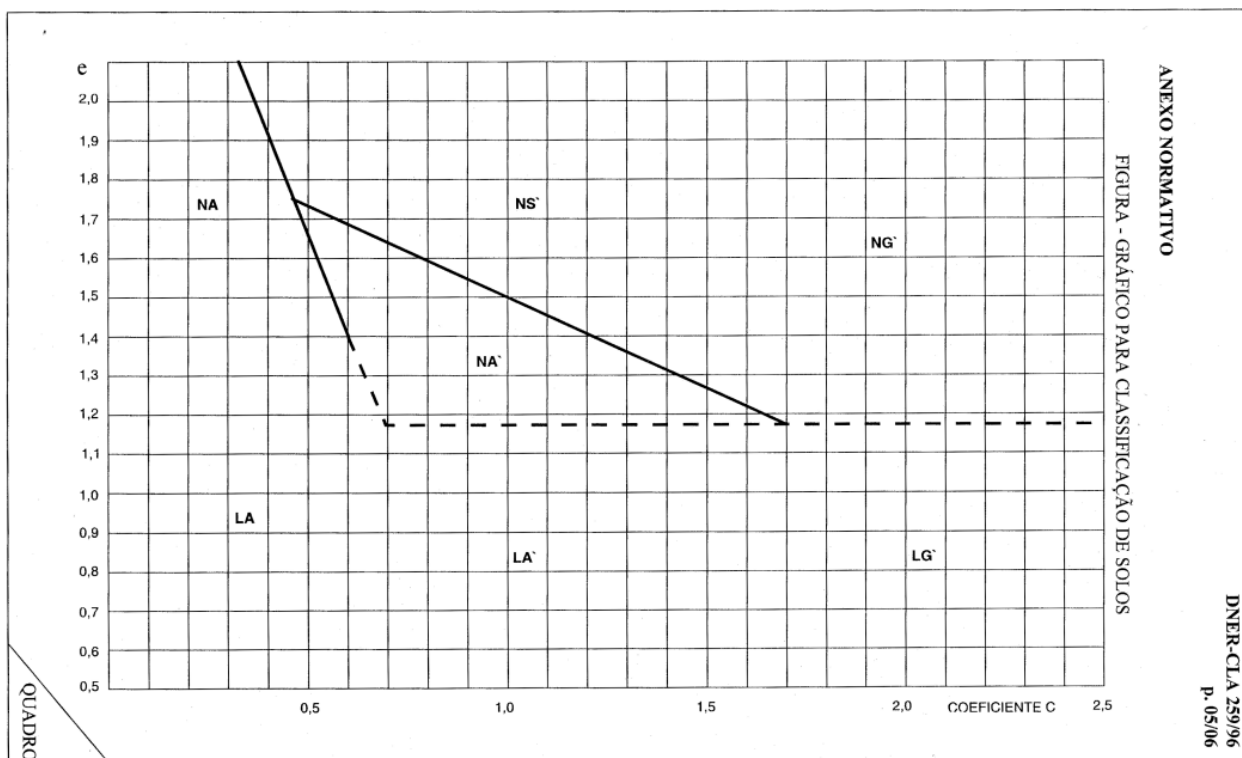
d) Classificação MCT

Com os valores de P_i e de d' é possível determinar o valor de e' (Equação 2) em que P_i é o coeficiente definido em (1) e d' o coeficiente angular definido em gráfico.

$$e' = \sqrt[3]{(20/d' + P_i/100)} \quad (2)$$

Com os valores de c' e e' , é possível localizar no gráfico da Figura 7 o ponto que determina a classe MCT do solo.

Figura 7 – Gráfico para classificação de solos



Fonte: DNER-CLA 259/96, 1996.

4.2.3 Análise da cinza de eucalipto

O agregado a ser utilizado neste trabalho foi estudado antes e as suas características e propriedades estão descritas em Vicente (2021). E, conforme esta autora, o ensaio de granulometria a laser demonstra o diâmetro e o tamanho das partículas, por meio da medida dos ângulos de difração do raio laser, tendo também relação com o diâmetro das partículas do material a ser ensaiado.

De acordo com a NBR 16605 (2017) foi determinada a massa específica, analisando-se 60g de cinza e utilizando querosene como líquido (VICENTE, 2021).

4.2.4 Preparação das amostras

Após o estudo preliminares de classificação e caracterização do solo, foram preparadas as amostras das misturas solo-cinza a serem estudadas (Figura 8). As porcentagens escolhidas foram 10%, 30% e 60% da massa seca do solo substituída pelo agregado.

Figura 8 – Preparação das amostras



Fonte: Acervo da autora (2022).

Para garantir dados mais seguros, foram preparadas 3 amostras com a porcentagem escolhida de agregado, misturado manualmente até se tornar uma mistura homogênea solo/rejeito.

4.2.5. Ensaio de compactação em miniatura – Mini-Proctor

Foram adotados 5 teores de umidade diferentes para o solo, variando 2 pontos percentuais de umidade entre um e outro. Foi calculada a proporção de água necessária para atingir essas umidades.

Cada amostra ficou separada em saco plástico e recebeu a água calculada para atingir as umidades desejadas (Figura 9). Esse processo foi feito manualmente com bastante cuidado para que a umidade seja a mesma em toda a amostra e todos os torrões sejam eliminados.

Figura 9 – Preparação das amostras para ensaio mini-proctor



Fonte: Acervo da autora, 2022.

Após a preparação, as amostras foram armazenadas por 24 horas, atentando-se para não perderem a umidade inicial, e então foram preparados os corpos-de-prova para o ensaio de compactação.

Os corpos-de-prova foram ensaiados conforme a norma DNER-ME 228/94, utilizando-se o equipamento miniatura como na Figura 10. Os ensaios foram realizados na energia de compactação correspondente ao Proctor normal.

Figura 10 – Equipamento para compactação do ensaio mini-proctor



Fonte: Acervo da autora (2022).

Após a compactação das amostras (Figura 11), os corpos-de-prova foram levados para a estufa a 100°C e ali permaneceram por 24 horas afim de obter a massa seca. Com os resultados destes procedimentos foi possível gerar os gráficos de compactação de determinar as propriedades ótimas dos materiais (teor de umidade e massa específica aparente seca máxima).

Figura 11 – Corpos-de-prova após compactação no mini-proctor



Fonte: Acervo da autora (2022).

4.2.6 Ensaio Mini CBR e expansão

4.2.6.1 Mini CBR

Com as curvas de compactação, os valores de massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótima para cada amostra, podemos então preparar as amostras para o Mini CBR.

Foram preparadas 6 amostras com teor de umidade ótima para cada porcentagem de solo estudada, sendo 3 delas para CBR com ruptura imediata (sem imersão) e os outros 3 com imersão dos corpos-de-prova em água por 24 horas.

Os corpos-de-prova foram preparados e o ensaio foi realizado seguindo a norma para solos compactados em equipamento miniatura (DNER-ME 254/97).

Para a compactação foi utilizado mesmo equipamento indicado na Figura 10. A prensa é utilizada para determinar a curva de carga versus penetração e assim calcular o mini-CBR das amostras, como é mostrado nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 - Prensa de CBR para ensaio de resistência a penetração



Fonte: Vicente (2022).

Enquanto o pistão penetra o corpo-de-prova, são anotadas as variações de medidas correspondentes a essa penetração, que serão multiplicadas pela constante do anel dinamométrico (Equação 3), obtendo os valores de carga correspondente.

$$\text{Valor de carga} = \text{Deformação} * K \quad (3)$$

Sendo:

- *Valor de carga*: corresponde a resistência penetração do pistão, em kgf;
- *Deformação*: leitura do anel dinamométrico em milímetros;
- *K*: constante do anel = 1,905 no caso do ensaio em miniatura.

Figura 13 – Leitura da penetração no ensaio mini-CBR



Fonte: Acervo da autora (2022).

Com os dados da penetração do pistão foram traçados os gráficos apresentando os valores de carga no eixo das abcissas e a penetração no eixo das ordenadas.

Para determinar o valor de mini-CBR são calculados os mini-CBR 1, que corresponde à penetração de 2,0 mm e o mini-CBR2, correspondente à penetração de 2,5 mm, conforme as Equações 4 e 5. O maior valor dentre as equações é adotado como o de mini-CBR para o teor de umidade testado.

$$\log(\text{mini-CBR } 1) = -0,254 + 0,896 * \log C1 \quad (4)$$

$$\log(\text{mini-CBR } 2) = -0,356 + 0,937 * \log C2 \quad (5)$$

Sendo:

- $C1$ = valor de carga correspondente à penetração de 2,0 mm em kgf;
- $C2$ = valor de carga correspondente à penetração de 2,5 mm em kgf.

Conforme indicado nos métodos de ensaios, 3 corpos-de-prova foram rompidos imediatamente após a compactação, portanto sem imersão. Outros 3 corpos-de-prova, após compactados, foram imersos em água (Figura 14). Todas as amostras foram compactadas nas condições ótimas (teor de umidade e massa específica aparente seca máxima) e energia do Proctor normal.

Figura 14 – Corpos-de-prova em imersão para mini-CBR



Fonte: Acervo da autora (2022).

Após a imersão fez-se a leitura final no extensômetro para determinar a expansão (Equação 6) e só então os corpos-de-prova foram submetidos ao teste de penetração.

$$E = \frac{(L_f - L_i) \times 100}{A_i} \quad (6)$$

Sendo:

- E : expansão, expressa em %, com aproximação de 0,1;
- L_i : leitura inicial do extensômetro (mm);
- L_f : leitura final do extensômetro (mm);
- A_i : altura inicial do corpo-de-prova, em milímetros, com aproximação de 0,01 mm, obtida na compactação do corpo-de-prova.

4.2.6.2 Relação entre Índices Suportes (RIS)

Esse método propõe uma relação entre as amostras analisadas: com e sem imersão, avaliando a reação do solo e a sua eficiência para utilização nas camadas de base de um pavimento.

O RIS foi proposto por Villibor e Nogami em 1982 e utiliza o ensaio mini-CBR com e sem imersão (Equação 7). Valores de RIS > 50% correspondem ao solo de comportamento laterítico e RIS < 50% aos solos de comportamento não laterítico.

$$RIS (\%) = \frac{Mini-CBR\ imerso}{Mini-CBR\ sem\ imersão} * 100 \quad (7)$$

Sendo:

- *Mini – CBR imerso*: valor de Mini-CBR em condições imersas, em %; e
- *Mini – CBR sem imersão*: valor de Mini-CBR sem imersão, dado em %.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterização do solo – Classificação MCT

Os dados obtidos para a classificação MCT da amostra de solo estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes encontrados na classificação MCT

Coeficiente	c'	d' (kg/m ³)	Pi (%)	e'
Valor encontrado	1,45	10	225	1,62

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Aplicando os coeficientes no ábaco apresentado na Figura 7, o solo é classificado como NS', portanto não laterítico siltoso.

