



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Weslany Fernandes Rodrigues

APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Palmas – TO

2019

Weslany Fernandes Rodrigues

APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ
PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA)

Orientador: Prof. Esp. Fernando Moreno Suarte Júnior.

Palmas – TO
2019

Weslany Fernandes Rodrigues

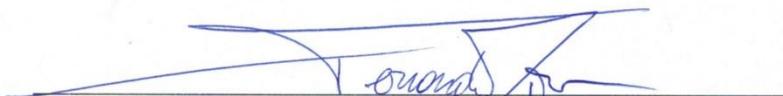
APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CINZA DA CASCA DE
ARROZ PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e
apresentado como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro
Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA)

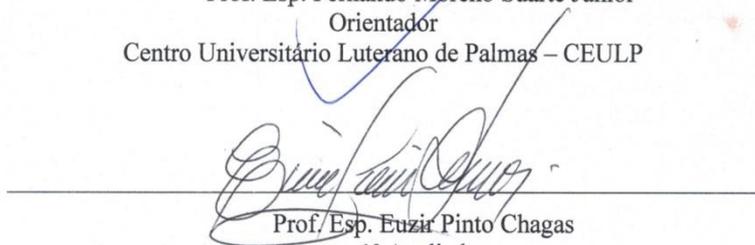
Orientador: Prof. Esp. Fernando Moreno Suarte Júnior.

Aprovado em: 28/05/2019

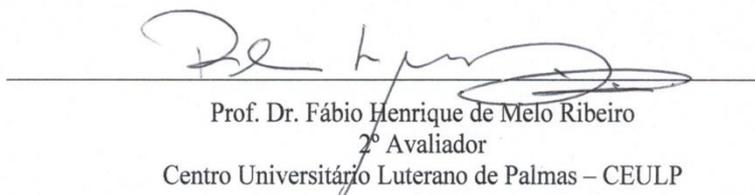
BANCA EXAMINADORA



Prof. Esp. Fernando Moreno Suarte Júnior
Orientador
Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. Esp. Euzir Pinto Chagas
1º Avaliador
Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro
2º Avaliador
Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2019

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me deu o dom da vida, a coragem, a sabedoria e, acima de tudo saúde. A meus pais Silvane e Weliton que me ajudaram e me apoiaram em tudo o que estava ao seu alcance, para que concluíssemos junto esse sonho.

A meu namorado Pedro Henrique pelas tantas vezes em que disse que acreditava em mim, no meu potencial, por toda parceria, compreensão e por nunca ter medido esforços para me ajudar durante essa trajetória.

Aos amigos que estiveram segurando minha mão, acreditando e me ajudando, especialmente à Thamires, Lucas Henrique e Danilo, que tornaram essa experiência melhor e mais leve. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus professores por cada orientação, dica e auxílio. Sem a dedicação e conhecimento de cada um deles, certamente tudo teria sido muito mais difícil.

Ao laboratório do CEULP/ULBRA pela cessão dos equipamentos. E a todos os seus funcionários pela disponibilidade e atenção sempre que necessário.

Agradeço ainda aos meus amigos por me darem força, incentivo e não me deixarem desistir.

A todos, o meu muito obrigado.

RESUMO

RODRIGUES, Weslany Fernandes. **Aproveitamento dos resíduos sólidos da cinza da casca de arroz para estabilização de solos.** 2019. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2019.

O presente trabalho aborda a viabilidade técnica do aproveitamento de resíduos da casca do arroz na estabilização de solos utilizados em camadas granulares para base e sub-base de rodovias, realizando estudos na cidade de Palmas TO. O objetivo principal do estudo foi elevar o Índice de Suporte Califórnia (CBR) para valores superiores a 80%, assim como reduzir o Índice de Expansibilidade para valores inferiores a 0,5% como exigido pelo DNIT para materiais de base. Definiram-se quatro amostras com diferentes teores de CCA e cimento Portland adicionados a um solo arenoso classificado pela HRB como A-3. Foram realizados ensaios de massa específica, granulometria, limite de liquidez e de plasticidade, compactação, CBR e expansão para o solo referencia e todas as amostras com adição. Os resultados mostraram que a CCA tende a elevar os valores do limite de liquidez e do limite de plasticidade, bem como a redução do índice de plasticidade ao preencher os vazios presentes no solo, a adição provoca uma correção granulométrica, desta maneira eleva o CBR do material. A mistura aumenta também o teor de umidade ótima (Wot) e reduz a massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) para uma mesma energia de compactação. Podendo-se concluir que a tendência geral é o aumento do CBR para valores superiores a 90%, assim como reduziu a expansão quando compactadas na energia de PI.

Palavras-chave: CCA, Estabilização, Pavimentação.

ABSTRACT

RODRIGUES, Weslany Fernandes. Use of solid residues from rice bark ash for soil stabilization. 2019. 73 f. - Civil Engineering Course, Lutheran University Center of Palmas, Palmas / TO, 2019.

The present work approaches the technical feasibility of the use of rice husk residues in the stabilization of soils used in granular layers for base and sub-base of highways, carrying out studies in the city of Palmas TO. The main objective of the study was to raise the California Support Index (CBR) to values greater than 80%, as well as reduce the Expansibility Index to values below 0.5% as required by DNIT for source materials. Four samples with different levels of CCA and Portland cement were added to a sandy soil classified by HRB as A-3. Specific gravity, grain size, liquidity and plasticity limits, compaction, CBR and expansion for the reference soil and all samples with addition were performed. The results showed that the CCA tends to raise the values of the liquidity limit and the plasticity limit, as well as the reduction of the plasticity index when filling the voids present in the soil, the addition causes a grain size correction, in this way elevates the CBR of the material. The mixture also increases the optimum moisture content (Wot) and reduces the maximum apparent dry mass (ρ_{dmax}) for the same compaction energy. It can be concluded that the general tendency is to increase the CBR to values higher than 90%, as well as reduce the expansion when compacted in the energy of PI.

Key words: CCA, Stabilization, Pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hierarquia de distribuição de resíduos sólidos	16
Figura 2 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas	24
Figura 3 - Cerâmica Santa Maria em Paraíso do Tocantins	32
Figura 4 – Solo coletado em Palmas - TO na rodovia BR - 010 km 432.....	33
Figura 5 – Fluxograma dos Experimentos.....	34
Figura 6 – Preparação de amostra para Granulometria Solo Referência.....	46
Figura 7 - Ensaio de Análise Granulométrica amostra M4	47
Figura 8 – Ensaio de Massa Específica do Solo de Referência.....	48
Figura 9 – Ensaio de Limite de Liquidez do Solo de Referência.....	50
Figura 10 – Ensaio de Limite de Plasticidade do Solo de Referência.....	50
Figura 11– Amostra M1 considerada NP.	51
Figura 12 – Determinação Massa Seca Limite de Liquidez	56
Figura 13 - Determinação Massa Seca Limite de Plasticidade Solo Referência.....	56
Figura 14 – Comparativo de penetração das amostras depois de rompida.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de arroz – safra 2016/17 e 2017/18	18
Tabela 2 - Composição química da CCA	19
Tabela 3 – Efeito das condições de queima nas propriedades da CCA.....	20
Tabela 4 – Classificação das adições minerais.....	21
Tabela 5 - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland.....	22
Tabela 6 - Previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo.....	29
Tabela 7 – Teores das misturas.....	36
Tabela 8 - Planilha de Ensaio Granulometria Solo de Referência	37
Tabela 9- Planilha de Ensaio Granulometria M1	39
Tabela 10 - Planilha de Ensaio Granulometria M2	41
Tabela 11 - Planilha de Ensaio Granulometria M3	43
Tabela 12 - Planilha de Ensaio Granulometria M4	45
Tabela 13 – Massa Especifica das Amostras.....	47
Tabela 14 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade Solo Referência	49
Tabela 15 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M1	52
Tabela 16 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M2	53
Tabela 17 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M3	54
Tabela 18 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M4	55
Tabela 19 – Ensaio de Compactação Solo Referência	57
Tabela 20 - Ensaio de Compactação M1	58
Tabela 21 - Ensaio de Compactação M2	59
Tabela 22 - Ensaio de Compactação M3	60
Tabela 23 - Ensaio de Compactação M4	61
Tabela 24 – Ensaio de CBR e Expansão Solo Referência.....	63
Tabela 25 – Ensaio de CBR e Expansão M1	64
Tabela 26 – Ensaio de CBR e Expansão M2.....	65
Tabela 27 – Ensaio de CBR e Expansão M3.....	66
Tabela 28 – Ensaio de CBR e Expansão M4.....	67
Tabela 29 – Resumo Geral dos Resultados de Ensaios	69
Tabela 30 – Variação em relação ao Solo Referência.....	69
Tabela 31 – Aceitabilidade para materiais de base segundo DNIT.....	70

