

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA**

RICARDO PAGANELLI DE LIMA

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO
UTILIZANDO RESÍDUO DE CANA DE AÇUCAR
(CINZA)**

CAMPINAS

2019

RICARDO PAGANELLI DE LIMA

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO
UTILIZANDO RESÍDUO DE CANA DE AÇUCAR
(CINZA)**

Dissertação apresentada para
obtenção do Título de Mestre
em Sistemas de Infraestrutura
Urbana ao Programa de Pós-
Graduação em Sistemas de
Infraestrutura Urbana -
CEATEC - Pontifícia
Universidade Católica de
Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio
Carlos Demanboro

CAMPINAS

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira – CRB 8/8423
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

t624.1514 Lima, Ricardo Paganelli de.
L732e Estabilização de solo laterítico utilizando resíduo de cana de açúcar
(cinza) / Ricardo Paganelli de Lima. - Campinas: PUC-Campinas, 2019.
136f.

Orientador: Antonio Carlos Demanboro.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Inclui bibliografia.

1. Solos - Análise. 2. Cana-de-açúcar - Derivados. 3. Mecânica do solo. 4. Solos - Compactação. 5. Impacto ambiental. 6. Pavimentos.
I. Demanboro, Antonio Carlos. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

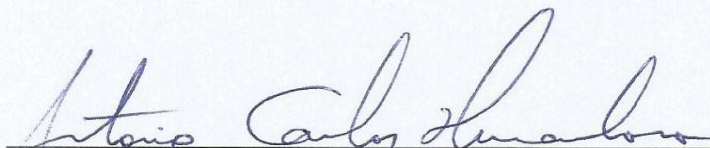
CDD – 22. ed. t624.1514

RICARDO PAGANELLI DE LIMA

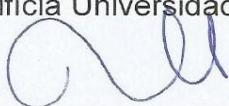
**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO UTILIZANDO
RESÍDUO DE CANA DE AÇUCAR (CINZA)**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Antonio Carlos Demanboro.

Dissertação defendida e aprovada em 28 de janeiro de 2019 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dra. Luisa A. Gachet Barbosa
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Dedico esse trabalho à Deus e a todos os espíritos de luz que me guiaram permitindo que eu vencesse mais essa etapa em minha vida. Dedico também aos meus pais June e Chico, minha noiva Camila e todos familiares, que acreditaram e me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e a Nossa Senhora da Aparecida, que me iluminaram para realizar esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro pela orientação, parceria, pelo companheirismo e dedicação ao longo desses anos.

Aos meus pais June e Francisco, que me apoiaram e me aparam nessa caminhada.

A minha noiva Camila, pela paciência e amparo nos desafios dessa etapa.

A todos meus familiares, pelo incentivo e torcida.

A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, pela dedicação e carinho.

A coordenação do curso do Engenharia Civil do UNIFEB, pelo apoio e confiança.

A Pro Reitoria de pesquisa e extensão pela bolsa de estudos.

Em memória ao Sr. Roberto Baldoch, pelo incentivo, dedicação e companheirismo.

"Precisamos dar um sentido humano às nossas construções. E, quando o amor ao dinheiro, ao sucesso nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu." **(Érico Veríssimo)**

RESUMO

LIMA, Ricardo Paganelli de. *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.

O Estado de São Paulo é referência global no cultivo e na produção de derivados de cana-de-açúcar, nas quais são utilizadas rodovias vicinais, muitas delas não pavimentadas, para o escoamento da safra entre a área da colheita e as usinas de processamento de açúcar e álcool. Para escoar a produção da usina até os centros de distribuição, o transporte rodoviário tem sido o principal meio logístico, tanto do Estado de São Paulo como do Brasil, sendo que apenas 12,4% das rodovias do país são pavimentadas. Além disso, o solo laterítico é o solo mais encontrado em todo o país, sendo necessário estabilizá-lo para compor bases e sub-bases de pavimentos, o que eleva os custos das pavimentações. Considerando que os veículos necessitam de uma boa infraestrutura para que se tenha segurança na trafegabilidade, a custos módicos, esta dissertação tem como objetivo avaliar o uso de solo laterítico do próprio local da usina, incorporado ao resíduo proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar, para possibilitar a viabilidade técnica e ambiental na manutenção e construção de pavimentos. O comportamento do compósito, sólido laterítico - cinza, foi avaliado por meio de ensaios de caracterização dos materiais e ensaios mecânicos. A metodologia baseou-se na coleta de amostra de solo laterítico da região de Barretos, a qual foi submetida aos ensaios de Proctor Intermediário, Índice de Suporte Califórnia (Califórnia Bearing Ratio - CBR) e Resistência a Compressão Simples. A amostra de cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi coletada e submetida a ensaios de análise granulométrica e caracterização pozolânica. Para realização da estabilização do solo foram utilizados cimento Portland CII-E-32, Cal Hidratada e Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Preparou-se misturas solo-5%cimento, solo-5% cal, solo-5% cinza, solo-5% cinza-1% cal e solo-5%cinza-2% cal. Após ampla série de ensaios, foram encontradas as resistências para o solo natural e as respectivas misturas. O CBR obtido para o solo natural foi de 40%. A introdução de 5% de cinza no solo natural, sem adição de aglomerantes, acarretou na diminuição do CBR para 32%, o que o impossibilita para o uso em camadas de sub-base e base de pavimentação. Em contrapartida, a inserção de 5% de cinza e 1% de cal atingiu CBR de 78%, possibilitando seu uso em camadas de sub-base de pavimentação. Além disso, com a mistura 5% de cinza e 2% de cal atingiu-se CBR de 83%, o que permite seu uso em camadas de base de pavimentos. Deste modo, pôde-se concluir pela viabilidade técnica e ambiental do uso da cinza, em camadas de sub-base e base de pavimentação.

Palavras-chave: Estabilização, Solo-Cinza, Material Alternativo, Pavimentos.

ABSTRACT

LIMA, Ricardo Paganelli de. *Lateritic Soil Stabilization Using Sugar Cane Residue (ash)* 2019. 136f.b (Master Degree in Urban Infrastructure) Post Graduation in Urban Infrastructure Systems Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019

Sao Paulo State is a global reference in the cultivation and production of sugar cane derivatives, and side roads, many of them dirt ones, are used to move the crop between the harvesting area and the sugar and alcohol processing plants. To transport the production from the plants to distribution centers, roads have been the main logistics means, not only in Sao Paulo State but also all over Brazil. However, only 12.4% of the roads in the country are paved. Moreover, the lateritic soil is the most common in the country, and it needs to be stabilized to compose bases and sub-bases of pavements, which makes the costs of having roads paved even higher. Taking into account that good infra structure is required so safe trafficability is provided, at low costs, this work aims to assess the use of lateritic soil of the sugar cane plant site itself, incorporated to the residue from the sugar cane bagasse burn, to make the construction and maintenance of pavements technically and environmentally viable. The behavior of the composite lateritic solid – ash was assessed by means of material characterization trials as well as mechanical trials. The methods were based on the collection of lateritic soil samples in Barretos region, which were submitted to Intermediate Proctor, California Bearing Ratio (CBR), and Resistance to Simple Compression. The sugar cane bagasse ash was collected and submitted to granulometric analysis and pozzolanic characterization. CII-E-32 cement, hydrated lime, and sugar cane bagasse ash were used to perform the stabilization of the soil. Mixtures were prepared in the following proportions: soil - 5% cement, soil – 5% lime, soil – 5% ash, soil - 5% ash -1% lime, and soil - 5% ash – 2% lime. After a broad range of tests, resistances for the natural soil and the respective mixtures were found. The natural soil CBR was 40%. The use of 5% ash in the natural soil, with no addition of binders, caused the CBR to decrease to 32%, making it impossible to use it in the layers of base and sub-base of pavement. On the other hand, the addition of 5% ash and 1% lime caused the CBR to increase to 78%, making it possible its use in the layer of base and sub-base of pavement. In addition to that, the mixture of 5% ash and 2% lime reached the CBR of 83%, making it possible its use in the layers of pavement base. Therefore, it may be concluded that the use of ash is environmentally and technically viable in the layers of base of sub base of pavement.

Key words: Stabilization, Soil-Ash, Alternative material, Pavements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mapa pedológico do estado de São Paulo	23
Figura 2 - Gráfico para classificação de solos finos.....	27
Figura 3 - Esquema para classificação pelo sistema unificado	28
Figura 4 - Classificação MCT.	30
Figura 5 - Compactador ensaio MCV	31
Figura 6 - Resultados do Ensaio MCV.....	32
Figura 7 - Curva de Compactação.....	33
Figura 8 - Estrutura do Pavimento Rígido.....	34
Figura 9 - Estrutura do Pavimento flexível.	35
Figura 10 - Tipos de Curvas Granulométricas.	38
Figura 11 - Curva de Enquadramento em faixa granulométrica.....	39
Figura 12 - Fluxograma das Etapas da Pesquisa	50
Figura 13 - Forma de coleta de amostra de solo	51
Figura 14 - Recipiente cerâmico e Almofariz com de mão borracha e Solo seco destorroadado e não destorroadado.	52
Figura 15 - Solo utilizado para peneiramento e conjunto de Peneiras	53
Figura 16 - Aparelho de Casagrande e o solo sendo ensaiado.	54
Figura 17 - Placa de vidro esmerilada e solo no formato cilíndrico	55
Figura 18 - Amostras acondicionadas para ensaio	58
Figura 19 - Cilindros imersos em água	58
Figura 20 - Materiais usados no ensaio de CBR	61
Figura 21 - Corpo de Prova na Prensa	61
Figura 22 - Ensaio de Compressão Simples.....	62
Figura 23 - Pátio de estocagem do bagaço de cana de açúcar	63
Figura 24 - Cinza passando por moagem.....	64
Figura 25 - Copos de provas sendo ensaiados em prensa hidráulica.....	65
Figura 26 - Mistura solo-cimento	68
Figura 27 - Mistura solo-cal	69
Figura 28 - Mistura solo-cinza	70
Figura 29 - Curva Granulométrica da Cinza.	72
Figura 30 - Curva Granulométrica do Solo.	75
Figura 31 - Limite de Liquidez.	76
Figura 32 - Classificação MCT.	79
Figura 33 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo Natural.....	80
Figura 34 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo - Cimento.....	81
Figura 35 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário Solo-cal	82
Figura 36 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo - Cinza	83
Figura 37 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo – 5%Cinza – 1%Cal	84
Figura 38 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo – 5%Cinza – 2%Cal	85
Figura 39 - Curva de CBR na Energia Intermediário Solo Natural com $W_o = 23\%$	87
Figura 40 - Curva de CBR na Energia Intermediário Solo Natural com $W_o = 22\%$	88
Figura 41 - Curva de CBR na Energia Intermediário Solo Natural com $W_o = 24\%$	89
Figura 42 - Curva de CBR do Solo - Cimento com $W_o = 21\%$	90
Figura 43 - Curva de CBR do Solo - Cimento com $W_o = 20\%$	91
Figura 44 - Curva de CBR do Solo - Cimento com $W_o = 22\%$	92
Figura 45 - Curva de CBR do Solo - Cal com $W_o = 25\%$	94
Figura 46 - Curva de CBR do Solo - Cal com $W_o = 24\%$	95
Figura 47 - Curva de CBR do Solo - Cal com $W_o = 26\%$	96
Figura 48 - Curva de CBR do Solo - Cinza com $W_o = 21\%$	97

Figura 49 - Curva de CBR do Solo - Cinza com $W_o = 20\%$	98
Figura 50 - Curva de CBR do Solo - Cinza com $W_o = 22\%$	99
Figura 51 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 1%cal com $W_o = 20\%$	101
Figura 52 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 1%cal com $W_o = 19\%$	102
Figura 53 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 1%cal com $W_o = 21\%$	103
Figura 54 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 2%cal com $W_o = 20\%$	104
Figura 55 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 2%cal com $W_o = 21\%$	106
Figura 56 - Comparativo de CBR's das amostras.....	107
Figura 57 - Comparativo de resistências à compressão simples das amostras	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Significado das Siglas do U.S.C.S.....	25
Tabela 2 - Grupos de solos de granulação grossa e fina.....	26
Tabela 3 - Esquema para classificação pelo sistema unificado.....	29
Tabela 4 - Faixas de Especificação Granulométrica.....	39
Tabela 5 - Limite de liquidez e índice de plasticidade de alguns solos típicos brasileiros.....	55
Tabela 6 - Orientação Granulométrica de agregado miúdo.....	64
Tabela 7 - Tabela de Requisitos Físicos para caracterização pozolânica.....	66
Tabela 8 - Composição Granulométrica da Cinza.....	72
Tabela 9 - Caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar – Argamassa com 25% de cinza.....	73
Tabela 10 - Caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar – Argamassa somente com cimento (traço referência).....	73
Tabela 11 - Composição Granulométrica do Solo.....	74
Tabela 12 - Ensaio Limite de Liquidez.....	75
Tabela 13 - Ensaio Limite de Plasticidade.....	76
Tabela 14 - Ensaio Mini- MCV.....	78
Tabela 15 - Ensaio de perda de massa por imersão (Pi).....	78
Tabela 16 - Tabela resumo dos resultados de Proctor.....	85
Tabela 17 - Solo natural: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 23%.....	86
Tabela 18 - Solo natural: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 22%.....	87
Tabela 19 - Solo natural: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 24%.....	88
Tabela 20 - Solo - cimento: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 21%.....	90
Tabela 21 - Solo - cimento: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 20%.....	91
Tabela 22 - Solo - cimento: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 22%.....	92
Tabela 23 - Solo - cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 25%.....	93
Tabela 24 - Solo - cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 24%.....	94
Tabela 25 - Solo - cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 26%.....	95
Tabela 26 - Solo - cinza: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 21%.....	97
Tabela 27 - Solo - cinza: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 20%.....	98
Tabela 28 - Solo - cinza: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 22%.....	99
Tabela 29 - Solo - 5%cinza - 1%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 20%.....	100
Tabela 30 - Solo - 5%cinza - 1%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 19%.....	101
Tabela 31 - Solo - 5%cinza - 1%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para Wo = 21%.....	102
Tabela 32 - Solo - 5%cinza - 2%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para W = 20%.....	104

Tabela 33 - Solo - 5%cinza - 2%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para W = 19%.	105
Tabela 34 - Solo - 5%cinza - 2%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para W = 21%.	106
Tabela 35 - Tabela resumo dos resultados de CBRs com melhores desempenhos.	107
Tabela 36 - Média dos resultados do ensaio de compressão simples do solo natural e solo estabilizado.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CBR = *Califórnia Bearing Ratio*.

CPII-E-32 = Cimento Portland.

CNU = Coeficiente de não uniformidade.

DER = Departamento de Estradas e Rodagens.

DNIT = Departamento Nacional de Infraestrutura de transporte.

g = Grama.

HRB = *Highway Research Board*.

IG = Índice de Grupo.

IP = Índice de Plasticidade.

ISC = Índice de Suporte Califórnia.

Kg = Quilo grama.

LL = Limite de Liquidez.

LP = Limite de Plasticidade.

MCT = Miniatura Compactada Tropical.

Md = Massa de solo seco, desprendido do corpo de prova imerso.

Mini - MCV = Solos compactados em equipamentos miniaturas.

mm = Milímetro.

Mo = Massa de solo seco do corpo de prova (10,00 mm), após compactação.

Mpa = Megapascal.

Pi = Perda de massa por imersão.

U.S.C.S = Classificação Unificada de Solos.

W = Umidade.

Wo = Umidade ótima.

ΔL = Variação de altura.

= Peneira.

γ_s = Massa específica aparentemente seca.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVO	20
2.1 Objetivos gerais	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Solos	21
3.2 Classificação dos Solos.....	23
3.2.1 Classificação Unificada de Solos (U.S.C.S)	25
3.2.2 Classificação HRB (Highway Research Board).....	28
3.2.3 Classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical)	29
3.3 Pavimentos	34
3.3.1 Características de Solo para Pavimentação.....	36
3.4 Estabilizações de Solos.....	36
3.4.1 Estabilização Granulométrica	37
3.4.2 Estabilização Química	40
3.4.3 Estabilização Mecânica	41
3.4.4 Estabilização com Materiais Alternativos	41
3.5 Cinza da Queima do Bagaço de Cana de açúcar	43
3.6 Ensaios Mecânicos.....	46
3.6.1 Ensaios de Proctor.....	47
3.6.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou Califórnia Bearing Ratio (CBR).....	47
3.6.3 Ensaio de Resistência a Compressão Simples	48
4 METODOLOGIA	49
4.1 Coleta de amostra de Solo.	51
4.2 Caracterização e Classificação de Solo	52
4.2.1 Limites de Consistências	53
4.2.2 Classificação HRB	56
4.2.3 Classificação MCT	57
4.3 Ensaios Mecânicos do Solo e do Solo Estabilizado.....	59
4.3.1 Ensaios de Compactação (Proctor).....	59
4.3.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR).....	60
4.3.3 Ensaio de Compressão Simples.....	62
4.4 Coleta da Amostra de Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar	63
4.5 Caracterização da Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar	63
4.6 Estabilização das Amostras de Solos.	67
4.6.1 Estabilização Solo – Cimento	67
4.6.2 Estabilização Solo – Cal.	68
4.6.3 Estabilização Solo – Cinza	69
4.6.4 Estabilização Solo – Cinza - Cal.....	70

4.7 Análise de resultados (Elaboração de Gráficos e Tabelas)	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1 Caracterização da Cinza do Bagaço de Cana de açúcar	72
5.2 Características do Solo.....	74
5.2.1 Limites de Consistência (LL e LP)	75
5.2.2 Classificações do Solo (HRB).....	77
5.2.3 Classificação MCT	77
5.2.4 Ensaio de Proctor do Solo Natural	79
5.3 Características do Solo Estabilizado	80
5.3.1 Ensaio de Proctor do Solo-Cimento	81
5.3.2 Ensaio de Proctor do Solo-Cal	82
5.3.3 Ensaio de Proctor do Solo-Cinza.....	82
5.3.4 Ensaio de Proctor do Solo-Cinza - Cal	83
5.4 Ensaio de CBR e Expansão	86
5.4.1 Ensaio de CBR do Solo Natural.....	86
5.4.2 Ensaio de CBR do Solo-Cimento.....	89
5.4.3 Ensaio de CBR do Solo-Cal.....	93
5.4.4 Ensaio de CBR do Solo-Cinza.....	96
5.4.5 Ensaio de CBR do Solo – 5%Cinza – 1%Cal	100
5.4.6 Ensaio de CBR do Solo – 5%Cinza – 2%Cal	103
5.5 Ensaio de Compressão Simples.....	108
6 DISCUSSÃO	110
7 CONCLUSÃO	113
8 REFERENCIAS	114
Apêndice A	123
Apêndice B	124
Apêndice C	124
Apêndice D	125
Apêndice E	125
Apêndice F	126
Apêndice G	126
Apêndice H	127
Apêndice I	128
Apêndice J	130
Apêndice K	131
Apêndice L	133
Apêndice M	134
Apêndice N	136

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma malha viária de 1,72 milhões de quilômetros de rodovias, sendo pavimentadas aproximadamente 213 mil, que corresponde a um percentual de 12,4% de rodovias pavimentadas (CNT, 2018).

Os pavimentos que são utilizados no Brasil são os rígidos e flexíveis, sendo que o principal e mais utilizado é o pavimento flexível, que dentre suas vantagens destaca-se a praticidade executiva pois se constitui de cinco camadas, subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

As camadas de sub-base e base são as mais nobres, depois do revestimento, e podem ser compostas de material fino (natural), estabilizado granulometricamente com o emprego de outros solos, brita ou material que constitui resistência para melhorar a qualidade do solo, podendo também ser estabilizado quimicamente (DNIT, 2006).

No território brasileiro são encontrados diversos tipos de solos, como os arenosos, argilosos, siltosos, mas dentre eles se destacam predominantemente os solos lateríticos. Importante ressaltar que estes solos, muitas vezes, não se enquadram quanto as especificações técnicas para uso em obras (PINTO, 2006).

Para que se conheçam as características dos solos, eis que surgem os sistemas de classificações, que possibilita a sua identificação e possibilidade de uso.

Para Caputo(1996), os sistemas de classificação de solos mais usuais são: Classificação Unificada de Solos (Unified Soil Classification System) (U.S.C.S) e Classificação HRB (Highway Research Board).

A classificação unificada é mais usada para obras de terra, como barragens, e a classificação HRB é utilizada em obras rodoviárias (Pinto, 2006).

A classificação HRB por se tratar de uma classificação internacional, onde o clima e formação dos solos diferem muito do Brasil, Villibor (1995) desenvolveu uma classificação voltada aos solos tropicais para uso em pavimentos, denominada MCT (Miniaturas Compactadas Tropicais).

Com a classificação MCT, solos classificados como impróprios na classificação HRB, puderam ser considerados bons para uso em pavimentos.

Sendo o solo, material comum em todo País, é utilizado em recuperação e construção de rodovias.

Na busca de soluções para construção de pavimentos de baixo custo, Villibor e Nogami (1995) desenvolveram técnicas para que se pudesse utilizar o solo natural do próprio local ou misturado com pequena quantidade de agregado, fazendo com ele a base do pavimento, diminuindo seu custo em relação aos custos verificados nas bases tradicionais: macadame hidráulico, brita graduada, solo cimento, etc.

A utilização de solos classificados como impróprios para uso em camadas de pavimento é feita utilizando cal e cimento, como principais estabilizantes, juntamente com o emprego de compactação mecânica (VILLIBOR et.al, 1995, 2007 e 2009).

Sendo o transporte rodoviário o principal meio logístico para locomoção de produtos e pessoas no Brasil, torna-se imprescindível atuar em manutenções e construções de novas vias, mas nem sempre isso é possível, devido às dificuldades econômicas e a dificuldade em empregar determinadas soluções técnicas em algumas regiões, como utilizar o próprio solo local, estabiliza-lo granulometricamente, entre outras, devido à má qualidade do solo local e a distancia de solos melhores para utilização em camadas de pavimentos. (OLIVEIRA et al, 2013).

Segundo Teixeira (2014), os solos usados em camadas estruturais de pavimentos são extraídos fora do local de construção, causando impactos ao meio ambiente na sua extração e inviabilizando algumas vezes a execução de obras devido à distância, podendo acarretar aumento significativo nos custos.

Neste contexto, encontrar soluções técnicas e econômicas para diminuir os impactos causados na construção de vias pode se tornar uma tarefa árdua.

Entretanto, a escassez de materiais naturais e as restrições ambientais trazem uma nova vertente de estudos para melhorar as características dos solos, para seu uso em camadas de pavimento, com o uso de materiais alternativos que possam ser misturados ao solo visando o aumento de sua resistência, seja por reações químicas ou por arranjos granulométricos (MACHADO et al, 2017).

Devido ao crescimento do cultivo de cana de açúcar e da instalação de usinas canavieiras no estado de São Paulo, a partir do ano 2000, com o etanol

ganhando espaço no mercado nos últimos anos, representando 60% da safra de cana de açúcar do país, cresceu a geração de resíduos provenientes do beneficiamento da cana de açúcar (ÚNICA, 2017).

Segundo Martins Filho e Martins (2017), o plantio de cana-de-açúcar, que representa uma das principais atividades agrícolas do país, gera como resultado final do processo produtivo das usinas sucroalcooleiras grande quantidade de cinza, proveniente da queima do bagaço da cana de açúcar, estimando-se uma produção anual de mais de 4 milhões de toneladas de cinza.

Ainda para Martins Filho e Martins (2017), as propriedades da cinza do bagaço de cana de açúcar como adubo para solos não mostram grande relevância. Sendo assim, as indústrias de cana de açúcar buscam soluções de uso mais nobres para esse resíduo, do que somente lançá-lo ao solo das plantações.

O uso das cinzas do bagaço de cana de açúcar vem sendo estudada em diversas áreas da engenharia, buscando substituição total ou parcial de materiais como cimento, cal entre outros, em confecção de concretos, argamassas, blocos, pavimentos, entre outros.

A necessidade de manutenção e construção de vias, o aumento da geração de cinza do bagaço de cana de açúcar proveniente do aumento da safra nos últimos anos, a busca por diminuir o uso de recursos naturais e aproveitar o solo do próprio local de uso, remetem ao objetivo desta pesquisa que é estudar a estabilização de um solo laterítico, utilizando resíduos de cana de açúcar (cinza) e avaliar seu comportamento através de ensaios de caracterização física e mecânica.

A pesquisa se justifica pela possibilidade de utilização de um resíduo, a cinza do bagaço de cana de açúcar, de forma a minimizar os impactos ambientais causados pelo uso de materiais naturais na estabilização de solos e pela deposição das cinzas ao solo, muitas vezes de forma inadequada.

A escolha do solo laterítico, por sua vez, justifica-se pois os solos de comportamento laterítico são encontrados em 65% do território brasileiro (VILLIBOR E NOGAMI 2009).

Como o cimento Portland e a cal hidratada são os dois principais estabilizantes de solo utilizados, serão referencias para realizar adição de cinza de bagaço de cana de açúcar ao solo, visando estabilizá-lo para que possa atingir

resistências compatíveis às exigidas em normas especificadas no manual do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) para uso em camadas estruturais de pavimentos.

As adições e misturas da cinza do bagaço de cana de açúcar visam uma substituição total ou parcial dos aditivos citados, prevalecendo a inserção de maior quantidade de material alternativo, a cinza, em relação a outros materiais utilizados para estabilização, para que se possa diminuir o uso desses.

A pesquisa foi desenvolvida utilizando ensaios normatizados executados em laboratório, seguindo orientação do Manual de Pavimentação do DNIT (2006). Os resultados dos ensaios serão apresentados, discutidos e serão feitos comentários, à guisa de conclusão.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar a estabilização de um solo laterítico, localizado na região de Barretos-SP, utilizando resíduos de cana de açúcar (cinza) e avaliar seu comportamento através de ensaios de caracterização física e mecânica.

2.2 Objetivos Específicos

- Discutir o estado da arte do tema proposto;
- Efetuar a caracterização o solo laterítico;
- Discutir o grau de pozolanicidade da cinza de cana-de-açúcar;
- Estabilizar o solo laterítico através da adição de cimento, cal e cinza de cana-de-açúcar;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Solos

O solo tem uma grande diversidade de características, sendo necessário conhecer sua origem de formação. Além disso, devido a sua alta complexidade, torna-se difícil compreender seu comportamento. Analisando o solo sob esta perspectiva, o estudo das suas características passa a ter importância significativa para seu uso como material de construção (MASSAD, 2016).

Na engenharia, a variedade de solos encontrados é enorme, sendo que esses solos podem ser encontrados de diversas formas, variando de blocos de pedra dura, densa, grande; a pedregulhos, areias, siltes, argilas, até depósitos orgânicos de turfas compressíveis e moles (TERZAGHI & PECK, 1962).

Para os engenheiros rodoviários, os solos são materiais naturais, de fácil dispersão em contato com água; material naturalmente não consolidado, isto é, constituídos por processos mecânicos e hidráulicos e que pode ser escavado com facilidade sem o emprego de explosivos (VILLIBOR et al. 2007).

A ação do intemperismo no solo, em regiões distintas, causa variações em suas características e composições mineralógicas, decorrentes das intempéries climáticas da região onde está situado o solo. Nas regiões onde o clima é temperado, a ação intemperizadora se dá predominantemente por ações físicas, sendo o solo formado pela ação do gelo e degelo da água que infiltra e percola pela rocha ocasionando, com o tempo, a quebra da estrutura da superfície da rocha, tornando-a pequenos pedaços; com isso o solo dessas regiões apresentam perfis pouco espessos (SILVA, 2016).

Em regiões de clima tropical úmido, onde ocorrem variações de altas temperaturas, combinadas com níveis pluviométricos elevados, o intemperismo que predomina é o químico. A rocha de origem sofre desagregação por ações químicas causadas pela presença de água, que por sua vez resulta em perfis de solos espessos, com características de interesses geotécnico, devido ao menor tamanho das partículas de solo (SILVA, 2016).

Os solos tropicais, formados em regiões tropicais úmidas, possuem características diretamente ligadas ao processo de intemperização pelo qual

foram formados, decorrentes de processos geológicos e/ou pedológicos típicos dessas regiões. Dentre a gama de solos tropicais, evidenciam-se duas grandes classes: solos lateríticos e solos saprolíticos (VILLIBOR et al. 2007).

Segundo (VILLIBOR e NOGAMI, 2009), os solos saprolíticos constituem a camada que está abaixo da camada espessa dos solos lateríticos. Para serem expostos, há a necessidade da ação do homem, via execução de obras ou por erosões. Este tipo de solo é heterogêneo e genuinamente residual. Possui uma mineralogia complexa em fase de decomposição de seus minerais, preservando característica da rocha de origem.

Os solos lateríticos são formados pela ação do intemperismo em um processo de laterização, ou seja, ocorre seu endurecimento, cujas características mais relevantes para estudo tecnológico são o melhoramento das condições do solo por alumínio ou óxidos hidratados de ferro. Além disso, ocorre a retenção de caulinita como argilomineral dominante, que confere as características dos minerais dos solos lateríticos e suas colorações: amarelo, alaranjado, vermelho e marrom. (VILLIBOR e NOGAMI, 2009). Segundo Massad (2016):

“na solução de muitos problemas de Engenharia Civil, o solo intervém como material de construção (aterro de estradas; barragens de terra e enrocamento etc.) ou como material natural (fundações de edifícios; escavações de valas e túneis; estabilização de encostas etc.). Para a elaboração de projetos adequados e a realização de obras seguras e econômicas, torna-se indispensável conhecer as suas características de identificação e de classificação e, em geral, as suas propriedades de engenharia.”

O solo, para ser aplicado como material de construção em camada de pavimentos necessita de rigoroso controle tecnológico, estudo prévio da sua qualidade e rigoroso acompanhamento na sua aplicação. Devido a este contexto, estudos de técnicas de estabilização precisaram ser desenvolvidos, para que se conseguisse a melhora das propriedades geotécnicas dos solos, seja por aglutinantes ou pela simples distribuição granulométrica (SENÇO, 2007).