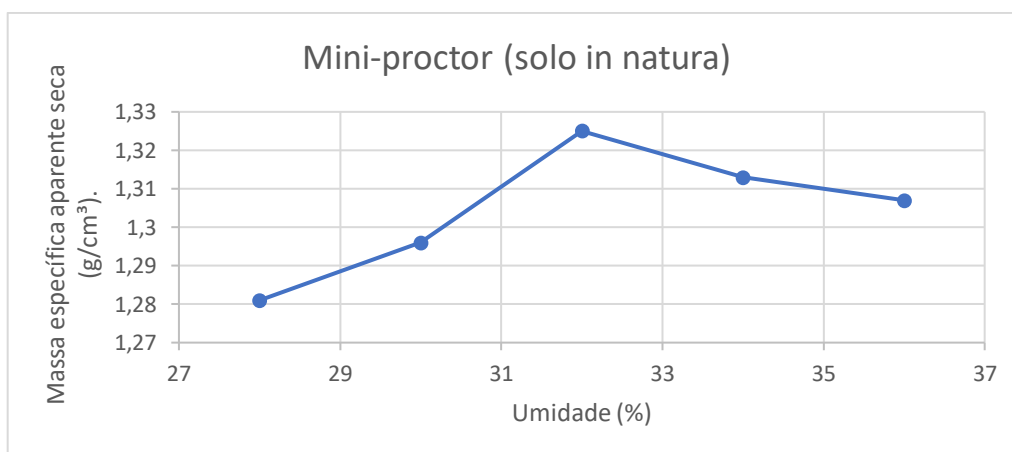
Vale ressaltar que o solo tem granulometria predominantemente fina e que o agregado é também muito fino. Como resposta, percebe-se elevado índice de compressibilidade, indicado pelo valor de c'.

5.2 Ensaios de compactação – Mini-proctor

Inicialmente, o solo foi testado in natura (sem adição do agregado), servindo como referência para análise dos resultados.

O gráfico de compactação para a energia do Proctor normal está representado na Figura 15. Os valores do teor ótimo de umidade e a massa específica aparente seca máxima encontrados foram, respectivamente: 32% e 1,325 g/cm³.

Figura 15 – Mini-proctor (solo in natura)



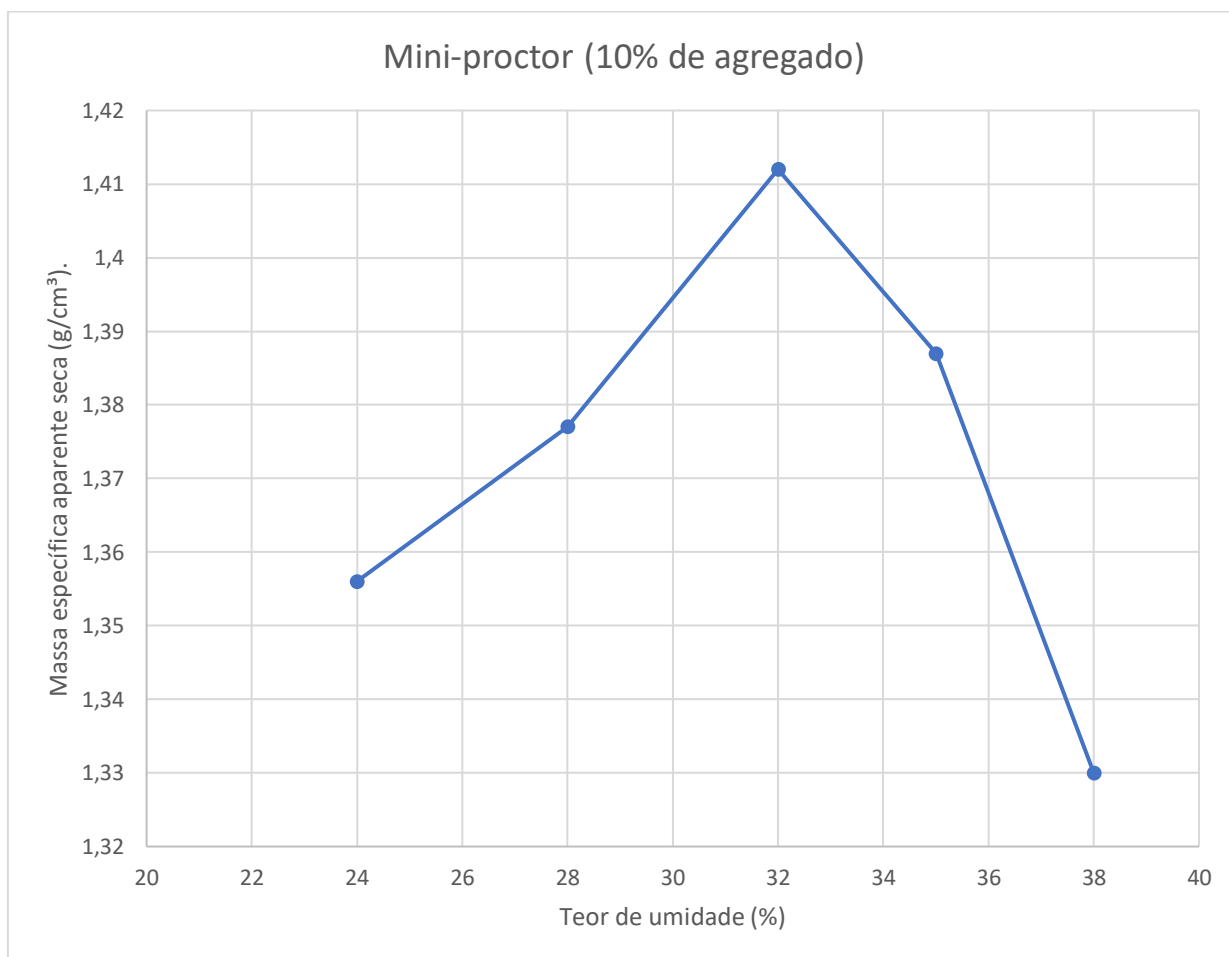
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As Figuras 16, 17 e 18 mostram as curvas obtidas no ensaio mini-proctor realizado com energia normal nas amostras com adição de 10%, 30% e 60% de cinzas, respectivamente.

Na preparação dessas misturas, houve reação exotérmica ao adicionar água nas misturas de solo + agregado. O maior aumento de temperatura foi observado na mistura com 30% de agregado, sendo medida uma variação de 8°C em 30 segundos.

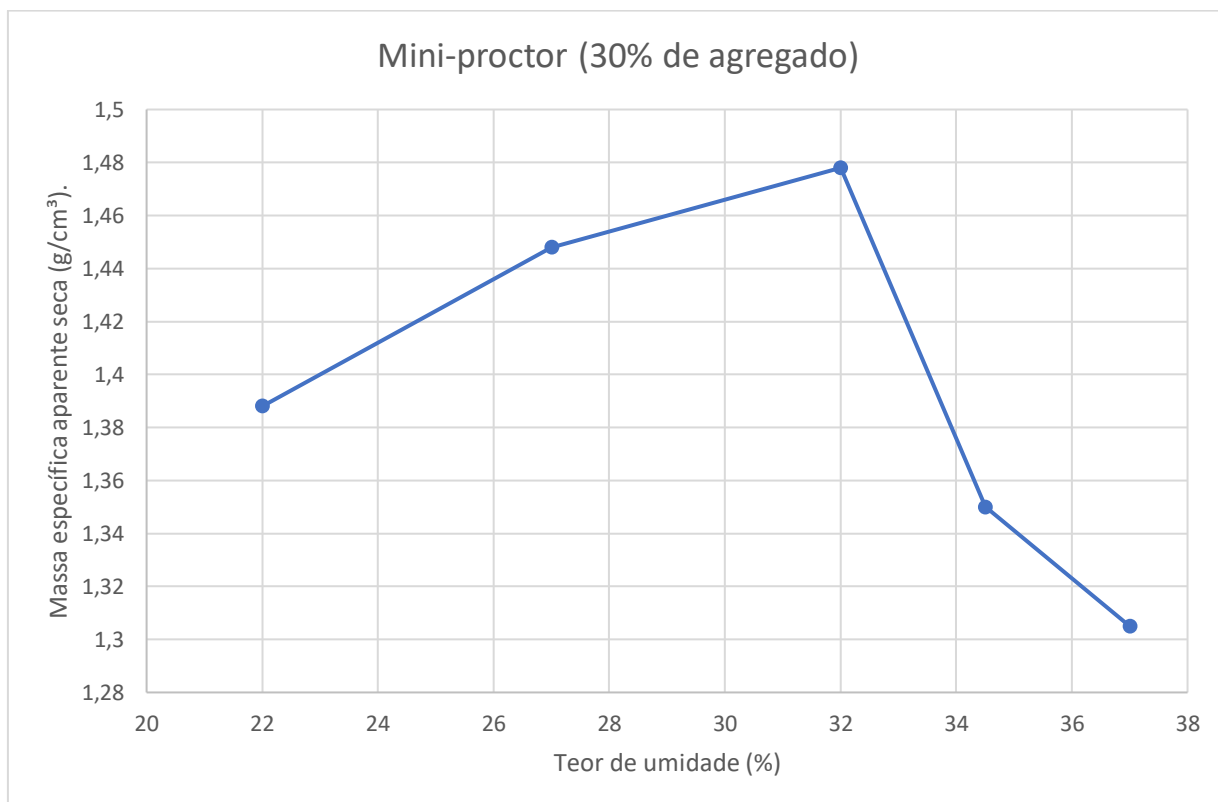
Uma hipótese para essa variação de temperatura pode ser a presença de materiais cimentícios na composição do agregado, com potencial para estudos futuros.

Figura 16 – Mini-proctor (10% de agregado)



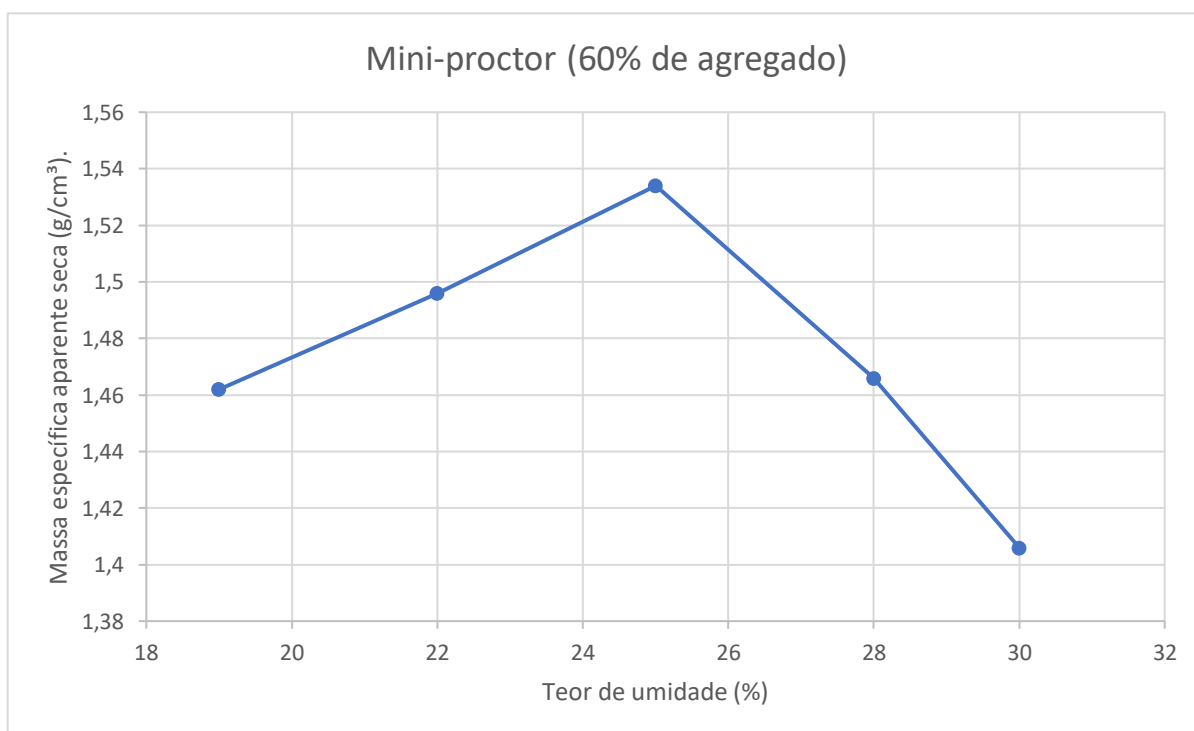
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 17 – Mini-proctor (30% de agregado)