LISTA DE FIGURAS

Gráfico 1 - Curva de distribuição granulométrica do Solo de Referência.....	38
Gráfico 2 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M1	40
Gráfico 3 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M2	42
Gráfico 4 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M3	44
Gráfico 5 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M4	46
Gráfico 6 – Comparativo entre Curvas de Compactação Solo Referência, M1 e M3.....	62
Gráfico 7 - Comparativo entre Curvas de Compactação Solo Referência, M2 e M4	62
Gráfico 8 – Comparativo do CBR das Amostras	68
Gráfico 9 – Comparativo de Expansão das Amostras	68

LISTA SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

DER: Departamento de Estradas de Rodagem

CCA: Cinza da casca de arroz

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

CP: Cimento Portland

DNIT: Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte

CBR: Índice de Suporte Califórnia

IP: Índice de Plasticidade

RCS: Resistência a Compressão Simples

CCE: Cinza de Cavaco de Eucalipto

SUCS: Sistema Unificado de Classificação dos Solos

AASHTO: Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	16
2.1.1	CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	17
2.1.2	PROPRIEDADES DA CCA	18
2.1.3	CLASSIFICAÇÃO POZOLÂNICA.....	20
2.1.4	EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO	21
2.2	CIMENTO PORTLAND	22
2.3	PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	23
2.3.1	PROPRIEDADES DOS SOLOS.....	25
2.3.2	COMPACTAÇÃO DE SOLOS	25
2.3.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	26
2.3.4	ESTABILIZAÇÃO SOLO-CIMENTO	28
2.3.5	SOLOS APROPRIADOS PARA ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO	30
2.3.6	CINZAS COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	DESENHO DO ESTUDO.....	32
3.2	LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	32
3.3	OBJETO DE ESTUDO	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	37
4.2	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS.....	47
4.3	DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE.....	49
4.4	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	57
4.5	ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR) E EXPANSÃO	63
5	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Percebe-se que nos últimos anos há uma maior preocupação, na indústria da construção civil, com o uso racional dos recursos naturais disponíveis no planeta. Visando a manutenção desses recursos a partir da reutilização dos resíduos sólidos, têm sido estudadas novas maneiras e processos para o setor, contribuindo assim para o consumo sustentável e consequentemente reduzindo os efeitos da degradação ambiental (KAWABATA, 2008).

A aplicação de soluções alternativas objetivando a melhoria das características de solo a partir da estabilização é necessária a fim de solucionar os problemas da escassez de material apropriado para utilização de camadas de base de rodovias, mas esse processo eleva o custo operacional da obra (KLAMT et al., 2016).

Com isso diversas pesquisas têm sido realizadas buscando a redução dos custos da estabilização de solos, através da substituição de uma parcela do cimento usado na estabilização por adições minerais. Geralmente, busca-se na composição dessas adições sílica e/ou alumínio em forma amorfa que, na presença de umidade, reage quimicamente com a cal oriunda da hidratação do cimento, formando assim a reação pozolânica (DALLACORT et al., 2002).

A cinza da casca de arroz proveniente da queima do arroz apresenta em sua composição elementos como os citados acima, podendo ser utilizada para aplicação na estabilização de solos. O presente trabalho tem como objetivo principal investigar o comportamento do solo melhorado com adição de cinza da casca de arroz e cimento Portland, no qual serão adicionados diferentes teores de mistura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar viabilidade técnica do aproveitamento dos resíduos sólidos da cinza da casca de arroz para estabilização de solos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para a realização do objetivo principal, foram traçados os objetivos específicos abaixo:

- a) Estudar as propriedades físicas e mecânicas do solo natural utilizados em camadas de pavimentos rodoviários;
- b) Determinar os teores de adição da cinza da casca de arroz e cimento na estabilização do solo e estudar suas propriedades físicas e mecânicas;
- c) Realizar estudo técnico comparativo entre as propriedades do solo de referência e o solo estabilizado com CCA.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido ao grande volume de resíduos industriais gerados e dispostos de forma incorreta na natureza vem – se buscando alternativas para reutilização destes materiais a fim de reduzir seus impactos no meio ambiente. Entre os vários resíduos destacam-se os agrícolas, que com a elevada produção dificulta sua disposição final (SAIDELLES et al., 2012).

Segundo o CONAB (2018) a estimativa do ciclo 2017/2018 para a produção mundial de arroz base beneficiado estabeleceu-se em 486,26 milhões de toneladas, no Brasil a estimativa será de 11.384,7 mil toneladas. O estado do Tocantins é o terceiro maior produtor nacional com um aumento de 10,4% na sua produção totalizando 688,4 mil toneladas produzidas, sendo que 20% resultam na cinza da casca do arroz.

Ao pesquisar formas para minimizar o aspecto de degradação ambiental provocada pelo não aproveitamento e disposição inadequada da CCA, notou-se a possibilidade de reutilizar esses materiais em outros setores produtivos, por exemplo, na construção civil. Com o elevado custo operacional na construção e manutenção de rodovias, devido à escassez de solos locais com características geotécnicas apropriadas, busca-se em outros locais um solo

com essas características, entretanto, em algumas regiões o transporte se torna economicamente inviável, com isso surgiu à necessidade de encontrar alternativas para solucionar esse problema. Uma delas é a estabilização do solo com métodos que permitem alterar suas propriedades, dando a ele as características técnicas necessárias para ser empregado na pavimentação (KLAMT et al., 2016).

Uma forma ecologicamente viável de reduzir custos é diminuindo o consumo de cimento, para isso, alguns materiais são utilizados para aumentar as propriedades mecânicas dos pavimentos, entre eles estão o cimento Portland e a Cal Hidratada. Ao fazer a troca de parte do cimento por cinzas contribui-se significativamente com práticas ecológicas e sustentáveis (SILVA, 2017).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) restos de materiais vindos da natureza ou do ser humano podem ser classificados como resíduos ou rejeitos, alguns desses materiais podem ser processados e assim reutilizados, com isso são chamados de resíduos, já os rejeitos não podem ser reaproveitados, sem possibilidade técnica nem financeira para continuidade de uso.

Buscando formas para minimizar os impactos, responsabilizar e gerenciar a disposição final desses resíduos foi sancionada em agosto e regulamentada em dezembro de 2010 a lei 12.305:2010 que institui a Política Nacional De Resíduos Sólidos e altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Nela reúne um conjunto de diretrizes e ações a serem adotadas e fala da necessidade de cada um ser responsável pelos resíduos que gera, faz uma diferenciação entre resíduo e rejeito num estímulo ao reaproveitamento e reciclagem dos materiais. A disposição final é admitida apenas para os rejeitos.