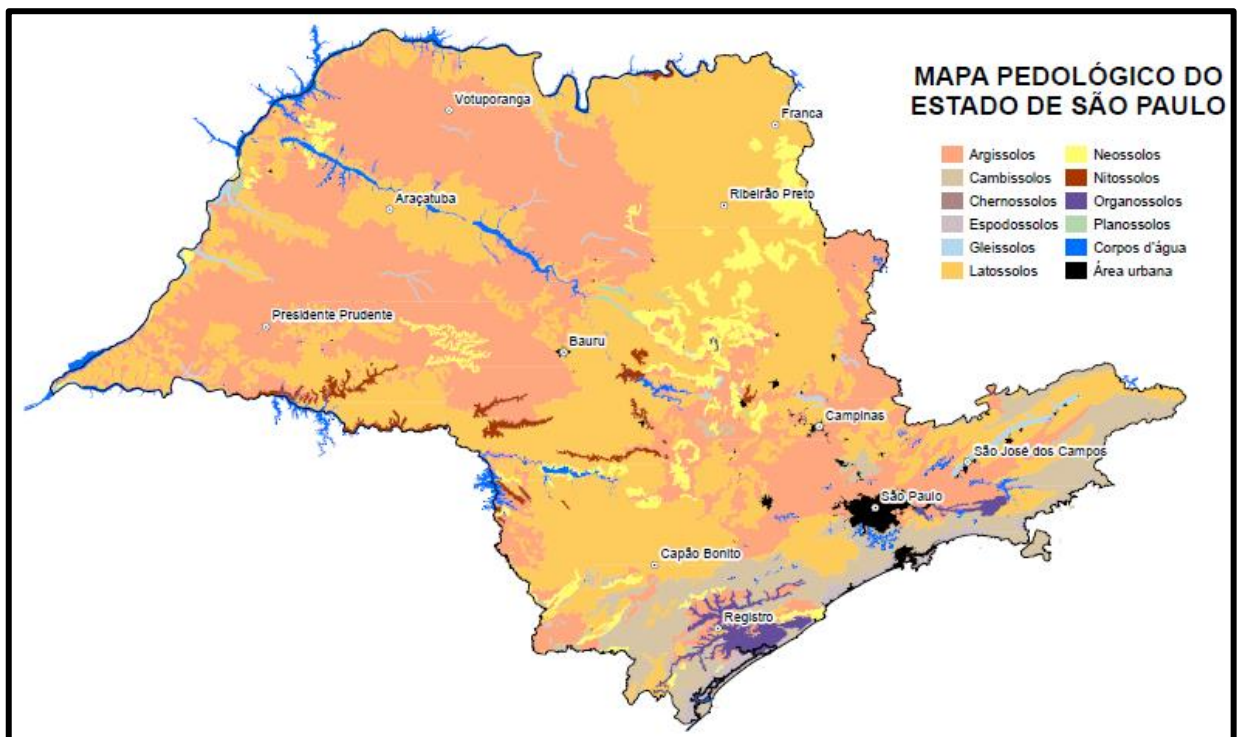
3.2 Classificação de Solos

Segundo Morandini, (2014), os solos tropicais são subdivididos em 13 grupos de solos: Organossolo, Gleissolo, Plintossolo, Planossolo, Espodossolo, Latossolo, Nitossolo, Argissolo, Chernolossolo, Luvisolo, Cambissolo, Vertissolo, Neossolo. Predominantemente os solos tropicais são aqueles pertencentes aos grupos: Argissolos, Latossolos, Nitossolos e Plintossolos.

Pereira et al. (2017) afirma que, no Brasil, a predominância de solos com características predominantes lateríticas é considerável, ocupando 65% do território brasileiro, segundo Villibor e Nogami, (2009), onde dentre os grupos com predominâncias e tendências lateríticas estão os Latossolos e Argissolos.

A Figura 1 mostra a distribuição dos grupos de solos presentes no estado de São Paulo.

Figura 1- Mapa pedológico do estado de São Paulo



Fonte: Oliveira et al, 1999.

Os diversos tipos de solos existentes tendem a se agrupar, formando grupos de solos, sendo que para organizar essas distintas classes surgem os sistemas de Classificação de solos (PINTO, 2006).

Segundo Massad (2016), a heterogeneidade dos solos e suas diversas aplicações na engenharia impossibilitam a sua classificação generalizada, havendo a necessidade de sistemas de classificação distinta, para que se possam suprir as necessidades no campo da geotecnia.

Para Gambill et al. (2016), os sistemas de classificação do solo fornecem as características dos solos, facilitando aos engenheiros a escolha e aplicação do solo em suas obras.

Para Caputo (1996), as classificações, mesmo sujeitas a limitações, constituem um meio prático para identificação de solos, onde os principais sistemas de classificações são: Classificação Unificada de Solos (Unified Soil Classification System) (U.S.C.S) e Classificação HRB (Highway Research Board).

Segundo Villibor et al. (2007), as duas classificações empregadas para o estudo do uso do solo em camadas de pavimentação, a Unified Soil Classification System (U.S.C.S) e a Classificação HRB (Highway Research Board), apresentam deficiências relacionadas a classificação geotécnica, à dosagem de materiais para uso em camadas de pavimentos, assim como os critérios para escolha dos mesmos para uso em camadas de pavimento, tamanho e forma de partículas, presença ou não de matéria orgânica, volumes de vazios, entre outros. Deficiências essas que acabam inviabilizando o solo para uso em camadas de pavimentação.

Gambill et al. (2016) reforça que numerosos sistemas de classificação são usados atualmente para aplicações específicas, mas os sistemas mais usuais de classificação de solos são ainda os citados por Caputo, (1996).

Delgado *et al.* (2013) afirma que as metodologias empregadas para classificação de solos nos meios rodoviários, utilizadas no Brasil (U.S.C.S e HRB), se baseiam em metodologias estrangeiras de climas frios onde ocorre congelamento de solos, sendo seu uso no país inadequado, devido às características climáticas que formam os solos brasileiros.

Balbo (2007) acrescenta que para uma melhor classificação de solos para o uso em pavimentos, seria adequada a utilização da Classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical) desenvolvida por Villibor et al. (2007), que classificaria melhor os solos brasileiros.

Balbo (2007) explica que a classificação MCT seria mais adequada para classificação de solos para fins rodoviários, pois essa metodologia reavalia

as propriedades geotécnicas dos solos considerados impróprios para pavimentação, sendo utilizados com sucesso como materiais de subleito, sub-base e base de pavimentação, em todo país.

As classificações U.S.C.S, HRB e MCT, que são as principais classificações de solos utilizadas em meios rodoviários, são apresentadas a seguir, avaliando-se seus principais aspectos de classificação.

3.2.1 Classificação Unificada de Solos (Unified Soil Classification System - U.S.C.S)

A classificação U.S.C.S foi desenvolvida originalmente pelo Professor Arthur Casagrande no ano de 1942. Sua utilização era para obras de aeroportos e aos poucos foi sendo generalizada. Atualmente, seu principal uso é em obras de terras e barragem, utilizada por geotécnicos (PINTO, 2006).

Para esse sistema de classificação, utiliza-se de um conjunto com duas letras para classificação do solo, sendo G, S, M, C e O o tipo de solo e as letras W, P, H, L e Pt, são os dados complementar do solo.

A tabela 1 mostra o significado de cada letra.

Tabela 1 - Significado das Siglas do U.S.C.S

Terminologia do Sistema Unificado		
Siglas	Solos	Complementos
G	Pedregulho	-
S	Areia	-
M	Silte	-
C	Argila	-
O	Solo Orgânico	-
-	-	-
W	-	Bem Graduado
P	-	Mal Graduado
H	-	Alta Compressibilidade
L	-	Baixa Compressibilidade
Pt	-	Turfa

Fonte: Pinto, (2006), adaptado.

Para essa classificação, é considerado primeiramente o material de granulometria fina, que passa na peneira de 0,075mm (#200); sendo

considerados solos de granulação fina quando a porcentagem que passa for superior a 50% e de granulação grossa quando a porcentagem que passar na peneira de 0,075mm (#200) for menor que 50% (DNIT, 2006).

Os grupos de solo considerados de granulação fina e de granulação grossa, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Grupos de solos de granulação grossa e fina.

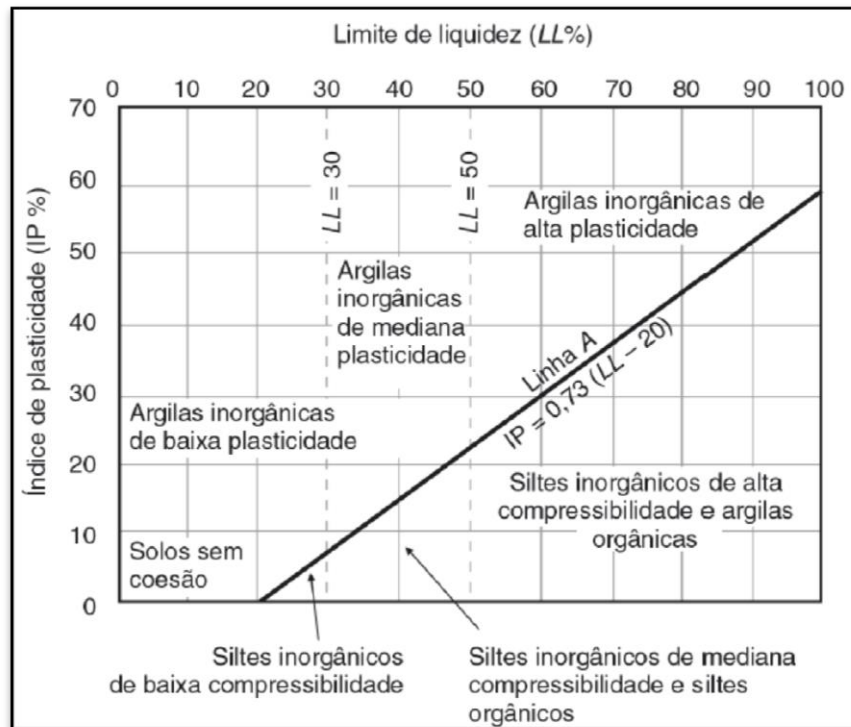
Tabela de Classificação dos Grupos de Solos		
Grupo	Solo	Descrição
ML e MH	Fino	Solos siltosos e solos micáceos. São siltes arenosos, siltes argilosos ou siltes inorgânicos relativamente com baixa plasticidade;
CL e CH	Fino	Argilas inorgânicas com baixo e alto limite de liquidez respectivamente;
OL e OH	Fino	Presença de matéria orgânica, incluindo siltes e argilas orgânicas;
Pt	Turfa	Alto teor de matéria orgânica. Turfas, húmus e solos pantanosos com altas texturas orgânicas e Fibrosos.
GW e SW	Grosso	Solos pedregulhosos e arenosos bem graduados que contém menos de 5% de finos passantes na peneira de abertura 0,074mm (#200), não plásticos.
GP e SP	Grosso	Solos pedregulhosos e arenosos mal graduados que contém menos de 5% de finos passantes na peneira de abertura 0,074mm (#200), não plásticos.
GM e SM	Grosso	Pedregulhos ou areias que contém mais de 12% de finos com pouca ou nenhuma plasticidade. Podem ser bem ou mal graduado.
GC e SC	Grosso	Solos pedregulhosos ou arenosos com mais de 12% de finos que exibem tanto baixa quanto alta plasticidade. Finos compostos por argila geralmente.

Fonte: Santos (2006), adaptado.

Para classificação U.S.C.S, são utilizados os parâmetros de limites de consistências do solo, limite de liquidez(LL) e limite de plasticidade (LP), que são apresentados a seguir.

Com os parâmetros LL e LP se extrai o índice de plasticidade do solo (IP). Arthur Casagrande colocou IP em função de LL, indicando que os solos de comportamentos argilosos, siltosos e orgânicos, se faziam representar acima de uma reta denominada A, conforme apresentado na Figura 2 (CAPUTO et al, 2016).

Figura 2 - Gráfico para classificação de solos finos.

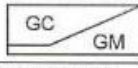
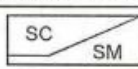
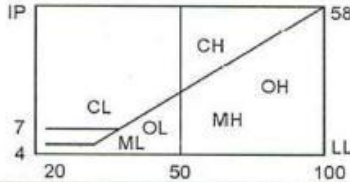


Fonte: Caputo et al. (2016)

Para a classificação U.S.C.S, além dos parâmetros do solo LL, LP e IP, utiliza-se do coeficiente de não uniformidade (CNU) do solo extraído da curva granulométrica, tomando-se a relação entre D60, que corresponde ao diâmetro onde se situa 60% das partículas de solos em massa e D10, que corresponde ao diâmetro onde estão 10% das partículas retidas em massa do solo (PINTO, 2006).

Para classificar o solo pelo sistema unificado, utiliza-se a classificação unificada, mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Esquema para classificação pelo sistema unificado.

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC 	
	S > G : S	5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
		% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3	
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
	% P #200 > 12	SC 		
		SM		
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: PINTO, (2006).

3.2.2 Classificação HRB (Highway Research Board)

Desenvolvida em 1920 pelo *Bureau of Public Roads* (Secretaria de estradas publicas), revisada pela *Highway Research Board* (HRB) (Conselho de pesquisa da estrada) e conhecida mundialmente após atualização pela *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) (Associação Americana de Funcionários Rodoviários do Estado), que normatizou a classificação se tornado HRB – AASHTO (SENÇO, 2007).

Pinto (2006), afirma que essa classificação é muito empregada nos meios rodoviários em todo mundo e para classificar os tipos de solos baseia-se na granulometria do solo e nos limites de consistências limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e no índice de grupo (IG). Com os dados laboratoriais, inicia-se a classificação da esquerda para direita da tabela de classificação HRB-AASHTO (Tabela 1) por eliminação, sendo considerado solo de granulação grosseira quando menos de 35% de massa de solo passar pela peneira de abertura 0,074mm (#200). Será considerado solo de granulação fina quando mais de 35% de massa de solo passar pela peneira de abertura 0,074mm (#200). O primeiro grupo da esquerda para direita que atender aos requisitos (% passante na peneira de abertura 0,074mm (#200)), será o grupo de classificação.

Tabela 3 - Esquema para classificação pelo sistema unificado.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS DE GRANULAÇÃO GROSSA ≤35% passando na# 200						MATERIAIS DE GRANULAÇÃO FINA ≥36% passando na# 200				
CLASSIFICAÇÃO POR	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 *
GRUPO	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
GRANULOMETRIA - % QUE PASSANA PENEIRA											
n° 10 2,00 mm	≤50			≤35				≥36			
n° 40 0,42 mm	≤30	≤50	≤51								
n° 200 0,075 mm	≤15	≤25	≤10								
LIMITE DE LIQUIDEZ ÍNDICE DE PLASTICIDADE	≤6		NP	≤40 ≤10	≥41 ≤10	≤40 ≥11	≥41 ≥11	≤40 ≤10	≥41 ≤10	≤40 ≥11	≥41 ≥11
ÍNDICE DE GRUPO	0		0	0		4máx		8máx	12máx	16máx	20máx
COMPONENTES SIGNIFICATIVOS DOS MATERIAIS	Fragmentos de pedra, areia, pedregulho		Areia fina	Pedregulho e areia com silte ou argila				Solos siltosos		Solos argilosos	
COMPORTAMENTO COMO SUBLEITO **	Excelente a Bom					Regular a Mau					
* Solos A-7: Se $IP \leq LL - 30 = A-7-5$ Se $IP > LL - 30 = A-7-6$											

Fonte: DNIT, (2006), adaptado.

Como demonstrado na tabela acima, os solos granulares compõe os grupos A-1, A-2, A-3, e os solos finos, os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 e subdivisões.

3.2.3 Classificação MCT

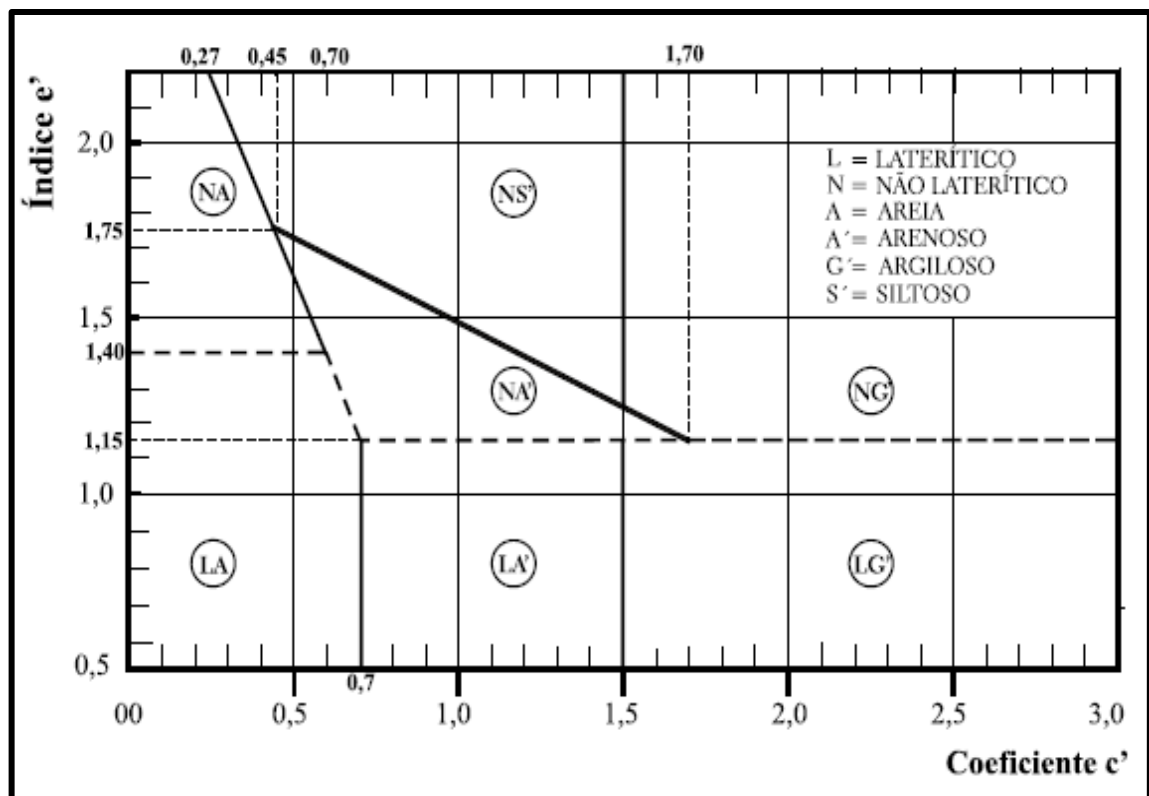
A classificação MCT se dá pela compactação de corpos de provas cilíndricos, de diâmetro igual a 50 mm por 50 mm de altura, onde a letra M é de miniatura (devido ao tamanho do corpo de prova), a letra C é de compactada, pois os solos são compactados em laboratórios e a letra T é relativa ao tipo de solo usado tropical (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

Segundo Balbo (2007) a contração, penetração e permeabilidade, são as propriedades mais representativas do comportamento de solos tropicais e a metodologia MCT enfatiza essas características, buscando sua utilização em obras rodoviárias, principalmente em pavimentação.

Para Fresneda et al.(2013), a classificação MCT tem como objetivo fazer uma rápida identificação dos solos. O método permite classificar o solo em dois grupos, laterítico e não laterítico, e em subgrupos (Argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas LG'; as areias argilosas lateríticas LA'; as areias com pouca argila laterítica LA; as argilas, argilas siltosas e argilas não-lateríticas NG'; Siltes, siltes arenosos e siltes argilosos não lateríticos NS'; as areias siltosas e areias argilosas não lateríticas NA'; as areias siltosas com quartzo e siltes argilosos não lateríticos NA).

Para que se possa executar a classificação MCT, utiliza-se da Figura 4, sendo que através dos coeficientes c' , que correspondente a quão argiloso é o solo e do índice e' , que corresponde ao caráter laterítico do solo, realiza-se a classificação.

Figura 4 - Classificação MCT.



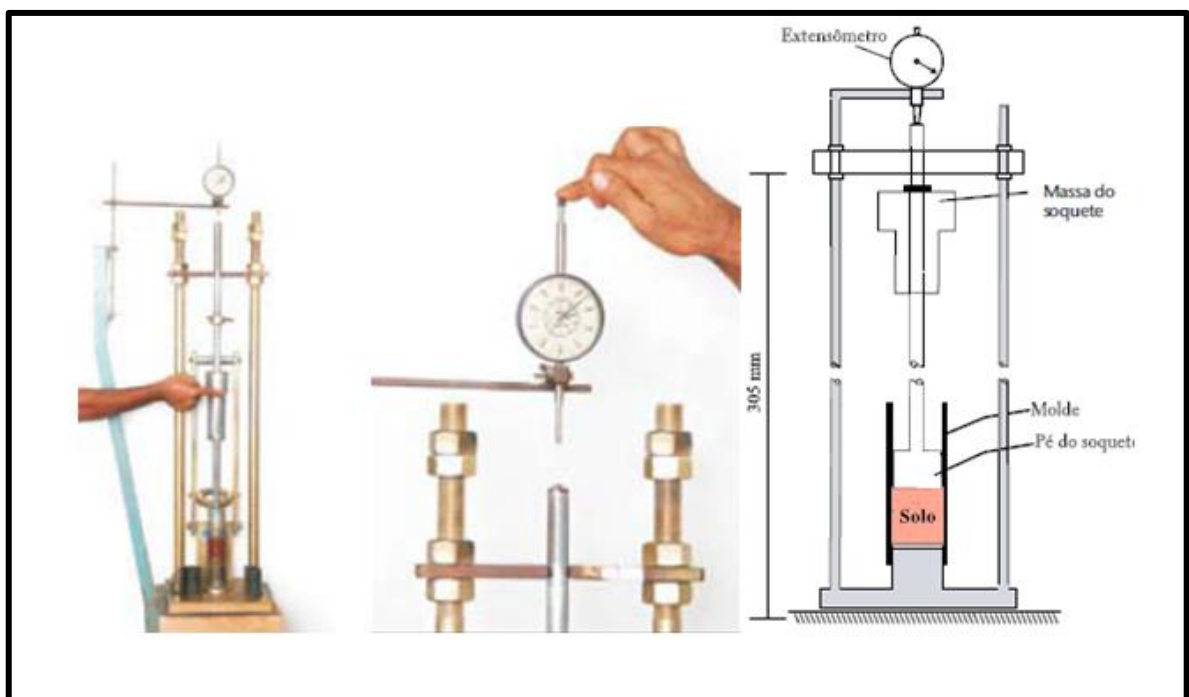
Fonte: VILLIBOR e NOGAMI, 2009.

Para que se possa conhecer o coeficiente c' e o índice e' são necessários uma serie de ensaios Mini-MCV (DNER-ME 258/94) e de perda de massa por imersão (Pi) (DNER-ME 256/94).

Segundo o DNIT (2006), é necessário realizar a compactação de corpos de provas miniaturas Mini-MCV com diferentes energias (numero de golpes) e teores de umidade, sendo que ao longo do ensaio é medida a variação da altura (ΔL) através da aplicação de uma serie de golpes padronizados. Com os pares de valores de numero de golpes e variação da altura (ΔL), para uma dada umidade ensaiada, traça-se a curva representativa do teor de umidade.

O equipamento para realização do ensaio é mostrado na Figura 5.

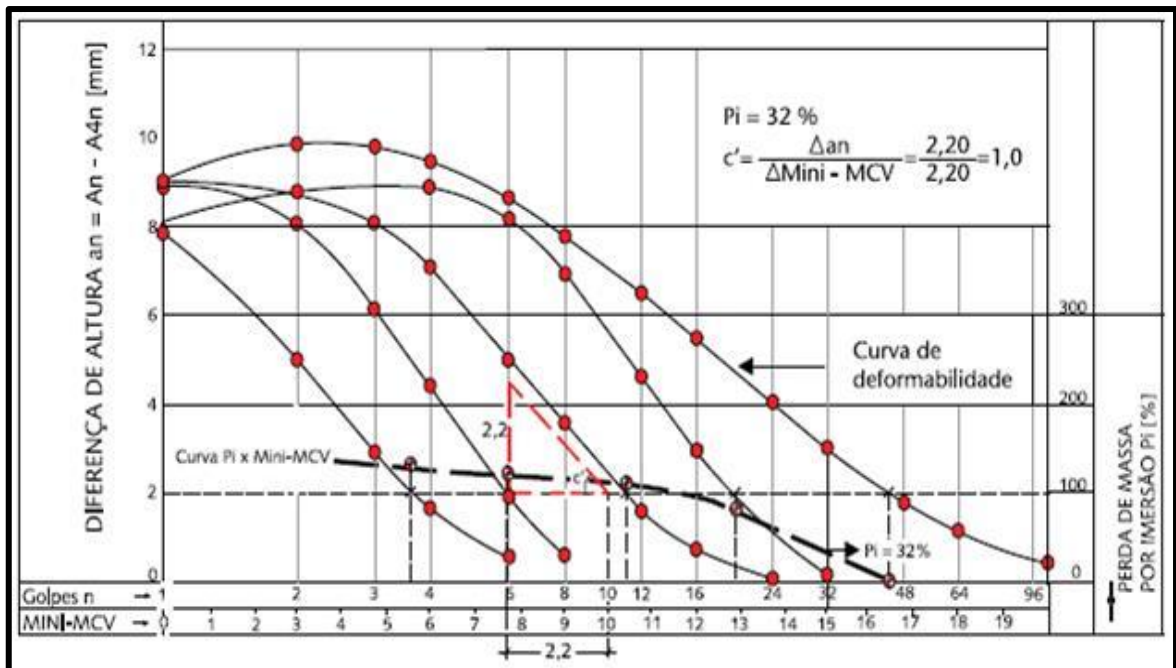
Figura 5 - Compactador ensaio MCV



Fonte: VILLIBOR e NOGAMI, 2009.

De acordo com Castro (2009), para realização do ensaio deve-se separar cinco (5) porções de solo de aproximadamente 200g, com umidades diferentes e crescentes, com variações entre elas de 1,5% a 5% em relação a massa do solo, aplicando-se uma serie de golpes e medindo em cada serie a variação de altura (ΔL). Com os resultados das cinco amostras, traça-se as curvas correspondentes em papel mono-logarítmico, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Resultados do Ensaio MCV

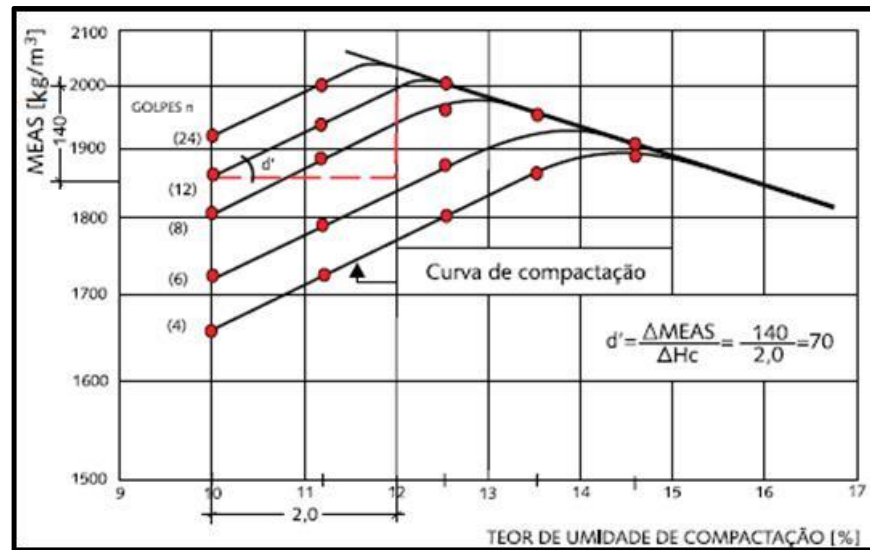


Fonte: VILLIBOR e NOGAMI, 2009.

Segundo Villibor e Nogami (2009), o coeficiente c' utilizado na classificação Geotécnica MCT é o coeficiente angular de uma reta representativa entre as curvas Mini-MCV, conforme mostrado da Figura 6.

Com os valores dos resultados da compactação, se traçam as curvas correspondentes às massas específicas aparentemente secas – MEAS, versus teor de umidade, extraindo-se o coeficiente d' , que reflete o tamanho dos grãos e a probabilidade do solo ter comportamento laterítico (VILLIBOR E NOGAMI, 2009). O coeficiente é obtido traçando uma reta na altura de doze (12) golpes, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Curva de Compactação.



Fonte: VILLIBOR e NOGAMI, 2009.

Determinados os coeficientes c' e d' , determina-se a perda de massa por imersão, levando os corpos de prova compactados a um recipiente onde possam estar submerso, extrai-se cerca de um centímetro (1,0 cm) de massa de solo, sendo que serão deixados imersos por vinte (20) horas. O material que se desprender, no período de vinte (20) horas, será levado à estufa para secagem e posteriormente calculada a massa que foi perdida do corpo de prova (DNIT, 2006).

Para determinação da perda de massa por imersão, utiliza-se da equação 1:

$$P_i = 100 \times (M_d/M_o). \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

M_d - é massa de solo seco, desprendido do corpo de prova imerso

M_o - é massa de solo seco do corpo de prova (10,00 mm), após compactação.

A classificação termina com o cálculo do índice e' , através da equação 2:

$$e' = (20/d' + P_i/100)^{1/3} \quad (\text{eq.2})$$

Onde:

d' - extraído da curva da figura 8, através das medias das massas específicas aparentemente secas.

Pi – é perda de massa por imersão, calculado através da equação 1.

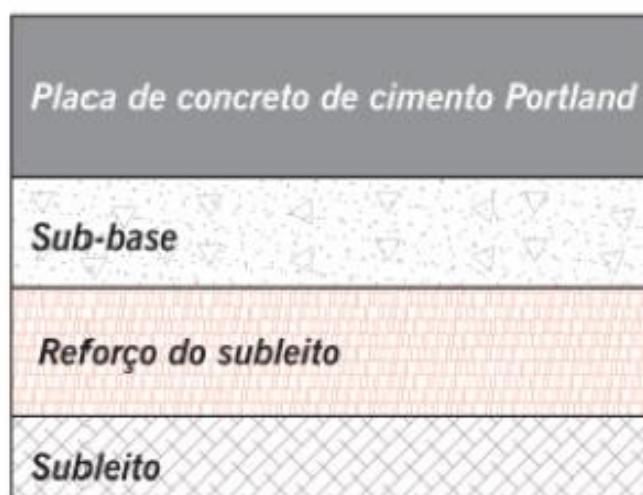
3.3 Pavimentos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT - NBR-7207, os pavimentos constituem-se por uma estrutura construída sobre um solo existente no local, que é denominado leito, com a função de resistir aos esforços horizontais e verticais provenientes dos veículos.