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

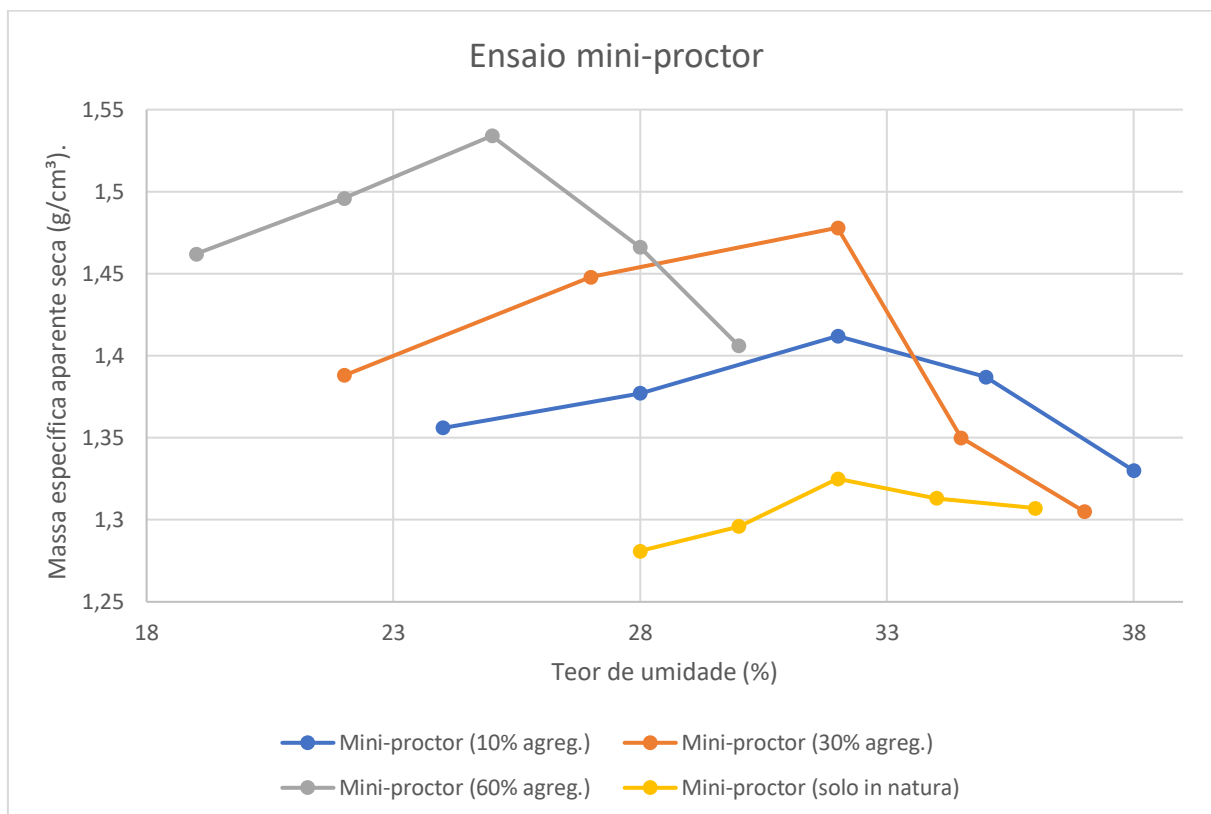
Figura 18 – Mini-proctor (60% de agregado)



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para observar e comparar o comportamento de cada amostra estudada, foi traçado o gráfico (Figura 19), que inclui todas as curvas geradas pelo ensaio mini-proctor com todas as amostras. A Tabela 3 resume os resultados para o teor ótimo de umidade e massa específica aparente seca máxima correspondente a cada amostra compactada.

Figura 19 – Mini-proctor (todas as amostras)



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 4 – Resultados do mini-proctor

Amostra	Teor de umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)
Solo in natura	32	1,325
10% de agregado	32,2	1,416
30% de agregado	31,9	1,480
60% de agregado	25	1,537

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

É possível observar que o valor da umidade ótima (W_{ot}) variou de maneira não linear, enquanto os valores da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$) aumentaram conforme aumentou a porcentagem do agregado na mistura com o solo.

O estudo da cinza utilizada como agregado (VICENTE, 2021) mostrou que esse material possui granulometria semelhante à das argilas e siltes, assemelhando-se, portanto, aos grãos do próprio material estudado, dado que se trata de um solo não laterítico siltoso.

Por se tratar de um solo não laterítico, é comum encontrar resultados anômalos, como o que ocorreu com as primeiras umidades ótimas encontradas. De fato, o solo apresenta as características semelhantes às de uma lama. A Figura 20 retrata a amostra com 30% de agregado expulsando água ao ser compactada, mesmo estando com o teor de umidade ótima.

Figura 20 – Corpo-de-prova exudando água durante o ensaio



Fonte: Acervo da autora (2022).

Mesmo repetindo os ensaios para mitigar a possibilidades de erros procedimentais, as umidades ótimas encontradas se mantiveram extremamente altas, característica típica dos solos finos (como neste caso).

5.3 Ensaio de compactação – mini-CBR

5.3.1 Preparação para compactação

Com os resultados dos ensaios de compactação (p_{dmax} e W_{ot}) foram moldados novos corpos-de-prova utilizando as umidades ótimas para cada mistura.

Para cada amostra havia 06 corpos-de-prova em umidade ótima: 03 deles para o ensaio de compactação com ruptura imediata e outros 03 para ruptura após 24h submerso em água, visando medir a expansão das misturas.

5.3.2 Mini-CBR sem imersão

Neste caso, os corpos-de-prova foram submetidos à compressão mini-CBR com ruptura imediata, sem imersão. A Figura 21 mostra corpos-de-prova submetidos ao ensaio de penetração para determinar o valor do mini-CBR.

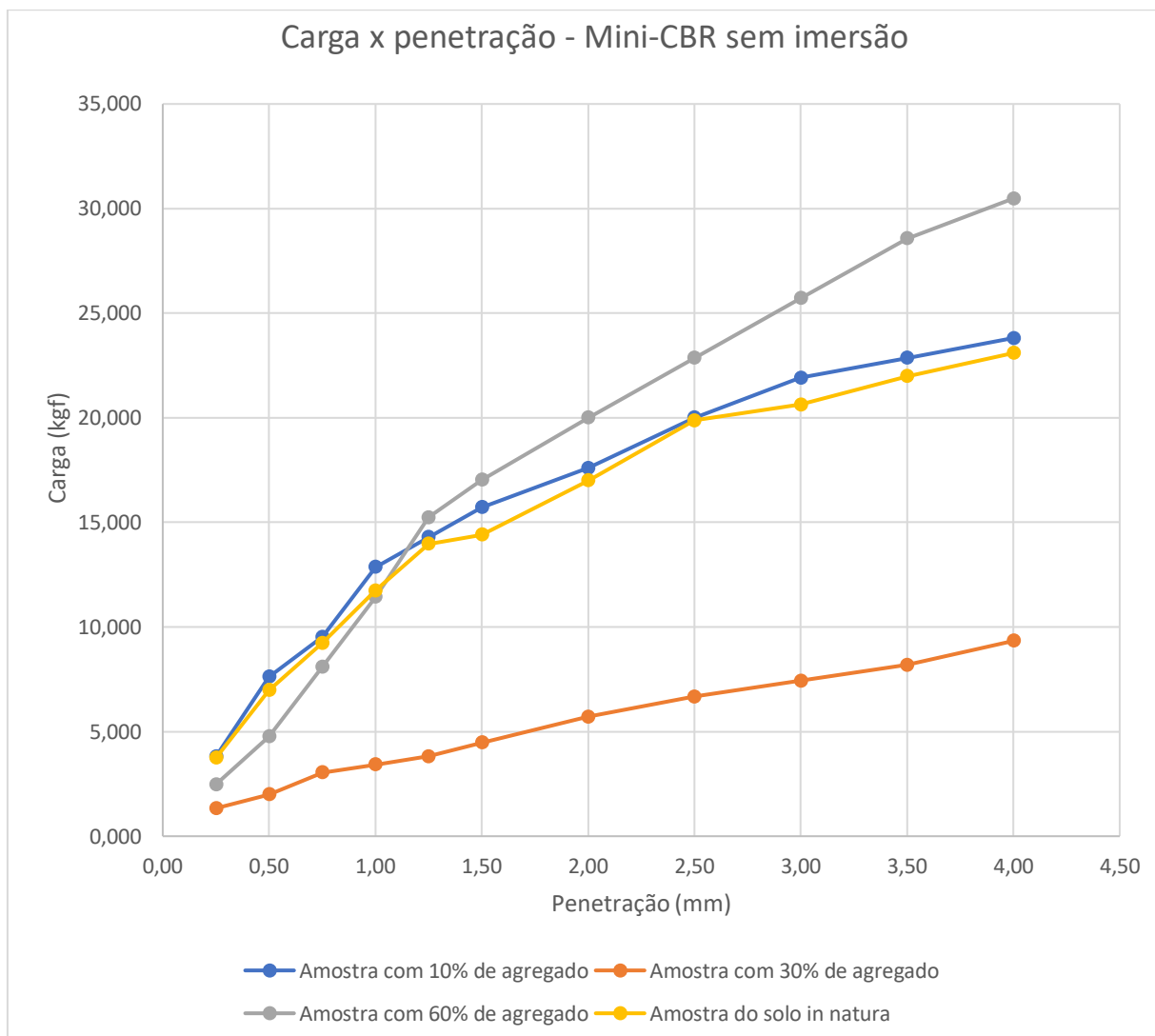
Figura 21 – Corpos-de-prova após mini-CBR de ruptura imediata



Fonte: Acervo da autora (2022).

A Figura 22 mostra as curvas de penetração em função da carga aplicada em cada amostra, juntamente com a amostra inicial de referência: o solo in natura.