Com os objetivos de diminuir a quantidade de resíduos e os danos à saúde do meio ambiente, a lei responsabiliza cada um dos criadores (consumidores, fabricantes, distribuidores, comerciantes e serviços públicos de limpeza) pelos seus resíduos. O Ministério do Meio Ambiente criou a Política Nacional que traz os princípios, objetivos e instrumentos para trabalhar a gestão dos resíduos sólidos, a política cita vários instrumentos para sua aplicação e obriga a criação do Plano. Além de orientar a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, na qual deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Figura 1 – Hierarquia de distribuição de resíduos sólidos



Fonte: Fontoura (2015)

Plano Nacional é o principal instrumento, ou seja, a maneira para implementar a lei. Através do Plano as instituições e empresas devem comprovar os resíduos gerados e sua destinação final ambientalmente adequada. Para as empresas, o Plano se tornou uma exigência para a obtenção de Licenciamento Ambiental.

Considerando a crescente preocupação da sociedade com relação às questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou uma comissão para revisar a NBR 10004:1987 visando aperfeiçoá-la e, desta forma, fornecer subsídios para o gerenciamento de resíduos sólidos. Assim foi criada a ABNT NBR 10.004:2004 esta norma estabelece os critérios de classificação e os códigos para a identificação dos resíduos de acordo com suas características.

Ficou definido como objetivo da ABNT NBR 10.004:2004 classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. A classificação se baseia nas características dos resíduos perigosos, inertes e não inertes. Envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e a comparação dessas características com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

2.1.1 CINZA DE CASCA DE ARROZ

A CCA é um material leve, volumoso e altamente poroso sendo o resultado do processo de combustão. Esse processo depende da combinação de três variáveis: tipo de equipamento utilizado; temperaturas de queima e tempo de exposição durante o processo. Sua composição química apresenta elevados teores de sílica (POUEY, 2006).

Em virtude do seu alto volume, os resíduos agroindustriais podem se tornar um problema ambiental se não tiverem algum destino correto, dentre eles destacam-se a casca de arroz, um dos cereais mais cultivados no mundo. Segundo o CONAB (2018) a estimativa do ciclo 2017/2018 para a produção mundial de arroz base beneficiado estabeleceu-se em 486,26 milhões de toneladas, no Brasil a estimativa será de 11.384,7 mil toneladas. O estado do Tocantins é o terceiro maior produtor nacional com um aumento de 10,4% na sua produção totalizando 688,4 mil toneladas produzidas. A cinza da casca resulta em 20% da casca de arroz. A queima, onde são obtidas cinzas, é uma maneira de reduzir o volume desses materiais.

Tabela 1 – Produção de arroz – safra 2016/17 e 2017/18

Região/UF	Produção (em mil t)	
	Safra 16/17	Safra 17/18
RR	87,00	87,30
RO	120,00	124,50
PA	187,7	170,80
TO	676,70	688,40
Brasil	12.327,80	11.384,70

Fonte: CONAB adaptado pela autora (2019)

Segundo a Lei 12.305/10 os resíduos resultantes da queima da casca do arroz se classificam quanto à origem como industriais, por ser gerado nos processos produtivos e instalações industriais. Após a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, a ABNT NBR 10.004:2004 faz a classificação quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, a CCA se enquadra em resíduos não perigosos, por existir em sua composição materiais reativos. Define-se também como Classe II A - Não inerte, por se tratar de um material pozolânico que reage com a sílica do cimento, não podendo ser destinado em qualquer local.

De acordo com Kawabata (2008) desde os anos 70 a utilização da CCA como material pozolânico tem sido intensamente, mas só a partir do desenvolvimento do concreto de elevado desempenho é que a preocupação em obter uma CCA com máxima pozolanicidade, que possibilita a sua utilização com substituição da sílica de fumo, se tornou mais evidente.

2.1.2 PROPRIEDADES DA CCA

De acordo com POUEY (2006) a composição química é variável conforme a origem do arroz, mas geralmente, a casca do arroz é constituída por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de resíduos inorgânicos, desses resíduos em média 95 a 98% do seu peso contêm um material altamente reagente e de fácil moagem, a sílica amorfa, que é uma pozolana altamente reativa obtida nos processos de queima a temperaturas inferiores a 700 °C.

Com temperaturas acima de 870 °C e do tempo de combustão, a sílica existente na CCA é transformada em formas cristalinas, essas formas perdem suas propriedades pozolânicas e tornam-se perigosas para a saúde humana, principalmente em caso de inalação (KAWABATA, 2008).

As cinzas obtidas a partir de casca de arroz de diferentes origens, embora queimadas com controle de combustão e pelo mesmo método apresentaram características diferentes. Conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química da CCA

Amostra / Tratamento	Composição típica em óxidos (% em peso)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
	91,97	nd	0,50	nd	1,05	0,85	1,75	0,60	nd	nd	nd
Cook (1977)	93,0	0,60	0,15	nd	0,42	0,43	0,04	1,05	nd	nd	2,77
Sallas (1986)	91,26	0,94	0,37	nd	0,88	2,15	nd	nd	nd	nd	nd
Cincotto(1988)	94,70	0,09	1,46	nd	0,95	0,99	0,04	1,75	nd	nd	7,29
Guedert (1989)	93,11	0,92	0,40	nd	0,85	0,52	0,12	1,12	nd	nd	nd
Farias (1990)	91,78	0,60	0,34	nd	0,52	0,50	0,11	1,30	nd	nd	nd
Sugita (1992)	90,0	0,1	0,40	nd	0,3	0,40	0,06	2,41	nd	nd	4,2
Isaia (1995)	78,6	2,3	2,3	nd	0,80	1,0	0,01	0,56	nd	nd	11,80
Fonseca (1999)	83,68	0,17	0,17	0,66	nd	1,03	nd	3,65	nd	1,34	8,54
Della (2001)	72,1	0,3	0,15	0,15	0,7	0,43	0,5	0,72	0,05	0,6	24,3
Qingge (2005)	92,4	0,3	0,40	0,11	0,30	0,70	0,07	2,54	nd	0,11	2,31

PF – perda ao fogo nd – não divulgado

Fonte: Pouey (2006)

Um dos pontos críticos para obtenção de uma boa reatividade da CCA é o controle da temperatura de queima que determina o teor de sílica amorfa e, por consequência, a atividade pozolânica. A obtenção de uma sílica altamente reativa depende do método empregado. A sílica pode ser obtida no simples processo de combustão, além disso, pode ser obtida através do tratamento físico-químico da casca seguido de queima e também do processo microbiológico (POUEY, 2006).

Assim, a temperatura de obtenção da cinza de casca de arroz e o tempo de exposição a essa temperatura, somados à variação de superfície específica, são os principais fatores intervenientes na qualidade do material como pozolana para concreto (SANTOS 2006).

Tabela 3 – Efeito das condições de queima nas propriedades da CCA

Condições de queima (°C/ tempo)	Ambiente de combustão	Propriedades da CCA	
		Estrutura da sílica	Área superficial (m ² /g)
500 – 600 / 1 min.	Moderada oxidação	amorfa	122
500 – 600 / 30 min.	Moderada oxidação	amorfa	97
500 - 600 / 2 horas	Moderada oxidação	amorfa	76
700 – 800 / 15 min.	Moderada oxidação	amorfa	42
700 – 800 / 15 min	Alta oxidação	Cristalina parcial	10 – 6
> 800 / > 1h	Alta oxidação	Cristalina	< 5

Fonte: Pouey (2006)

2.1.3 CLASSIFICAÇÃO POZOLÂNICA

Reação pozolânica é o nome dado à hidratação do cimento, que ocorre quando os compostos da cinza entram em contato com os do cimento. Pozolana é um material natural ou artificial que contém sílica em forma reativa. Segundo definição da ABNT NBR 12653:1992 são materiais que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Segundo Falcão Bauer (2014) os materiais pozolânicos são moídos até se tornar um pó finíssimos, assim passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico, mas para que essa reação ocorra devem ser colocados em presença de água e de outro material, por exemplo, o clínquer, que no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio, reagindo com a pozolana passa a desenvolver as reações químicas que tornam primeiramente pastosos e depois endurecidos. Além do efeito pozolânico, a incorporação da CCA provoca o efeito microfíler quando os grãos finos preenchem os vazios formados entre as partículas reduzindo assim a quantidade de poros existentes, possibilitando uma elevação da densidade, resistência e durabilidade do material.