Para Bernucci et al. (2006), os pavimentos podem ser divididos em três classes: rígido, semirrígido e flexível, sendo diferenciados pelas seguintes características:

Os pavimentos rígidos são compostos por três camadas: revestimento, base ou sub-base e subleito ou reforço do subleito. O revestimento é composto por placas de concreto armado ou não, apoiada a uma base ou sub-base de material granular ou material estabilizado, que por sua vez apoia-se ao subleito ou reforço do subleito, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Estrutura do Pavimento Rígido



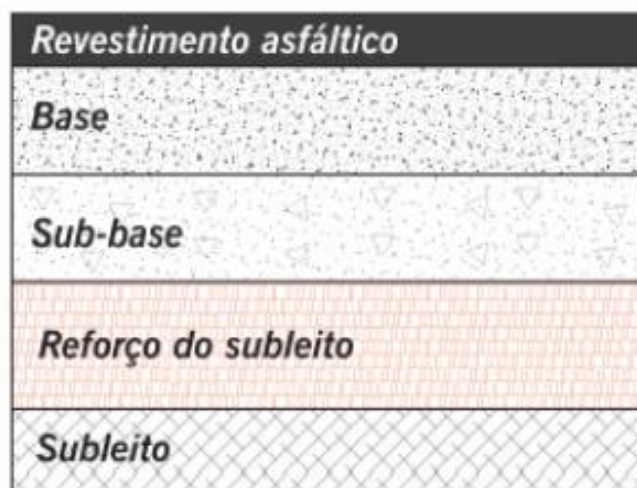
Fonte: BERNUCCI et al., 2006.

Os pavimentos flexíveis e semirrígidos tem sua forma estrutural semelhante, sendo que ambos contemplam cinco camadas, sendo: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. Para os flexíveis e semirrígidos o revestimento é composto de material asfáltico. O que difere um do outro são as

camadas intermediárias da base e sub-base, sendo que para o pavimento flexível são compostas de matérias granulares, misturas de solos e solo; enquanto o semirrígido é composto por materiais cimentados.

A Figura 9 mostra a estrutura do pavimento flexível.

Figura 9 - Estrutura do Pavimento flexível.



Fonte: BERNUCCI et al., 2006.

No Brasil, são predominantes o uso de pavimentos flexíveis nas rodovias, devido ao custo inicial e a facilidade construtiva em comparação a outros tipos de pavimentos. No entanto, a sua estrutura é complexa, sendo dividida em camadas que interagem entre si para que possam suportar as cargas provenientes dos veículos (ROCHA e REZENDE, 2017).

Para Teixeira (2014), o papel do solo no pavimento é notório, pois as camadas de subleito e sub-base, são basicamente constituídas por solos. As camadas de base e sub-base são constituídas por materiais granulares, por serem consideradas as camadas nobres do pavimento por suportar a maior parte dos esforços. No entanto, o solo muitas vezes se torna parte constituinte do material utilizado, podendo estar no seu estado natural ou estabilizado, quando o mesmo for o elemento principal.

Conforme Machado et al. (2017), para esse tipo de pavimento procura-se utilizar material local com comportamento geotécnico que satisfaça as Normas rodoviárias em vigor.

3.3.1 Características do Solo para Pavimentação

Na pavimentação, o solo é o terreno de fundação, chamado leito. Segundo o DNIT (2006), os solos podem ser utilizados para compor as camadas de pavimentos de base, sub-base, reforço do subleito e o próprio subleito.

Os solos, para serem utilizados em camadas de pavimentos, são selecionados por meio de suas propriedades, que são: deformabilidade, permeabilidade e aumento da capacidade de suporte, quando compactados. (BERNUCCI et al. 2006).

Em se tratando de pavimento flexível, o solo para ser utilizado em camadas de pavimento passa pelo ensaio de CBR – California Bearing Ratio, proposto pelo eng.º O. J. Porter no estado da Califórnia em 1939 e desenvolvido pelo United Corps of Engineers – U.S. Army, para avaliar a capacidade de suporte (MEDINA, 1997).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT através da NBR-9895:2016, diz que o valor do CBR é dado em porcentagem (%), pois reflete a resistência equivalente do solo compactado em relação à rocha de origem (brita).

O solo, para ser utilizado como camada de pavimento, necessita de uma resistência mínima exigida.

O DNIT (2006) padronizou a classificação dos solos para uso em camadas de pavimentação, adotando um valor mínimo de CBR. Sendo assim, para que o solo possa compor a camada de subleito, necessita de CBR mínimo entre 2% e 3%; para reforço do subleito deve ter CBR maior que 3%; para sub-base ter CBR mínimo de 20%, sendo recomendado valores maiores que 40%. Para a base, deve ter CBR mínimo de 80%.

Quando o solo natural não atende as exigências mínimas, surge a técnica de estabilização de solo, para que através de misturas de outros materiais, se possa melhorar sua qualidade e desempenho (COELHO et al,2015).

3.4 Estabilização de Solos

Com o surgimento dos automóveis no início do século XVIII, as vias que não estavam preparadas para receber o tráfego dos veículos começaram a sofrer deformações, necessitando de estabilização, pois eram constituídas de

materiais argilosos que em contato com a água atolavam os veículos (FRAENKEL, 1980).

Segundo Fraenkel (1980), a primeira tentativa de estabilização foi no sentido de petrificar as vias, logo a diante no final do século XVIII e início do século XIX, na Inglaterra e na França, estudavam-se a estabilização dos solos utilizando rodas metálicas e tração animal para tal feito.

A estabilização passou, então, a ser estudada para melhoramento do solo para suportar as cargas provenientes dos veículos, onde nem sempre os solos locais apresentavam condições técnicas que atendessem as necessidades do tráfego.

A estabilização do solo passou a ser definida como o um processo natural ou artificial que altera as características originais do solo, tornando-o mais resistente a deformações, modificando seu comportamento interno entre as partículas de sólidos e a água, ocasionando ainda a diminuição dos índices de vazios. (HOUBEN E GUILLAUD, 1994).

Machado et al. (2017), afirma que a estabilização de solo é feita utilizando técnicas para torná-lo mais resistente aos esforços do tráfego, fazendo com que aumente sua capacidade de suporte e conseqüentemente a durabilidade, sendo os processos de estabilização mais usuais a estabilização granulométrica, mecânica e química.

Para Coelho et al,(2015) a estabilização é um método utilizado frequentemente na engenharia para melhorar as propriedades e características do solo, onde as técnicas para melhorar as características do solo dividindo-se em: estabilização mecânica; estabilização granulométrica e estabilização (química), com aditivos.

Os métodos de estabilização de solos, assim como os principais materiais utilizados e os possíveis materiais a serem utilizados, são apresentados a seguir.

3.4.1 Estabilização Granulométrica

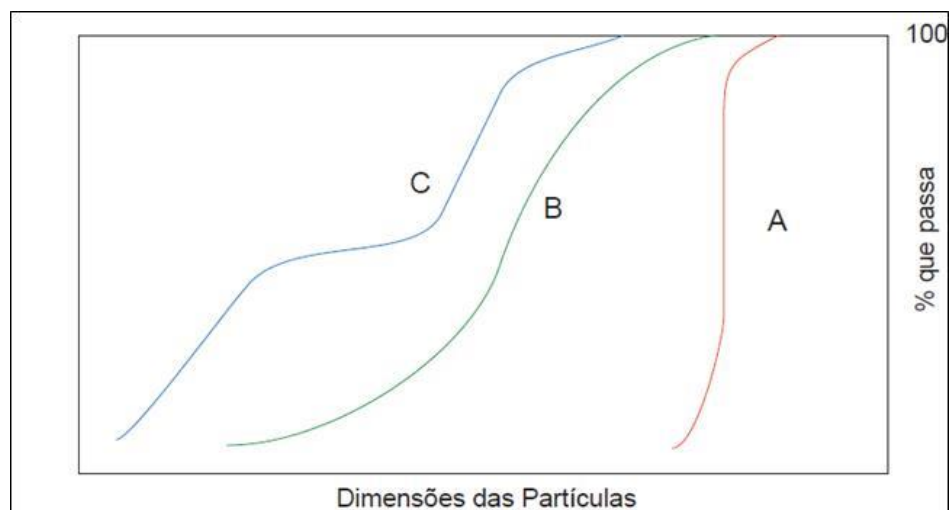
Segundo Almeida et al, (2010), a estabilização granulométrica (também pode ser chamada de correção granulométrica), ocorre pois nem sempre o solo local possui qualidade satisfatória para uso em camadas de pavimentos, sendo

assim feita sua separação granulométrica, analisando seus pontos falhos e misturando material com frações tais que complementam sua granulometria.

Almeida (2010), afirma que a maneira mais simples e usual da estabilização granulométrica é a mistura do solo natural como encontrado, com outro solo também em condição natural que não satisfaz as exigências de norma, produzindo um novo material.

Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006), utiliza-se das peneiras de abertura: 0,075mm(#200), 0,15mm(#100), 0,42mm(#40), 2,09(#10) e 4,8(#4), para conhecer a granulometria do solo, o que permite traçar a curva granulométrica em escala semi-logarítmica. Através da forma da curva, como mostra a Figura 10, pode-se distinguir o tipo de granulometria, sendo: Curva (A) granulometria uniforme; Curva(B) granulometria bem graduada e Curva (C) granulometria mal graduada.

Figura 10 - Tipos de Curvas Granulométricas.



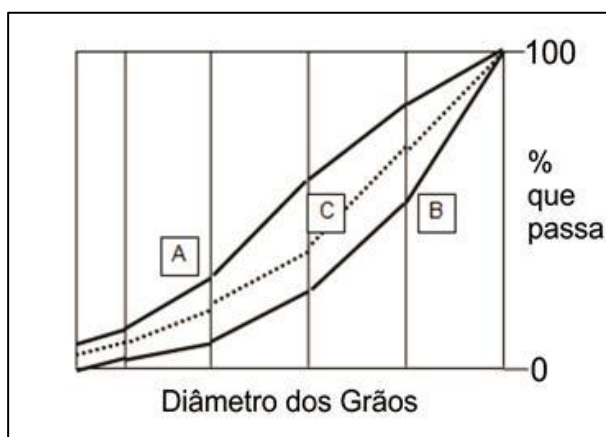
Fonte: DNIT (2006)

A Norma DNIT 141/2010 – ES, especifica a granulometria ideal para os solos serem utilizados como camada de base de pavimentação. Fornece seis faixas de especificação granulométrica, como mostrado na Tabela 4 e na Figura 11. A curva granulométrica deve se comportar dentro dos limites inferior e superior da faixa de especificação.

Tabela 4 - Faixas de Especificação Granulométrica.

Faixas de Orientação Granulométrica							
Peneiras	Faixas de Classificação						Tolerância da Faixa
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso que passa						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"(25,4mm)	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"(9,52mm)	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
4,76mm(#4,0)	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
2,00mm(#10)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
0,42mm(#40)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
0,074mm(#200)	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: Adaptado DNIT (2010).

Figura 11 - Curva de Enquadramento em faixa granulométrica.

Fonte: Adaptado DNIT (2010)

Nos estudos de Coelho et al.(2015); Machado et al. (2017); Mogrovejo (2013); Rocha e Rezende (2017); Pereira et al. (2017), entre outros, para se ter uma estabilização granulométrica de um solo, não é necessário misturá-lo somente com outro solo ou agregado (brita), o que é normalmente utilizado; mas a utilização de materiais alternativos que possuem partículas resistentes, sendo que resíduos que possuam uma tal granulometria que se misturada ao solo melhora sua resistência, tem emprego na atualidade.

3.4.2 Estabilização Química

A estabilização química consiste na utilização de um ou mais aditivos, incorporando-os ao solo. Modifica-se as características geotécnicas do solo pela relação predominantemente química, ou seja, as propriedades do solo são alteradas pela reação química entre aditivo e partículas do solo (WINTERKORN e PAMUKCU, 1991).

Para França (2003), a estabilização química consiste na alteração da estrutura do solo, adicionando-se aditivos em quantidades que melhorem suas propriedades físicas e mecânicas. Os aditivos utilizados para estabilização variam de produtos industrializados a resíduos industriais.

Segundo Patrício (2015), a estabilização química é o processo onde se utiliza material químico em mistura com o solo, para melhorar suas propriedades e conseqüentemente sua resistência. Esse material pode ter características cimentantes ou não, desde que ao ser misturado ao solo proporcione aumento de capacidade de suporte.

Segundo Santos (2013), a estabilização química vai além dos métodos convencionais de misturas de um aditivo químico como cimento ou cal. Podem ser utilizados além dos métodos convencionais como solo-cimento e solo-cal, métodos alternativos como: a estabilização com cinzas volantes ("*fly ash*") e escórias de alto forno ("*blast furnace slag*"), a estabilização com o emprego de sais (cloretos, ácido fosfórico), lignina, silicatos de sódio ("*water glass*"), aluminatos de cálcio, sulfatos de potássio, óxidos de ferro, cinzas pozolânicas de turfas e restos de atividade agrícola (palha de arroz, casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar etc.).

A estabilização química deve propiciar ao solo propriedades mínimas para uso em camadas estruturais de pavimento.

Conforme Instrução de Projeto (IP-DE-P00/001) de 2006, do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP), os solos estabilizados quimicamente, deverão apresentar propriedades geotécnicas condizentes com a camada estruturante no qual poderá ser utilizada. Para Sub-base orientam-se misturas que oferecem capacidade de suporte (CBR) maior ou igual a 30%, já para base a exigência da capacidade de suporte (CBR) obrigatoriamente deverá ser igual ou superior a 80% (DER, 2006).

3.4.3 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica compreende a aplicação de uma energia ao solo (compactação), capaz de diminuir a quantidade de vazios e aproximar melhor os grãos, aumentando sua resistência, promovendo a diminuição da permeabilidade e da deformabilidade (MOGROVEJO, 2013).

Trindade (2008), afirma que a estabilização mecânica diminui o índice de vazios do solo, devido à expulsão de ar por compactação, aproximando suas partículas e o tornando mais resistente.

Para Santos (2013), a estabilização mecânica é um complemento a outras estabilizações (granulométrica e química), pois a compactação por si só não estabelece um processo de estabilização, e sim um complemento.

3.4.4 Estabilização com Materiais alternativos

A estabilização, conforme citada por diversos autores como: Winterkorn e Pamukcu, (1991); Guimarães (2002); França (2003); Villibor e Nogami, (2009); Dalla, (2009); Coelho et al.(2015); Machado et al. (2017); Mogrovejo (2013); Rocha e Rezende (2017); Pereira et al. (2017); Santos (2013), entre outros, busca a utilização do solo local de forma que possa diminuir os impactos ambientais e o custo final do pavimento, com resistência e qualidade.

A escassez de materiais naturais e as restrições ambientais citadas por Machado et al. (2017), traz uma nova vertente aos estudos para melhorar as características dos solos para seu uso em camadas de pavimento, com o uso de materiais alternativos que possam ter características as quais, quando misturado ao solo, possa aumentar sua resistência, seja por reações químicas ou por arranjo granulométrico.

No estudo de Machado et al. (2017), foi utilizado um polímero industrial, desenvolvido a base de Éster do Ácido Acrílico, produto biodegradável, não contaminante e solúvel na presença de água, para estabilização de solo no estado de Sergipe, como agente químico. Foram adicionadas ao solo natural porções de 2% a 6% de polímero. Os resultados obtidos mostraram um aumento no índice de suporte Califórnia (ISC) e na resistência a compressão simples, concluindo que a adição de 6% do polímero ao solo atendeu as exigências da

norma vigente, melhorando significativamente as propriedades geotécnicas do solo.

Coelho et al.(2015), em seus estudos, usou lodo ativado de uma estação de tratamento de esgoto do estado do Paraná, misturado a um solo argiloso na proporção 1:1 (solo – lodo) e a um solo arenoso na proporção 1:0,25 (solo – lodo), ambos com adição de cimento de 6% e 10%. Todas as misturas obtiveram resultados que viabilizam seu uso no subleito da camada de pavimentação, sendo que a mistura com adição de 10% de cimento pode ser utilizada em bases de pavimentação.

Nos estudos de Mogrovejo (2013), a estabilização do solo foi através de papel Kraft, resíduo reciclado de sacos de cimento, beneficiado em forma de fibra e que foi misturado a um solo argiloso e outro arenoso nas proporções de 5%, 10% e 15%, da região de Campinas-SP. Para análise de seus resultados ele avaliou as resistências dos solos em seus estados naturais e após adição da fibra. Os resultados obtidos mostraram aumento da resistência ao cisalhamento em todas as misturas, principalmente no solo argiloso. O autor concluiu que a utilização do papel Kraft em estabilização de solo é viável.

Santos (2013), utilizou escoria de aciaria e cinza volante da queima de carvão de termelétrica, para estabilizar solos do estado de Minas Gerais. No seu estudo foram misturados os resíduos aos solos na proporção de 10% e 20% de escoria de aciaria e as porções de 75%, 87,5 e 100% de cinza volante a massa seca de solo. Analisados seus resultados, o autor concluiu pela viabilidade de uso em camadas de pavimento dos resíduos industriais.

Resende et al, (2014), em seus estudos, utilizou a cinza do cavaco de eucalipto para estabilização de solos para uso em rodovias, que devido ao seu alto teor de cálcio possui características semelhantes a cal hidratada, que por sua vez pode apresentar atividades cimentantes.

Mishra (2012), utilizou para estabilização de solos a cinza volante em seus estudos, misturada com a cal hidratada. Nos estudos, foram adicionados 3% de cal hidratada e 30% de cinza volante em relação à massa de solo, atingindo um CBR de 56%. Ao adicionar 2% de cal hidratada e 30% de cinza volante conseguiu-se um CBR de 48%. Apesar da diminuição do CBR, o ganho de resistência em relação ao solo natural foi de 21 vezes, uma vez que o CBR do

solo natural era de apenas 2,3%. Isto possibilitou o uso em sub-bases de pavimentação.

De acordo com os autores citados, o uso de materiais alternativos pode contribuir para diminuição do uso de recursos naturais para estabilização de solo, mostrando a gama de materiais que podemos utilizar e encorajando novas pesquisas com outros materiais.

3.5 Cinza da Queima do Bagaço de Cana de açúcar

No processo de fabricação de álcool e açúcar, a cana de açúcar passa por processo de moagem, resultando em um resíduo denominado bagaço. Grande parte desse bagaço é queimado em caldeira para geração de energia renovável nas usinas sucroalcooleiras. Deste processo de queima origina-se a cinza do bagaço da cana de açúcar (LEAL e CASTRO, 2007).

Segundo Leal e Castro (2007), o reaproveitamento da cinza do bagaço da cana de açúcar poderá contribuir para redução de impactos ambientais, causados pela deposição desse resíduo.

Lima et al. (2012), salienta que as cinzas provenientes da queima do bagaço de cana de açúcar são lançadas nas plantações como adubo. Segundo o autor, estudos da Embrapa comprovaram que esse resíduo não possui nutrientes adequados para o cultivo de cana de açúcar, fazendo com que as usinas sucroalcooleiras busquem por soluções para destinar esse resíduo.

Nos estudos de Osinubi, et al, (2009), estabilizou-se solo laterítico utilizando cinza do bagaço de cana de açúcar, com misturas de até 12% de cinza em relação a massa de solo, para melhorar as características geotécnicas do solo. Foram realizados ensaios de compactação para determinação do CBR do solo com adição de cinza do bagaço de cana de açúcar, onde com a porcentagem de adição de 2% à massa de solo, atingiu-se CBR de 16%, abaixo do limite esperado para bases de pavimentação, que no caso seria CBR de 80%. No entanto, o autor afirma que a cinza do bagaço de cana de açúcar não pode ser empregada ao solo sozinha para estabilização, mas devido as suas propriedades que modificaram a estrutura do solo, recomenda estudos com misturas, visando sua estabilização.

Nos estudos de Ogunribido (2012), a cinza de cana de açúcar foi incorporada ao solo como estabilizante, sendo ensaiadas amostras de solos com percentuais de cinza de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Os seus resultados comprovaram que ao aumentar o teor de cinza no solo, a massa específica da mistura diminuía e o teor de umidade aumentava, resultando em diminuição da resistência. As misturas mostraram que ao incorporar cinza ao solo, o CBR do solo, que em média foi de 8%, chegou a ter diminuição de 4% entre as amostras, dificultando o emprego de mais de 4% de cinza do bagaço de cana de açúcar a mistura do solo.

Ogunribido (2012) concluiu em seus estudos que a cinza da cana de açúcar é um bom estabilizador quando adicionado teores abaixo de 4%, pois não apresentou características pozolânicas. Isso dificultou o aumento do CBR do solo, no entanto ao incorporar cinza a solos lateríticos ocorreu a melhoria de suas características geotécnicas.

Eberemu (2013), nos seus estudos, para diminuição da infiltração de águas em aterros, utilizou solo laterítico com mistura de cinza do bagaço de cana de açúcar, além de compactação, para diminuir percolação da água no solo, conseguindo criar uma barreira hidráulica que impediu a contaminação das águas subterrâneas. Segundo os seus estudos, o bagaço da cana de açúcar foi queimado entre 12 e 24 horas em temperaturas de 500°C a 700°C até que se tornou cinza, sendo em seguida submetida a peneiramento (peneira de 75mm) para se ter um material homogêneo e posteriormente misturada ao solo nas proporções de 4%, 8% e 12%, em relação a massa de solo, sendo feitos ensaios de compactação(Proctor) para o solo natural e com as referidas porcentagens. Os resultados obtidos por Eberemu (2013), foram que ao aumentar a quantidade de cinza necessitou-se de uma maior porcentagem de água para que se atingisse a densidade máxima da mistura. Essas porcentagens variaram de 19% a 20,4% em relação à massa das misturas. Os resultados de resistência ao cisalhamento mostraram que as misturas podem ser utilizadas em barreiras de contenção hidráulicas, concluindo que a cinza do bagaço de cana de açúcar é um ótimo material para mistura no solo, pois devido sua finura ocupa os vazios do solo e conseqüentemente aumenta sua resistência ao cisalhamento e diminui a infiltração de água.

Yadav et al. (2017), utilizou em seus estudos de estabilização de solo para uso em subleito de estradas, as cinzas da casca de arroz, cinza do bagaço de cana de açúcar e cinza de esterco animal. Para análise de viabilidade foram adicionados à massa de solo porcentagens de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12% das cinzas, individualmente. Os materiais casca de arroz, bagaço de cana de açúcar e esterco, passaram por processo de queima até se tornarem cinzas e foram submetidas a peneiramento para homogeneidade das amostras, sendo posteriormente ensaiadas as misturas e conhecido os respectivos CBRs no estado aparentemente seco e saturado das amostras. Segundo os autores, a substituição de 7,5% do solo natural pelas cinzas, fora a mistura que obteve os melhores valores de CBR no estado das amostras aparentemente secas, sendo 7,5 % para solo natural, 19% para o solo com cinza da casca de arroz, 16% para o solo com cinza do bagaço da cana de açúcar e 14% para solo com cinza de esterco. No estado saturado, as amostras apresentaram os melhores valores de CBR com a substituição de 7,5% do solo pelas cinzas. No entanto, o valor máximo do CBR não atingiu 8%. Yadav et al. (2017), concluíram que as cinzas principalmente as de casca de arroz e bagaço de cana de açúcar, quando submetidas a melhorias estruturais, como finura e queima adequada, apresentam características cimentantes se tornando bons estabilizadores de solos para subleitos. Já a cinza de esterco não foi considerado um bom estabilizante, mas não se descartou seu uso como estabilizante, recomendando que a ela seja misturado algum aditivo.

Nos estudos feitos por Alavéz - Ramírez et al. (2012), foi utilizada a cinza do bagaço de cana de açúcar e cal hidratada como estabilizadores químicos de blocos de solos. O cimento tem sido o estabilizante mais utilizado, no entanto, como consequência do alto consumo de energia necessário para sua fabricação e consequente danos ambientais causados pela liberação de grandes quantidades de gases de efeito estufa durante sua produção, a indústria do cimento tem sido apontado como um dos principais contribuintes de Emissões de CO₂. Em vista desta problemática, o autor utilizou-se de cal hidratada e cinza do bagaço de cana de açúcar a fim de substituir o uso do cimento Portland. Foram realizados ensaios de resistências a compressão do solo com 10% de cal, 10% de cimento e a combinação 10% de cal e 10% de cinza do bagaço de cana de açúcar em relação a massa de solo. Os resultados mostraram que a massa específica do solo

aumentou conforme foi adicionada a cinza do bagaço de cana de açúcar, sendo encontrados valores de massa específica máxima para solo natural de $1,83 \text{ g/cm}^3$, solo com 10% de cimento $1,9 \text{ g/cm}^3$, solo com 10% de cal $1,84 \text{ g/cm}^3$ e solo com 10% de cinza e 10% de cal $1,67 \text{ g/cm}^3$. Alavéz - Ramírez et al. (2012), concluíram que a adição de 10% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em combinação com 10% de cal, melhora significativamente as suas propriedades mecânicas de durabilidade, flexibilidade e compressão, comparados a blocos preparados apenas com solo e cal. Os autores justificam essa melhora devido as reações químicas da cal com o solo e da cinza com a cal, devido as propriedades mesmo que pequenas de silicas amorfas contidas na cinza. Deste modo, ela reage quimicamente com os ions de cálcio da cal, formando compostos cimentícios que estabilizam o solo arenoso. Assim, concluíram que a combinação de cinza do bagaço de cana de açúcar e cal, como substituto do cimento na estabilização de blocos de solo compactados, parece ser uma alternativa promissora ao considerar questões de consumo de energia e poluição.

Outros autores como Lopes et al. (2014), Rezende et al. (2017), utilizaram a cinza do bagaço de cana de açúcar em substituição do cimento Portland em concretos.

Os estudos apresentados mostram que a cinza do bagaço de cana de açúcar pode apresentar característica pozolânica ou não, sendo que tal propriedade é influenciada pela finura do material e pelo teor de sílica amorfa, podendo ser alterada pela queima ou modificada em laboratório.

O presente trabalho estudou o uso da cinza da cana de açúcar para estabilização de solo laterítico para bases de pavimentação, tomando como base a experiência dos autores citados nesta revisão bibliográfica, mas optou-se por utilizar a cinza *in natura* adicionada ao solo, além da cinza com incorporação de cal hidratada ao solo. Outras misturas foram feitas, conforme descrito no item 4 - Metodologia.

3.6 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos consistem em métodos que, através da compactação e mistura de solos de texturas distintas, modificam o estado do solo aumentando sua resistência (ONYELOWE et al., 2012).

A compactação é o processo através do qual uma energia é empregada mecanicamente, aproximando as partículas de solo e aumentando o entrosamento entre elas, ocasionando o aumento da resistência de cisalhamento, peso específico e compressibilidade. O processo de compactação reduz o volume de vazios contidos no solo, reduzindo a permeabilidade, conseqüentemente o tornando mais estável e aumentando sua capacidade de suporte (Maia et al., 2015).

Segundo Pinto (2006), o processo de compactação vai depender do tipo de obra e do solo disponível, dependendo da umidade que o solo se encontra e da densidade que se procura atingir.

Pinto (2006) relata que a técnicas de compactação foi creditada ao engenheiro Ralph Proctor no ano de 1933, sendo o ensaio padronizado e conhecido mundialmente como ensaio de compactação de Proctor, denominado somente Ensaio de Proctor.

3.6.1 Ensaio de Proctor

O ensaio de Proctor determina a densidade aparentemente seca máxima e a umidade ótima de solos, para fins rodoviários (MASSAD, 2016).

O ensaio de Proctor foi padronizado no Brasil pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 7182:2016.

Os valores de densidade seca máxima do solo e umidade ótima são usados para realização de outros dois ensaios, Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) e Ensaio de Resistencia a compressão simples.

3.6.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou Califórnia Bearing Rratio (CBR)

O índice de suporte Califórnia foi desenvolvido por Porter em 1929 e padronizado pela ABNT NBR 9895:2016. Seu uso é para fins rodoviários, sendo que os resultados são parâmetros para os projetos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, até os dias atuais (CAPUTO et al, 2016).

Através dos valores de umidade ótima, conhecido no ensaio de Proctor, são moldados os corpos de provas e ensaiados segundo NBR 9895:2016.

3.6.3 Ensaio de Resistência a Compressão Simples

O ensaio de compressão simples foi padronizado pela ABNT NBR-12025:2012 para solo-cimento.

O ensaio consiste em aplicação de um carregamento axial ao solo, moldado em cilindro, até atingir sua ruptura.

Segundo Dalla Rosa (2009) esse ensaio é muito utilizado quando os solos são estabilizados quimicamente, devido a sua simplicidade de execução, custo baixo e confiabilidade. O ensaio é o mais utilizado para rompimentos de corpos de prova de concreto. Assim, o ensaio objetiva analisar a viabilidade da estabilização química em solos.

4 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida a partir da busca de informações em artigos, teses, revistas, normas, dentre outros, visando embasar o processo de estabilização de solos e viabilizar a mistura de cinza de bagaço de cana de açúcar.