Figura 22 – Carga x penetração do ensaio mini-CBR sem imersão

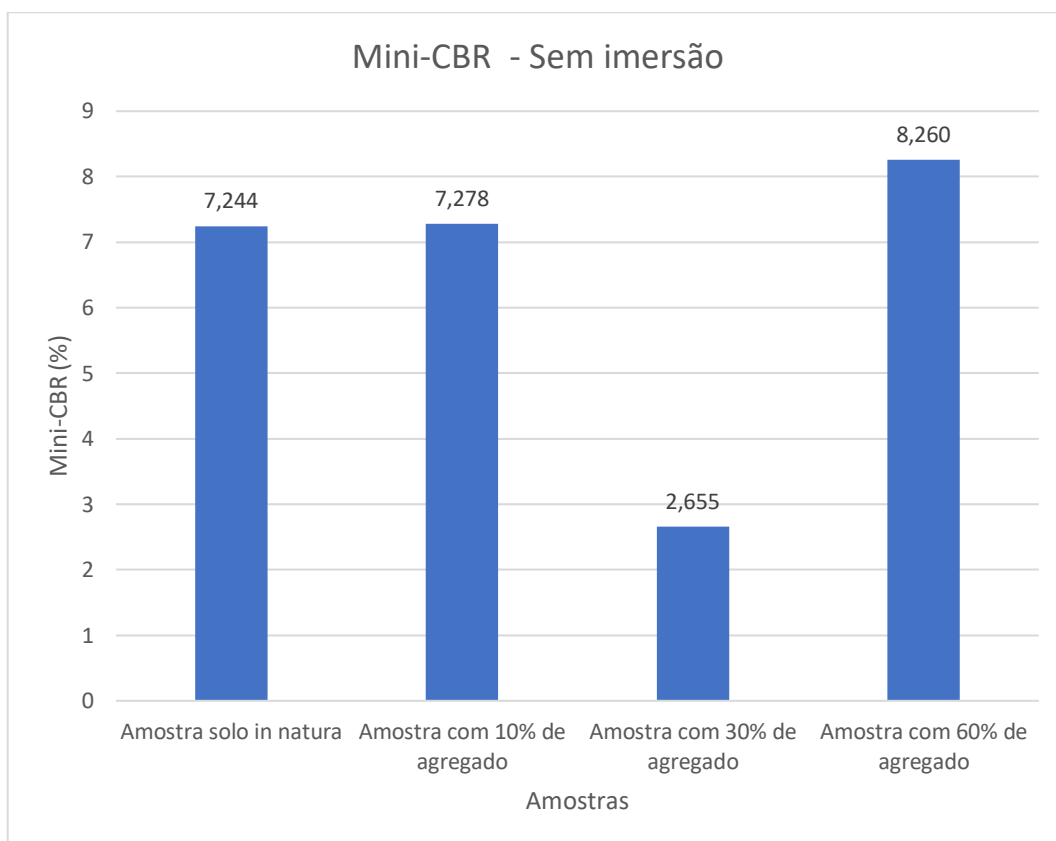


Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

É possível observar que a amostra com 30% de agregado foi a mais discrepante, apresentando valor de carga bem abaixo da curva de referência. A amostra com 10% dispersão alteração quase insignificante e, por fim, a amostra com 60% de agregado que teve pequeno aumento no valor de carga em relação a amostra de referência.

Esses resultados puderam ser notados nos valores finais do mini-CBR sem imersão, que estão apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Mini-CBR sem imersão



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Observam-se que os resultados encontrados são não lineares. As variações percentuais dos valores finais de mini-CBR de cada amostra comparados com a amostra de referência estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Variação percentual de mini-CBR sem imersão

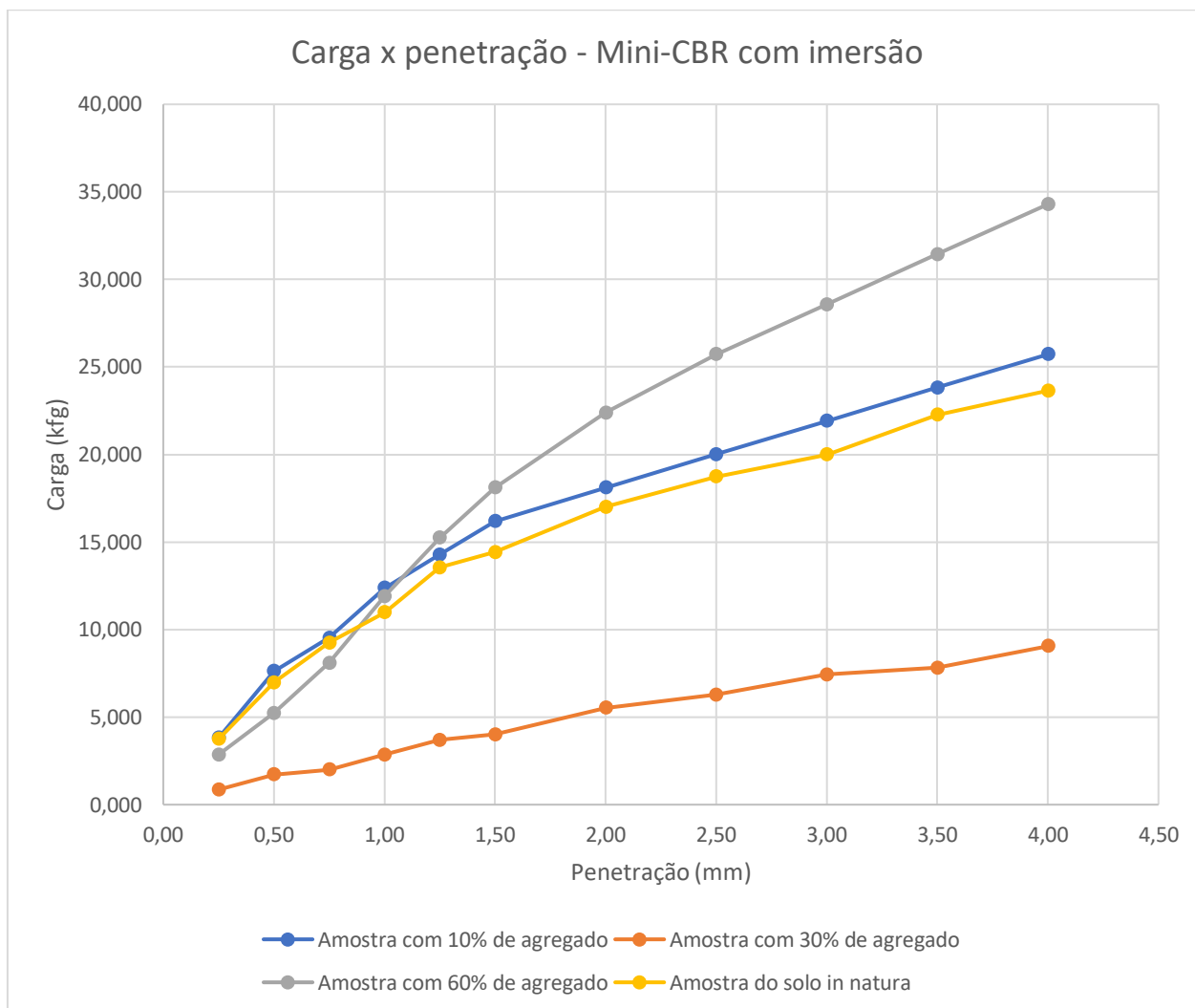
Amostra	Varição percentual com a amostra de referência
10% de agregado	+ 0,47%
30% de agregado	- 63,35%
60% de agregado	+ 14,02%

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

2.3.3 Mini-CBR com imersão

Na segunda etapa dos ensaios de mini-CBR, os corpos-de-prova foram imersos por 24 horas em água. A Figura 24 apresenta as curvas de penetração em função da carga aplicada em cada amostra, juntamente com a amostra do solo in natura.

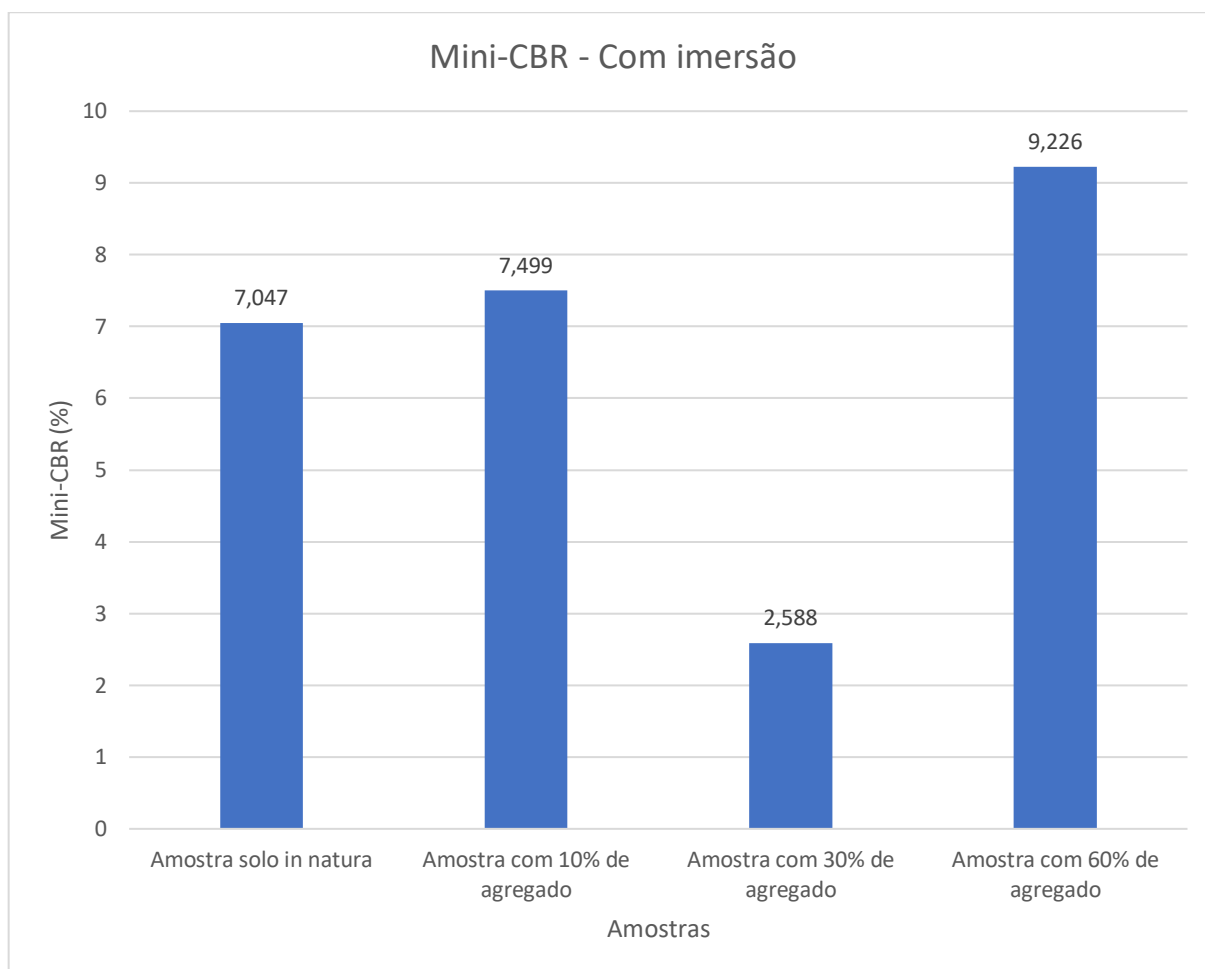
Figura 24 – Carga x penetração do ensaio mini-CBR com imersão



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Os resultados obtidos foram muito similares aos anteriores (sem imersão), com o mesmo padrão e apenas com variações percentuais. A amostra com 10% de agregado se manteve bem parecida à do solo inicial. A amostra com 30% apresentou valores de carga bem baixos e, por fim, a amostra com 60% de agregado, que aumentou bastante o valor da carga. A Figura 25 mostra os valores do mini-CBR após 24 horas de imersão.