As cinzas resultantes da queima de cascas de arroz e a sílica ativa são exemplos de materiais pozolânicos. Segundo Mehta e Monteiro (2014) a CCA é classificada como adições superpozolanas como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das adições minerais

Classificação	Tipos de Adições
Cimentantes	Escória granulada de alto forno
Cimentantes e Pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa Metacaulim Cinza de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio Argilas Calcinadas Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto forno resfriada lentamente Cinzas de forno Escória de caldeira Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes (filler)	Pó de cálcio, pó de pedra

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

2.1.4 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO

Além da estabilização de solos, por apresentar alto teor de sílica em sua composição química a CCA tem inúmeras utilidades. A CCA é um resíduo com grande potencial de reciclagem e aplicações, como por exemplo, na construção civil como pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas ou ainda na fabricação de tijolos prensados, como na indústria cerâmica, associada à argila no processo de obtenção de refratários e isolantes térmicos. Ou também é empregada na agropecuária no tratamento dos solos como fertilizante. Primeiro é usada como cama para os animais na avicultura e pecuária, posteriormente o material da cama, agora com alto valor fertilizante devido à incorporação de nutrientes proveniente dos dejetos dos animais é misturado ao solo para. A viabilidade técnica da aplicação da CCA em diversas áreas da indústria e da engenharia tem sido comprovada por inúmeros trabalhos experimentais (POUEY, 2006).

Silva (2009) revela também que as reações pozolânicas ocorrem desde as primeiras idades até os 90 dias de cura. Os autores observam que com 7 dias a alta reatividade da adição já nas idades iniciais de cura. Verifica-se a redução do pico até a idade de 90 dias para a CCA CC.

Kawabata (2008) indica nos seus estudos a viabilidade da utilização de CCA como aditivos minerais substituindo o cimento Portland na produção de concreto leve. Embora a utilização de concreto leve exija precauções e estudos quanto ao dimensionamento estrutural e sua utilização.

2.2 CIMENTO PORTLAND

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002, p. 7) define cimento como sendo:

Um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais.

Segundo ABCP (2002) por ser o material de construção de mais extenso uso no mundo, o cimento Portland também é o mais conhecido e aplicado na estabilização química de solos. Na sua composição estão presentes dois componentes: o clínquer e as adições. Sendo o primeiro principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. Já as adições definem os diferentes tipos existentes, diferenciados principalmente por sua função e composição. Os mais empregados nas diversas obras de construção civil são os cimentos Portland: comum, composto, de alto-forno e pozolânico. A Tabela 5 mostra quais tipos de cimento disponíveis no mercado podem ser usados nas mais diferentes aplicações.

Tabela 5 - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland

Aplicação	Tipos de cimento portland
Pavimento de concreto simples ou armado	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Pisos industriais de concreto	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)
Concreto arquitetônico	Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Argamassa armada (VER NOTA) (*)	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Solo-Cimento	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Argamassas e concretos para meios agressivos (água do mar e de esgotos)	de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Resistente a Sulfatos
Concreto-massa	de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e de Baixo Calor de Hidratação
Concreto com agregados reativos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)

NOTA:

(*) Dada a pouca experiência que se tem no Brasil sobre uso do CP III e do CP IV na argamassa armada deve-se consultar um especialista antes de especificá-los para esse uso.

Fonte: ABCP adaptador pela autora (2002)

2.3 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Segundo o Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes – DNIT (2006) pavimento é a superestrutura de uma rodovia, formada por múltiplas camadas sobrepostas de diferentes materiais e variadas resistências, assentadas sobre o subleito. Destinadas a suportar juntas elevadas tensões e deformidades impostas pelo tráfego de maneira durável e ao mínimo custo possível. A estrutura é construída para receber e transmitir esforços de maneira a atenuar os efeitos das tensões aplicadas na superfície, aliviando-as nas camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes, de tal forma que o subleito receba uma parcela mínima desta tensão.

Cada camada do pavimento possui funções específicas, são destinadas técnica e economicamente para resistir esforços proporcionando aos usuários e veículos conforto, economia e segurança, adequadas de suporte e rolamento em quaisquer condições climáticas. As cargas aplicadas sobre a superfície do pavimento acabam por gerar determinado estado de tensões na estrutura, que muito dependerá do comportamento mecânico das camadas (LOPES, 2011).

Geralmente, as camadas que compõem os pavimentos rodoviários são compostas por:

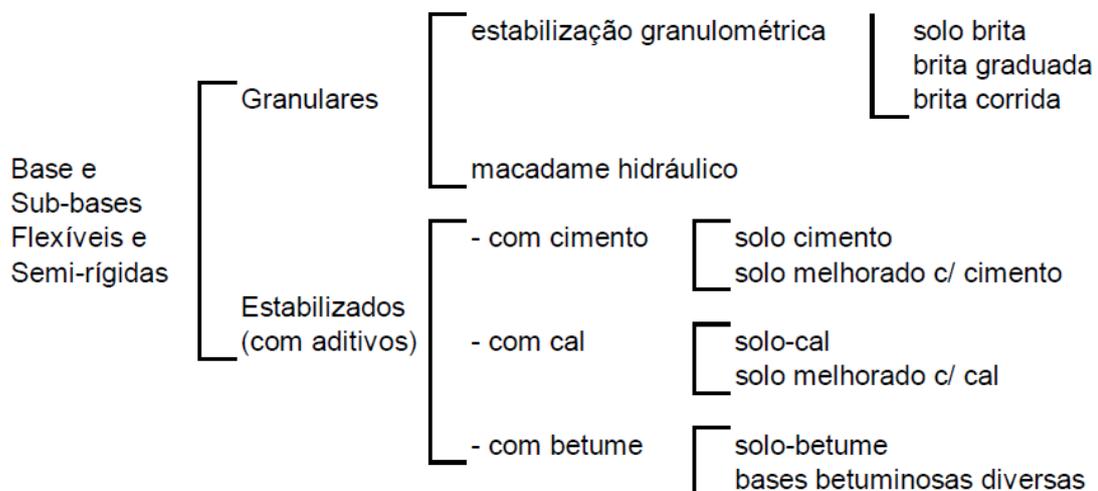
- **Subleito:** É o solo natural onde receberá o pavimento, as cargas postas pela circulação de veículos na superfície serão aliviadas em sua profundidade (em média de 0,60 a 1,50 m de profundidade), há casos em que o Índice de Suporte Califórnia – CBR poderá ser menor que 2%, nesse caso haverá a necessidade da substituição desse material por um melhor, se o CBR for maior que 20% esse mesmo solo poderá ser usado como sub-base. Será constituído de material natural consolidado e compactado ou por material transportado e compactado.
- **Regularização do subleito (nivelamento):** Corrige falhas. Poderá ou não existir, a depender das condições do leito. Abrange cortes e aterros uma espessura de até 20 cm.
- **Reforço do subleito:** Camada adicional e opcional, seu uso é mais indicado quando há a necessidade de regularização do subleito ou quando o mesmo é composto de solo com pouca resistência é preciso executar sobre o subleito uma camada de solo de melhor

qualidade que sirva como reforço. O solo usado deve ter CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$.