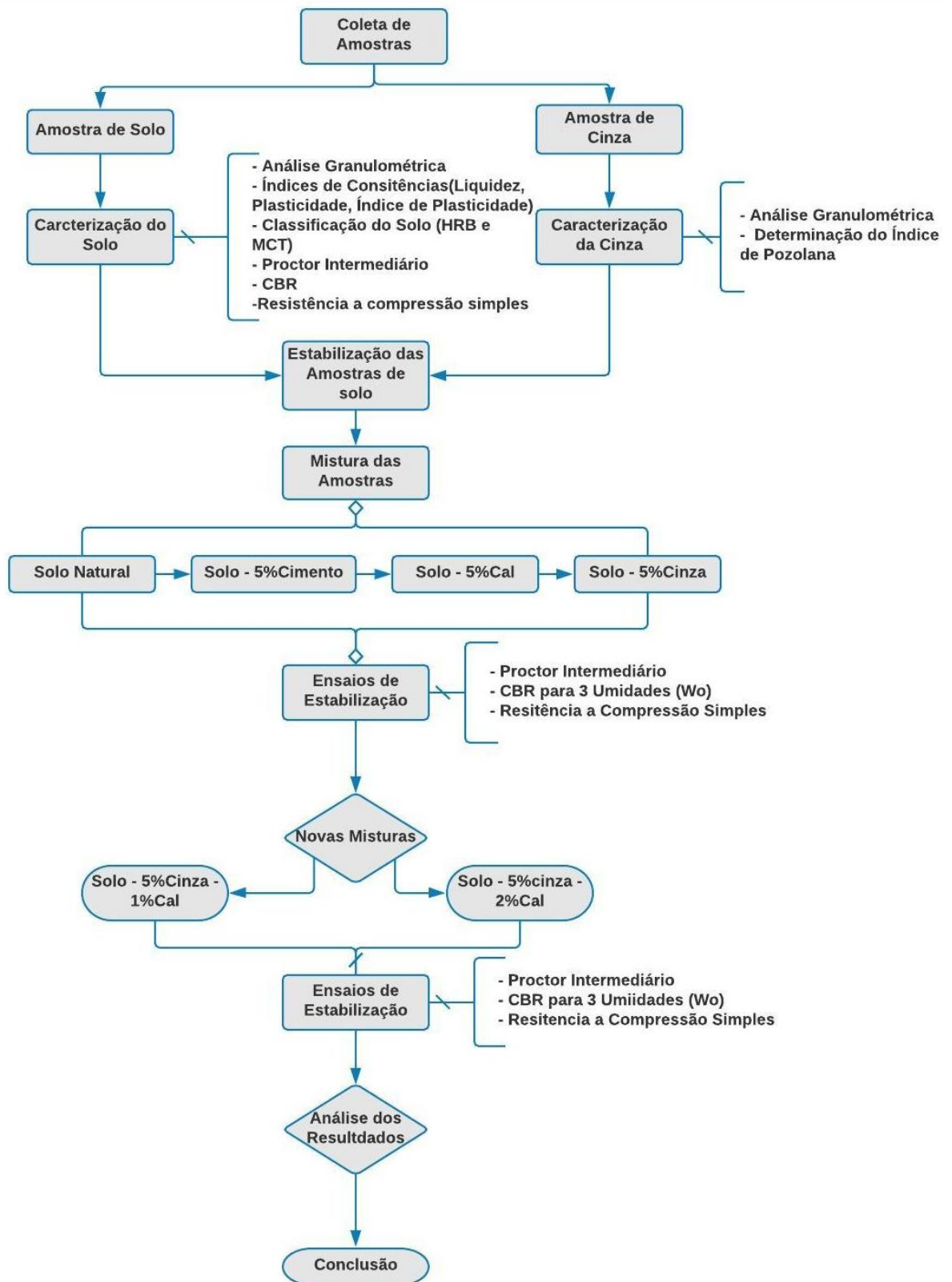
A parte experimental se divide nas etapas: coleta de amostra de solo, classificação da amostra de solo, ensaios mecânicos da amostra de solo, coleta de amostra de cinza de bagaço de cana de açúcar, estabilização da amostra de solo utilizando-se misturas entre: solo x cal hidratada de marca conhecida no mercado, solo x cimento Portland CII –E-32 de marca conhecida no mercado, e solo x cinza de bagaço de cana de açúcar.

Em todas as misturas utilizou-se solo com a adição de 5% de estabilizante, quer seja de cimento, cal ou cinza, a sua massa total.

Posteriormente após ensaios realizados com misturas contendo 5% dos materiais, o solo foi estabilizado utilizando-se a mistura solo x cal x cinza, onde foi adotado um percentual de 5% de cinza e 1% de cal hidratada em relação a massa de solo. Em seguida, o solo foi novamente ensaiado, adotando-se percentuais de 5% de cinza de bagaço de cana de açúcar e 2% de cal hidratada.

O fluxograma da Figura 12 mostra as etapas realizadas na pesquisa.

Figura 12 - Fluxograma das Etapas da Pesquisa



Fonte: Autor

4.1 Coleta de amostra de Solo

A amostra de solo foi coletada próxima à usina canavieira, situada entre os municípios de Barretos e Guáira com coordenadas geográficas de localização latitude 20°27'30.65"S e longitude 48°27'43.79"O.

O local escolhido para coleta da amostra de solo foi uma área próxima à estrada de acesso a usina canavieira, onde se fez uma limpeza superficial para que o material coletado tivesse homogeneidade e que não houvesse necessidade de escavação profunda.

Por se tratar de um local onde poderia haver mudanças no estado do solo, devido às atividades no local com o passar dos dias, foi realizada a coleta de todo o solo necessário para uso durante a pesquisa.

A Figura 13 mostra o local e forma de coleta da amostra de solo, este foi identificado e colocado em sacos transparentes com capacidade de vinte e cinco (25) quilos (kg).

Figura 13 - Forma de coleta de amostra de solo



Fonte: Autor

4.2 Caracterização e Classificação de Solo

Após coleta, a amostra de solo foi levada ao laboratório onde foi separada em bandejas e seca em estufa à temperatura de 105 °C durante 12 horas.

O solo seco em estufa foi esfriado em temperatura ambiente e posteriormente destorroado utilizando-se de um recipiente cerâmico e da ferramenta denominada “Almofariz com mão de borracha”, um soquete de madeira com a ponta recoberta com borracha. Este procedimento é utilizado para quebrar os torrões do solo, mantendo sua granulometria de origem, sem que os grãos sejam triturados NBR 6457:2016.

A Figura 14 mostra o recipiente cerâmico e a ferramenta utilizada para o procedimento de destorroamento “Almofariz com mão de borracha” e o solo seco antes e depois de destorroado.

Figura 14 - Recipiente cerâmico e Almofariz com de mão borracha e Solo seco destorroado e não destorroado.



Fonte: Autor

O solo destorroado foi submetido a análise granulométrica segundo NBR 7181:2017 (Análise Granulométrica)

Na Figura 15 é mostrada a porção de solo e o conjunto de peneiras utilizado nos ensaios segundo NBR 7181:2016.

Figura 15 - Solo utilizado para peneiramento e conjunto de Peneiras



Fonte: Autor

4.2.1 Limites de Consistência

O solo foi submetido aos ensaios de Limite de Liquidez NBR 7180:2016 e Limites de Plasticidades NBR 6459:2016.

Para o ensaio de limite de liquidez pegou-se uma porção de solo cem gramas (100g), solo este que passou na peneira de número quarenta (nº 40) de malha 0,42mm, colocou-se em um recipiente cerâmico para que se pudesse adicionar água aos poucos e com auxílio de uma espátula misturou-se o solo com a água tornando uma pasta homogênea para se iniciar o ensaio.

Colocou-se uma porção de solo na concha do aparelho de Casa Grande e realizando assim uma ranhura no solo no centro da concha com cinzel (gabarito de aproximadamente 10mm de espessura de profundidade e largura).

Depois de feita ranhura, foi girada a manivela do aparelho de Casa grande para que se iniciasse o ensaio, mantendo uma velocidade constante de dois (2) giros por segundo na manivela.

Contou-se o número de golpes (quantas vezes a concha tocou a base de madeira) para fechamento da ranhura, retirou-se uma porção de solo, que foi colocada em uma cápsula metálica para ser levado a estufa para secagem.

O procedimento se repetiu por mais quatro (4) vezes totalizando cinco (5) procedimentos, onde para cada um foi adicionado uma quantidade de água

distinta, o ensaio foi encerrado depois de aproximadamente quinze (15) golpes, pois com esta quantidade, a ranhura já havia se unido.

Na Figura 16 o aparelho de Casagrande e o solo sendo ensaiado.

Figura 16 - Aparelho de Casagrande e o solo sendo ensaiado.



Fonte: Autor

O ensaio de limite de plasticidade foi executado com aproveitamento do solo utilizado no ensaio de limite de liquidez orientação (NBR 7180:2016), onde já se possuía um determinado teor de umidade, o solo já passava do estado plástico para o estado líquido.

Tomou-se uma pequena porção do solo, que foi rolado sobre uma placa de vidro esmerilada com a palma da mão até que se formou um cilindro de aproximadamente cem milímetros 100mm, verificando-se assim, o aparecimento de fissuras de três milímetros (3mm) em suas geratrizes.

Após aparecimento das fissuras, pegou-se a porção de solo, a mesma foi colocada em cápsula metálica e levada para secagem em estufa. Foram realizados cinco (5) procedimentos para finalizar o ensaio.

A Figura 17 mostra a placa de vidro esmerilada e o solo no formato cilíndrico de aproximadamente cem milímetros 100mm.

Figura 17 - Placa de vidro esmerilada e solo no formato cilíndrico

Fonte: Autor

Com os resultados da análise granulométrica dos Limites de Consistências (Liquidez e Plasticidade), foi calculado o Índice de Plasticidade (IP) do Solo, que se dá pela diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), sendo então calculado pela equação 3 (NBR 7180:2016):

$$IP = LL - LP \quad \text{(eq.3)}$$

Quando IP for zero (0) ou der valor negativo, admite-se IP = NP (não plástico).

Da Tabela 5, pode-se determinar o tipo de solo através do LL e do IP, típicos de solos brasileiros.

Tabela 5 - Limite de liquidez e índice de plasticidade de alguns solos típicos brasileiros.

Índices de Consistência, de alguns solos brasileiros		
Solos	LL (%)	IP (%)
Residuais de Arenito (arenosos Finos)	29 – 44	11 - 20
Residual de Gnaisse	45 – 55	20 - 25
Residual de Basalto	45 – 70	20 - 30
Residual de Granito	45 – 55	14 - 18
Argilas Orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Argilas Orgânicas de baixadas litorâneas	120	80
Argila Porosa vermelha de São Paulo	65 a 85	25 a 40
Argilas variegadas de São Paulo	40 a 80	15 a 45
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20 a 45	3 a 15
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	64	42

Fonte: Adaptado de Pinto(2006)

Para se analisar a compressibilidade ou índice de compressão (CC) do solo, utilizou-se da equação 4 (Pinto, 2006):

$$CC = 0,009 \times (LL - 10) \quad \text{(eq.4)}$$

Também por equação definida pelo DNIT (2006), calculou-se o Índice de Grupo (IG), pela equação 5, sendo:

$$IG = 0,2 a + 0,005 a.c + 0,01 b.d. \quad \text{(eq. 5)}$$

Onde:

\underline{a} = É a porcentagem (%) de material que passa na peneira de abertura 0,074mm (nº 200), subtraindo uma constante de 35 (O valor de \underline{a} de na equação tem variação entre 0 e 40).

\underline{b} = É a porcentagem (%) de material que passa na peneira de abertura 0.074mm (nº 200), subtraindo uma constante de 15 (O valor de \underline{b} na equação tem uma variação de 0 a 40).

\underline{c} = É o valor do limite de liquidez, subtraindo uma constante de 40. (O valor de \underline{c} na equação tem variação de 0 a 20).

\underline{d} = É o valor do Índice de plasticidade subtraindo uma constante 10.(O valor de \underline{d} na equação tem variação de 0 a 20).

O valor mínimo de IG é zero (0) e o valor máximo vinte (20). Sendo assim IG com valores próximos a vinte (20) são considerados de baixa capacidade de suporte e IG próximo à zero (0) são considerados de boa capacidade de suporte (ASTM D3282).

4.2.2 Classificação HRB

Além da análise granulométrica, o solo foi classificado utilizando o sistema de classificação mais difundido no Brasil nos meios rodoviários: A Classificação Highway Research Board (HRB) ASTM D3282 da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) utilizando os resultados obtidos na análise granulométrica e Limites de Consistências.

A partir da porcentagem que passou na peneira de nº 200, foi determinado qual o tipo de solo se está trabalhando; se a porcentagem passante maior que 36% solo de granulação fina e se menor que 35% solo de granulação grossa.

A classificação iniciou-se da esquerda para a direita, conforme orienta a norma, por eliminação dos percentuais que não atende aos tabelados, conforme Tabela 3 do item 3.2.2.

Foram analisados os percentuais das peneiras de nº 10 e nº40 e verificado qual a classe de solo se encaixariam. Posteriormente, também da esquerda para direita, foram analisados os índices de consistências limite de liquidez e Índice de plasticidade e o índice de grupo para confirmação da classe de grupo se encaixou o solo.

Por eliminação, da esquerda para a direita, a classe de solo que mais se encaixa nos resultados dos parâmetros citados acima, é o solo classificado.

4.2.3 Classificação MCT

Para classificação do solo em relação às suas características lateríticas foi utilizado à classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical).

Essa classificação foi permitida após ensaios mecânicos, para obtenção dos dados relevantes. A classificação laterítica ou não laterítica do solo obedeceu à norma rodoviária DNER-CLA 259/96.

Foram realizados ensaios de Mini – MCV segundo a norma rodoviária DNER-CLA 258/96 e de perda de massa por imersão, seguindo a norma rodoviária DNER-CLA 256/96.

Para os ensaios foram preparadas cinco (5) amostras de solos de 500g de massa, com diferentes umidades, sendo as umidades respectivamente, 20% (100g) de água, 22% (110g), 24%(120), 26%(130) 28%(140g).

As amostras foram homogeneizadas e deixadas em repouso em sacos plásticos por 24 horas, conforme orienta a norma DNER-CLA 258/96.

A Figura 18 mostra as amostras acondicionadas para ensaio.

Figura 18 - Amostras acondicionadas para ensaio



Fonte: Autor

Para realização do ensaio, utilizou-se da amostra de solo 200g, que foi colocada nos cilindros miniaturas, começando pela amostra com menor teor de umidade e levado ao equipamento para compactação.

Após compactação das cinco (5) amostras, quando se verificou uma diferença de altura ao se aplicar a energia de menos de 2,0mm em cada amostra, o ensaio foi interrompido e se retirou de cada cilindro 10 mm de solo e os cilindros foram levados para imersão por 20 horas conforme orienta a norma DNER-CLA 256/96.

A Figura 19 mostra os cilindros imersos em água.

Figura 19 - Cilindros imersos em água



Fonte: Autor

Através dos ensaios de compactação Mini-MCV, foram determinados os coeficientes empíricos c' e d' extraídos dos gráficos conforme exemplificado no item 3.2.3 e mostrado nas Figuras 7 e 8.

Através do resultado do ensaio perda de imersão e do coeficiente d' calculou-se o índice e' .

A perda por imersão (P_i) foi calculada pela equação 1 e o índice e' foi calculado através da equação 2, citadas no item 3.2.3.

Para classificação MCT usou-se o gráfico da Figura 5 do item 3.2.3, de posse dos coeficientes c' e o índice e' .

4.3 Ensaio Mecânicos do Solo e do Solo Estabilizado

Os ensaios mecânicos utilizados Proctor Intermediário foram feitos seguindo a NBR 7182:2016, assim como o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) que seguiu a NBR 9895:2016 e o ensaio de Compressão simples que seguiu a norma NBR-12025:2012.

4.3.1 Ensaio de Compactação (Proctor)

O ensaio de Proctor foi realizado seguindo a NBR 7182:2016, onde se tomou uma porção de solo de quatro mil gramas (4000g) no seu estado seco, para realizar o ensaio de Proctor Intermediário.

Para realização do ensaio de Proctor intermediário, foi adicionada aleatoriamente água ao solo seco, atingindo-se certa umidade para que se pudesse iniciar a compactação conforme a orientação da norma, para que se tenha uma homogeneidade para dar início ao ensaio, não muito seco e não muito úmido.

Utilizou-se de cilindro de altura, diâmetro e peso conhecidos, soquete de peso e altura de queda conhecidos e padronizados conforme orientação da norma (NBR 7182:2016). Inicialmente, para realização do ensaio de Proctor Intermediário, iniciou-se com quinhentos e cinquenta gramas (550g) de água e posteriormente foram adicionados, duzentos gramas (200g), cento e cinquenta gramas (150g), e cem gramas (100g).

Foram moldados cinco (5) cilindros e compactados conforme orientação da norma. Como houve reaproveitamento do solo, para cada corpo de prova que foi ensaiado, o solo foi totalmente destorroado e homogeneizado novamente, para que toda a amostra de solo ficasse com a mesma umidade.

Houve a variação das quantidades de água, pois, as mesmas são colocadas aleatoriamente, de acordo com o comportamento do solo e orientação da norma.

Após cada corpo de prova ensaiado, retirou-se uma porção de solo, sendo acondicionado em uma cápsula metálica e levado à estufa para secagem. Este procedimento se repetiu para os cinco (5) corpos de provas de Proctor Intermediário.

Com o término do ensaio de compactação e secagem das amostras retiradas dos corpos de provas ensaiados, e com os resultados da massa específica e umidade, foi obtida a curva de compactação e, assim, pôde-se obter a massa específica aparentemente seca máxima e a umidade ótima do solo, através do ponto mais elevado da curva de compactação.

4.3.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR)

Para realização do ensaio CBR, necessitou-se dos resultados obtidos no ensaio de Proctor Intermediário, onde se conheceu a massa específica aparentemente seca máxima e a umidade ótima do solo para a energia de compactação Intermediária.

Com os resultados da umidade ótima, preparou-se uma porção de cinco mil gramas (5000g) de solo seco e foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima, 1200g de água, conhecida através da curva de compactação do ensaio de Proctor Intermediário para realização do ensaio.

O ensaio seguiu a NBR 9895:2016. Foram moldados três (3) corpos de provas para o CBR referente à energia de Proctor Intermediário.

Optou-se por realizar três (3) ensaios para energia Intermediária, para que assim se evitassem erros, sendo um corpo de prova moldado na umidade ótima de ensaio $W_o = 23\%$, $W_o = 22\%$ e $W_o = 24\%$.

Conforme orienta a norma; preparados com disco espaçador, sobre carga e manômetro de expansão e colocados submersos em água por quatro (4) dias.

Na Figura 20 mostra os materiais utilizados para realização do ensaio de CBR.

Figura 20 - Materiais usados no ensaio de CBR



Fonte: Autor

Durante os quatro (4) dias mediu-se a expansão ou contração das amostras moldadas, e no quarto (4º) e último dia, os corpos de provas foram retirados da água e deixados por aproximadamente vinte (20) minutos escoando água.

Posteriormente, foram levados à prensa hidráulica Marshall da marca Test Via, modelo VS 731, serie 228, com capacidade de 5000kgf, para serem ensaiados, alcançando-se assim a determinação do grau de compactação.

Na Figura 21 mostra o corpo de prova sendo ensaiado na prensa.

Figura 21 - Corpo de Prova na Prensa



Fonte: Autor

4.3.3 Ensaio de Compressão Simples

Para realização do ensaio de compressão simples, foram seguidas as orientações da norma NBR-12025:12, onde foram utilizadas para as amostras de solo 'in natura', solo com adição de cal e solo com adição de cinza, o mesmo procedimento.

Após os ensaios de Proctor Intermediários foram moldados os corpos de provas cilíndricos de dimensões 10,0cm x 15,0cm, na umidade ótima de cada amostra.

Para o solo natural a umidade encontrada foi de 23%, solo – cimento de 21%, solo – cal 25%, solo – cinza 21%, solo – 5% cinza – 1%cal de 20% e solo – 5 cinza – 2%cal também de 20%. As amostras foram cuidadosamente extraídas com auxílio de um extrator, sendo deixadas em local reservado por sete (7) dias para cura e posterior ensaio a compressão simples.

Para cada amostra foram moldados três (3) corpos de provas, seguindo o mesmo procedimento de compactação do ensaio de CBR.

As amostras de solo 'in natura' e solo com adição de cinza, apesar de não conterem aglomerante, visando uma análise comparativa, também aguardaram sete (7) dias para serem ensaiadas.

O equipamento utilizado para ensaio das amostras foi uma prensa hidráulica marca Zeloso, modelo PC, serie 351, com capacidade máxima de 10000 Kgf.

A Figura 22 mostra o equipamento com a amostra para ser ensaiada.

Figura 22 - Ensaio de Compressão Simples



Fonte: Autor

4.4 Coleta da Amostra de Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar

A cinza de bagaço de cana de açúcar foi coletada em usina canavieira da região de Barretos, nas coordenadas geográficas Latitude 20°28'50,09"S e Longitude 48°24'35,15"O.

A cinza foi coletada após queima em caldeira da própria usina. A queima do bagaço feita em caldeira, sendo que as temperaturas podem chegar a 520°C. O tempo de queima é variável assim como a temperatura, por depender da demanda da safra (material que chega para moagem) e os dias trabalhados na usina.

O bagaço de cana de açúcar, após moagem, é levado à caldeira por esteiras rolantes, sendo que o excedente da moagem é estocado em pátios, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Pátio de estocagem do bagaço de cana de açúcar



Fonte: Autor

Em seguida, as cinzas do bagaço de cana de açúcar, provenientes da queima, são levadas para o local de plantio da cana.

4.5 Caracterização da Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar

As cinzas do bagaço de cana de açúcar foram submetidas ao ensaio de peneiramento, seguindo a norma NBR – NM 248:2003, para determinação de sua composição granulométrica.

A sua classificação seguiu orientação da norma NBR 7211:2009, utilizando a Tabela 6, mostrada a seguir, para classificação da granulometria da cinza.

Tabela 6 - Orientação Granulométrica de agregado miúdo.

Peneira ABNT	Porcentagem, em peso, retida acumulada na peneira ABNT, para agregados miúdos.			
	Zona 1 (muito Fina)	Zona 2 (fina)	Zona 3 (media)	Zona 4 (grossa)
9,5mm	0	0	0	0
6,3mm	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8mm	0 a 5 ^A	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4mm	0 a 5 ^A	0 a 15 ^A	0 a 25 ^A	5 ^A a 40
1,2mm	0 a 10 ^A	0 a 25 ^A	10 ^A a 45 ^A	30 ^A a 70
0,6mm	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3mm	50 a 85 ^A	60 ^A a 88 ^A	70 ^A a 92 ^A	80 ^A a 95
0,15mm	85 ^B a 100	90 ^B a 100	90 ^B a 100	90 ^B a 100

^APode haver uma tolerância de até um máximo de cinco unidades de por cento em um só dos limites marcados com a letra A ou distribuídos em vários deles.

^BPara agregado miúdo resultante de britamento, este limite pode ser 80.

Fonte: NBR 7211:2009

Após análise granulométrica, a cinza foi preparada para determinação do índice de pozolânica, seguindo orientação da ABNT NBR 5752:2014 e calculada sua massa específica conforme previsto pela NBR 6508:1984.

A cinza passou por processo de secagem e posteriormente de moagem para que atingisse granulométrica adequada para ensaio, conforme orientação da norma (material passante na peneira de 45 μ entre 10% e 15%).

A moagem foi feita em recipiente cerâmico com almofariz, conforme mostra Figura 24, sendo peneirada em agitador elétrico para se obtivesse a quantidade de material necessário para ensaio.

Figura 24 - Cinza passando por moagem

Fonte: Autor

Foram moldados seis (6) corpos de provas de dimensões 50mm x 100mm, para cada tipo de traço de argamassa. A NBR 5752: 2014 orienta usar dois (2) traços de argamassa, um contendo somente cimento, areia normal e água, que é o traço referencia, onde para moldar os 6 copos de provas usou respectivamente 624g de Cimento CII- F-32, 1872g de Areia Normal, 300g de água e 1,25mg de aditivo superplastificante.

O outro traço, o traço experimental com substituição de 25% da massa de cimento por cinza, foi respectivamente de 468g de Cimento CII- F-32, 156g de cinza, 1872g de Areia Normal, 300g de água e 5,4g de aditivo superplastificante.

Após Preparação dos traços, foram moldados os corpos de provas e levado a câmara úmida para cura e posterior ensaio de ruptura aos 28 dias, conforme orientação da norma.

A Figura 25 mostra os corpos de provas sendo ensaiados em prensa hidráulica da marca EMIC, modelo MCT 3016, serie 1873, com capacidade de 30000kgf.

Figura 25 - Copos de provas sendo ensaiados em prensa hidráulica



Fonte: Autor

Com os resultados do ensaio de compressão simples foi calculado o índice de desempenho da cinza em relação ao com cimento Portland aos 28 dias (I_{cimento}), pela equação 6 (ABNT 2014):

$$I_{\text{cimento}} = (F_{\text{cb}}/F_{\text{ca}}) \times 100 \quad (\text{eq.6})$$

Onde:

Icimento corresponde ao índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e seu valor é expresso em porcentagem (%), arredondando para o número inteiro mais próximo;

Fcb corresponde à resistência média aos 28 dias dos corpos de provas moldados com cimento Portland e 25% da cinza de bagaço de cana de açúcar, que foi expressa em megapascal (Mpa).

Fca corresponde à resistência média aos 28 dias dos corpos de provas moldados somente com cimento Portland que foi expressa em megapascal (Mpa).

Calculado o Icimento, utilizou-se da norma NBR 12653:2014, para verificar se a cinza possuía características pozolânicas.

Para verificação foi utilizada a tabela de valores para verificação fornecida pela norma NBR12653:2014.

A Tabela 7 mostra a avaliação das características pozolânicas dos materiais.

Tabela 7 - Tabela de Requisitos Físicos para caracterização pozolânica.

Propriedade	Classe de Material Pozolânico			Método de Ensaio
	N	C	E	
Material Retido na peneira de 45µm	< 20%	< 20%	< 20%	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
<p>N= Pozolanas naturais e artificiais que obedçam aos requisitos aplicáveis nesta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográficos ácidos, cherts silicoso, terras diatomáceas e argilas calcinadas. C= Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedece aos requisitos aplicáveis nesta Norma. E= Qualquer pozolana que cujos requisitos difiram das classes anteriores, conforme estabelecido nesta Norma.</p>				

Fonte: Adaptado NBR 12653:2014

4.6 Estabilização das Amostras

Após caracterização do solo e da cinza do bagaço de cana de açúcar, foram determinados os percentuais de cimento, cal e cinza que seriam adicionados ao solo para estabilização.

Conforme orientação do manual de pavimentação do DNIT-2006, que define os percentuais de aditivos para estabilização de solo, foi adotado um percentual de 5% de aditivos (cimento e cal). A cinza, apesar de não conter características cimentantes, também foi adicionada ao solo em 5%, para comparação com os aditivos convencionais.

A escolha do percentual de 5% foi adotado seguindo orientação do DNIT-2006, que define para os percentuais de aditivos estabilizantes entre 2% a 10%.

O percentual aplicado é em relação à massa de solo utilizada para os ensaios de estabilização, Proctor Intermediário (4000g) e Índice de Suporte Califórnia – CBR (5000g), ensaios esses que são padrões para escolha do solo a ser utilizado em camadas de pavimentação (DNIT, 2006).

A escolha do Proctor Intermediário, para realização dos ensaios, seguiu orientação do DNIT (2006), DNIT (2010) e DER (2006), que tem como exigência mínima a energia intermediária de compactação.

4.6.1 Estabilização Solo-Cimento

A estabilização com utilização de cimento se iniciou com ensaio de Proctor Intermediário, seguindo a NBR 7182/2016.

O procedimento é semelhante ao feito no solo natural citado no item 4.3.1, mas foi adicionado ao solo 5% de cimento em sua massa total.

Para o ensaio, foram utilizados quatro mil gramas (4000g) de solo e acrescentados duzentos gramas (200g) de cimento, totalizando quatro mil e duzentas gramas (4200g).

A Figura 26 mostra a mistura solo cimento.

Figura 26 - Mistura solo-cimento



Fonte: Autor

Com os resultados do Proctor, foram moldados os corpos de provas, três(3) unidades para o ensaio de CBR, seguindo orientação da norma NBR 9895:2016 e os mesmos procedimentos adotados para os ensaios do solo natural citado no item 4.3.2.

Para o solo-cimento, os teores de umidades usados foram: $W_o=21\%$ (1103g de água); $W_o=20\%$ (1050g de água); $W_o=22\%$ (1155g de água);

Os ensaios a compressão simples seguiram a norma NBR-12025/12 e os procedimentos citados no item 4.3.3.

4.6.2 Estabilização Solo-Cal

Os procedimentos adotados para estabilização de solo-cal foram os mesmo utilizados para solo-cimento citado no item 4.6.1.

Para o solo cal os teores de umidades utilizados foram: $W_o=25\%$ (1313g de água); $W_o=24\%$ (1260g de água); $W_o=26\%$ (1365g de água);

A Figura 27 mostra a mistura solo Cal.

Figura 27 - Mistura solo-cal



Fonte: Autor

4.6.3 Estabilização Solo-Cinza

Os procedimentos adotados para cinza são mostrados nos itens anteriores 4.6.1 e 4.6.2.

Uma vez que a cinza, em seus ensaios de caracterização, não apresentou a característica pozolânica, portanto sua estabilização não é considerada estabilização química e sim granulométrica.

A princípio utilizou-se o mesmo procedimento da estabilização de solo-cimento e solo-cal, para se ter um padrão de porcentagem igual adicionada ao solo e analisar seu comportamento solo-cinza-água.

Para o solo-cinza os teores de umidades utilizados foram: $W_o=21\%$ (1103g de água); $W_o=20\%$ (1050g de água); $W_o=22\%$ (1155g de água);

A Figura 28 mostra a mistura solo-cinza.

Figura 28 - Mistura solo-cinza



Fonte: Autor

4.6.4 Estabilização Solo-Cinza-Cal

Para que se pudesse atingir melhores resultados, optou-se pela mistura solo-cinza-cal, realizando-se a homogeneização da mistura de solo, com valores de 5% de cinza (200g) e 1% de cal hidratada (40g) para a amostra de 4000g de solo, para o ensaio de Proctor intermediário.

Repetiu-se o ensaio, homogeneizando o solo com valores de 5% de cinza (200g) e 2% de cal hidratada (80g) para a amostra de 4000g de solo, para o ensaio de Proctor intermediário.

Os procedimentos de ensaios foram os padrões, citados nos itens anteriores.