Figura 25 – Mini-CBR com imersão



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Os resultados se mantiveram não lineares, com comportamento semelhante ao apresentado no ensaio mini-CBR sem imersão. As variações percentuais dos valores finais de mini-CBR de cada amostra em comparação com a amostra de referência estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 6 – Variação percentual de mini-CBR com imersão

Amostra	Variação percentual em relação a amostra de referência
10% de agregado	+ 6,41%
30% de agregado	- 63,28%
60% de agregado	+ 30,92%

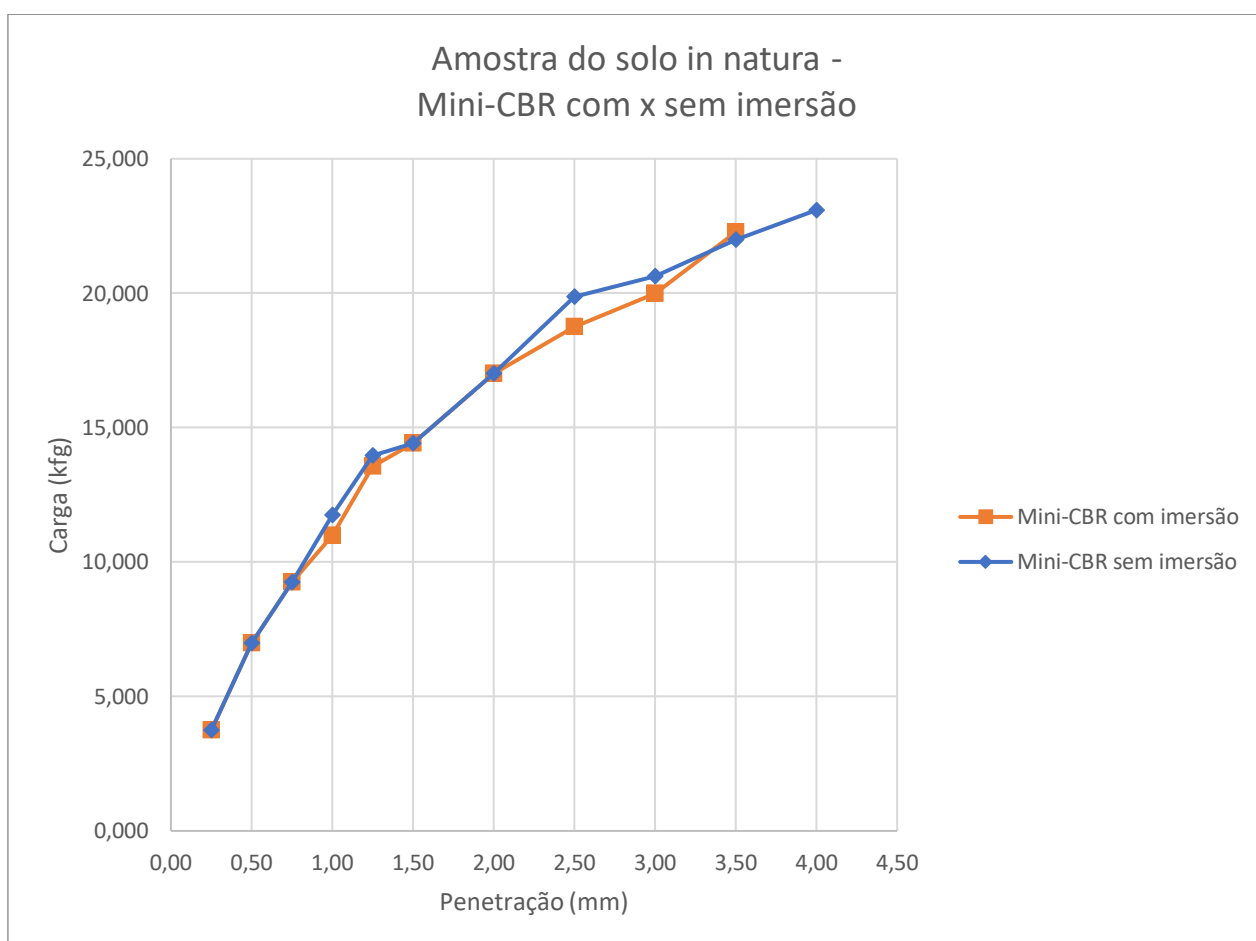
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

2.3.4 Comparação entre com ensaio mini-CBR *com e sem* imersão

As Figuras 26, 27, 28 e 29 demonstram os valores de mini-CBR *com e sem* imersão para cada amostra estudada.

Para a amostra do solo in natura os comportamentos são similares. A curva referente ao solo sem imersão apresenta resultados superiores apenas em alguns pontos.

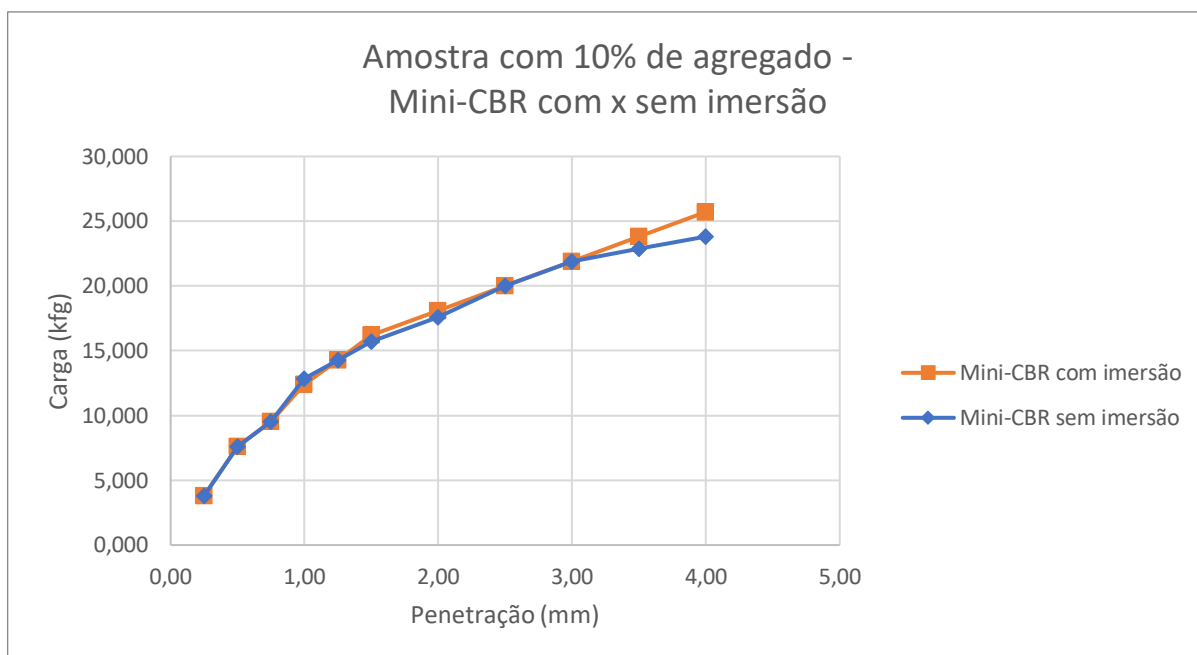
Figura 26 – Comparação mini-CBR *com e sem* imersão (amostra do solo in natura)



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

A Figura 27, referente a amostra com 10% de agregado apresenta diversos pontos convergentes ao longo do gráfico. A curva do ensaio sem imersão se apresenta inferior apenas em alguns pontos, com destaque no fim do ensaio, onde há maiores valores para o caso das amostras com imersão.

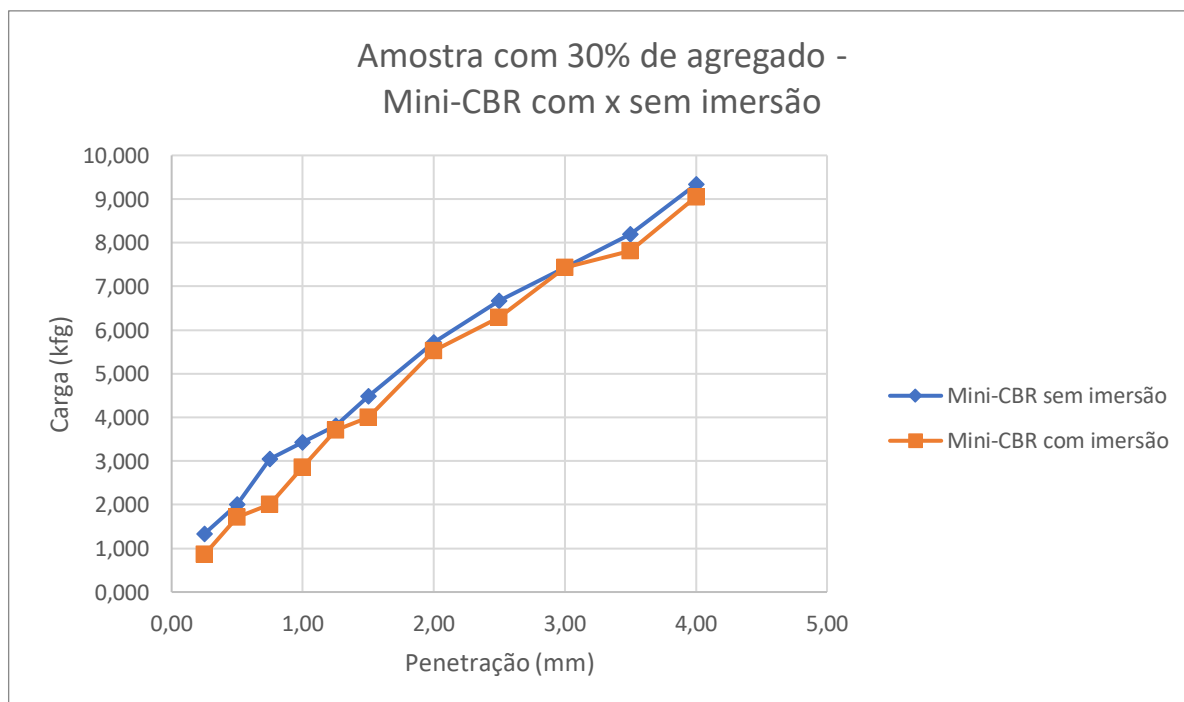
Figura 27 – Comparação mini-CBR *com e sem* imersão (amostra com 10% de agregado)



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

A Figura 28 para o ensaio com 30% de agregado, demonstra que a curva do ensaio sem imersão é superior à do ensaio com imersão em quase todos os pontos. De maneira geral, elas apresentam comportamentos similares.