- **Sub-base:** Camada complementar a base. Para aliviar as pressões sobre as camadas de solos inferiores, surgem as camadas de base e sub-base que também podem desempenhar papel importante na drenagem dos pavimentos. Utilizada quando não for recomendável fazer a base sobre o leito regularizado ou sobre o reforço, por questões técnicas e econômicas. Usada para regularizar a espessura da base. Deve ter CBR $\leq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$.
- **Base:** Suporte estrutural. Podem ser constituídas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados, brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente, concretos e etc. Camada imposta para resistir e redistribuir ao subleito, os esforços postos pela circulação de veículos e sobre a qual se construirá o revestimento. Deve apresentar CBR $\geq 80\%$, expansão $\leq 0,5$, LL $\leq 25\%$ e IP $\leq 6\%$.

Dependendo do tipo de pavimento poderá não possuir camada de sub-base ou reforço, mas a existência de revestimento e de subleito são condições mínimas para que a estrutura seja chamada de pavimento. De uma forma geral, as bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas são classificadas em:

Figura 2 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas



2.3.1 PROPRIEDADES DOS SOLOS

Em seu conceito básico, solo é todo tipo de matéria orgânica, mineral inconsolidado ou parcialmente cimentado encontrado na superfície terrestre, ou seja, qualquer material que possa ser escavado sem necessidade de explosivos (DNIT, 2006).

Dentre suas propriedades, as que se destacam são:

- a) Permeabilidade: Quando o solo permite a passagem da água sob a ação da gravidade.
- b) Capilaridade: Quando o solo absorve água por ação da tensão superficial, inclusive opondo-se a força da gravidade.
- c) Compressibilidade: Quando o solo se deforma, sob ação de uma força de compressão diminuindo de volume.
- d) Elasticidade: Quando o solo se recuperar a forma inicial após o esforço deformante ser cessado; os solos não são perfeitamente elásticos, assim sua recuperação é parcial.
- e) Expansibilidade e Contratilidade: São características das argilas, assim são mais comuns nos solos argilosos. São respectivamente as propriedades dos solos de permitir que seu volume seja reduzido ou ampliado por efeito de umidade.
- f) Resistência ao cisalhamento: A ruptura dos solos dá-se por cisalhamento, ou seja, por deformação distorcional.

2.3.2 COMPACTAÇÃO DE SOLOS

De acordo com a norma ABNT NBR 7182:2016, ao se compactar um material com uma umidade relativamente baixa o atrito entre o solo é elevado impossibilitando a redução dos vazios. Elevando o teor de umidade do solo, a água causa um efeito lubrificante entre os grãos, proporcionando uma estrutura mais compacta por causa da maior arranjo. Quando o solo já apresenta um grau de saturação elevado, os grãos existentes ficam cobertos por água, a partir desse teor de umidade, o mecanismo da compactação não consegue mais reduzir os vazios de ar.

O estudo da compactação foi iniciado por Ralph Proctor, em 1933. Ele descobriu a relação entre massa específica seca, o teor de umidade e a energia de compactação, mostrando

que ao se aplicar certa energia de compactação a um solo, sua massa específica varia em função da umidade em que o solo se encontra (SILVA, 2017).

Compactação do solo é o processo manual ou mecânico que tem como objetivo melhorar a resistência e a permeabilidade do solo, através da redução do índice de vazios, aumentando a resistência do solo, fazendo uma transição do solo em estado fofo para um estado compacto. Pode ser feito tanto em laboratório como no campo. Na prática, esta energia de compactação representa o número de golpes no solo. Outro fato importante a notar é que, à medida que a energia de compactação aumenta, é necessária uma quantidade menor de água para se alcançar o máximo de compactação. Através do ensaio de compactação é possível obter a densidade máxima dos solos. Consiste em se compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico para Proctor normal 3 camadas sucessivas, sob a ação de 25 golpes e para Energia Intermediária e Energia Modificada respectivamente 26 golpes em 3 camadas ou 55 golpes em 5 camadas. No ensaio é conveniente à determinação de, pelo menos, cinco pontos com diferentes teores de umidade, de forma a que um deles se encontre próximo à umidade ótima e os outros dois no ramo descendente e decrescente da curva (DNIT, 2006).

O processo que deverá ser empregado depende do tipo de solo disponível, assim como as energias de compactação que definem a massa específica a ser atingida e seu teor e umidade ótima (MOTTA, 2005). Segundo o método utilizado poderá ou não haver reaproveitamento do solo compactado. Em caso não reaproveitamento cada corpo de prova, deverá ser compactado com amostra não utilizada.

2.3.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Um problema corriqueiro que se percebe ao construir estradas é a escarces de solos com resistência mínima que podem ser usados nas camadas de um pavimento rodoviário. A seguir as soluções que podem ser tomadas quando os materiais encontrados não apresentam as características geotécnicas exigidas:

- a) A substituição do solo existente por outro, cujo comportamento seja satisfatório;
- b) Estabilização química ou mecânica deste solo;
- c) Modificação do dimensionamento do projeto.

Estabilização pode ser conceituada como sendo a prática de conferir ao solo características e propriedades que permitam sua utilização, dando um tratamento adequado a fim de aumentar sua capacidade de carga para que o mesmo resista aos esforços causados pelo tráfego aplicados sobre o pavimento. A estabilização engloba todas as modificações aplicadas aos solos, com o objetivo de melhorar suas características de resistência mecânica e garantir a vida útil das obras de engenharia (DINIZ 2009).

A melhoria das propriedades físicas dos solos por meio da estabilização pode ser atingida de várias formas, podendo ser classificadas como:

- Estabilização mecânica: É o método que assegura ao solo estabilidade sem a mistura de aditivos. As propriedades do solo podem ser melhoradas corrigindo a granulometria com mistura de diferentes tipos de solos, antes da compactação, procurando-se assim aumentar a coesão e o ângulo de atrito, melhorando assim a resistência do solo. Podendo ser empregado cimento, cal ou produtos betuminosos (SANTOS 2012).
- Estabilização química: Ao misturar o solo com uma substância que aumente sua coesão ou que impermeabilize, impedindo a diminuição da sua resistência pela ação da água. Podendo ser empregadas resinas, betuminosos ou produtos químicos (MEDINA, 1987).

Segundo Brito e Paranhos (2017) a escolha do tipo de estabilização é uma tarefa complexa, devendo ser analisados os pontos de vista técnico e econômico. Os vários dos métodos acima podem ser frequentemente adaptados para solucionar o problema. Em relação ao solo, os seguintes fatores devem ser considerados de forma a selecionar o melhor método: condições climáticas, de drenagem, de tráfego, as propriedades do solo no estado natural, as propriedades desejadas para o solo estabilizado e efeitos no solo após a estabilização. No Brasil, geralmente, a estabilização mais aconselhada é a mecânica, desde que ao longo do trecho a pavimentar haja solos que, por si só ou por misturas, possuam as características exigidas pela especificação. Caso não seja possível adotar esta solução, aconselha-se então, preferencialmente, examinar a estabilização com cimento (solo-cimento).

2.3.4 ESTABILIZAÇÃO SOLO-CIMENTO

A estabilização de solo-cimento é adequada apenas para uso em bases ou sub-bases e caracteriza, quando revestido com asfalto, um pavimento semirrígido. Apresenta custo inicial baixo e boa durabilidade. É uma mistura de solo, água e cimento, realizada no local, que pode lançar mão de solo regional (LOTURCO, 2005).

De acordo com Silva (2017) a estabilização solo-cimento acontece devido às reações químicas geradas na hidratação do cimento, produto obtido pela compactação da mistura de solo, cimento e água, em busca de atender os parâmetros de estabilidade e durabilidade impostos.

Na estabilização com solo-cimento na maioria das vezes a maneira mais eficiente e econômica é com adição de cimento Portland. Os principais objetivos da utilização do cimento na estabilização de solos são a melhoria das características mecânicas e uma maior estabilidade relativamente à variação do teor em água (CRISTELO, 2001).