Os teores de umidades utilizados para moldagem dos corpos de prova para o ensaio CBR da mistura solo - 5%cinza - 1%cal foram: $W_o=20\%$ (1060g de água); $W_o=19\%$ (1007g de água); $W_o=21\%$ (1113g de água);

Para a mistura solo - 5%cinza - 2%cal os teores de umidade foram:

$W_o=20\%$ (1070g de água); $W_o=19\%$ (1017g de água); $W_o=21\%$ (1124g de água).

4.7 Análises de resultados

Após os ensaios realizados, os resultados foram plotados em gráficos e tabelas para facilitar a análise.

Amparado nas normas de pavimentação do DNIT (2006) e DER (2006), analisou-se a viabilidade de uso do solo estabilizado com cimento, cal e cinza para compor camadas de pavimentos, enfatizando seu uso em base e priorizando o uso do material alternativo cinza do bagaço de cana de açúcar.

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios granulométricos, consistências e ensaios mecânicos, características dos materiais e das misturas do solo estabilizado com cimento, cal e cinza.

5.1 Caracterização da Cinza do Bagaço de Cana de açúcar

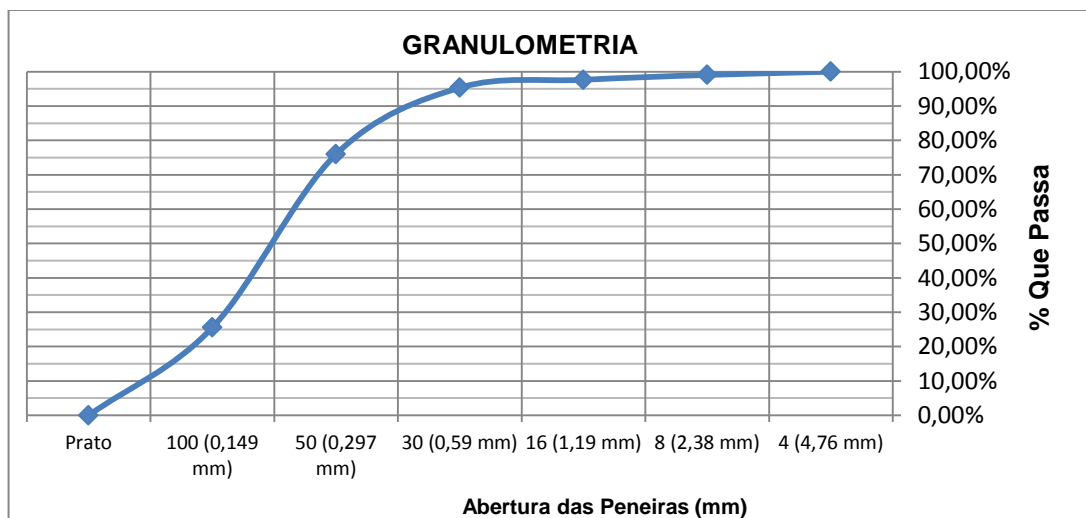
A curva granulométrica obtida pelo ensaio normatizado pela NBR – 7211:2009, tem seus resultados na Figura 29, e exhibe os resultados do peneiramento na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição Granulométrica da Cinza.

DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AGREGADO NBR 7211/2009	
Peneira nº	% Que Passa
4 (4,76 mm)	100%
8 (2,38 mm)	99%
16 (1,19 mm)	98%
30 (0,59 mm)	95%
50 (0,297 mm)	76%
100 (0,149 mm)	26%
Prato	0%
Modulo de Finura = 1,06	

Fonte: Autor

Figura 29 - Curva Granulométrica da Cinza.



Fonte: Autor

De acordo com a curva granulométrica a cinza se mostrou um material de granulométrica muito fina de diâmetro máximo igual a 0,59mm e modulo de finura igual a 1,06 segundo NBR 7211:2009.

Na NBR 12563:2014 correlacionam-se a resistência a compressão de duas (2) argamassas, uma padrão e outra com substituição de 25% do cimento pela cinza, sendo determinado o índice de pozolaniciade pela divisão da média de tensões da argamassa com 25%, pela media de tensões da argamassa contendo somente cimento.

Nas Tabelas 9 e 10 são mostrados os resultados das médias de tensões dos 2 tipos de argamassa da caracterização pozolânica da cinza e sua massa específica. As demais tensões e complementos dos ensaios são apresentados no Apêndice A.

Tabela 9 - Caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar – Argamassa com 25% de cinza.

Ensaio de Caracterização da Cinza - Argamassa com 25% de Cinza – Referência - 28 dias.		
Massa específica da cinza = 0,53g/cm ³		
Tensão (MPa)		
Mínima	Máxima	Média
15,64	22,55	18,97
Desvio Padrão = 2.305		

Fonte: Autor

Tabela 10 - Caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar – Argamassa somente com cimento (traço referência).

Ensaio de Caracterização da Cinza - Argamassa somente com Cimento Referência – 28 dias.		
Massa específica da cinza = 0,53g/cm ³		
Tensão (MPa)		
Mínima	Máxima	Média
25,86	43,28	32,03
Desvio Padrão = 5.914		

Fonte: Autor

Os resultados mostraram que a cinza possui uma massa específica de $0,53\text{g/cm}^3$. Além disso, a argamassa com cinza teve uma redução de 56,2% em sua resistência, em relação ao traço referência.

Através das médias das tensões dos traços, calculou-se o índice de pozolanicidade da cinza em 59,2%.

Para que a cinza possa ser caracterizada como material pozolânico, seu índice de pozolanicidade teria que ser igual ou superior a 90%, segundo NBR 12563:2014, o que caracteriza o material como não pozolânico.

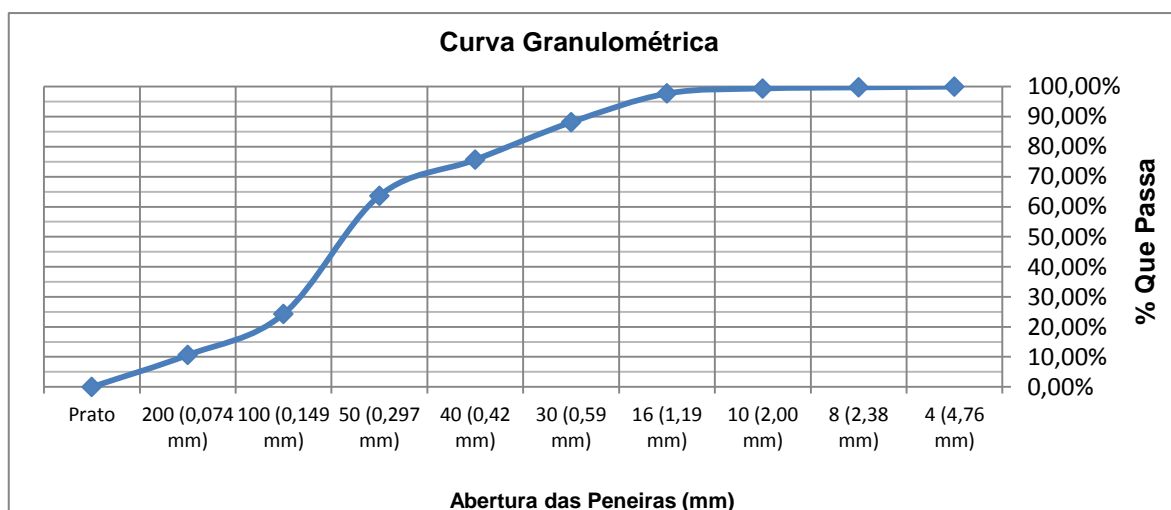
5.2 Características do solo

Na Tabela 11 são apresentados os resultados do peneiramento. Na Figura 30 apresenta-se a curva granulométrica obtida.

Tabela 11 - Composição Granulométrica do Solo.

DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO - NBR 7181/84		
Peneira nº	% Retida Acumulada	% Que Passa
4 (4,76 mm)	0%	100%
8 (2,38 mm)	0%	100%
10 (2,00mm)	1%	99%
16 (1,19mm)	2%	98%
30 (0,59mm)	12%	88%
40 (0,42mm)	24%	76%
50 (0,297mm)	36%	64%
100 (0,149mm)	76%	24%
200 (0,074mm)	89%	11%
Prato	100%	0%

Fonte: Autor

Figura 30 - Curva Granulométrica do Solo.

Fonte: Autor

As porcentagens retidas mostram que o solo predominante é areia, contendo partículas finas.

Seguindo orientação da norma DNIT (2006) e de autores com Pinto (2006), a curva granulométrica indica que o solo é bem graduado, com predominância da fração arenosa fina.

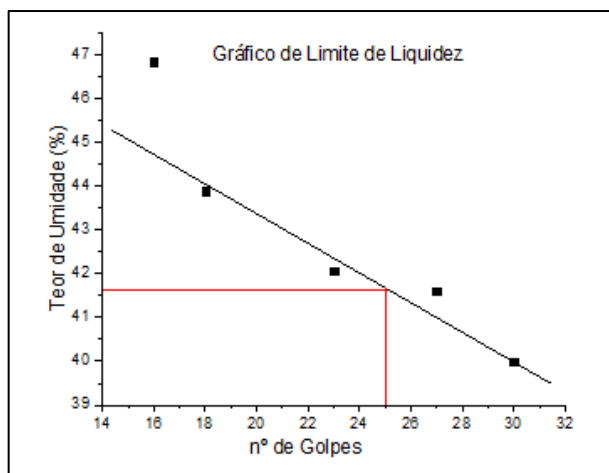
5.2.1 Limites de Consistência – Limite de Liquidez e de Plasticidade (LL e LP)

Os resultados do ensaio de limite de liquidez estão apresentados na Tabela 12 e na Figura 31.

Tabela 12 - Ensaio Limite de Liquidez.

Limite de Liquidez					
Cápsula nº	8	14	72	146	168
Cápsula com solo úmido (g)	52	39,8	49,6	50,3	38,6
Cápsula com solo seco (g)	45,4	36,45	43,5	44,2	34,9
Massa de água (g)	6,6	3,3	6,1	6,1	3,7
Tara da cápsula	28,9	28,4	29	30,3	27
Massa do solo seco (g)	16,5	8,05	14,5	13,9	7,9
Teor de Umidade %	40	41,61	42,07	43,88	46,84
Número de golpes	30	27	23	18	16

Fonte: Autor

Figura 31 - Limite de Liquidez.

Fonte: Autor

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados do ensaio de limite de plasticidade, com o cálculo do Índice de Plasticidade.

Tabela 13 - Ensaio Limite de Plasticidade.

Cápsula nº	34	50	54	179	182
Cápsula com solo úmido (g)	30,6	31,4	31	30,8	30,8
Cápsula com solo seco (g)	30	30,6	30,36	30	29,6
Massa de água (g)	0,6	0,8	0,64	0,8	1,2
Tara da cápsula (g)	28,4	28,5	28,7	27,9	26,5
Massa do solo seco (g)	1,6	2,1	1,66	2,1	3,1
Teor de umidade %	37,5	38,1	38,55	38,1	38,71
Obs: obter no mínimo três (3) valores que não difiram de sua média mais de 5%.	Limite de Liquidez = 41,6 %				
	Limite de Plasticidade = 38,19 %				
	Índice de Plasticidade = 3,41 %				

Fonte: Autor

Os ensaios de consistência apontam que, apesar da predominância de frações grossas (areia) no solo, o mesmo possui frações finas suficientes para execução do ensaio.

O índice de plasticidade (IP) mostra a plasticidade do solo, sendo que os valores de IP para solos podem ser considerados:

IP = 0 Não Plástico

1 < IP < 7 Pouco Plástico

7 < IP < 15 Plasticidade Média

IP > 15 Muito Plástico

No caso do solo analisado, o IP encontrado foi de 3,41%, sendo considerado pouco plástico.

O solo analisado possui um LL de 41,6% e IP = 3,41%, típico de solos arenosos finos (areias argilosas), o que pode ser avaliado com o auxílio da Tabela 5.

5.2.2 Classificações do Solo (HRB)

O solo foi classificado conforme a Tabela 3, com os parâmetros coletados através dos ensaios de análise granulométrica e limites de consistência e pode ser classificado como A-2-5(0), solo considerado de bom a excelente para uso em subleitos.

Para classificação, foram consideradas as porcentagens de solo passantes nas peneiras de número # 200 (11%), # 40(76%) e # 10 (99%) e os limites de consistências, limite de liquidez igual a 41,6%, índice de plasticidade igual a 3,41% e o índice de grupo (IG) igual a 0.

O item de maior relevância é a porcentagem passante na peneira de abertura 0,074mm (nº 200), que define a classe de solo (grosso ou fino) e os índices de consistência LL, IP e IG. (ASTM D3282)

5.2.3 Classificação MCT

Os resultados do ensaio Mini-MCV, executados conforme norma DNER – CLA – 258/96, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Ensaio Mini- MCV.

Coefficientes obtidos pela metodologia Mini-MCV					
Teores de umidade	20%	22%	24%	26%	28%
Solo	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Coefficiente c'	0,42	0,46	0,69	0,68	0,67
Coefficiente d'	125	124,6	98,5	100	70

Fonte: Autor

Após o ensaio de Mini-MCV, foram realizados os ensaios de perda de massa por imersão, conforme norma DNER – CLA – 256/96, para determinação do índice e'.

Os resultados do ensaio de perda de massa por imersão (Pi) são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Ensaio de perda de massa por imersão (Pi).

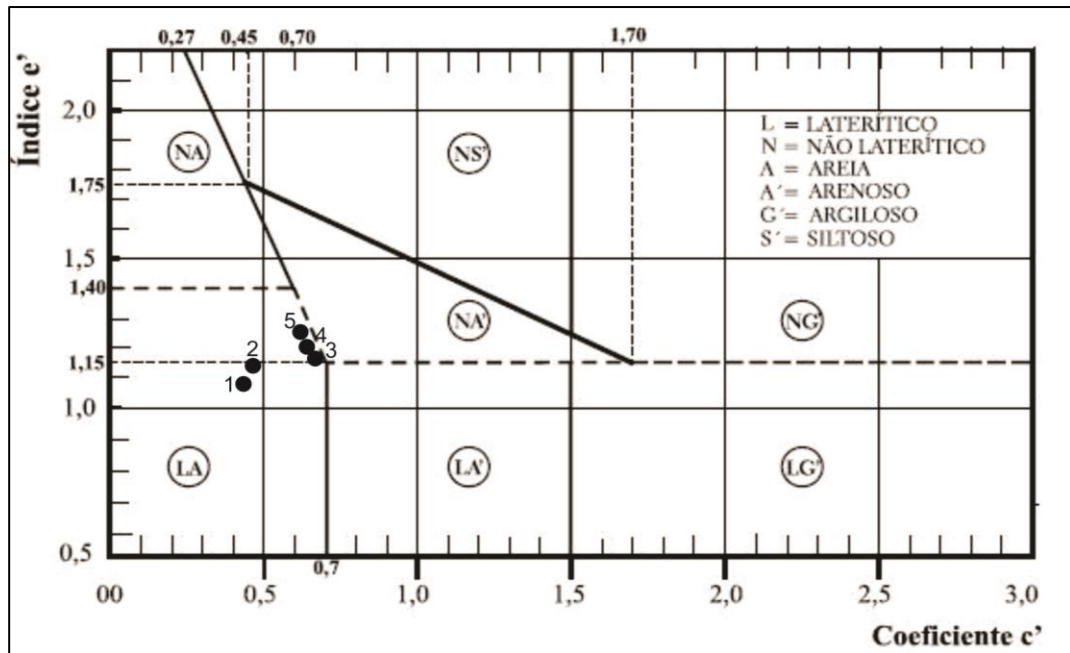
Resultados do ensaio da perda de massa por imersão (Pi)					
Solo	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Teores de umidade	20%	22%	24%	26%	28%
Coefficiente d'	115,5	124,6	98,5	100	70
Perda de massa por imersão (Pi)	132,6g	139,7g	143,1g	149g	153g
Índice e'	1,14	1,16	1,18	1,19	1,22

Fonte: Autor.

Com os resultados obtidos com a perda de massa por imersão calculou-se o índice e' pela equação 2, apresentada no item 3.2.3.

Com os pares de valores c' e e', fez-se a classificação MCT, apresentada na Figura 32.

Figura 32 - Classificação MCT.



Fonte: Adaptado de VILLIBOR e NOGAMI, 2009 e Fresneda et.al, 2013, valores inseridos pelo autor (1,2,3,4 e 5).

Como apresentado na figura 32, os pontos são a representação das cinco (5) amostras do mesmo solo ensaiadas para melhor verificação da classificação.

Com isso, diminui a possibilidade de erros e aumenta a confiabilidade na classificação.

O solo se enquadrou no quadrante LA de areias lateríticas, sendo classificado como: areia com pouca argila laterítica, segundo Villibor e Nogami (2009) e Fresneda et al.(2013).

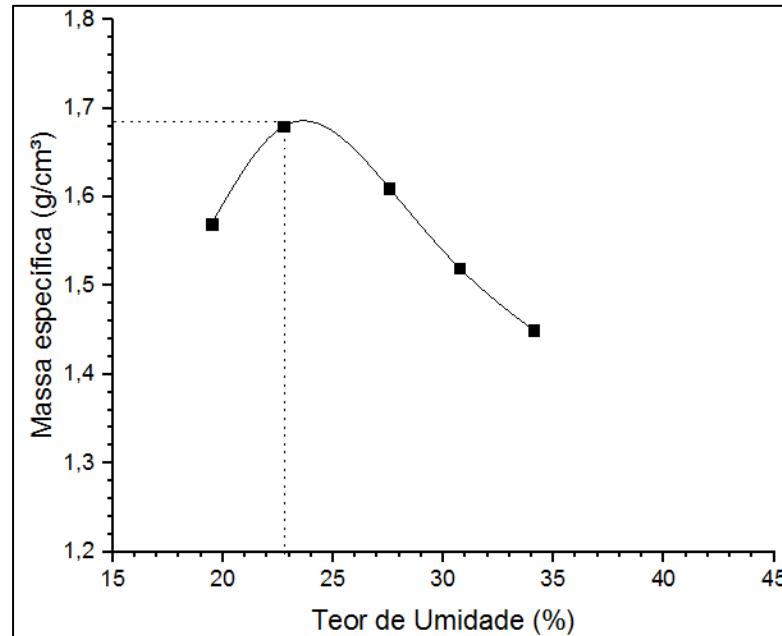
5.2.4 Ensaios de Compactação (Proctor) do Solo Natural

O solo natural foi ensaiado para energia de compactação: Proctor Intermediário, seguindo a Norma NBR 7182:2016, e orientação do DNIT(2006).

Com os pares de valores encontrados de teor de úmida (W) e peso específico aparentemente seco, foi possível plotar o gráfico de compactação e determinar o peso específico seco máximo do solo compactado e o teor de umidade ótimo de compactação (Wo). Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam no Apêndice B.

A Figura 33 mostra a curva de compactação de Proctor Intermediário do solo natural.

Figura 33 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo Natural



Fonte: Autor

Da curva de compactação são conhecidos os valores de massa específica aparentemente seca máxima e teor de umidade ótimo (W_o).

Para o ensaio de Proctor Intermediário do solo natural os valores encontrados foram, massa específica aparentemente seca máxima = $1,68\text{g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo (W_o) = 23%.

5.3 Características do Solo Estabilizado

Após os resultados obtidos do solo natural, o solo foi estabilizado.

Para sua estabilização foram utilizados cimento, cal e cinza do bagaço de cana de açúcar. As proporções utilizadas estão descritas no item 4.6 da metodologia.

Para realização dos ensaios foi adotada a energia intermediária de compactação (Proctor Intermediário), seguindo orientação do DNIT (2006) que preconiza para análise e uso de solo em pavimentos que a energia empregada seja no mínimo a energia intermediária.

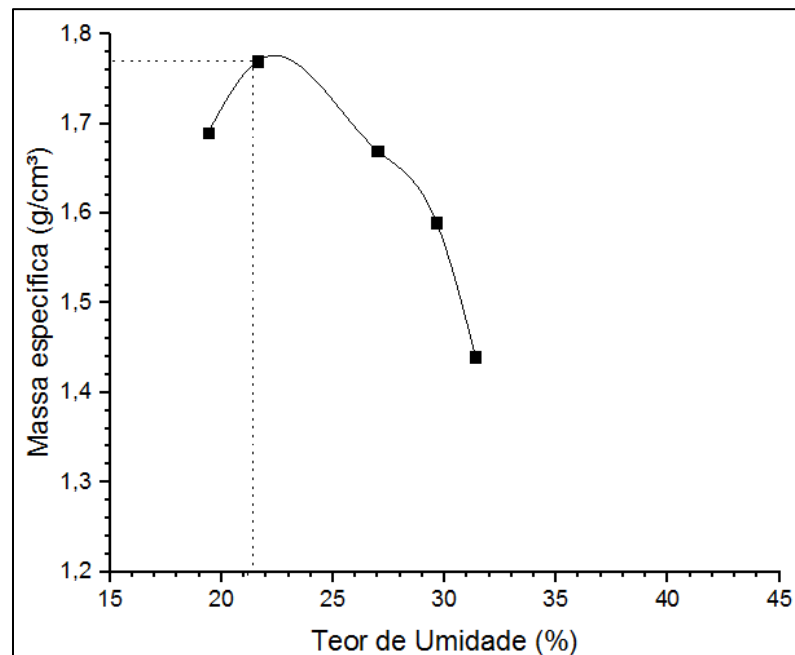
5.3.1 Ensaio de Proctor do Solo-Cimento

Para o solo com adição de 5% de cimento a sua massa total, o ensaio realizado foi de Proctor Intermediário.

Conforme feito para os resultados do solo natural, os pares de valores de teor de umidade e peso específico aparentemente secos foram transcritos para o gráfico. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice C.

A Figura 34 mostra a curva de compactação de Proctor Intermediário do solo-cimento.

Figura 34 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo - Cimento



Fonte: Autor.

Da curva de compactação são conhecidos os valores de massa específica aparentemente seca máxima e teor de umidade ótimo (W_o).

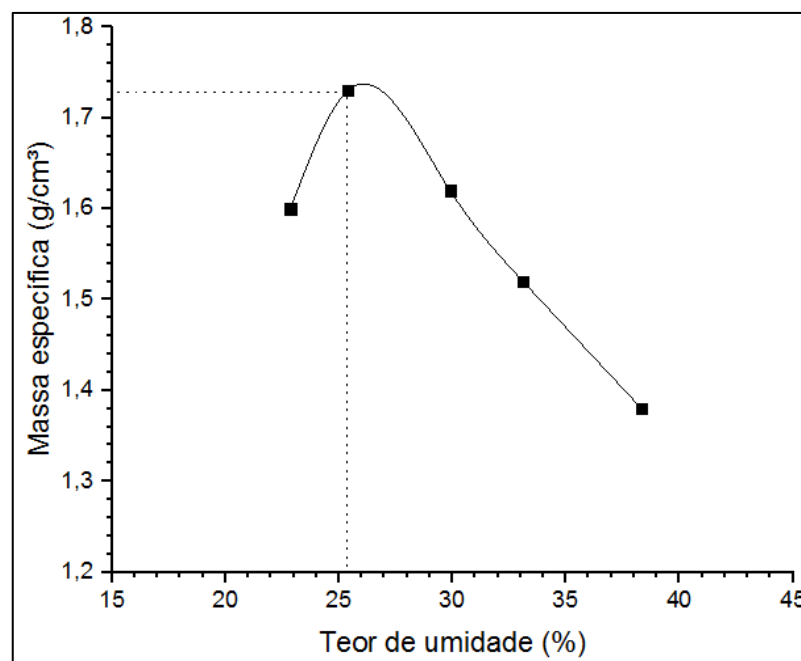
Para o ensaio de Proctor Intermediário do solo – cimento os valores encontrados foram massa específica aparentemente seca máxima = $1,76\text{g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo (W_o) = 21% (Figura 34).

5.3.2 Ensaio de Proctor do Solo-Cal

Para o solo com adição de 5% de cal em sua massa total, foi realizado o ensaio de Proctor Intermediário.

Os resultados foram plotados em gráficos, conforme mostrado na Figura 35 mostrando a curva de compactação de Proctor Intermediário do solo-cal. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice D.

Figura 35 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário Solo-cal



Fonte: Autor

Da curva de compactação são conhecidos os valores de massa específica aparentemente seca máxima e teor de umidade ótimo (W_o).

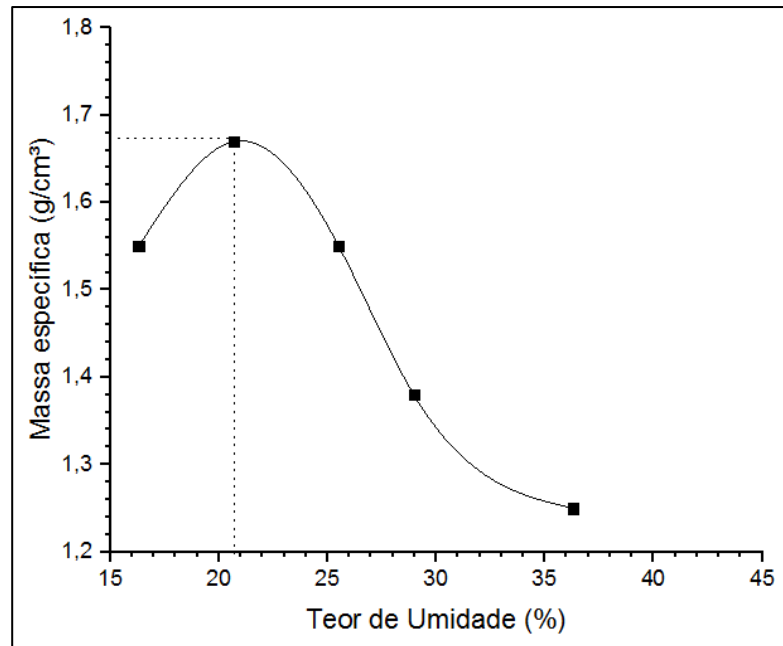
Para o ensaio de Proctor Intermediário do solo – cal os valores encontrados foram, massa específica aparentemente seca máxima = $1,72\text{g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo (W_o) = 25% (Figura 35).

5.3.3 Ensaio de Proctor do Solo-Cinza

Para o solo com adição de 5% de cinza do bagaço da cana de açúcar em sua massa total, foi realizado o ensaio de Proctor Intermediário.

Os resultados foram plotados em gráficos, conforme a Figura 36 demonstrando a curva de compactação de Proctor Intermediário do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice E.

Figura 36 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo - Cinza



Fonte: Autor.

Da curva de compactação são conhecidos os valores de massa específica aparentemente seca máxima e teor de umidade ótimo (W_o).

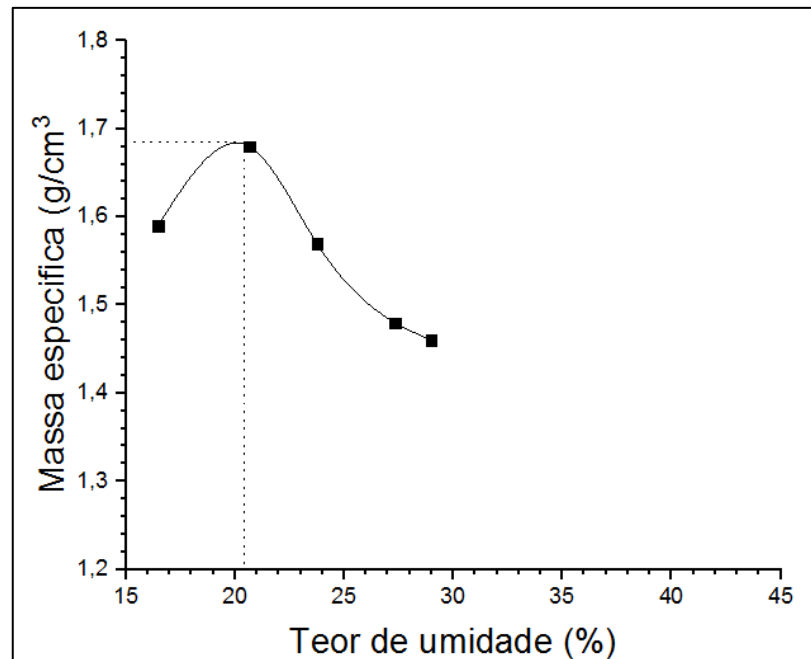
Para o ensaio de Proctor Intermediário do solo – cinza os valores encontrados foram, massa específica aparentemente seca máxima = $1,68\text{g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo (W_o) = 21% (Figura 36).

5.3.4 Ensaio de Proctor do Solo - Cinza – Cal

Para o solo com adição de 5% de cinza do bagaço da cana de açúcar e 1% de cal hidratada a sua massa total, foi realizado o ensaio de Proctor Intermediário.

Os resultados foram plotados em gráficos, conforme a Figura 37 demonstrando a curva de compactação de Proctor Intermediário do solo – 5%cinza – 1%cal. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice F.

Figura 37 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo – 5%Cinza – 1%Cal

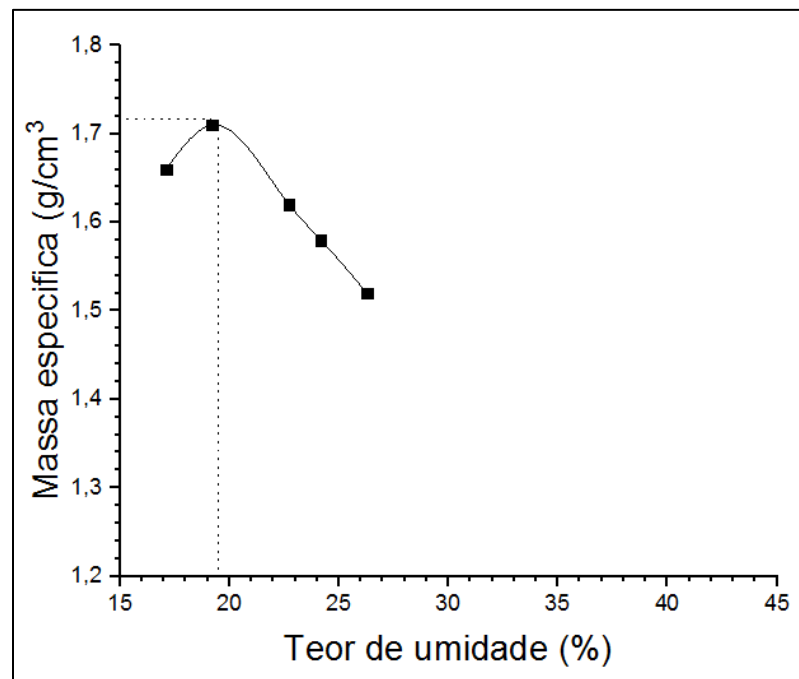


Fonte: Autor

Para o ensaio de Proctor Intermediário do solo - 5%cinza - 1%cal os valores encontrados foram, massa específica aparentemente seca máxima = $1,68\text{g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo (W_o) = 20% (Figura 36).