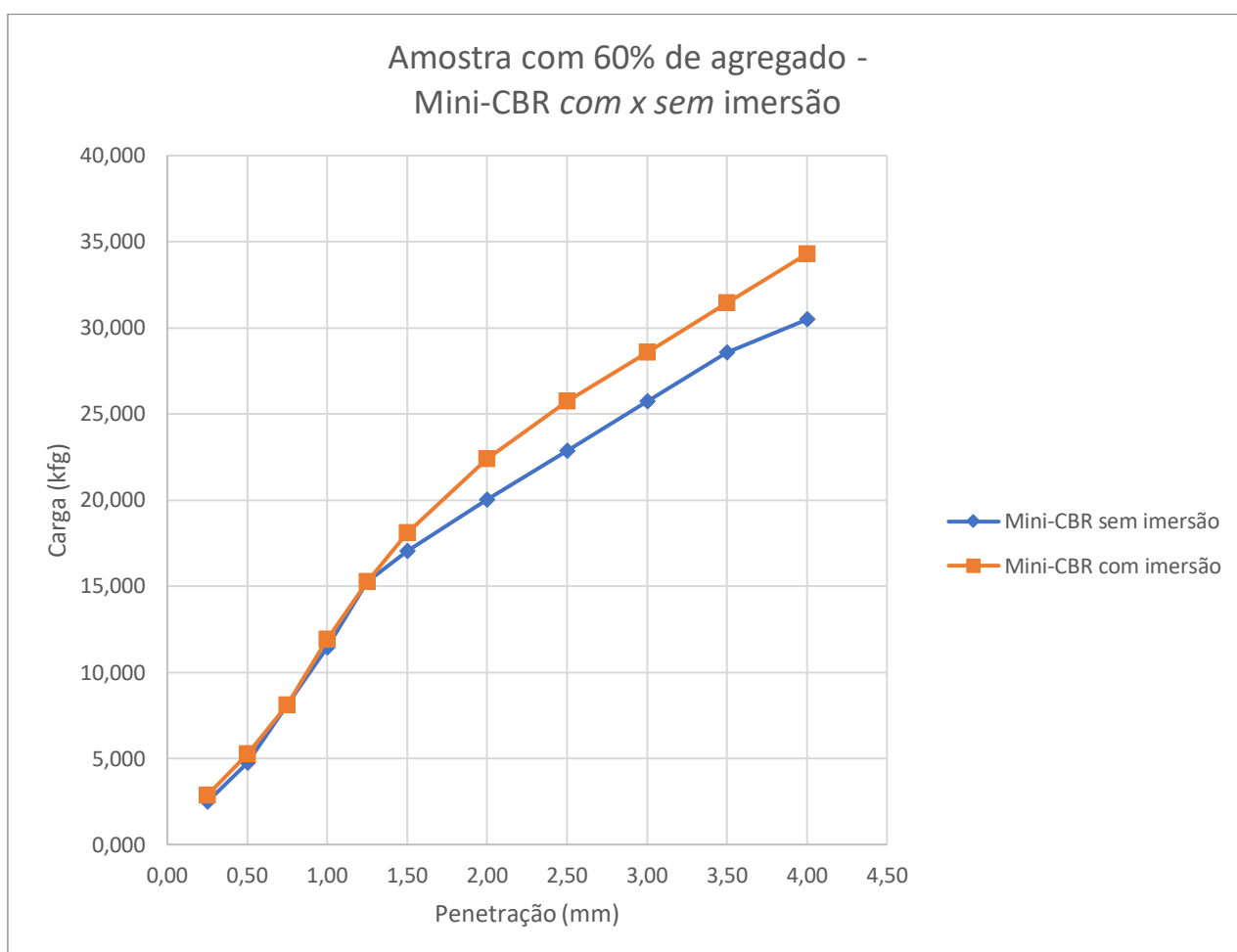
Figura 28 – Comparação mini-CBR *com e sem* imersão (amostra com 30% de agregado)



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

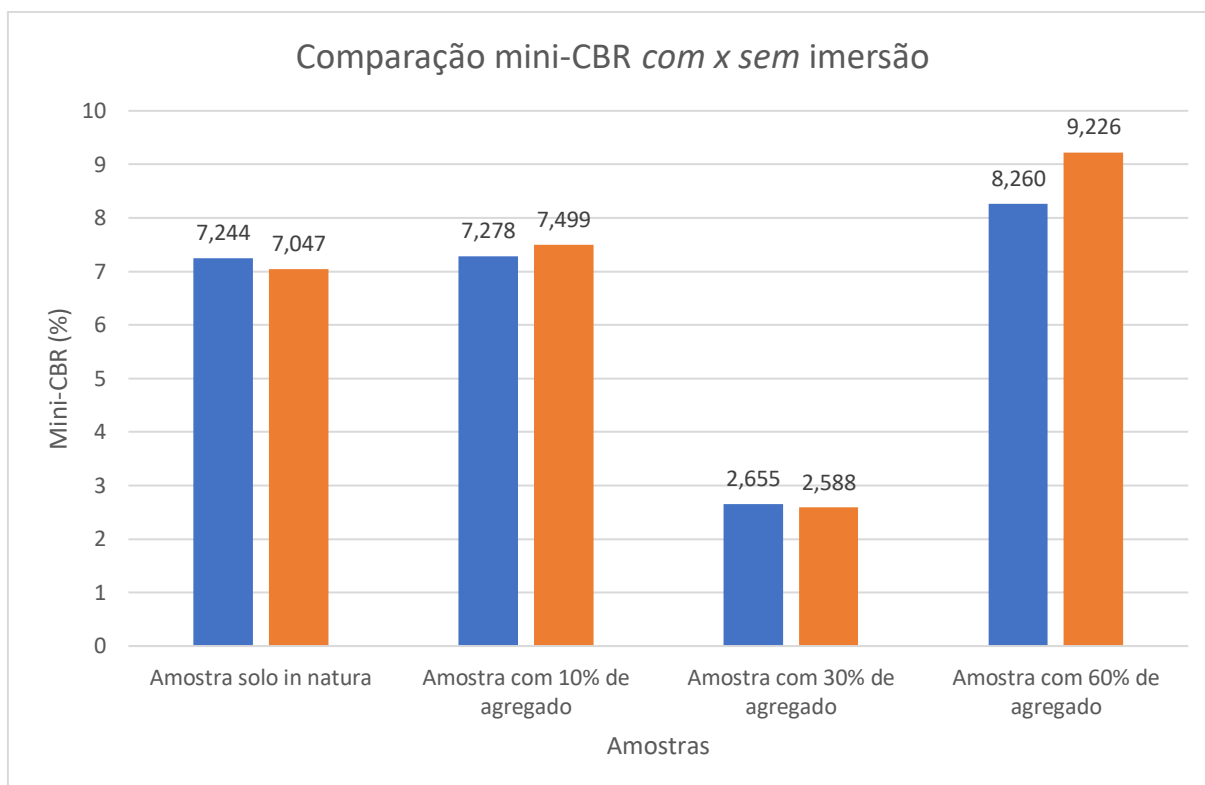
A Figura 29 ilustra a comparação entre os ensaios mini-CBR *com e sem* imersão para a amostra com 60% de agregado. Os pontos iniciais são convergentes, e depois o ensaio com imersão apresenta resultados superiores comparado ao sem imersão.

Figura 29 – Comparação mini-CBR *com e sem* imersão (amostra com 60% de agregado)



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

A Figura 30 demonstra os valores finais de mini-CBR para cada amostra. É possível observar valores sempre muito parecidos para os testes *com e sem* imersão, porém apenas as amostras do solo in natura, e a amostra com 30% de agregado apresentaram o comportamento esperado, com resultados superiores para os ensaios sem imersão.

Figura 30 - Comparação mini-CBR *com* e *sem* imersão.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

As variações percentuais dos valores de mini-CBR dos ensaios sem imersão para os ensaios com imersão de cada amostra estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Variação percentual entre o ensaio mini-CBR *sem* x *com* imersão

Amostra	Variação percentual entre o ensaio mini-CBR sem x com imersão de cada amostra (%)
Solo in natura	- 2,72%
10% de agregado	+ 3,04%
30% de agregado	- 2,52%
60% de agregado	+ 11,69%

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

2.3.5 Relação de perda de suporte após a imersão

Os valores de RIS foram devidamente calculados e apresentados na Tabela 8.

As amostras do solo in natura e com 30% de agregado apresentaram valores pequenos de perda de resistência após a imersão. As amostras com 10% e 60% de agregado em sua composição obtiveram aumento de mini-CBR após a submersão, demonstrando as características anômolas estimadas para esse solo.

Tabela 8 – Valores de RIS (%)

Amostra	Mini- CBR		RIS (%)
	Com imersão	Sem Imersão	
Solo in natura	7,047	7,244	97,28
10% de agregado	7,499	7,278	103,04
30% de agregado	2,588	2,655	97,50
60% de agregado	9,226	8,260	111,69

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

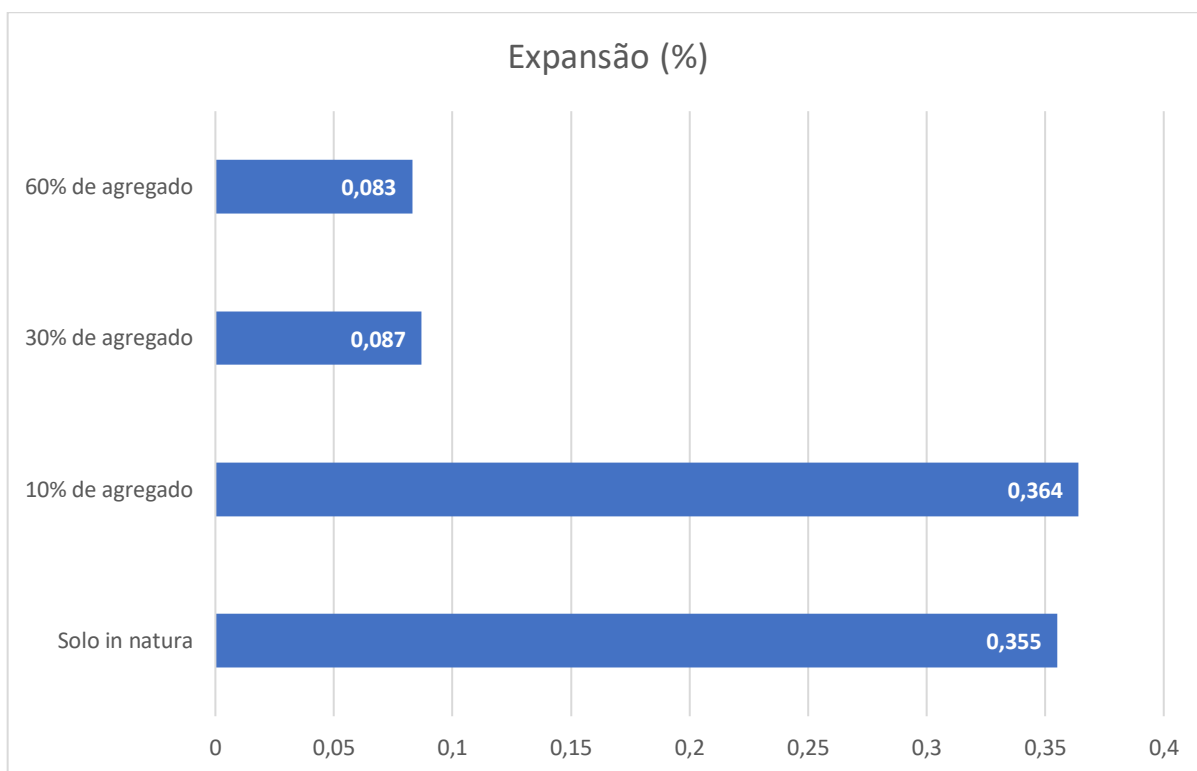
De maneira surpreendente os valores de RIS são maiores que 50%, mesmo se tratando de um solo de comportamento não laterítico. Uma hipótese para esses resultados, pode ser a contribuição das partículas finas do agregado em um solo já muito fino, resultando em material com características de um solo saturado, mesmo estando com teor ótimo de umidade.