Segundo Fritscher (2016) as modificações nas propriedades dos solos dependem diretamente da quantidade de cimento adicionada, os efeitos causados no solo se iniciam com teores a partir de 2%. Ao analisar a resistência mecânica de solos cimentados com pequenas adições de cimento (1 a 7%) notou-se um aumento na resistência percebendo que a eficiência da cimentação é maior nas misturas mais compactas. As seguintes mudanças ocorrem com o acréscimo do cimento: redução do índice de plasticidade e perda da capacidade de retenção de água, aumento da capacidade de carga; aumento da durabilidade a ciclos de molhagem e secagem; aumento da permeabilidade em solos argilosos, e a diminuição nos outros solos; aumento da tendência à retração em solos granulares; e a diminuição da tendência à expansão de solos argilosos.

A Tabela 6 mostra um indicativo da quantidade de cimento a ser adicionada para a estabilização de acordo com o tipo de solo.

Tabela 6 - Previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo

TIPO DE SOLO	PORCENTAGEM DE CIMENTO A ADICIONAR
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argilas	8 a 15

Fonte: Lopes Júnior (2007)

De acordo com a ABNT NBR 12.253:2012 os solos utilizados como base e sub-base de pavimento em solo-cimento são classificados em quatro tipos: A1, A2, A3 e A4. A norma prescreve como critério de aceitação uma resistência mínima a compressão aos 7 dias valores com $RCS \geq 2,1\text{Mpa}$. Os solos argilosos e siltosos podem ser descartados por complicações no andamento do procedimento e por necessitarem de grande quantidade de cimento, o que eleva o custo da obra, resultando assim um fator indesejado.

Os procedimentos de dosagem de acordo com a ABNT NBR 12.253:2012 estão descritos resumidamente a seguir:

- Em função da classificação granulométrica dos solos A1, A2, A3 ou A4, são indicadas porcentagens de cimento (de 5% até 10%) para a execução do ensaio de compactação;
- Para cada teor de cimento selecionado, moldar e curar, no mínimo, três corpos de prova cilíndricos. Aplicáveis respectivamente a solos com 100% de material passando na peneira de abertura de 4,8 mm e a solos com algum material nela retido;
- Deve ser adotado como o teor de cimento, o menor valor para a resistência média à compressão simples mais próxima ou superior a 2,1 MPa, aos 7 dias de idade;
- O teor mínimo de cimento recomendado é de 5%. Podem ser empregados teores de até 3,5%, desde que satisfeitos os critérios anteriores.

2.3.5 SOLOS APROPRIADOS PARA ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO

A textura e a plasticidade de um solo podem servir com indicativo de sua aptidão para a estabilização com cimento. O cimento deve ser usado como estabilizante de materiais com menos de 35% de seu peso seco passando na peneira 200, e com IP inferior a 20. O cimento é particularmente eficiente na estabilização de materiais de baixa a média plasticidade, para emprego na pavimentação.

Argilas muito expansivas são muito difíceis de estabilizar com cimento. As areias finas exigem alto teor de cimento (10 a 14%) para atingirem a RCS exigida em camadas de pavimentos (em torno de 2,1Mpa). A presença de matéria orgânica são fatores que podem inibir o desenvolvimento de resistência em um solo tratado com cimento.

Solos arenosos com pH inferior a 5,3 não reagirá normalmente com o cimento. Teores de sulfatos superiores a 0,5 (no solo) podem provocar aumento de volume com a consequente perda de resistência a solos tratados com cimento (NUNEZ, 1991).

2.3.6 CINZAS COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O aumento das propriedades do solo com adição de cimento é um processo bastante usual por sua fácil aplicação e boa economia quando comparado a outros métodos. Apesar disso ainda existe uma pouca compreensão do desempenho do solo com adição de material cimentante quando se trata de dosagem, na prática, baseiam-se em trabalhos anteriores e não em fatos científicos. Justino da Silva (2017) analisou adição de cinza de cavaco de eucalipto (CCE) na infraestrutura de pavimentos rodoviários. Foram aplicadas as três energias de compactação em misturas com 0,5; 10; 15 e 20% de CCE misturada ao solo. O experimento resultou em um aumento da resistência nas misturas e a adição de 15% foi a que apresentou a maior resistência em relação à mistura de referência. A partir do estudo concluiu-se que a cinza de cavaco de eucalipto pode ser utilizada para reforçar bases e sub-base de pavimentos.

Silva (2009) mostra que em diferentes tipos de CCA quando a mesma é adicionada ao cimento o desempenho mecânico da resistência à compressão melhora e a taxa de absorção tende a diminuir. Mostrando a possibilidade de diminuir o consumo de cimento, já que mesmo o substituindo, há melhorias em relação aos traços de referência.

Jaines e Arns (2016) verificaram a viabilidade da estabilização de um solo de classificação A 2-4 com cinza de casca do arroz, para uso em camadas de base e sub-base de

pavimentos rodoviários. Foram estudadas misturas de solo com dosagens de 5 %, 10 % e 15 % de CCA em relação ao peso. Com os resultados obtidos foram possível concluir que o solo aditivado com as três porcentagens diferentes de CCA conseguiram atingir valores de expansão menores que 1%, cumprindo os requerimentos para material de camadas de base e sub-base. Com respeito ao valor do ISC, foram obtidos valores maiores para as amostras compactadas na energia PI por serem amostras com maior massa específica seca aparente.

Fritscher (2016) utilizou o cimento Portland e a cinza de casca de arroz nos seus estudos. Foram realizados ensaios a fim de determinar a resistência da mistura com tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Os valores nas misturas contendo apenas cimento praticamente dobraram com o aumento do teor de cimento, inicialmente de 7% para 11% da massa seca de solo. Com base nos resultados obtidos, é possível notar a importância de um agente cimentante na mistura. As amostras contendo cimento e CCA apresentaram resistências inferiores comparadas com aquelas que continham somente cimento. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de as cinzas reagirem melhor com as frações finas do solo (reações pozolânicas), e como o solo em estudo possui poucos finos, a interação entre os materiais não foi efetiva.

3 METODOLOGIA

3.1 DESENHO DO ESTUDO

A pesquisa ocorreu por um estudo de caso de forma exploratória com finalidade de produzir conhecimentos científicos a partir da aplicação prática do resíduo sólido da cinza da casca de arroz em solos utilizados como base de pavimentos rodoviários. Com caráter quantitativo, por trabalhar com dados numéricos que expressam qualidades. O estudo foi desenvolvido com procedimentos técnicos laboratoriais com base em pesquisas de natureza bibliográficas e experimentais.

3.2 LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

O objeto de estudo foi a cinza da casca de arroz que foi coletada na Cerâmica Santa Maria, localizada na R Perimetral, 565 no setor Pouso Alegre em Paraíso do Tocantins. O local de estudo é localizado em Palmas - TO na rodovia BR - 010 km 432. Os procedimentos laboratoriais foram realizados no Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Figura 3 - Cerâmica Santa Maria em Paraíso do Tocantins