Para o solo com adição de 5% de cinza do bagaço da cana de açúcar e 2% de cal hidratada a sua massa total, os resultados foram plotados, conforme mostrado na Figura 38. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice G.

Figura 38 - Curva de Compactação Ensaio Proctor Intermediário do Solo – 5%Cinza – 2%Cal



Fonte: Autor

Para o ensaio de Proctor Intermediário do solo - 5%cinza - 2%cal os valores encontrados foram, massa específica aparentemente seca máxima = 1,72g/cm³ e teor de umidade ótimo (Wo) = 20% (Figura 37).

A Tabela 16 mostra o resumo dos resultados de Proctor do solo natural e das misturas.

Tabela 16 - Tabela resumo dos resultados de Proctor.

Tabela Resumo dos resultados de Proctor		
	Massa específica aparentemente seca (g/cm ³)	Teor de Umidade Ótimo (%)
Solo Natural	1,68	23
Solo - Cimento	1,76	21
Solo - Cal	1,72	25
Solo - Cinza	1,68	21
Solo - 5% de Cinza - 1% de Cal	1,68	20
Solo 5% de Cinza - 2% de Cal	1,72	20

Fonte: Autor

5.4 Ensaios de CBR e Expansão

Esses ensaios seguiram orientação da norma NBR 9895:2016, sendo que para os ensaios CBR's os corpos de prova foram moldados e ensaiados de acordo com os resultados encontrados no ensaio de Proctor.

5.4.1 Ensaios de CBR do Solo Natural

Para o solo natural foram moldados três (3) corpos de provas com energia de compactação intermediária.

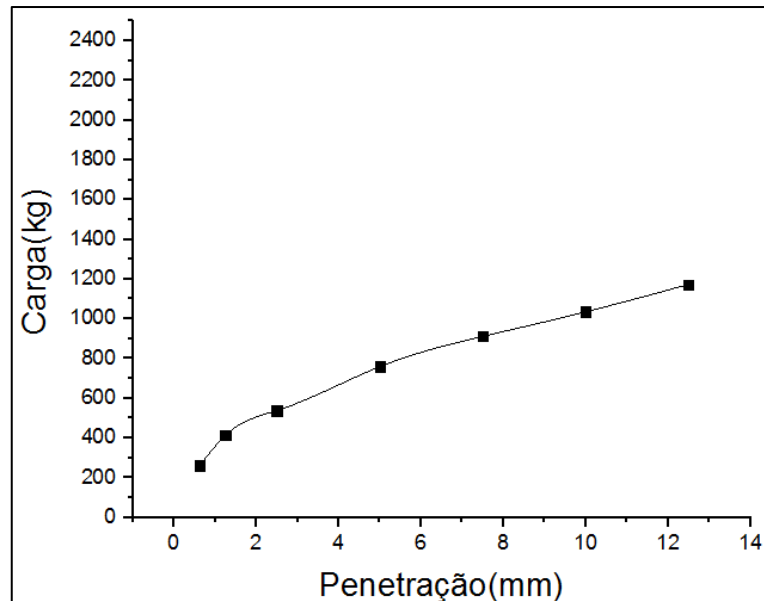
A Tabela 17 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 23% e peso específico aparentemente seco máximo igual a $1,68\text{g/cm}^3$.

Tabela 17 - Solo natural: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 23\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo Natural			
$W_o = 23\%$ e $\gamma_s = 1,68\text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (kgf)	CBR (%)
2,5	3,9	538,2	39,9
5	5,5	759	37,03
CBR Final = 40%			
Expansão Final = 0,12%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, conforme apresentado na Figura 39 a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo natural. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice H.

Figura 39 - Curva de CBR na Energia Intermediário Solo Natural com $W_o = 23\%$ 

Fonte: Autor

A tabela 18 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia intermediária de compactação com teor de úmida (W_o) igual a 22%.

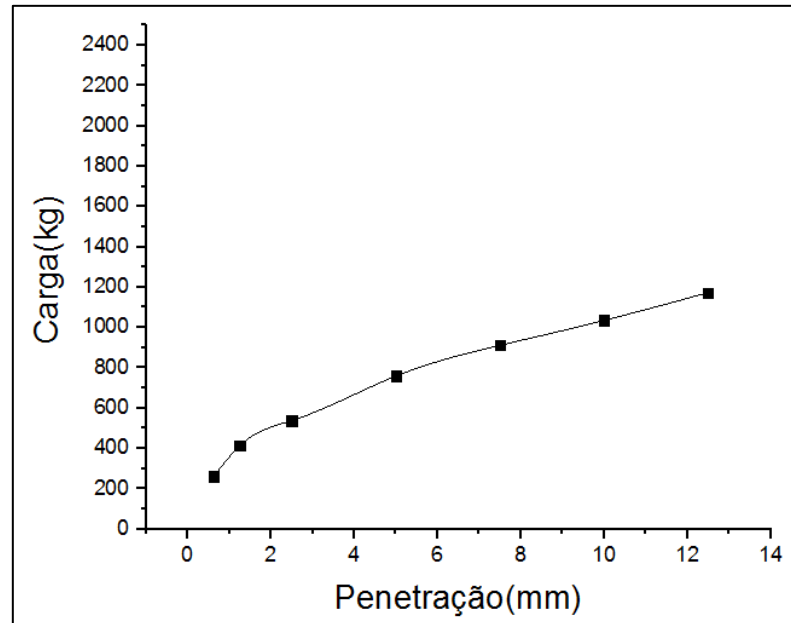
Tabela 18 - Solo natural: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 22\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo Natural			
$W_o = 22\%$ e $\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	3,8	524,4	38,8
5	5,4	745,2	36,4
CBR Final = 39%			
Expansão Final = 0,12%			

Os resultados foram plotados em gráficos, conforme mostrado na Figura 40, a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia

intermediária do solo natural. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice H.

Figura 40 - Curva de CBR na Energia Intermediário Solo Natural com $W_o = 22\%$



Fonte: Autor

A Tabela 19 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia intermediária de compactação com teor de umidade (W_o) igual a 24%.

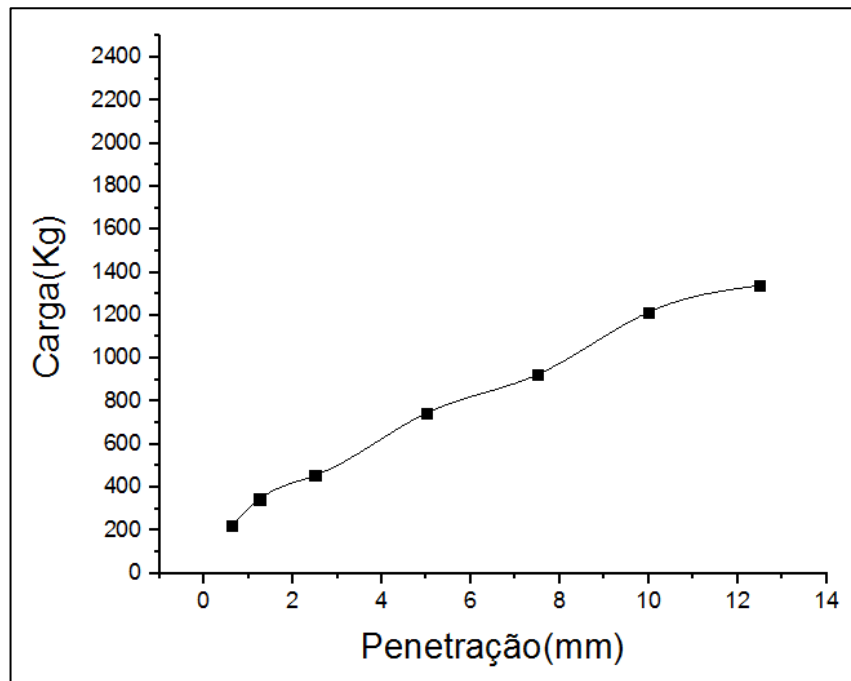
Tabela 19 - Solo natural: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 24\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo Natural			
$W_o = 24\%$ e $\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	3,3	455,4	33,7
5	5,4	745,2	36,4
CBR Final = 36%			
Expansão Final = 0,13%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, conforme apresentado na Figura 41 que mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo natural. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice H.

Figura 41 - Curva de CBR na Energia Intermediário Solo Natural com $W_o = 24\%$



Fonte: Autor

Os resultados dos ensaios CBR mostraram que os pares de valores umidade ótima de 24% e massa específica aparentemente seca de $1,68 \text{ g/cm}^3$, para o solo natural, ocasionou a maior resistência, de 40%.

5.4.2 Ensaio de CBR do Solo-Cimento

Para o solo-cimento foram moldados três (3) corpos de provas, para energia intermediária.

A Tabela 20 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 21% e peso específico aparentemente seco máximo igual a $1,76 \text{ g/cm}^3$.

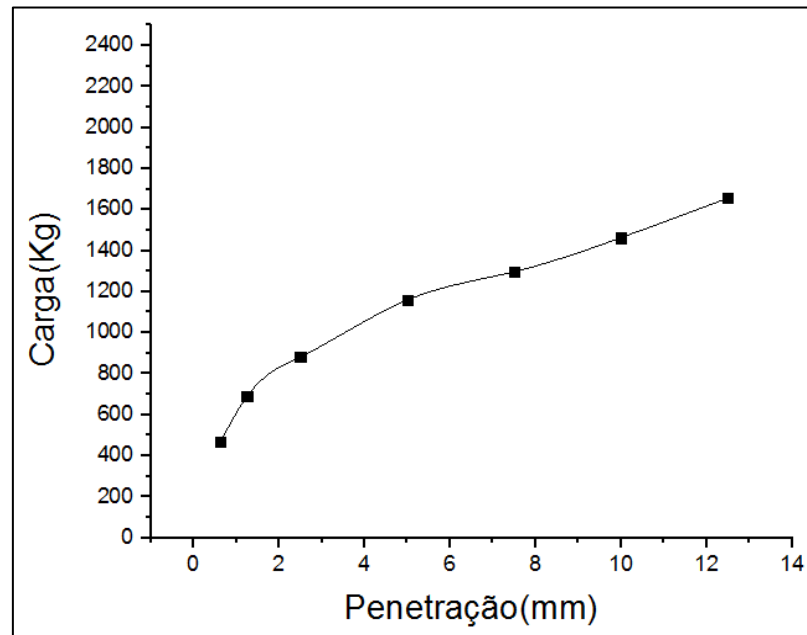
Tabela 20 - Solo - cimento: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 21\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cimento			
$W_o = 21\%$ e $\gamma_s = 1,76 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	6,4	883,2	65,4
5	8,4	1159,2	56,6
CBR Final = 65%			
Expansão Final = 0,21%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, conforme mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cimento na Figura 42. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice I.

Figura 42 - Curva de CBR do Solo - Cimento com $W_o = 21\%$



Fonte: Autor

A Tabela 21 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 20%.

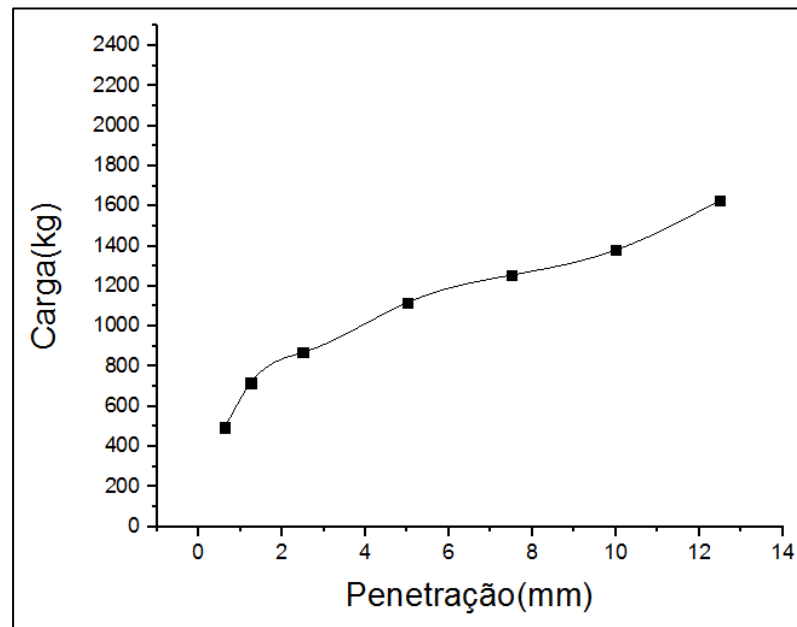
Tabela 21 - Solo - cimento: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 20\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cimento			
$W_o = 20\%$ e $\gamma_s = 1,76 \text{ g/cm}^3$			
Penetração		Resultados	
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	6,3	869,4	64,4
5	8,1	1117,8	54,5
CBR Final = 64%			
Expansão Final = 0,20%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, mostrando a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cimento na Figura 43. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice I.

Figura 43 - Curva de CBR do Solo - Cimento com $W_o = 20\%$



Fonte: Autor

A Tabela 22 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 22%.

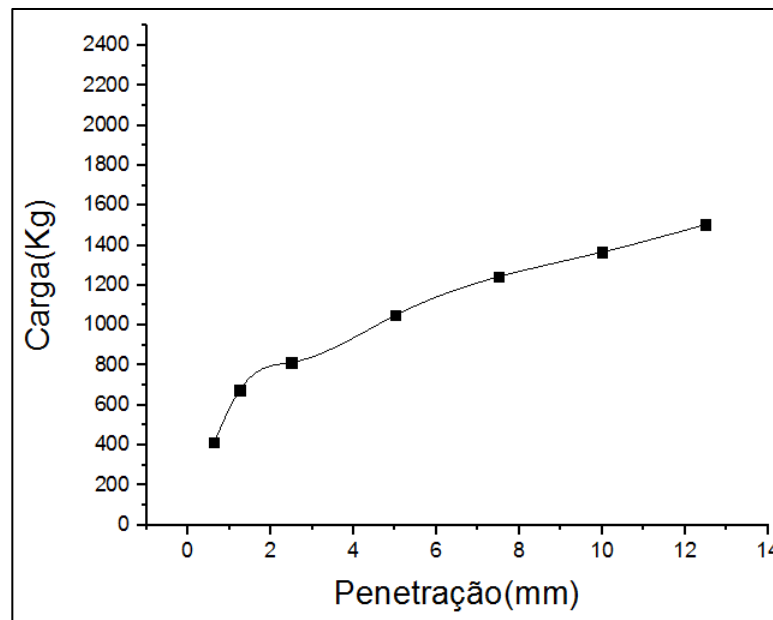
Tabela 22 - Solo - cimento: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 22\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cimento			
$W_o = 22\%$ e $\gamma_s = 1,76 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	5,9	814,2	60,3
5	7,6	1048,8	51,2
CBR Final = 60%			
Expansão Final = 0,23%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 44 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cimento. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice I.

Figura 44 - Curva de CBR do Solo - Cimento com $W_o = 22\%$



Fonte: Autor

Os resultados mostram que com o solo-cimento na umidade de 21% e massa específica aparentemente seca de $1,76\text{g/cm}^3$, atinge-se o maior valor de CBR, de 65%.

5.4.3 Ensaio de CBR do Solo-Cal

Para o solo-cal foram moldados seis (3) CBR, para energia intermediária.

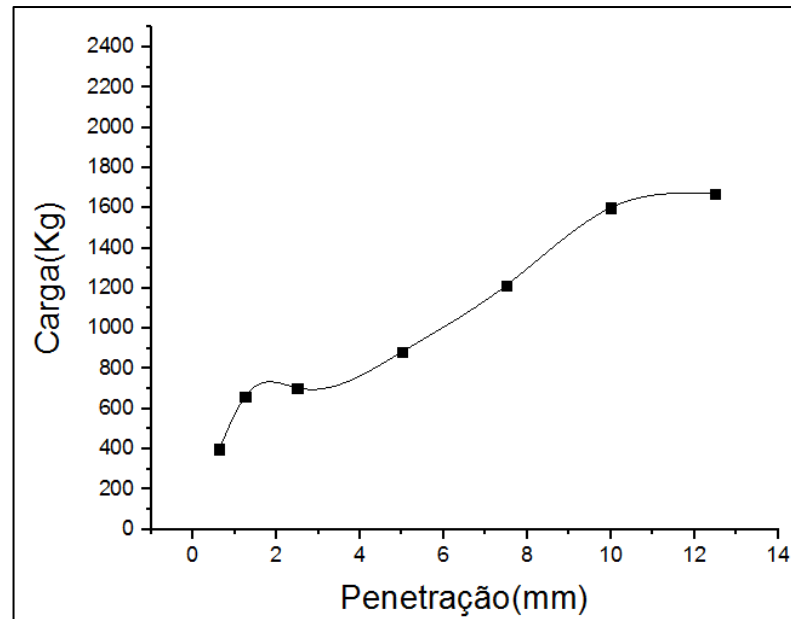
A Tabela 23 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 25% e peso específico aparentemente seco máximo igual a $1,72\text{g/cm}^3$. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice J.

Tabela 23 - Solo - cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 25\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cal			
$W_o = 25\%$ e $\gamma_s = 1,72\text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	5,1	703,8	52,1
5	6,4	883,2	43,1
CBR Final = 52%			
Expansão Final = 0,23%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 45 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cal.

Figura 45 - Curva de CBR do Solo - Cal com $W_o = 25\%$ 

Fonte: Autor

A Tabela 24 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 24%.

Tabela 24 - Solo - cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 24\%$.

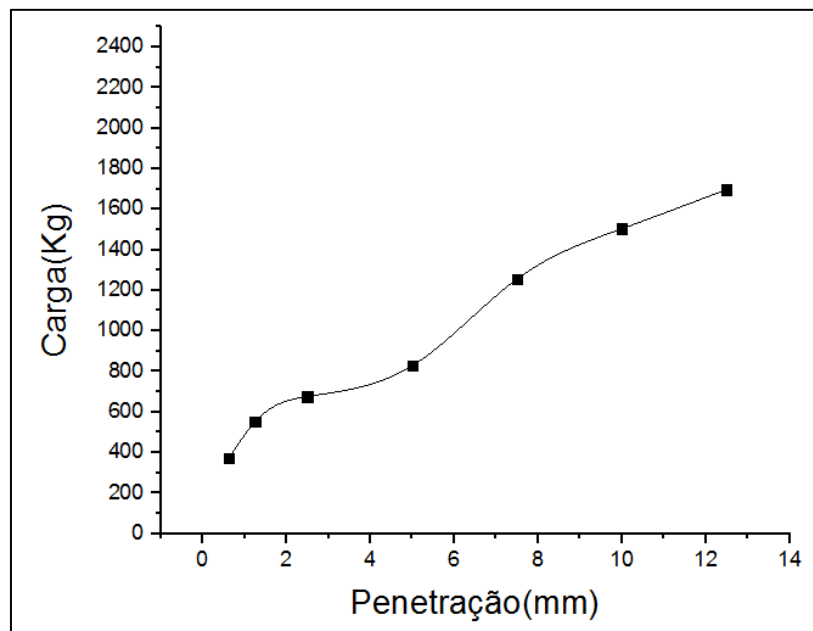
Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cal			
$W_o = 24\%$ e $\gamma_s = 1,72 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	4,9	676,2	50,1
5	6,0	828	40,4
CBR Final = 50%			
Expansão Final = 0,23%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 46 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária

do solo-cal. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice J.

Figura 46 - Curva de CBR do Solo - Cal com $W_o = 24\%$



Fonte: Autor

A Tabela 25 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 26%.

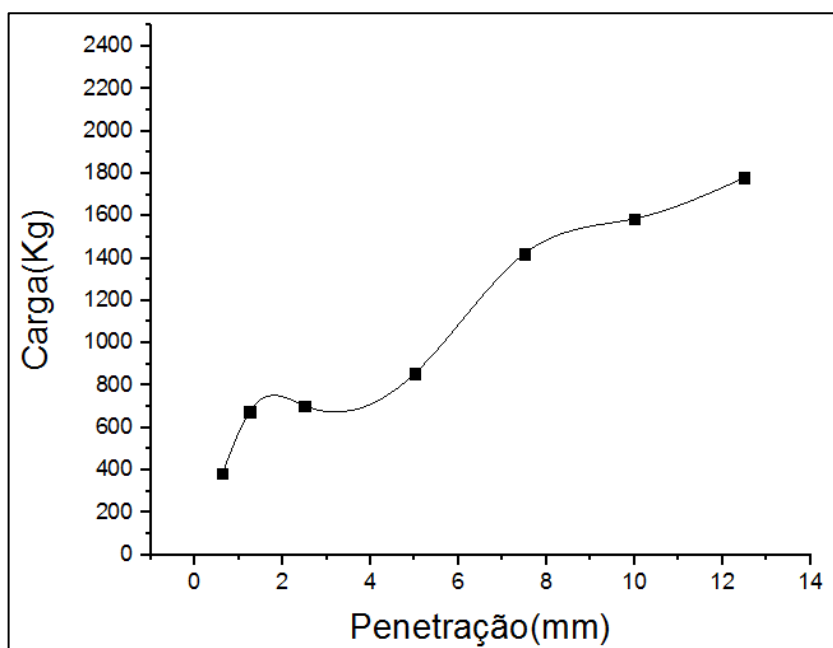
Tabela 25 - Solo - cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 26\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cal			
$W_o = 26\%$ e $\gamma_s = 1,72 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	5,0	690	51,1
5	6,2	855,6	41,7
CBR Final = 51%			
Expansão Final = 0,24%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 47 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cal. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice J.

Figura 47 - Curva de CBR do Solo - Cal com $W_o = 26\%$



Fonte: Autor

Os resultados mostram que o solo-cal na umidade de 25% e massa específica aparentemente seca de $1,72\text{g/cm}^3$, atingiu-se o maior valor de CBR de 52%.

5.4.4 Ensaio de CBR do Solo-Cinza

Para o solo-cinza foram moldados três (3) corpos de prova CBR, para energia intermediária.

A Tabela 26 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 21% e peso específico aparentemente seco máximo igual a $1,68\text{g/cm}^3$.

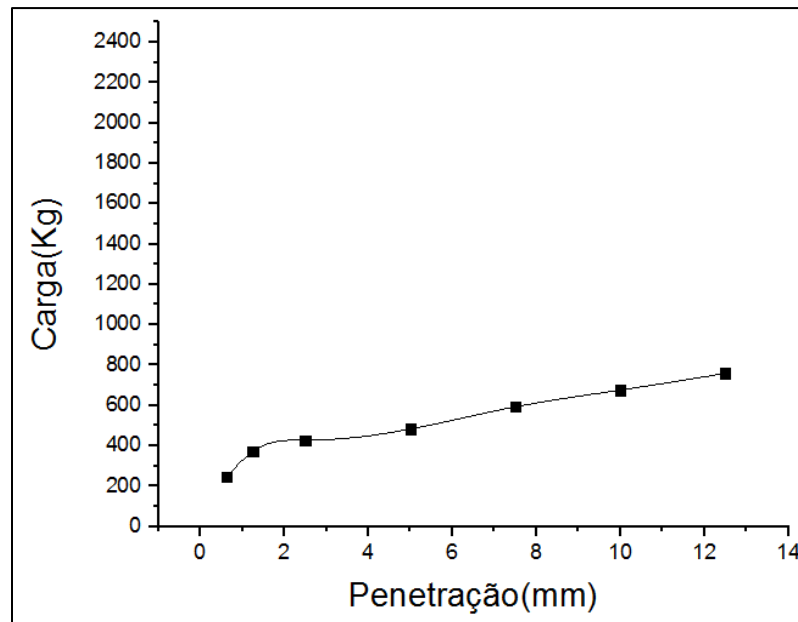
Tabela 26 - Solo - cinza: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 21\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cinza			
$W_o = 21\%$ e $\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	3,1	427,8	31,7
5	3,5	483	23,6
CBR Final = 32%			
Expansão Final = 0,38%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 48 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice K.

Figura 48 - Curva de CBR do Solo - Cinza com $W_o = 21\%$



Fonte: Autor

A tabela 27 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 20%.

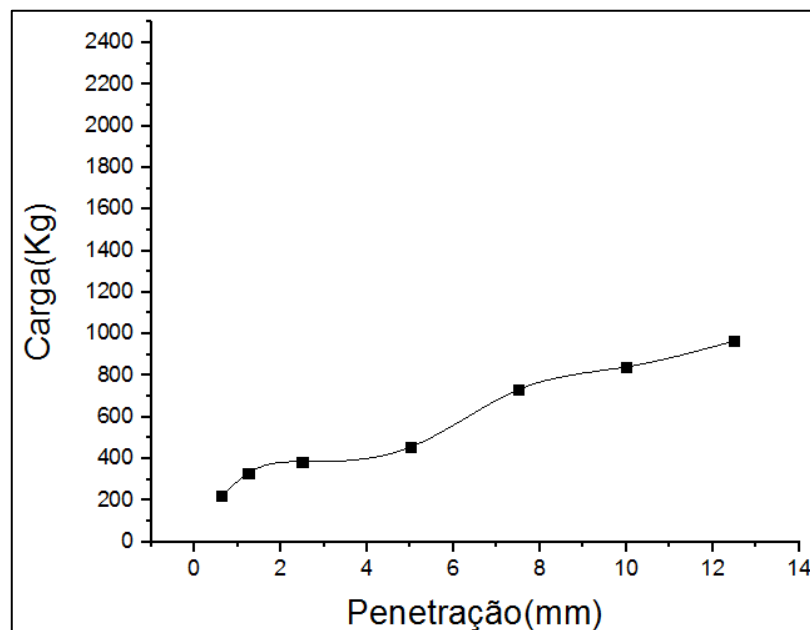
Tabela 27 - Solo - cinza: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 20\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cinza			
$W_o = 20\%$ e $\gamma_s = 1,66 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	2,8	386,4	28,6
5	3,3	455	22,2
CBR Final = 29%			
Expansão Final = 0,38%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 49 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam no Apêndice K.

Figura 49 - Curva de CBR do Solo - Cinza com $W_o = 20\%$



Fonte: Autor

A Tabela 28 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 22%.

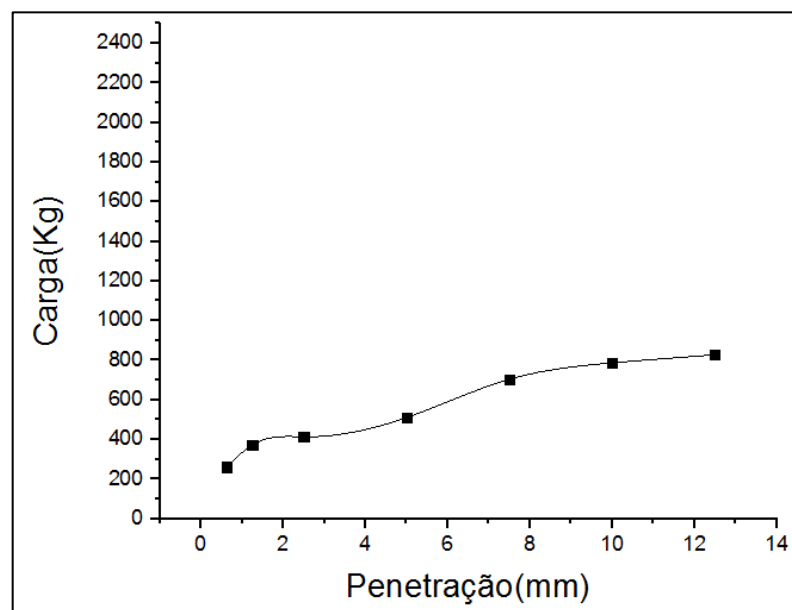
Tabela 28 - Solo - cinza: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 22\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - cinza			
$W_o = 22\%$ e $\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	3	414	30,7
5	3,7	510,6	24,9
CBR Final = 29%			
Expansão Final = 0,39%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 50 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice K.

Figura 50 - Curva de CBR do Solo - Cinza com $W_o = 22\%$



Fonte: Autor

Os resultados mostram que com o solo-cinza na umidade de 21% e massa específica aparentemente seca de $1,68\text{g/cm}^3$, atinge-se o maior valor de CBR, de 32%.

Entre as misturas estabilizantes, a cinza se mostrou o pior estabilizante, diminuindo em 8% o CBR do solo natural.

5.4.5 Ensaio de CBR do Solo-5%Cinza-1%Cal

Para o solo-5%cinza-1%cal foram moldados três (3) CBR, para energia intermediária.

A Tabela 29 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação, com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 20% e peso específico aparentemente seco máximo igual a $1,69\text{g/cm}^3$.

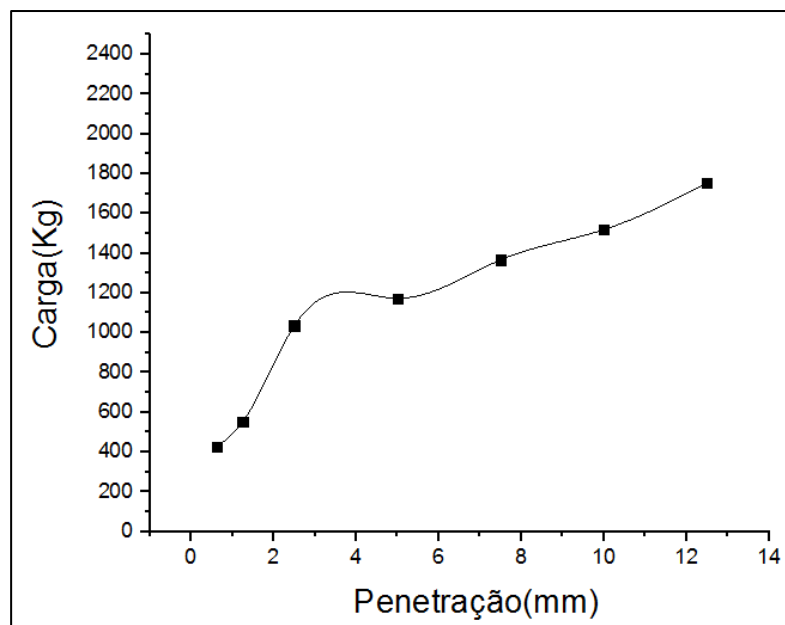
Tabela 29 - Solo - 5%cinza - 1%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 20\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - 5%cinza - 1%cal			
$W_o = 20\%$ e $\gamma_s = 1,69\text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	7,6	1048,8	77,69
5	8,5	1173	57,22
CBR Final = 78%			
Expansão Final = 0,24%			

Fonte: Autor.