2.4 Expansão

Foi realizado o ensaio de expansão com os mesmos corpos-de-prova utilizados no ensaio mini-CBR com imersão. Os corpos-de-prova ficaram submersos por 24 horas, com leituras no início e no fim desse tempo. A Figura 31 apresenta os valores de expansão medidos para cada amostra.

É possível observar que o valor da expansão teve pequeno aumento nas misturas com 10% de agregado. Houve diminuição acentuada na expansão para as amostras com 30% e 60% de agregado. Assim, a adição do agregado tornou o solo menos expansivo.

Figura 31 – Resultados da expansão das amostras.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

2.5 Aplicação em pavimentos

Os valores obtidos nos experimentos anteriores estão resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados obtidos nos ensaios de compactação

Amostra	Parâmetros de compactação		Mini- CBR (%)		Expansão (%)
	pd máx (g/cm ³)	Wot (%)	Sem imersão	Com imersão	
Solo in natura	1,465	28,25	7,244	7,047	0,355
10% de agregado	1,416	32,2	7,278	7,499	0,364
30% de agregado	1,445	30	2,655	2,588	0,087
60% de agregado	1,538	25	8,260	9,226	0,083

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

As condições necessárias para que um solo possa ser utilizado em pavimentação estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros para materiais em pavimentação

Camada	Norma	CBR	Expansão
Base estabilizada granulometricamente	DNIT 141/2010	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$
Sub-base estabilizada granulometricamente	DNIT 139/2010	$\geq 20\%$	$\leq 1,0 \%$
Reforço do subleito estabilizado granulometricamente	DNIT 138/2010	Especificado em projeto	$\leq 1,0 \%$
Regularização do subleito	DNIT 137/2010	Especificado em projeto	$\leq 2,0 \%$

Fonte: DNIT (2010). Adaptado.

Analisando os resultados e os parâmetros mínimos necessários (Tabela 10) e considerando a energia de compactação adotada, é possível observar que nenhuma das amostras apresenta o valor de CBR compatível para as camadas de sub-base e base de pavimento. Por outro lado, mesmo com valores de CBR pouco expressivos, o solo e as misturas de solo-cinza podem ser aplicados em pavimentação como enchimento de aterro, subleito e regularização de subleito. Também podem ser indicados para pavimentos, na camada de reforço do subleito. A expansão está, em todos os casos, não constitui parâmetro impeditivo.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O solo e as misturas de solo-cinza analisadas neste estudo não resultaram materiais aptos para camadas de base e sub-base de pavimentos. Mas podem ser indicados para enchimento de aterro, subleito, regularização de subleito e para a reforço do subleito na estrutura do pavimento.

A utilização da cinza de cavaco para a estabilização dos solos apresentou resultados significativos para continuar o estudo de outras maneiras, especialmente nos corpos-de-prova com 60% de agregado, onde aumentou a capacidade de suporte do solo.

O solo empregado nesse estudo é não laterítico siltoso com péssimas qualidades para a pavimentação rodoviária: muito expansivo e baixa capacidade de suporte. Tanto o solo quanto o agregado são materiais finos com alta compressibilidade e, por analogia, as misturas de solo-cinza também o são.

Por se tratar de um resíduo que seria descartado na natureza (em aterros ou áreas de cultivos), é importante salientar que quaisquer resultados benéficos, mesmo que pequenos, mas que possam oferecer alternativas de destino a esse material trazem impactos positivos para a natureza.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para futuros ensaios que possam complementar essa pesquisa são:

- Estudar a estabilização de outros tipos de solo utilizando o mesmo agregado, como solos argilosos e arenosos.
- Realizar ensaios granulométricos com o solo e também com as misturas solo/agregado utilizadas nesta pesquisa.
- Realizar os mesmos ensaios com diferentes porcentagens do agregado, em especial a cerca de 60%, como por exemplo 50, 55, 65 e 70%, visto que os resultados mais interessantes encontrados foram nessa porcentagem.
- Analisar a reação exotérmica que ocorre ao adicionar água na amostra seca de solo e agregado, em especial na amostra com 30% de rejeito. Estudar por quais motivos isso ocorre, e quais as consequências pode trazer.

- Estudar a utilização desse solo com adição do agregado para diferentes fins além da pavimentação, como taludes e fundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 7809: Agregados graúdos – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.

BELLOTE AFJ, Silva HD, Ferreira CA & Andrade GC. **Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais**. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, 37:99-106.

BERNUCCI, et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**, Rio de Janeiro, PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 F. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-7-Materiais-e-estruturas-de-pavimentos-asf%C3%A1lticos.pdf>> Acesso em: dezembro de 2022.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia Ambiental**, São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/artigo-cientifico/pdf/estabilizacao-de-solos.pdf>>. Acesso em outubro de 2022.

CAVA, F. **Estas são as funções dos pavimentos**. Além da Inércia, 2021. Disponível em: <<https://alemdainercia.com/2021/04/19/estas-sao-as-funcoes-dos-pavimentos/>>. Acesso em: outubro de 2022.

Confederação Nacional do Transporte (CNT), Anuário do Transporte. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2020/Rodoviario/1-1-/Inicial>>. Acesso em: novembro de 2022.

CORREIA, F. M. **Análise de distúrbios de compactação de cavacos de eucalipto em digestores contínuos fase vapor**. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Normais e Manuais:

DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura – MiniMCV.

DNER-ME 256/94: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online data FAOSTAT. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>> Acesso em novembro de 2022.

GUERRA, Marcos Antonio de Souza Lima. **Avaliação de indicadores biológicos e físicoquímicos no composto orgânico produzido a partir de resíduos da indústria de celulose**. 2007.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual IBÁ 2021**. Disponível em: <<https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>>. Acesso em novembro de 2022.

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

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

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos** – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.

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

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

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), 2017.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo, 1995.

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

PIEIDADE JR., C. R. C. **Análise da Potencialidade de Alguns Solos Não Lateríticos para Utilização em Barreiras Impermeáveis**. São Carlos, 2003. Dissertação de

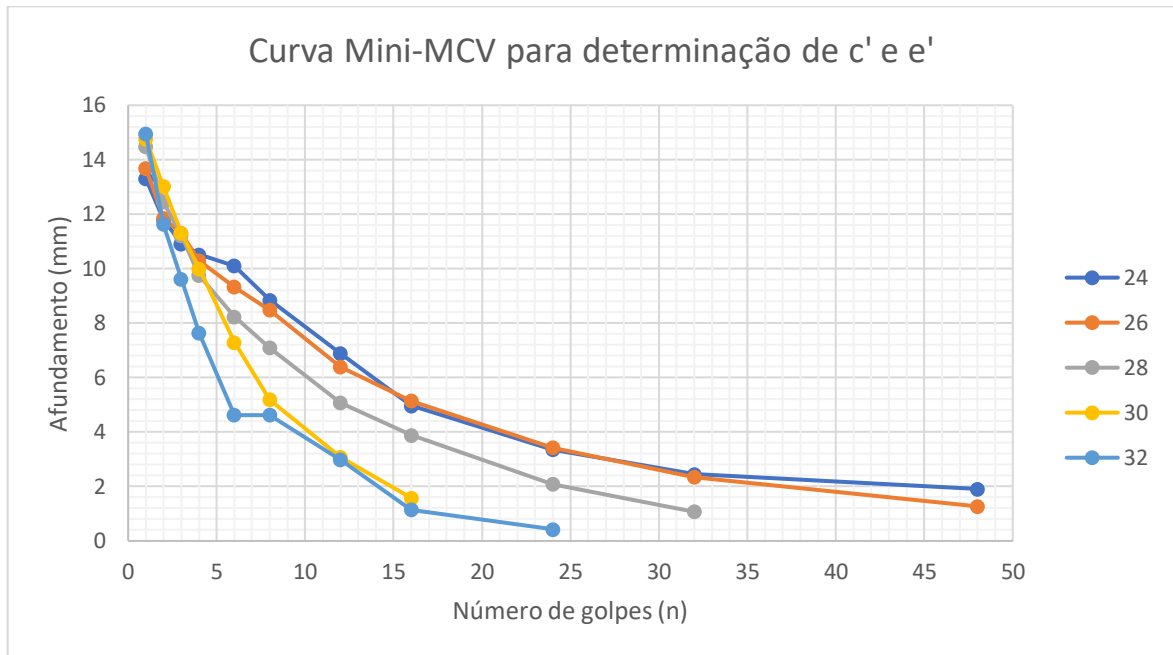
Mestrado. 123p. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-07052008-150323/publico/dissertacao.pdf>>. Acesso em novembro de 2022.

SENÇO, Wlastermiler. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume, São Paulo, 2007.

SOUZA, R. A. de. **Estudo comparativo dos ensaios de CBR e Mini-CBR para solos de Uberlândia – MG**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2007. 113 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf>>. Acesso em novembro de 2022.

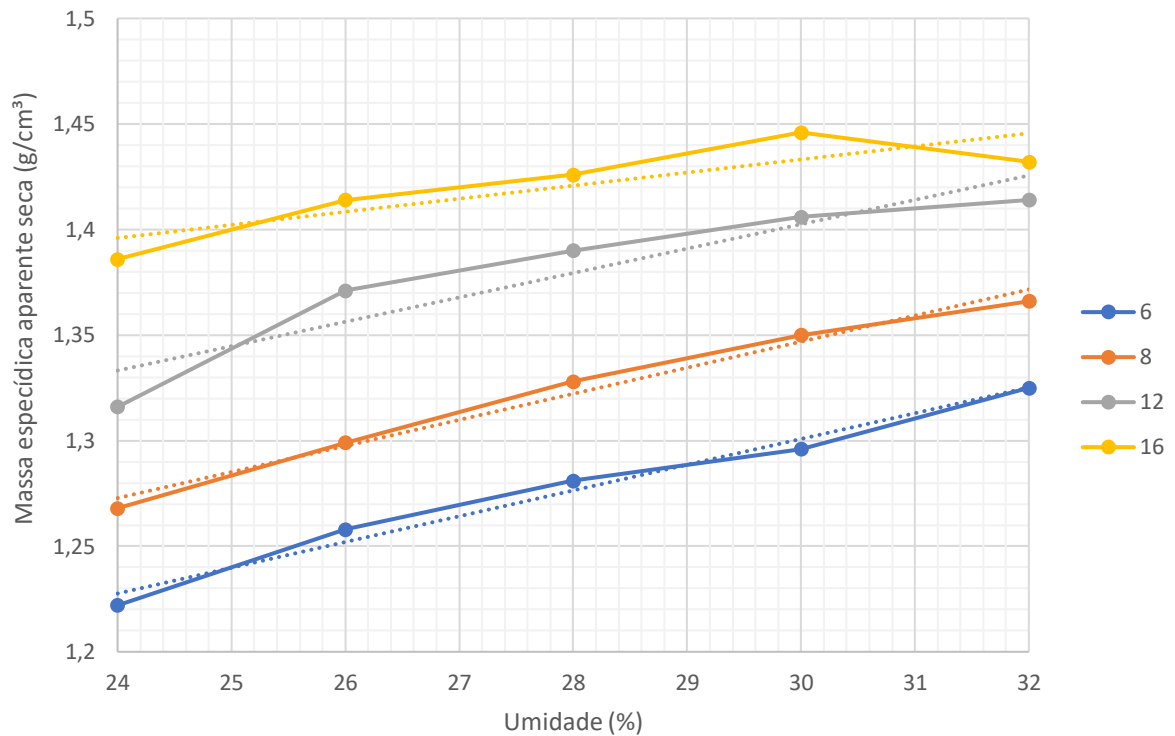
VICENTE, G. O. **Estabilização de solo com adição de resíduo de celulose para aplicação em pavimentação rodoviária**. Ilha Solteira, 2021. Dissertação de Mestrado. 67p. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

VGR, **A diferença entre lixo, resíduo e rejeito e como é feito o seu gerenciamento**; 2020. Disponível em: <https://www.vgresiduos.com.br/blog/blogdiferenca-entre-lixo-residuo-rejeito/>. Acesso em janeiro de 2023.