Fonte: Google Earth

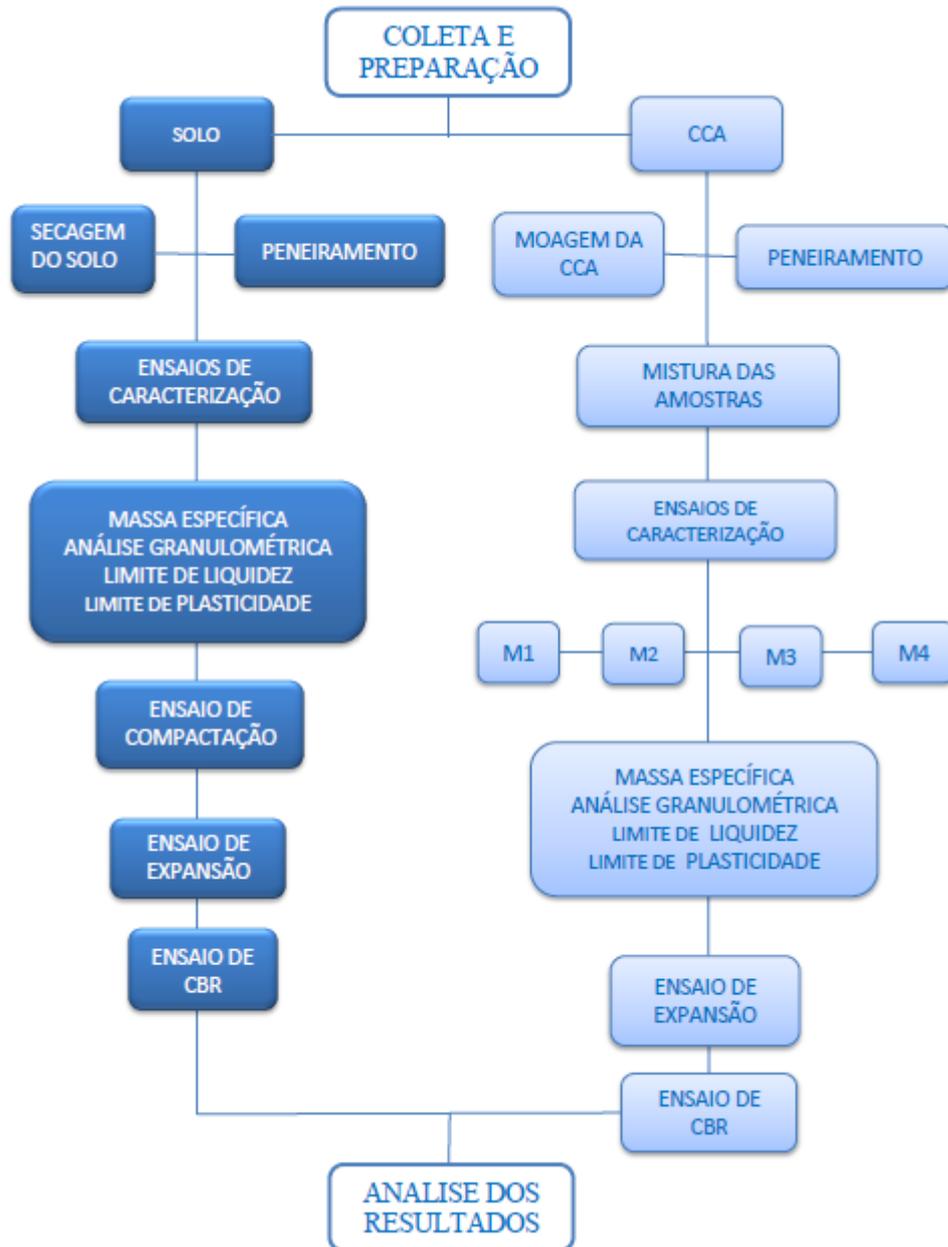
Figura 4 – Solo coletado em Palmas - TO na rodovia BR - 010 km 432.



Fonte: Google Earth

A metodologia de execução seguiu o programa experimental ilustrado na Figura 5, que mostra esquematicamente todas as etapas de ensaios.

Figura 5 – Fluxograma dos Experimentos



Fonte: Autora (2019)

3.3 OBJETO DE ESTUDO

A cinza de casca de arroz utilizada no presente estudo foi fornecida pela cerâmica Santa Maria em Paraíso do Tocantins. O solo foi coletado na rodovia BR – 010 km 432. O desenvolvimento do projeto ocorreu nas estruturas Laboratório do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA), que forneceu os equipamentos necessários à realização dos ensaios de caracterização geotécnica, de compactação, expansão e CBR. A fim de realizar os objetivos específicos do presente estudo a pesquisa seguiu a seguinte metodologia de ensaios.

a) Estudar as propriedades físicas e mecânicas do solo natural utilizados em camadas de pavimentos rodoviários;

O solo foi coletado na rodovia BR – 010 km 432, devendo ser submetidos aos seguintes processos:

- Preparação para ensaios de caracterização – ABNT NBR 6457: 2016;
- Determinação da massa específica segundo a ABNT NBR 6458: 2017;
- Análise granulométrica segundo a ABNT NBR 7181: 2018;
- Determinação do limite de liquidez segundo a ABNT NBR 6459: 2017;
- Determinação do limite de plasticidade segundo a ABNT NBR 7180: 2016;
- Ensaios de compactação segundo a ABNT NBR 7182: 2016;
- Índice de suporte Califórnia (ISC) segundo a ABNT NBR 9895: 2017.

b) Determinar os teores de adição da CCA e cimento na estabilização do solo;

O cimento empregado obedece às exigências da norma DNER-ES 143/2018 Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço, simultaneamente com as da ABNT NBR NBR-16697:2018.

- Cimento Portland composto segundo a ABNT NBR 16697:2018.
- Moagem no Moinho de Bolas

Foi usado como parâmetro de referência ABNT NBR 12254:2013 que estabelece como teor mínimo de cimento de 3% em relação à massa total da mistura para sub-bases e 5% em relação à massa total da mistura para bases. A Tabela 7 apresenta os teores utilizados nas misturas, assim como as respectivas nomenclaturas que as descrevem.

Tabela 7 – Teores das misturas

Nomenclatura	Cimento (%)	CCA (%)
M1	3	10
M2	3	20
M3	5	10
M4	5	20

Fonte: Autora (2019)

c) Realizar estudo técnico comparativo entre as propriedades do solo de referência e o solo estabilizado com CCA.

Foram feitas misturas de acordo com seus respectivos teores. A realização dos ensaios de caracterização e resistência das misturas seguiu as metodologias das seguintes normas:

- Determinação da massa específica segundo a ABNT NBR 6458: 2017;
- Análise granulométrica segundo a ABNT NBR 7181: 2018;
- Determinação do limite de liquidez segundo a ABNT NBR 6459: 2017;
- Determinação do limite de plasticidade segundo a ABNT NBR 7180: 2016;
- Ensaios de compactação segundo a ABNT NBR 7182: 2016;
- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia segundo a ABNT NBR 9895: 2017.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e analisa os resultados dos ensaios de caracterização, fazendo-se a classificação dos solos. Em seguida, serão apresentados os resultados dos ensaios de compactação, CBR e Expansão.

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

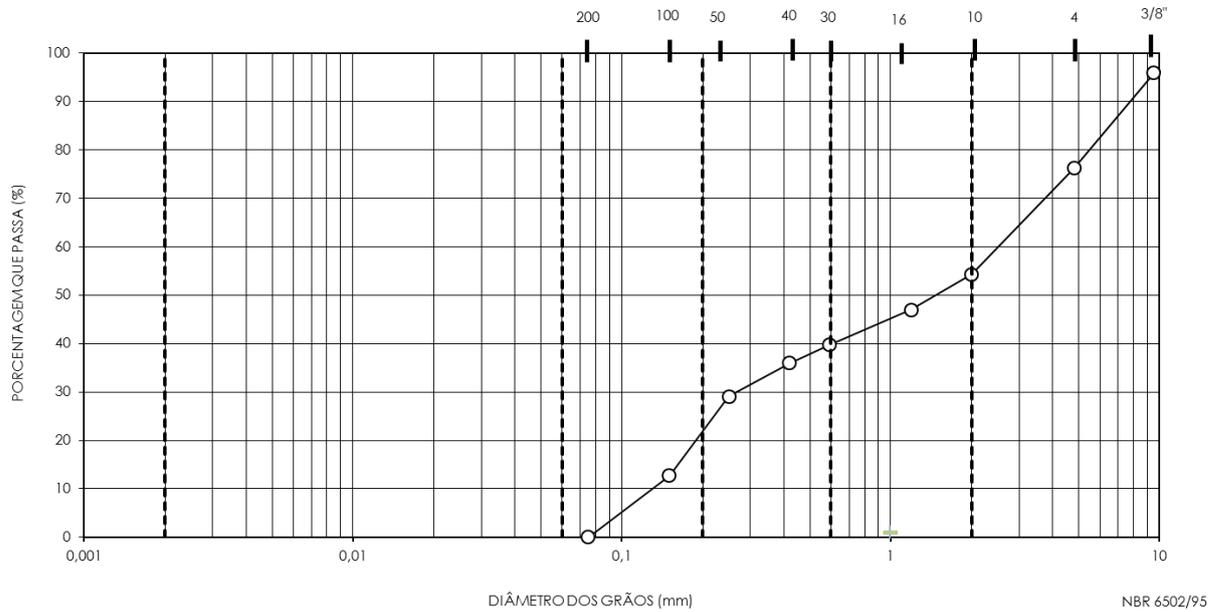
Tabela 8 - Planilha de Ensaio Granulometria Solo de Referência