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 51 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice L.

Figura 51 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 1%cal com $W_o = 20\%$



Fonte: Autor

A Tabela 30 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 19%.

Tabela 30 - Solo - 5%cinza - 1%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 19\%$.

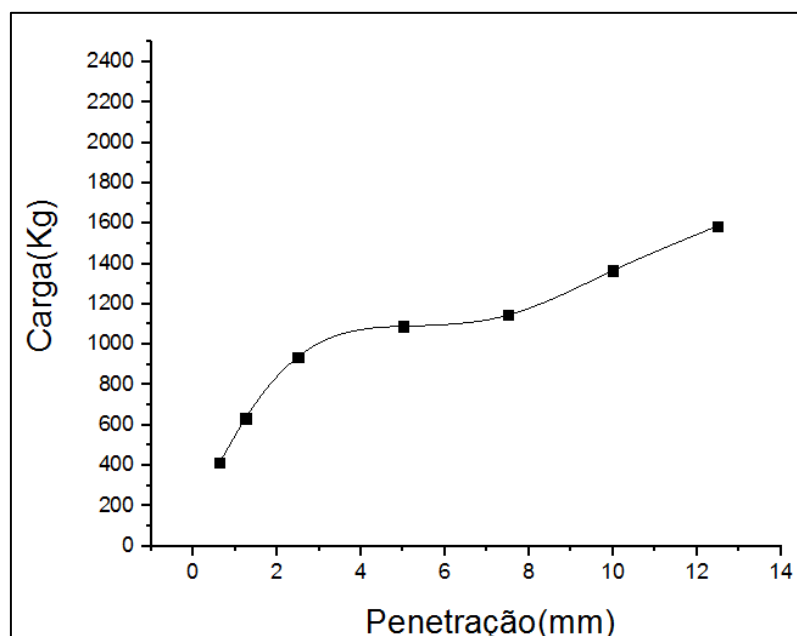
Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - 5%cinza - 1%cal			
$W_o = 19\%$ e $\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	6,9	952,2	70,53
5	7,9	1090,2	53,18
CBR Final = 71%			
Expansão Final = 0,25%			

Fonte: Autor.

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 52 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária

do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice L.

Figura 52 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 1%cal com $W_o = 19\%$



Fonte: Autor.

A Tabela 31 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 21%.

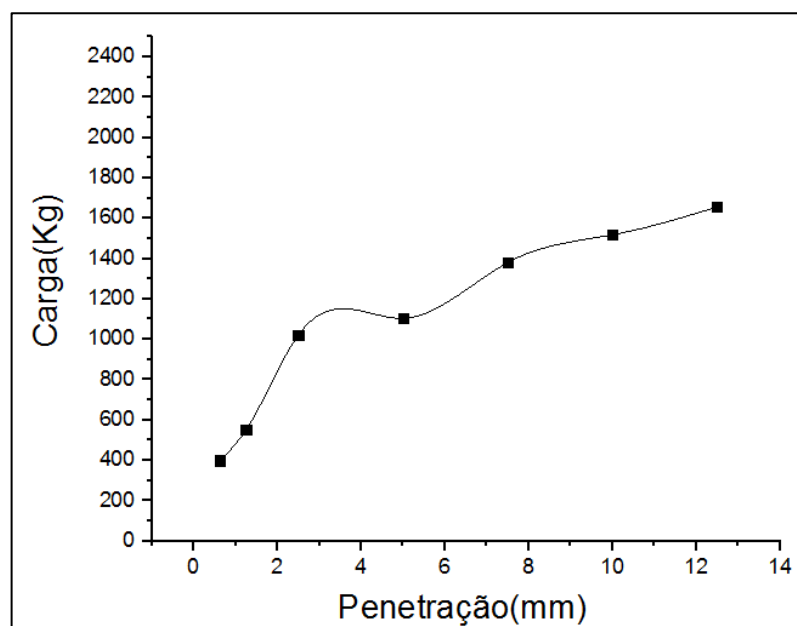
Tabela 31 - Solo - 5%cinza - 1%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W_o = 21\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - 5%cinza - 1%cal			
$W_o = 21\%$ e $\gamma_s = 1,69 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	7,4	1021,2	75,64
5	8	1104	53,85
CBR Final = 76%			
Expansão Final = 0,25%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 53 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice L.

Figura 53 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 1%cal com $W_o = 21\%$



Fonte: Autor

Os resultados mostram que com o solo - 5%cinza - 1%cal, na umidade de 20% e massa específica aparentemente seca de $1,69\text{g/cm}^3$, atinge-se o maior valor de CBR, de 78%.

5.4.6 Ensaio de CBR do Solo-5%Cinza-2%Cal

Para o solo-5%cinza-2%cal foram moldados três (3) CBR, para energia intermediária.

A Tabela 32 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 20% e peso específico aparentemente seco máximo igual a $1,72\text{g/cm}^3$.

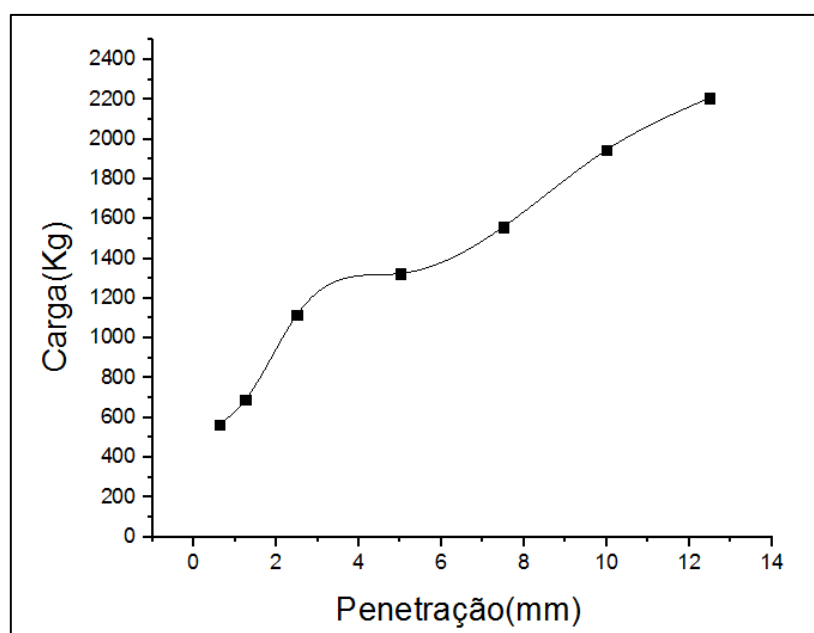
Tabela 32 - Solo - 5%cinza - 2%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W = 20\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - 5%cinza - 2%cal			
$W_o = 20\%$ e $\gamma_s = 1,72 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	8,1	1117,8	82,8
5	9,6	1324,8	64,62
CBR Final = 83%			
Expansão Final = 0,24%			

Fonte: Autor.

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 54 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice M.

Figura 54 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 2%cal com $W_o = 20\%$



Fonte: Autor

A Tabela 33 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 19%.

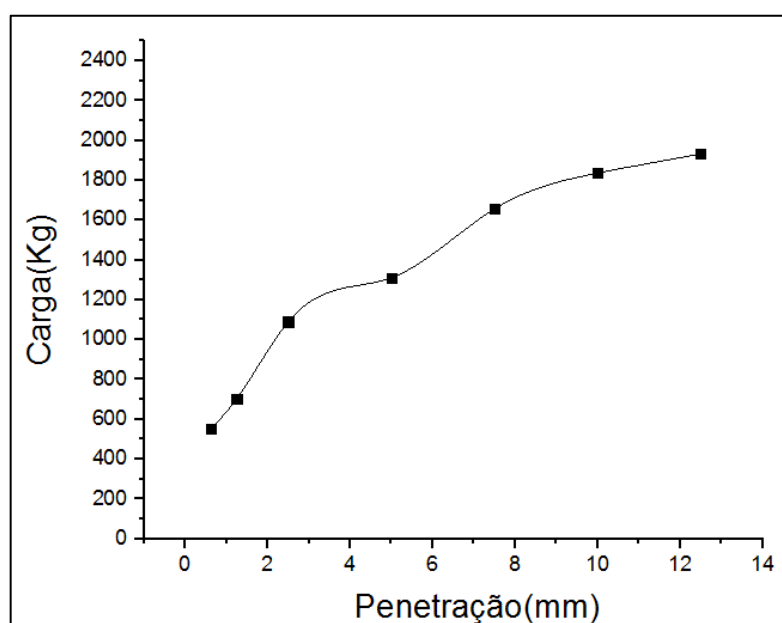
Tabela 33 - Solo - 5%cinza - 2%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W = 19\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - 5%cinza - 2%cal			
$W_o = 19\%$ e $\gamma_s = 1,70 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	7,9	1090,2	80,76
5	9,5	1311	63,95
CBR Final = 81%			
Expansão Final = 0,24%			

Fonte: Autor

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 54 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice M.

Figura 54 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 2%cal com $W_o = 19\%$



Fonte: Autor.

A Tabela 34 mostra os resultados do ensaio de CBR para a energia Intermediária de compactação com teor de úmida ótimo (W_o) igual a 21%.

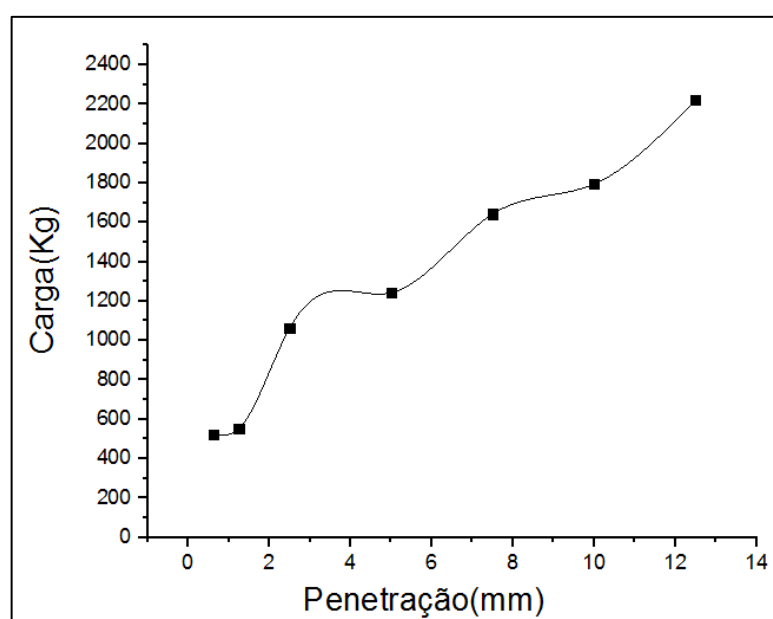
Tabela 34 - Solo - 5%cinza - 2%cal: ensaio CBR com energia Intermediária de compactação para $W = 21\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo - 5%cinza - 2%cal			
$W_o = 21\%$ e $\gamma_s = 1,70 \text{ g/cm}^3$			
Penetração			Resultados
mm	Leitura	Carga (Kgf)	CBR (%)
2,5	7,7	1062,6	78,71
5	9,0	1242	60,60
CBR Final = 79%			
Expansão Final = 0,25%			

Fonte: Autor.

Os resultados foram plotados em gráficos, sendo que a Figura 55 mostra a curva do CBR (carga (kg) x penetração (mm)) para energia intermediária do solo-cinza. Os valores obtidos e procedimentos do ensaio constam do Apêndice M.

Figura 55 - Curva de CBR do solo - 5%cinza - 2%cal com $W_o = 21\%$



Fonte: Autor

Os resultados mostram que para o solo - 5%cinza - 2%cal, na umidade de 20% e massa específica aparentemente seca de 1,72g/cm³, atinge-se o maior valor de CBR, de 83%.

A Tabela 35 mostra o resumo dos resultados do ensaio CBR.

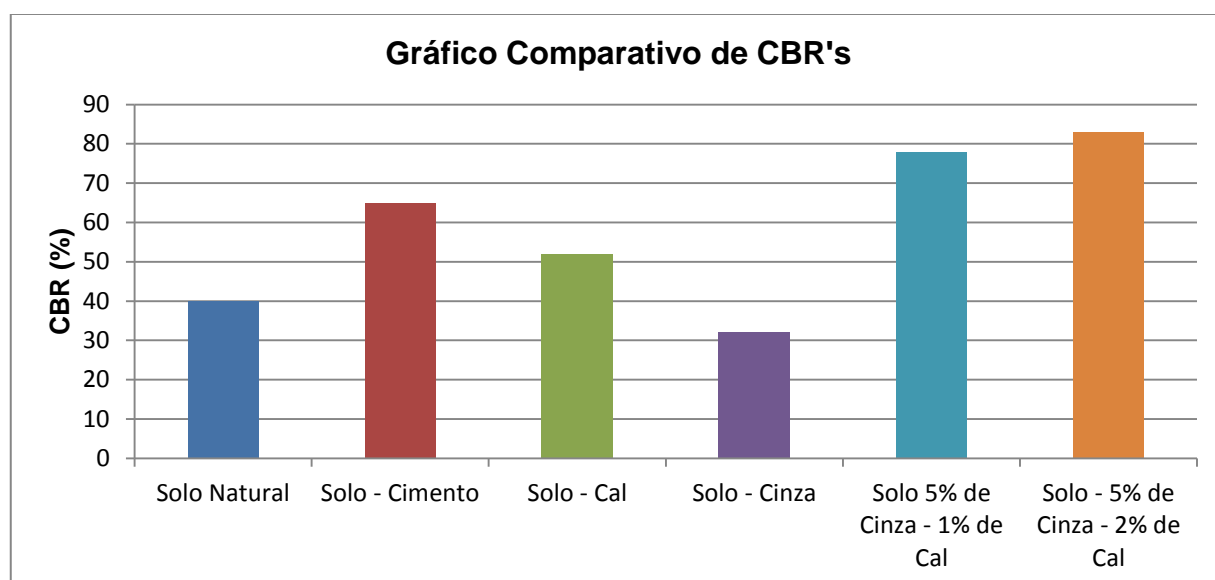
Tabela 35 - Tabela resumo dos resultados de CBRs com melhores desempenhos.

Tabela Resumo dos resultados de CBR			
	Massa específica aparentemente seca (g/cm³)	Teor de Umidade Ótimo (%)	CBR (%)
Solo Natural	1,68	23	40
Solo - Cimento	1,76	21	65
Solo - Cal	1,72	25	52
Solo - Cinza	1,68	21	32
Solo - 5% de Cinza - 1% de Cal	1,68	20	78
Solo 5% de Cinza - 2% de Cal	1,72	20	83

Fonte: Autor

A Figura 56 mostra o comparativo de CBR's das misturas.

Figura 56 - Comparativo de CBR's das amostras



Fonte: Autor

5.5 Ensaio de Compressão Simples

Os valores médios das amostras à compressão simples são apresentados na Tabela 36, juntamente com o desvio padrão. Os resultados obtidos das amostras, constam do Apêndice N.

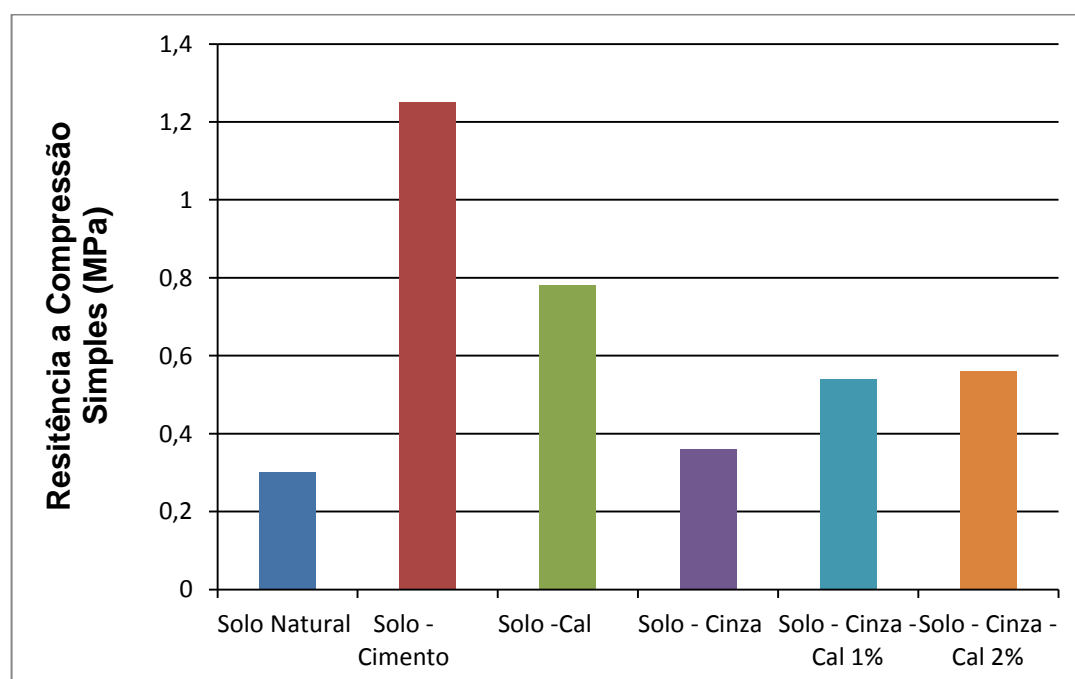
Tabela 36 - Média dos resultados do ensaio de compressão simples do solo natural e solo estabilizado.

Resistência a Compressão Simples (7 dias)						
Corpo de Prova	Solo Natural (MPa)	Solo - Cimento (MPa)	Solo - Cal (MPa)	Solo - Cinza (MPa)	Solo - Cinza - Cal 1% (MPa)	Solo - Cinza - Cal 2% (MPa)
Resistência Média	0,3	1,25	0,78	0,36	0,54	0,56
Desv. Padrão	0,02	0,45	0,006	0,04	0,015	0,017

Fonte: Autor

Como apresentado na tabela 36, os valores de resistências a compressão simples foram discrepantes. Para melhor visualização, a Figura 57 mostra o comparativo das resistências à compressão simples das amostras.

Figura 57 - Comparativo de resistências à compressão simples das amostras



Fonte: Autor

Analisando a Figura 57, verifica-se que o solo estabilizado com cimento apresenta resistências superiores às demais misturas.

Como se vê na Figura 57, ao ser adicionado cinza ao solo, ocorreu um aumento de sua resistência à compressão simples de 17% em relação ao seu estado natural. Ao misturar solo – cinza – cal, esse aumento chega a 46%.

6. DISCUSSÃO

Ao término dos ensaios previstos na pesquisa, analisou-se os resultados da amostra de solo no seu estado natural e com mistura de cimento, cal e cinza de bagaço de cana de açúcar e a mistura solo – cinza – cal.

No ensaio de peneiramento, o solo estudado apresenta pequena quantidade de material fino argiloso, de 10,62%, que podem ser divididos entre siltes e argilas.

Os ensaios de consistência comprovaram essa pequena quantidade de material argiloso, pois seus resultados apresentaram índice de plasticidade de 3,41%, indicando que o solo possui pouca plasticidade.

Os resultados obtidos com ensaios diversos e normatizados, voltados para o uso de solo para pavimentação, classificaram o solo em estudo em A-2-5, pela classificação HRB. Além disso, possui características lateríticas pela classificação MCT.

O solo A-2-5, pela classificação HRB, possui boa capacidade de suporte para compor camadas de subleito de pavimentação, por não apresentar expansão elevada(0,12%), inferior a 3%.

No ensaio de caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar, os resultados foram insatisfatórios para essa característica, sendo que o índice de pozolânicidade da cinza teria que atingir valor superior a 90% e atingiu somente 56%.

Julga-se que devido a cinza não ter sofrido queima em temperatura constante, como citado nos trabalhos de Alavéz - Ramírez et al. (2012) e Ogunribido (2012), isso gerou variedades de tamanho de partículas grosseiras presentes na cinza coletada. Com isso, para atender as características esperadas, provavelmente haveria a necessidade de padronização da queima e posteriormente moer a cinza para atingir as granulometrias adequadas, como realizado nos estudos de Yadav et al, (2017) e Eberemu, (2013). No presente estudo, partiu-se do pressuposto de utilizar a cinza conforme saiu da caldeira da usina, sem nenhum tipo de tratamento prévio.

Os resultados de Proctor obtidos apresentados na Tabela 16 permitem verificar que ocorreu pequena redução de umidade ótima ao se adicionar cinza ao

solo, sendo que isso também aconteceu nos estudos de Alavéz - Ramírez et al, (2012).

O ensaio de Proctor, segundo a NBR 7182:2016, não indica a resistência do solo, mas a quantidade ideal de água que deve ser empregada no solo (teor de umidade ótimo) para que se possa atingir o melhor entrosamento entre as partículas sólidas presentes no solo e conseqüentemente a sua massa específica aparente seca máxima.

Do mesmo modo, o ensaio de compressão simples não é parâmetro de resistência para solos em camadas de pavimentação, segundo o DNIT (2006). Entretanto, pode auxiliar na inferência do aumento de coesão do solo estabilizado, conforme relatado por Dalla (2009), visto que este ensaio objetiva analisar a viabilidade da estabilização química.

Os ensaios de resistência à compressão resultaram que, ao adicionar outros materiais ao solo, aumentou-se sua coesão e conseqüentemente sua resistência ao cisalhamento, sugerindo seu emprego como estabilizante para o solo.

Para que o solo natural ou estabilizado possa ser usado em camadas de pavimento, deve atender a norma de pavimentação do DNIT 2006, sendo que para uso em bases de pavimentação teriam que atingir CBR de no mínimo 80% e para a sub-base o CBR deve ser superior a 20%, sendo aconselhado 40%.

A mistura solo-cinza não atingiu as resistências mínimas para compor as camadas nobres do pavimento, base e sub-base, também visto nos estudos de Yadav et al, (2017), que ao misturar cinza do bagaço de cana de açúcar e solo, sem emprego de nenhum aditivo, esta mistura apenas poderia ser utilizada para melhoria do subleito e camadas de reforço do subleito, devido os valores de CBRs obtido serem inferiores a 20%.

Ao adicionar 5% de cinza a massa de solo, o CBR do solo natural decresceu de 40% para 32%. Esse comportamento já havia sido observado nos estudos de Ogunribido (2012), que ao adicionar mais de 4% de cinza à massa de solo, o CBR do solo decresceu conforme aumentou-se a porcentagem de cinza.

Os ensaios com solo – cimento, solo – cal e solo – 5%cinza – 1%cal, mostraram resultados satisfatórios de estabilização, podendo compor as camadas de sub-base de pavimentação, pois seus CBR's atingiram respectivamente CBR =

65%, CBR = 52% e 78%, o que representou um aumento de 35%, 23% e 48,7 % em relação ao CBR do solo natural.

A mistura solo – 5%cinza – 2%cal, atingiu CBR de 82%, viabilizando a mistura para uso em base de pavimentação.

As misturas: solo – 5%cinza – 1%cal e solo – 5%cinza – 2%cal, fez com que o CBR do solo atingisse valores de 78% e 83%, o que representou um aumento respectivo 48,71% e 51,8%, podendo ser utilizado nas camadas nobres de pavimentação, sub-base e base. Os resultados foram de encontro com os estudos de Alavéz - Ramírez et al. (2012) que utilizou a mistura solo – cinza – cal, tornando possível a estabilização do solo laterítico, onde a combinação melhora as propriedades geotécnicas do solo, durabilidade, flexibilidade, aumento da massa específica aparente seca e compressibilidade. Entretanto, neste trabalho utilizou-se um percentual muito menor de cal, de apenas 1% e 2%, obtendo-se resultados altamente positivos, ao passo que Alavéz-Ramirez et al. (2012) utilizaram 10% de cal em seus trabalhos.

7. Conclusão

Poucos trabalhos científicos tratam a estabilização de solos lateríticos utilizando cinza de bagaço de cana de açúcar.

O solo do presente estudo pôde ser classificado como laterítico, que era um dos objetivos da pesquisa devido a sua enorme quantidade no território nacional.

O uso da cinza do bagaço de cana de açúcar, coletada da caldeira sem controle de queima, não apresentou características pozolânicas.

Ao ser incorporada ao solo laterítico sem aglomerantes, diminuiu sensivelmente sua resistência, inviabilizando o uso em camadas nobres de pavimentação. Entretanto, pode ser utilizada desde que o solo, além da cinza de cana-de-açúcar, tenha adição de cal.

Com a adição de 1% de cal ao solo e 5% de cinza do bagaço de cana de açúcar, atingiu CBR de 78%, viabilizando a utilização da mistura em sub-base de pavimentação.

Com a adição de 2% de cal ao solo e 5% de cinza do bagaço de cana de açúcar, conseguiu-se estabilizar o solo laterítico, atingindo CBR de 82%, possibilitando uma aplicação nobre desse resíduo, racionalizando o uso de materiais naturais para estabilização de solos.

Deste modo, conclui-se pela viabilidade técnica e ambiental do uso do solo com mistura de 5% de cinza de bagaço de cana de açúcar e 2% de cal, para bases de pavimentação.

Para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar os aspectos econômicos, não contemplados nesta dissertação, bem como realizar ensaios com uniformização da queima da cinza e posterior peneiramento.

Por fim, julga-se importante que as Normas Técnicas incorporem a possibilidade de utilização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar aos solos, sendo fundamental atuar junto às usinas para certificar a qualidade da cinza.

8. REFERENCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6457: **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. ABNT, 2016.

_____. NBR 5752: **Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. ABNT, 2016.

_____. NBR 6459: **Solo – Determinação do limite de liquidez**. ABNT, 2016.

_____. NBR 6508: **Massa específica dos Sólidos**. ABNT, 1984a.

_____. NBR 7180: **Solo- Determinação do limite de plasticidade**. ABNT, 2016.

_____. NBR 7181: **Solo – Análise granulométrica**. ABNT, 2017.

_____. NBR 7182: **Solo – Ensaio de Compactação**. ABNT, 2016.

_____. NBR 7207: **Terminologia e classificação de Pavimentação**. ABNT, 2014.

_____. NBR 7211: **Agregados para Concreto**. ABNT, 2009.

_____. NBR 9895: **Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio**. ABNT, 2016.

_____. NBR 12025: **Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio**. ABNT, 2012.

_____. NBR 12653: **Materiais Pozolânicos — Requisitos**. ABNT, 2014.

_____. NBR 15894: **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos**. ABNT, 2010.

_____. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. ABNT, 2003.

ALAVÉZ - RAMÍREZ R.; MONTES - GARCÍA P.; MARTÍNEZ - REYES J.; ALTAMIRANO - JUÁREZ. D. C.; GOCHI - PONCE Y. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. **Construction and Building Materials**. v 34, n 34, p. 296-305, Abr, 2012.

ALMEIDA, M.S.S.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; MACHADO, C. C.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, C. H. C. Correção granulométrica de solos para aplicações em estradas florestais: estudo de caso com solos da Cenibra. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 34, n. 6, p. 1085 – 1090, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D-3282-09, **Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**, West Conshohocken, PA, 2009.

BALBO, J.T., **Pavimentação asfáltica - materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.558p.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1. Ed. Rio de Janeiro. 2006. 504 p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6.ed. Vol. 1. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.

CAPUTO, H.P.; CAPUTO, A.N.; RODRIGUES, J.M.A. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**, volume 1: Fundamentos. Rio de Janeiro: LTC, 7ªed., 2016.

CASTRO, B.A.C. **Construção de estradas e vias urbanas**. Belo Horizonte: UFMG/Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, 2009. Notas de Aula.

COELHO, R. V.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; FONTENELE, H. B.; TEIXEIRA, R. S. Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, vol.10, n. 2, (2015).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE (CNT). Disponível em: <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/Rodoviario/1-1-/Principais-dados>. Acesso em: out. 2018.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009

DELGADO, A. K.; CARVALHO, J. C.; CARDOSO, F. B. F. Influência da estabilização química no comportamento de solos finos compactados. **Anais do XVII Congresso Ibero-LatinoAmericano Del Asfalto**, CILA, Guatemala, C.A., 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER/SP). IP-DE-P00/001. **Projeto de Pavimentação**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV**. DNER-ME 258/94, Rio de Janeiro, 1994.

_____. **Classificação de solos tropicais para finalidades viárias utilizando corpos-de prova compactados em equipamento miniatura**. DNER-CLA 259/96, Rio de Janeiro, 1996.

_____. **Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão.** DNER-ME 256/96, Rio de Janeiro, 1994.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** DNIT 141/2010 – ES, Rio de Janeiro, 2010.

EBEREMU, A. O. Evaluation of bagasse ash treated lateritic soil as a potential barrier material in waste containment application. **Acta Geotechnica.** v 8, n. 4, p. 407-421, Fev, 2013.

FRAENKEL, B. B. **Engenharia Rodoviária.** 3 Ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A, 1980.852p

FRANÇA, F.C., **Estabilização química de solos para fins rodoviários:** estudo de caso com o produto “RBI GRADE 91”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

FRESNEDA C.S; NAVARRO S.S; VALENCIA. Y.G. “Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico”. **INGE CUC**, vol. 9, n. 1, p. 219-230, Jun, 2013.

GAMBILL.D. R.; WALL .W A.; FULTON A. J.; HEIDI R. Howard. Predicting USCS soil classification from soil property variables using Random Forest. **Journal of Terramechanics**, v.65, p.85–92, 2016.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil.** São Paulo: Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2002. 341 p.