Condição de compactação					
Cilindro nº	1	2	3	4	5
Umidade de compactação (%)	24	26	28	30	32
Massa úmida do corpo de prova (g)	200	200	200	200	200
Massa seca do corpo de prova - Ms (g)	161,29	158,73	156,25	153,85	151,51
Altura do corpo-de-prova - A (mm)	23,05	51,31	51,78	52,61	53,45
Massa seca + Tara (g)	308,6	296,83	316,08	296,28	272,2
Tara da cápsula (g)	209,8	237,4	262,91	261,08	204,13
Massa seca despreendida - Md (g)	98,8	59,43	53,17	35,2	68,07
Perda de peso por imersão - Pi (%)	324,96	198,62	176,2	120,37	240,14

Perda de massa por imersão de Solos Compactados e
Determinação do d'



ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS - MCT - MINI-PROCTOR (solo in natura)					
Determinação (nº)	1	2	3	4	5
Área do cilindro (cm²)	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
Altura do corpo-de-prova - CP (cm³)	4,98	5,02	5,06	5,02	4,97
Volume do corpo-de-prova - CP (cm³)	97,76	98,54	99,33	98,54	97,50
Amostra úmida - M (g)	160,29	166,02	173,72	173,38	173,31
Massa específica úmida $\rho = M/V$ (g/cm³)	1,640	1,685	1,749	1,759	1,778
Massa específica aparente seca (g/cm³)	1,281	1,296	1,325	1,313	1,307
Teor de umidade (%)	28,00	30,00	32,00	34,00	36,00

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS - MCT - MINI-PROCTOR (10% de agregado)					
Determinação (nº)	1	2	3	4	5
Área do cilindro (cm²)	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
Altura do corpo-de-prova - CP (cm³)	5,03	4,91	5,08	4,98	4,97
Volume do corpo-de-prova - CP (cm³)	98,76	96,42	99,66	97,76	97,50
Amostra úmida - M (g)	166,02	170,00	179,00	180,83	179,00
Massa específica úmida $\rho = M/V$ (g/cm³)	1,681	1,763	1,796	1,850	1,836
Massa específica aparente seca (g/cm³)	1,356	1,377	1,412	1,387	1,330
Teor de umidade (%)	24,00	28,00	32,00	35,00	38,00

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS - MCT - MINI-PROCTOR (30% de agregado)					
Determinação (nº)	1	2	3	4	5
Área do cilindro (cm ²)	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
Altura do corpo-de-prova - CP (cm ³)	4,94	5,02	4,99	5,02	4,96
Volume do corpo-de-prova - CP (cm ³)	96,78	98,44	97,89	98,54	97,34
Amostra úmida - M (g)	164,00	181,00	191,00	179,00	174,00
Massa específica úmida $\rho = M/V$ (g/cm ³)	1,693	1,839	1,951	1,817	1,788
Massa específica aparente seca (g/cm ³)	1,388	1,448	1,478	1,350	1,305
Teor de umidade (%)	22,00	27,00	32,00	34,50	37,00

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS - MCT - MINI-PROCTOR (60% de agregado)					
Determinação (nº)	1	2	3	4	5
Área do cilindro (cm ²)	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
Altura do corpo-de-prova - CP (cm ³)	5,07	5,04	5,00	5,05	5,03
Volume do corpo-de-prova - CP (cm ³)	99,52	98,94	98,15	99,13	98,74
Amostra úmida - M (g)	173,15	180,55	188,00	186,07	180,49
Massa específica úmida $\rho = M/V$ (g/cm ³)	1,740	1,825	1,915	1,877	1,828
Massa específica aparente seca (g/cm ³)	1,462	1,496	1,534	1,466	1,406
Teor de umidade (%)	19,00	22,00	25,00	28,00	30,00

ENSAIO DE MINI-CBR (solo in natura)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	1,5	2,8575	2	3,81	1,5	2,8575
0,5	4	7,62	4	7,62	4	7,62
0,75	5	9,525	5	9,525	5	9,525
1	6	11,43	6,5	12,3825	7	13,335
1,25	8	15,24	7	13,335	7,5	14,2875
1,5	8,5	16,1925	8	15,24	8	15,24
2	9	17,145	9	17,145	8	15,24
2,5	10,5	20,0025	10,5	20,0025	10	19,05
3	12	22,86	11	20,955	11	20,955
3,5	12	22,86	11	20,955	12	22,86
4	13	24,765	12	22,86	13	24,765

ENSAIO DE MINI-CBR (solo in natura)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	1	1,905	1	1,905	2	3,81
0,5	1,5	2,8575	3	5,715	2	3,81
0,75	3,5	6,6675	5	9,525	4	7,62
1	5	9,525	7	13,335	6	11,43
1,25	7	13,335	8	15,24	7	13,335
1,5	9	17,145	10	19,05	9	17,145
2	11,5	21,9075	12,5	23,8125	11	20,955
2,5	13	24,765	13,5	25,7175	13,5	25,7175
3	15	28,575	15	28,575	14	26,67
3,5	16,5	31,4325	17	32,385	16	30,48
4	18	34,29	18	34,29	17	32,385

EXPANSÃO (solo in natura)			
-	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Altura do CP (mm)	5,01	4,99	4,98
Leitura inicial (mm)	0,2	0,2	0,2
Leitura final (mm)	0,21	0,215	0,23
L = Lf - Li (mm)	0,01	0,015	0,03
Expansão (100*L/H) (%)	0,200	0,301	0,602

ENSAIO DE MINI-CBR (10% de agregado)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	2	3,81	2	3,81	2	3,81
0,5	4	7,62	4	7,62	4	7,62
0,75	5	9,525	5	9,525	5	9,525
1	7	13,335	6,5	12,3825	7	13,335
1,25	8	15,24	7	13,335	8	15,24
1,5	8,5	16,1925	8	15,24	8	15,24
2	10	19,05	9	17,145	9	17,145
2,5	11	20,955	10	19,05	10	19,05
3	12	22,86	11	20,955	11	20,955
3,5	12	22,86	12	22,86	12	22,86
4	13	24,765	12	22,86	13	24,765

ENSAIO DE MINI-CBR (10% de agregado)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	2	3,81	2	3,81	2	3,81
0,5	4	7,62	4	7,62	4	7,62
0,75	5	9,525	6	11,43	5	9,525
1	6	11,43	7	13,335	6	11,43
1,25	7	13,335	8	15,24	9	17,145
1,5	8	15,24	9	17,145	10	19,05
2	9	17,145	10	19,05	10	19,05
2,5	10	19,05	11	20,955	11	20,955
3	11	20,955	12	22,86	11	20,955
3,5	12	22,86	13	24,765	12	22,86
4	13	24,765	14	26,67	13	24,765

EXPANSÃO (10% de agregado)			
-	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Altura do CP (mm)	5,02	5,041	5,022
Leitura inicial (mm)	0,2	0,2	0,2
Leitura final (mm)	0,22	0,215	0,22
L = Lf - Li (mm)	0,02	0,015	0,02
Expansão (100*L/H) (%)	0,398	0,298	0,398

ENSAIO DE MINI-CBR (30% de agregado)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	0,5	0,9525	0,9	1,7145	0,6	1,143
0,5	1	1,905	1,1	2,0955	1	1,905
0,75	1,2	2,286	1,8	3,429	1,3	2,4765
1	1,5	2,8575	2	3,81	1,5	2,8575
1,25	2	3,81	2,1	4,0005	2	3,81
1,5	2,2	4,191	2,5	4,7625	2,5	4,7625
2	3	5,715	3	5,715	3	5,715
2,5	3,2	6,096	3,8	7,239	3,5	6,6675
3	3,9	7,4295	4	7,62	4	7,62
3,5	4,1	7,8105	4,5	8,5725	4	7,62
4	4,9	9,3345	5	9,525	5	9,525

ENSAIO DE MINI-CBR (30% de agregado)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	0,4	0,762	0,5	0,9525	0,5	0,9525
0,5	0,9	1,7145	0,9	1,7145	1	1,905
0,75	1,1	2,0955	1	1,905	1	1,905
1	1,5	2,8575	1,5	2,8575	1,5	2,8575
1,25	2	3,81	1,9	3,6195	2	3,81
1,5	2,2	4,191	2	3,81	2	3,81
2	3	5,715	2,8	5,334	2,5	4,7625
2,5	3,5	6,6675	3,1	5,9055	3	5,715
3	4	7,62	3,8	7,239	4	7,62
3,5	4,2	8,001	4	7,62	4	7,62
4	4,9	9,3345	4,6	8,763	4,5	8,5725

EXPANSÃO (30% de agregado)			
-	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Altura do CP (mm)	5,011	5,07	5,01
Leitura inicial (mm)	0,2	0,4	0,2
Leitura final (mm)	0,2	0,397	0,216
L = Lf - Li (mm)	0	-0,003	0,016
Expansão (100*L/H) (%)	0,000	-0,059	0,319

ENSAIO DE MINI-CBR (60% de agregado)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	1,5	2,8575	1	1,905	1,5	2,8575
0,5	3	5,715	2	3,81	2	3,81
0,75	5	9,525	3,5	6,6675	4	7,62
1	7	13,335	5	9,525	5	9,525
1,25	9	17,145	6	11,43	8	15,24
1,5	10	19,05	7	13,335	9	17,145
2	12	22,86	9	17,145	10	19,05
2,5	13	24,765	11	20,955	11	20,955
3	15	28,575	12,5	23,8125	13	24,765
3,5	17	32,385	13,5	25,7175	14	26,67
4	18,5	35,2425	14,5	27,6225	17	32,385

ENSAIO DE MINI-CBR (60% de agregado)						
Penetração (mm)	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)	Leitura	Carga (kgf)
0,25	1	1,905	2	3,81	2	3,81
0,5	1,5	2,8575	4	7,62	3	5,715
0,75	3,5	6,6675	5	9,525	4	7,62
1	5,5	10,4775	7	13,335	6	11,43
1,25	7,5	14,2875	8,5	16,1925	8	15,24
1,5	9	17,145	10	19,05	9	17,145
2	11,5	21,9075	12	22,86	12	22,86
2,5	13,5	25,7175	13,5	25,7175	13,5	25,7175
3	15	28,575	15	28,575	14,5	27,6225
3,5	16,5	31,4325	16,5	31,4325	16	30,48
4	18	34,29	18	34,29	18	34,29

EXPANSÃO (60% de agregado)			
-	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Altura do CP (mm)	4,99	4,98	4,97
Leitura inicial (mm)	0,2	0,2	0,2
Leitura final (mm)	0,205	0,204	0,204
L = Lf - Li (mm)	0,005	0,004	0,004
Expansão (100*L/H) (%)	0,100	0,080	0,080