HOUBEN, H. & H. GUILLAUD. Earth construction: a comprehensive guide. **Intermediate Technology Publications**, London. 362 p, 1994.

LEAL. C. L. D; CASTRO. P. F. Aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como fíler em concreto asfáltico. **VÉRTICES**, v. 9, n. 1/3, jan./dez. 2007

LIMA, S. A.; HUMBERTO, V.; SALES, A.; NETO, V.F. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. **Construction & Building Materials**, v. 35, p. 829-837, 2012.

Lopes. B. C. S; BRITO. A. F. S; SARMENTO. A. P; DELALIBERA. R. G. Análise da viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana de açúcar como substituição parcial do cimento Portland. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 3, out. 2014.

MACHADO, L. F. M.; CAVALCANTE, E. H.; ALBUQUERQUE, F. S.; SALES, A.T.C. Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos. **Revista Matéria**, v.22, n.3, 2017.

MAIA. J. P. S.; SOUSA. J. F. M.; JUNIOR. C. L. M. Avaliação do Comportamento Físico e Mecânico de um Solo. **Vetor - Revista de Ciências Exatas e Engenharias** , Rio Grande do Norte, v. 25, n. 1, p. 57-75, 2015.

MARTINS FILHO. S. T.; MARTINS. C. H. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá - PR**, v.10, n.4, p.1205-1225, 2017.

MASSAD, FAIÇAL. **Mecânica dos Solos Experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

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

MOGROVEJO, D. R. L. **Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel kraft**. 2013. 181 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MORANDINI, T. L. C. **Solos tropicais e bentonita: análise geotécnica de misturas com ênfase na abordagem coloidal**. 2014. 267f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotecnia) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

OGUNRIBIDO, T. H. T. Potentials of Sugar Cane Straw Ash for Lateritic Soil Stabilization in Road Construction. **International Journal of Science & Emerging Technologies**, v. 3, n.5, p.102-106, Maio. 2012.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: IAC; Rio de Janeiro: EMBRAPA-Solos, 1999. 64p.: mapa.

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

ONYELOWE, K. C.; OKAFOR, F. O. A comparative review of soil modification methods. **ARNP Journal of Earth Sciences**, Ipswich- MA, v.1, n.2, p.36-41, 2012.

Osinubi. K. J, Bafyau. V, Eberemu. A.O. Bagasse ash stabilization of lateritic soil. In: Yanful EK (ed) Contribution to chapter 5 in appropriate technologies for environmental protection in the developing world. **Springer**, Holanda, p 281–290, 2009.

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

PEREIRA, R. S.; EMMERT, F.; MIGUEL, E. P.; MOTA, F. C. M.; REZENDE, A. V.; LEAL, F. A. C. Estabilização mecânica de solos como alternativa na construção de estradas florestais de baixo custo. **Revista Nativa**, Sinop, Mato Grosso, v.5, n.3, p.212-2017, 2017.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.

PINTO, G. J. F.; MELO E. S. R. L; NOTARO, K. A. Geração de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Métodos de Cálculo. **VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Campina Grande – PB, 2016.

REZENDE. M. F; MACHADO. F. C. S; GOUVEIA. A. M. C; BEZERRA. A. C. S; GRILLO. R. H. F; ORTIGARA. Y. V. B. Substituição parcial do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar em habitações de interesse social. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 9, n. 1, mar. 2017.

ROCHA, M.T.; REZENDE, L.R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Revista Matéria**, v.22, n.4, 2017.

SANTOS, A. L. **Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando a aplicação em pavimentação**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado), UFSJ, - Universidade Federal de São João del-Rei, Minas Gerais.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado), USP- Universidade de São Paulo, São Carlos.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. vol.1. ed.2. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, M. F. Estudo da **Estabilização com Cal de um solo Laterítico e um solo não Laterítico**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

TEIXEIRA, IVONEI. **Estabilização de um Solo Laterítico Argiloso para utilização como camada de**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia**. Tradução de A. J. C. Nunes e M. L. C. Campello. 1. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro técnico, 1962.

TRINDADE, T.P.; et. al. **Compactação de solos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. Viçosa: Editora UFV, 2008. 95 p.

UNICA - **UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. UNICADATA**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br> . Acesso em: 05 nov. 2017.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas: Bases alternativas com solos lateríticos** Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. 3. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRZA, P.R.M. e ZUPPOLINI, A.N. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas, Bases Alternativas com Solos Lateríticos**. 2007. São Paulo

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

WINTERKORN, H. F.; PAMUKCU, S. Soil Stabilization and Grouting. In: FANG, H. Y (Ed). **Foundation Engineering Handbook**.ed,2. New York, US: Springer, 1991.

Yadav AK, Gaurav K, Kishor R, Suman SK. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads. **Int J Pavement Res Technol**, v. 10, ed. 3, p. 254–61, maio, 2017.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios de caracterização pozolanica.

Tabela – A.1 Ensaio Argamassa com 25% de cinza.

Ensaio de Caracterização da Cinza - Argamassa com 25% de cinza – 28 dias.	
Massa específica da cinza = 0,53g/cm³	
Corpo de Prova	Tensão máxima (MPa)
CP1	19,94
CP2	15,64
CP3	18,7
CP4	19,25
CP5	17,72
CP6	22,55
Numero de CPs	6
Média	18,97
Mediana	18,98
Desv. Padrão	2.305
Coef. Var..(%)	12,15
Mínimo	15,64
Máximo	22,55

Fonte: Autor

Tabela – A.2 Ensaio Argamassa somente com cimento

Ensaio de Caracterização da Cinza - Argamassa somente com Cimento – Referência – 28dias.	
Corpo de Prova	Tensão máxima (MPa)
CP1	43,28
CP2	30,55
CP3	29,41
CP4	30,94
CP5	25,86
CP6	32,13
Numero de CPs	6
Média	32,03
Mediana	30,75
Desv. Padrão	5.914
Coef. Var.(%)	18,47
Mínimo	25,86
Máximo	43,28

Fonte: Autor

Apêndice B – Resultados e Roteiro do ensaio de Proctor intermediário do solo natural

Tabela – B.1 Resultados obtidos no ensaio de Proctor utilizando energia de compactação intermediária.

Ensaio de Compactação - NBR 7182:2016					
Cilindro	1	2	3	4	5
Vol. do cilindro (m ³)	990,27	990,27	990,27	990,27	990,27
Tara do cilindro(g)	2460	2460	2460	2460	2460
Massa do cilindro + solo úmido (g)	4320	4505	4490	4430	4379
Massa do solo úmido(g)	1860	2045	2030	1970	1919
Massa específica do solo úmido (g/m ³)	1,88	2,07	2,05	1,99	1,94
Massa específica aparentemente seca (g/m ³)	1,57	1,68	1,61	1,52	1,45
Teor de Umidade (W)					
Capsula n ^o	8	25	37	75	133
Capsula com solo úmido(g)	69,80	90,00	87,80	108,80	86,00
Capsula com solo seco(g)	62,90	78,40	75,10	89,50	71,23
Massa da água(g)	6,90	11,60	12,70	19,30	14,77
Tara da capsula(g)	27,50	27,40	29,00	26,70	27,90
Massa do solo seco(g)	35,40	51,00	46,10	62,80	43,33
Teor de umidade (w) (%)	19,49	22,75	27,55	30,73	34,09
Fator de Correção (adimensional)	0,84	0,81	0,78	0,76	0,75

Fonte: Autor

APÊNDICE C - Resultados e Roteiro do ensaio de Proctor intermediário do solo - cimento

Tabela – C.1 Resultados obtidos no ensaio de Proctor utilizando energia de compactação intermediária.

Ensaio de Compactação - NBR 7182:2016					
Cilindro	1	2	3	4	5
Vol. do cilindro (m ³)	915,19	915,19	915,19	915,19	915,19
Tara do cilindro(g)	2115	2115	2115	2115	2115
Massa do cilindro + solo úmido (g)	3960	4090	4060	3997	3845
Massa do solo úmido(g)	1845	1975	1945	1882	1730
Massa específica do solo úmido (g/m ³)	2,02	2,16	2,13	2,06	1,89
Massa específica aparentemente seca (g/m ³)	1,69	1,77	1,67	1,59	1,44
Teor de Umidade (W)					
Capsula n ^o	2	10	33	102	125
Capsula com solo úmido(g)	75,40	90,20	89,40	92,80	79,80
Capsula com solo seco(g)	67,80	79,40	76,20	78,10	67,50
Massa da água(g)	7,60	10,80	13,20	14,70	12,30
Tara da capsula(g)	28,60	29,40	27,30	28,50	28,30
Massa do solo seco(g)	39,20	50,00	48,90	49,60	39,20
Teor de umidade (w) (%)	19,39	21,60	26,99	29,64	31,38
Fator de Correção (adimensional)	0,84	0,82	0,79	0,77	0,76

Fonte: Autor

Apêndice D - Resultados e Roteiro do ensaio de Proctor intermediário do solo - cal

Tabela – D.1 Resultados obtidos no ensaio de Proctor utilizando energia de compactação intermediária.

Ensaio de Compactação - NBR 7182					
Cilindro	1	2	3	4	5
Vol. do cilindro (m ³)	915,19	915,19	915,19	915,19	915,19
Tara do cilindro(g)	2115	2115	2115	2115	2115
Massa do cilindro + solo úmido (g)	3910	4100	4040	3970	3867
Massa do solo úmido(g)	1795	1985	1925	1855	1752
Massa específica do solo úmido (g/m ³)	1,96	2,17	2,10	2,03	1,91
Massa específica aparentemente seca (g/m ³)	1,60	1,73	1,62	1,52	1,38
Teor de Umidade (W)					
Capsula nº	5	23	56	101	153
Capsula com solo úmido(g)	81,70	84,20	81,20	88,30	88,10
Capsula com solo seco(g)	72,10	72,80	69,60	73,50	71,50
Massa da água(g)	9,60	11,40	11,60	14,80	16,60
Tara da capsula(g)	30,10	27,90	30,80	28,80	28,20
Massa do solo seco(g)	42,00	44,90	38,80	44,70	43,30
Teor de umidade (w) (%)	22,86	25,39	29,90	33,11	38,34
Fator de Correção (adimensional)	0,81	0,80	0,77	0,75	0,72

Fonte: Autor

Apêndice E - Resultados e Roteiro do ensaio de Proctor intermediário do solo - cinza

Tabela – E.1 Resultados obtidos no ensaio de Proctor utilizando energia de compactação intermediária.

Ensaio de Compactação - NBR 7182					
Cilindro	1	2	3	4	5
Vol. do cilindro (m ³)	915,19	915,19	915,19	915,19	915,19
Tara do cilindro(g)	2115	2115	2115	2115	2115
Massa do cilindro + solo úmido (g)	3770	3960	3899	3745	3670
Massa do solo úmido(g)	1655	1845	1784	1630	1555
Massa específica do solo úmido (g/m ³)	1,81	2,02	1,95	1,78	1,70
Massa específica aparentemente seca (g/m ³)	1,55	1,67	1,55	1,38	1,25
Teor de Umidade (W)					
Capsula nº	10	40	41	78	88
Capsula com solo úmido(g)	88,00	88,20	77,20	77,50	83,30
Capsula com solo seco(g)	79,50	78,00	67,10	66,20	68,60
Massa da água(g)	8,50	10,20	10,10	11,30	14,70
Tara da capsula(g)	27,40	28,70	27,50	27,20	28,10
Massa do solo seco(g)	52,10	49,30	39,60	39,00	40,50
Teor de umidade (w) (%)	16,31	20,69	25,51	28,97	36,30
Fator de Correção (adimensional)	0,86	0,83	0,80	0,78	0,73

Fonte: Autor

APÊNDICE F - Resultados e Roteiro do ensaio de Proctor intermediário do solo – 5%cinza – 1%cal.

Tabela – F.1 Resultados obtidos no ensaio de Proctor utilizando energia de compactação intermediária.

Ensaio de Compactação - NBR 7182					
Cilindro	1	2	3	4	5
Vol do cilindro (m ³)	986,3	986,3	986,3	986,3	986,3
Tara do cilindro(g)	2165	2165	2165	2165	2165
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	3990	4160	4085	4030	4020
Massa do Solo úmido(g)	1825	1995	1920	1865	1855
Massa especifica do solo úmido(g/m ³)	1,85	2,02	1,95	1,89	1,88
Massa especifica do solo seco(g/m ³)	1,59	1,68	1,57	1,48	1,46
Teor de Umidade (W)					
Capsula nº	77	99	103	135	168
Capsula com solo úmido(g)	48,70	46,70	46,10	45,60	56,90
Capsula com solo seco(g)	45,90	43,50	42,30	41,80	50,20
Massa da água(g)	2,80	3,20	3,80	3,80	6,70
Tara da Capsula(g)	28,90	28,00	26,30	27,90	27,10
Massa do solo seco(g)	17,00	15,50	16,00	13,90	23,10
Teor de umidade(%)	16,47	20,65	23,75	27,34	29,00
Fator de Correção(adimensional)	0,86	0,83	0,81	0,79	0,78

Fonte: Autor

Apêndice G - Resultados e Roteiro do ensaio de Proctor intermediário do solo – 5%cinza – 2%cal.

Tabela – G.1 Resultados obtidos no ensaio de Proctor utilizando energia de compactação intermediária.

Ensaio de Compactação - NBR 7182					
Cilindro	1	2	3	4	5
Vol. do cilindro (m ³)	990,27	990,27	990,27	990,27	990,27
Tara do cilindro(g)	2460	2460	2460	2460	2460
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	4380	4480	4430	4400	4365
Massa do Solo úmido(g)	1920	2020	1970	1940	1905
Massa especifica do solo úmido(g/m ³)	1,94	2,04	1,99	1,96	1,92
Massa especifica do solo seco(g/m ³)	1,66	1,71	1,62	1,58	1,52
Teor de Umidade (W)					
Capsula nº	81	83	90	91	92
Capsula com solo úmido(g)	47,70	47,80	48,90	46,60	47,90
Capsula com solo seco(g)	45,10	44,90	44,90	42,90	43,80
Massa da água(g)	2,60	2,90	4,00	3,70	4,10
Tara da Capsula(g)	29,90	29,80	27,30	27,60	28,20
Massa do solo seco(g)	15,20	15,10	17,60	15,30	15,60
Teor de umidade(%)	17,11	19,21	22,73	24,18	26,28
Fator de Correção(adimensional)	0,85	0,84	0,81	0,81	0,79

Fonte: Autor.

APÊNDICE H - Resultados e Roteiro do ensaio de CBR do solo natural.

Tabela – H.1 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 23\%$.

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo Natural					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 23\%$	$\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5424g	Volume = 2309,37cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE			PENETRAÇÃO		
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	99,2	94,9	0,63	1,9	262,2
Ms +Tara	85,8	82,6	1,25	3,0	414
M. Água	13,4	12,3	2,5	3,9	538,2
Tara	27,5	28,2	5	5,5	759
M. Seca	58,3	54,4	7,5	6,6	910,8
Umidade	23	22,6	10	7,5	1035
Média	22,80		12,5	8,5	1173
CBR (%) 2,5mm 39,9		CBR (%) 5,0mm 37,03		CBR FINAL = 40%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,12	0,12	0,13	0,15	0,12

Fonte: Autor.

Tabela – H.2 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 22\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo Natural					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 22\%$	$\gamma_s = 1,66 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5540g	Volume = 2327,58cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE			PENETRAÇÃO		
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	97,1	94,4	0,63	1,8	248,4
Ms +Tara	84,5	82,5	1,25	2,9	400,2
M. Água	12,6	11,9	2,5	3,8	524,4
Tara	27,5	28,2	5	5,4	745,2
M. Seca	57	54,3	7,5	6,9	952,2
Umidade	22,1	21,9	10	7,8	1076,4
Média	22,00		12,5	8,7	1200,6
CBR (%) 2,5mm 38,8		CBR (%) 5,0mm 36,4		CBR FINAL = 39%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,12	0,13	0,13	0,15	0,12

Fonte: Autor

Tabela – H.3 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 24\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo Natural					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 24\%$	$\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5460g	Volume = 2312,41cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	91,5	87,6	0,63	1,6	220,8
Ms +Tara	79,1	76	1,25	2,5	345
M. Água	12,4	11,6	2,5	3,3	455,4
Tara	27,5	28,2	5	5,4	745,2
M. Seca	51,6	47,8	7,5	6,7	924,6
Umidade	24,03	24,26	10	8,8	1214,4
Média	24,15		12,5	9,7	1338,6
CBR (%) 2,5mm 33,7		CBR (%) 5,0mm 36,4		CBR FINAL = 36%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,13	0,14	0,14	0,16	0,13

Fonte: Autor

APÊNDICE I - Resultados e Roteiro do ensaio de CBR do solo – cimento.

Tabela – I.1 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 21\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cimento					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 21\%$	$\gamma_s = 1,76 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5525g	Volume = 2314,23cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	113,1	82,7	0,63	3,4	469,2
Ms +Tara	98,3	73,2	1,25	5	690
M. Água	14,8	9,5	2,5	6,4	883,2
Tara	28,5	29,1	5	8,4	1159,2
M. Seca	69,8	44,1	7,5	9,4	1297,2
Umidade	21,2	21,5	10	10,6	1462,8
Média	21,37		12,5	12	1656
CBR (%) 2,5mm 65,4		CBR (%) 5,0mm 56,6		CBR FINAL = 65%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,24	0,24	0,26	0,27	0,21

Fonte: Autor

Tabela – I.2 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 20\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cimento					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 20\%$	$\gamma_s = 1,76 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5460g	Volume = 2312,41cm³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE			PENETRAÇÃO		
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	14	115	0,63	3,6	496,8
Ms +Tara	88,3	81,3	1,25	5,2	717,6
M. Água	11,7	10,6	2,5	6,3	869,4
Tara	28,5	29,1	5	8,1	1117,8
M. Seca	59,8	52,2	7,5	9,1	1255,8
Umidade	19,6	20,3	10	10	1380
Média	19,90		12,5	11,8	1628,4
CBR (%) 2,5mm		CBR (%) 5,0mm		CBR FINAL = 64%	
64,4		54,5			
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,22	0,24	0,25	0,25	0,20

Fonte: Autor

Tabela – I.3 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 22\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cimento					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 22\%$	$\gamma_s = 1,76 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5540g	Volume = 2327,58cm³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE			PENETRAÇÃO		
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	14	115	0,63	3	414
Ms +Tara	87,8	88,9	1,25	4,9	676,2
M. Água	76,9	78	2,5	5,9	814,2
Tara	10,9	10,9	5	7,6	1048,8
M. Seca	28,5	29,1	7,5	9	1242
Umidade	48,4	48,9	10	9,9	1366,2
Média	22,5	22,3	12,5	10,9	1504,2
CBR (%) 2,5mm		CBR (%) 5,0mm		CBR FINAL = 60%	
60,3		51,2			
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,24	0,26	0,27	0,29	0,23

Fonte: Autor

APÊNDICE J - Resultados e Roteiro do ensaio de CBR do solo – cal.

Tabela – J.1 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 25\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cal					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 25\%$	$\gamma_s = 1,72 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5525g	Volume = 2314,23cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE			PENETRAÇÃO		
Cap. Nº	26	57	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	98,7	87,5	0,63	2,9	400,2
Ms +Tara	84,9	75,7	1,25	4,8	662,4
M. Água	13,8	11,8	2,5	5,1	703,8
Tara	29,5	28,4	5	6,4	883,2
M. Seca	55,4	47,3	7,5	8,8	1214,4
Umidade	24,91	24,95	10	11,6	1600,8
Média	24,93		12,5	12,1	1669,8
CBR (%) 2,5mm 52,1		CBR (%) 5,0mm 43,1		CBR FINAL = 52%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,21	0,24	0,26	0,29	0,23

Fonte: Autor

Tabela – J.2 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 24\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cal					
Compactação (Proctor Intermediário)			$W_o = 24\%$	$\gamma_s = 1,72 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5540g	Volume = 2327,58cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE			PENETRAÇÃO		
Cap. Nº	26	57	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	99,8	77,2	0,63	2,7	372,6
Ms +Tara	86,1	67,7	1,25	4	552
M. Água	13,7	9,5	2,5	4,9	676,2
Tara	29,5	28,4	5	6	828
M. Seca	56,6	39,3	7,5	9,1	1255,8
Umidade	24,20	24,17	10	10,9	1504,2
Média	24,19		12,5	12,3	1697,4
CBR (%) 2,5mm 50,1		CBR (%) 5,0mm 40,4		CBR FINAL = 50%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,22	0,23	0,27	0,29	0,23

Fonte: Autor

Tabela – J.3 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 24\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cal						
Compactação (Proctor Intermediário)				$W_o = 26\%$	$\gamma_s = 1,72 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5460g	Volume = 2312,41cm³	Const. Prensa = 138kgf		
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO		
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)	
Mh +Tara	76,8	81,2	0,63	2,8	386,4	
Ms +Tara	67	70,2	1,25	4,9	676,2	
M. Água	9,8	11	2,5	5,0	690	
Tara	29,5	28,4	5	6,2	855,6	
M. Seca	37,5	41,8	7,5	10,3	1421,4	
Umidade	26,13	26,32	10	11,5	1587	
Média	26,22		12,5	12,9	1780,2	
CBR (%) 2,5mm		CBR (%) 5,0mm		CBR FINAL = 51%		
51,1		41,7				
Expansão						
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)	
	0,22	0,24	0,29	0,3	0,24	

Fonte: Autor

APÊNDICE K - Resultados e Roteiro do ensaio de CBR do solo – cinza.

Tabela – K.1 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 21\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cinza						
Compactação (Proctor Intermediário)				$W_o = 21\%$	$\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5440g	Volume = 2327,58cm³	Const. Prensa = 138kgf		
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO		
Cap. Nº			Mm	Leitura	Carga (kg)	
Mh +Tara	96,9	90,5	0,63	1,8	248,4	
Ms +Tara	85,1	79,7	1,25	2,7	372,6	
M. Água	11,8	10,8	2,5	3,1	427,8	
Tara	28	28,8	5	3,5	483	
M. Seca	57,1	50,9	7,5	4,3	593,4	
Umidade	20,67	21,22	10	4,9	676,2	
Média	20,94		12,5	5,5	759	
CBR (%) 2,5mm		CBR (%) 5,0mm		CBR FINAL = 32%		
31,7		23,6				
Expansão						
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)	
	0,42	0,44	0,47	0,48	0,38	

Fonte: Autor

Tabela – K.2 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 20\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cinza					
Compactação (Proctor Intermediário)				$W_o = 20\%$	$\gamma_s = 1,66 \text{ g/cm}^3$
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5460g	Volume = 2312,41cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	25	54	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	91,7	95,4	0,63	1,6	220,8
Ms +Tara	81,1	84	1,25	2,4	331,2
M. Água	10,6	11,4	2,5	2,8	386,4
Tara	28	28,8	5	3,3	455,4
M. Seca	53,1	55,2	7,5	5,3	731,4
Umidade	19,96	20,65	10	6,1	841,8
Média	20,31		12,5	7	966
CBR (%) 2,5mm 28,6		CBR (%) 5,0mm 22,2		CBR FINAL = 29%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,41	0,44	0,48	0,48	0,38

Fonte: Autor

Tabela – K.3 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 22\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x Cinza					
Compactação (Proctor Intermediário)				$W_o = 22\%$	$\gamma_s = 1,68 \text{ g/cm}^3$
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara = 5525g	Volume = 2314,23cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	25	54	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	95,7	100,4	0,63	1,9	262,2
Ms +Tara	83,4	87,6	1,25	2,7	372,6
M. Água	12,3	12,8	2,5	3	414
Tara	28	28,8	5	3,7	510,6
M. Seca	55,4	58,8	7,5	5,1	703,8
Umidade	22,20	21,77	10	5,7	786,6
Média	21,99		12,5	6	828
CBR (%) 2,5mm 30,7		CBR (%) 5,0mm 24,9		CBR FINAL = 29%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,41	0,45	0,46	0,49	0,39

Fonte: Autor

APÊNDICE L - Resultados e Roteiro do ensaio de CBR do solo – 5%cinza – 1%cal.

Tabela – L.1 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 20\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x 5%Cinza x 1%Cal					
Compactação (Procto Intermediário)			$W_o = 20\%$	$\gamma_s = 1,69\text{g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara= 5525g	Volume = 2314,23cm³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	5	8	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	71,4	95,9	0,63	3,1	427,8
Ms +Tara	64,3	84,5	1,25	4	552
M. Água	7,1	11,4	2,5	7,6	1048,8
Tara	29,5	28,6	5	8,5	1173
M. Seca	34,8	55,9	7,5	9,9	1366,2
Umidade	20,40	20,39	10	11	1518
Média	20,40		12,5	12,7	1752,6
CBR (%) 2,5mm		CBR (%) 5,0mm	CBR FINAL = 78%		
77,69		57,22			
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,28	0,29	0,3	0,3	0,24

Fonte: Autor

Tabela – L.2 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 19\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x 5%Cinza x 1%Cal					
Compactação (Procto Intermediário)			$W_o = 19\%$	$\gamma_s = 1,68\text{g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara= 5440g	Volume = 2327,58cm³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	44	47	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	86,8	90	0,63	3	414
Ms +Tara	77,5	80,2	1,25	4,6	634,8
M. Água	9,3	9,8	2,5	6,9	952,2
Tara	28,3	29,1	5	7,9	1090,2
M. Seca	49,2	51,1	7,5	8,3	1145,4
Umidade	18,90	19,18	10	9,9	1366,2
Média	19,04		12,5	11,5	1587
CBR (%) 2,5mm		CBR (%) 5,0mm	CBR FINAL = 71%		
70,53		53,18			
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,27	0,27	0,31	0,31	0,25

Fonte: Autor

Tabela – L.3 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 21\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x 5%Cinza x 1%Cal					
Compactação (Procto Intermediário)			$W_o = 21\%$	$\gamma_s = 1,69\text{g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara= 5460g	Volume = 2312,41cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	25	54	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	85,7	99,4	0,63	2,9	400,2
Ms +Tara	75,5	86,9	1,25	4	552
M. Água	10,2	12,5	2,5	7,4	1021,2
Tara	26,5	27,8	5	8	1104
M. Seca	49	59,1	7,5	10	1380
Umidade	20,82	21,15	10	11	1518
Média	20,98		12,5	12	1656
CBR (%) 2,5mm 75,64		CBR (%) 5,0mm 53,85		CBR FINAL = 76%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,27	0,29	0,29	0,31	0,25

Fonte: Autor

APÊNDICE M - Resultados e Roteiro do ensaio de CBR do solo – 5%cinza – 2%cal.

Tabela – M.1 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 20\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x 5%Cinza x 2%Cal					
Compactação (Procto Intermediário)			$W_o = 20\%$	$\gamma_s = 1,72\text{g/cm}^3$	
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara= 5525g	Volume = 2314,23cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	177	178	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	61,4	65,9	0,63	4,1	565,8
Ms +Tara	55,8	59,4	1,25	5	690
M. Água	5,6	6,5	2,5	8,1	1117,8
Tara	27,5	27,6	5	9,6	1324,8
M. Seca	28,3	31,8	7,5	11,3	1559,4
Umidade	19,80	20,44	10	14,1	1945,8
Média	20,11		12,5	16	2208
CBR (%) 2,5mm 82,8		CBR (%) 5,0mm 64,62		CBR FINAL = 83%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,28	0,28	0,28	0,3	0,24

Fonte: Autor

Tabela – M.2 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 19\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x 5%Cinza x 2%Cal					
Compactação (Procto Intermediário)				$W_o = 19\%$	$\gamma_s = 1,70\text{g/cm}^3$
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara= 5440g	Volume = 2327,58cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	203	204	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	96,8	102	0,63	4	552
Ms +Tara	85,7	89,9	1,25	5,1	703,8
M. Água	11,1	12,1	2,5	7,9	1090,2
Tara	27,3	27,5	5	9,5	1311
M. Seca	58,4	62,4	7,5	12	1656
Umidade	19,01	19,39	10	13,3	1835,4
Média	19,20		12,5	14	1932
CBR (%) 2,5mm 80,76		CBR (%) 5,0mm 63,95		CBR FINAL = 81%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,26	0,27	0,3	0,3	0,24

Fonte: Autor

Tabela – M.3 Resultados obtidos no ensaio de CBR utilizando energia de compactação intermediária com $W_o = 19\%$

Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Ensaio de CBR - Solo x 5%Cinza x 2%Cal					
Compactação (Procto Intermediário)				$W_o = 21\%$	$\gamma_s = 1,70\text{g/cm}^3$
CBR (Intermediário)	Cilindro = Grande	Tara= 5460g	Volume = 2312,41cm ³	Const. Prensa = 138kgf	
TEORES DE UMIDADE				PENETRAÇÃO	
Cap. Nº	51	61	Mm	Leitura	Carga (kg)
Mh +Tara	55,7	59,4	0,63	3,8	524,4
Ms +Tara	51	53,9	1,25	4	552
M. Água	4,7	5,5	2,5	7,7	1062,6
Tara	29	27,9	5	9	1242
M. Seca	22	26	7,5	11,9	1642,2
Umidade	21,36	21,15	10	13	1794
Média	21,26		12,5	16,1	2221,8
CBR (%) 2,5mm 78,71		CBR (%) 5,0mm 60,60		CBR FINAL = 79%	
Expansão					
Leituras	1º	2º	3º	4º	Final (%)
	0,27	0,29	0,29	0,31	0,25

Fonte: Autor

APÊNDICE N – Resultados do Ensaio de resistência a compressão simples do solo natural e solo-estabilizado.

Tabela – N.1 Resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão simples do solo natural e solo-estabilizado.

Resistência a Compressão Simples (7 dias)						
Corpo de Prova	Solo Natural (MPa)	Solo - Cimento (MPa)	Solo - Cal (MPa)	Solo - Cinza (MPa)	Solo - Cinza - Cal 1% (MPa)	Solo - Cinza - Cal 2% (MPa)
1	0,3	1,2	0,79	0,37	0,55	0,55
2	0,32	1,25	0,78	0,4	0,52	0,55
3	0,28	1,29	0,78	0,32	0,54	0,58
Resistência Média	0,3	1,25	0,78	0,36	0,54	0,56
DESV. Padrão	0,02	0,045	0,006	0,040	0,015	0,017

Fonte: Autor