TEOR DE UMIDADE				PENEIRAMENTO GROSSO				
Nº Cápsula	#	1	2	Amostra Total Úmida (g)				
C + S + A	(g)	65,80	69,30	Amostra Total Seca (g)				1000,00
C + S	(g)	64,00	67,40	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
C - Cápsula	(g)	15,70	17,20			Retido	Passante	
S - Solo	(g)	48,3	50,2	2"	50,8		1000,00	100,00
A - Água	(g)	1,80	1,90	1 1/2"	38,1		1000,00	100,00
w - Umidade	(%)	3,73	3,78	1"	25,4		1000,00	100,00
Umidade Média	(%)	3,76		3/4"	19,0	0,00	1000,00	100,00
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS passante na peneira Nº 10				3/8"	9,5	21,10	978,90	97,89
				Nº 4	4,8	98,50	880,40	88,04
Picnômetro Nº	#	1	2	Nº 10	2,0	110,10	770,30	77,03
Pic+Solo+Água				PENEIRAMENTO FINO				
Pic+Água	(g)	667,3	665,9	Massa Úmida (g)				
T°C de Ensaio	(°C)	27,0	27,0	Massa Seca (g)				272,70
Massa Solo Úmido	(g)	50,0	50,0	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
Massa Solo Seco	(g)	48,2	48,2			Retido	Passante	
ME da Água, T°C Ens	(g/cm ³)	1,0	1,0	Nº 16	1,19	36,80	235,90	66,64
ME dos grãos	(g/cm ³)	2,715	2,699	Nº 30	0,59	36,20	199,70	56,41
ME dos grãos média	(g/cm ³)	2,707		Nº 40	0,42	18,90	180,80	51,07
Massa Úmida para Sedimentação	(g)	100,00		Nº 50	0,25	34,90	145,90	41,21
Massa Seca para Sedimentação	(g)			Nº 100	0,15	81,80	64,10	18,11
Número do Densímetro				Nº 200	0,075	64,10	0,00	0,00

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de granulometria do solo mostrado na Tabela 8, foi obtida a seguinte curva de distribuição granulométrica ilustrada no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva de distribuição granulométrica do Solo de Referência



Fonte: Autora (2019)

A partir da curva apresentada no Gráfico 1, definem-se as seguintes porcentagens de cada material presente no solo: pedregulho 45,7%, areia grossa 14,6%, areia média 18,7%, areia fina 21%. Em termos gerais, tem-se 54,3% de areia. E, de acordo a classificação HRB o solo foi A-3 definido como areia fina, com característica do comportamento geral como subleito definido como excelente a bom.

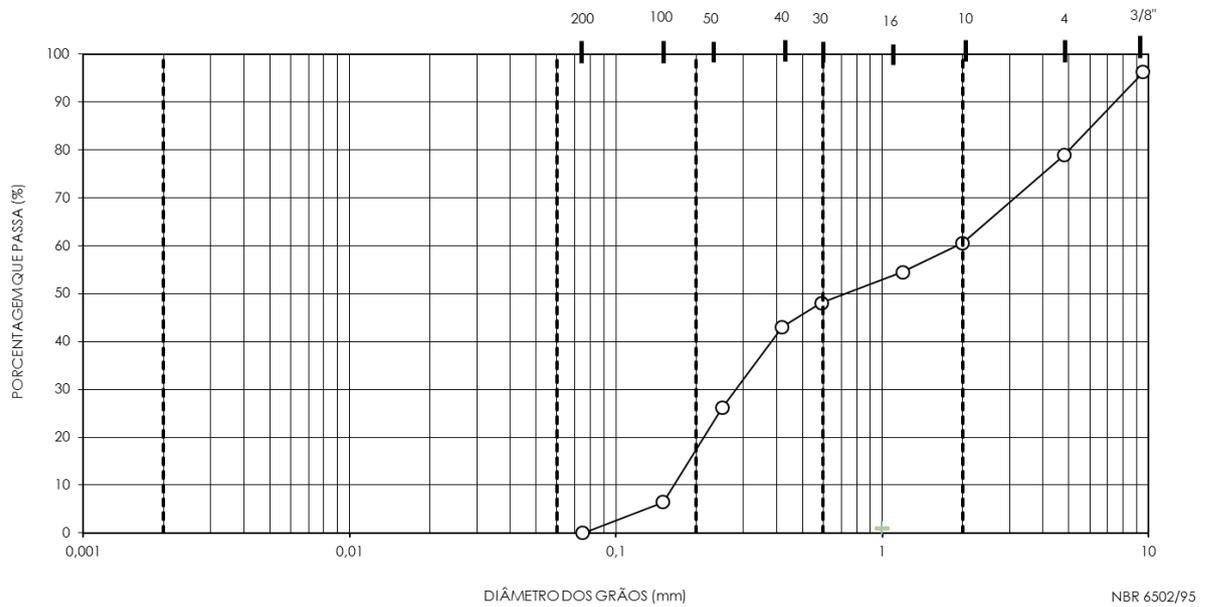
Tabela 9- Planilha de Ensaio Granulometria M1

TEOR DE UMIDADE				PENEIRAMENTO GROSSO				
Nº Cápsula	#	1	2	Amostra Total Úmida (g)				
C + S + A	(g)	65,80	69,30	Amostra Total Seca (g)				1000,00
C + S	(g)	64,00	67,40	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
C - Cápsula	(g)	15,70	17,20			Retido	Passante	
S - Solo	(g)	48,3	50,2	2"	50,8		1000,00	100,00
A - Água	(g)	1,80	1,90	1 1/2"	38,1		1000,00	100,00
w - Umidade	(%)	3,73	3,78	1"	25,4		1000,00	100,00
Umidade Média	(%)	3,76		3/4"	19,0	0,00	1000,00	100,00
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS passante na peneira Nº 10				3/8"	9,5	22,20	977,80	97,78
				Nº 4	4,8	102,40	875,40	87,54
Picnômetro Nº	#	1	2	Nº 10	2,0	108,20	767,20	76,72
Pic+Solo+Água				PENEIRAMENTO FINO				
Pic+Água	(g)	664,2	664,9	Massa Úmida (g)				
T°C de Ensaio	(°C)	27,0	27,0	Massa Seca (g)				357,40
Massa Solo Úmido	(g)	50,0	50,0	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
Massa Solo Seco	(g)	48,2	48,2			Retido	Passante	
ME da Água, T°C Ens	(g/cm ³)	1,0	1,0	Nº 16	1,19	36,20	321,20	68,95
ME dos grãos	(g/cm ³)	2,684	2,684	Nº 30	0,59	37,90	283,30	60,81
ME dos grãos média	(g/cm ³)	2,684		Nº 40	0,42	29,40	253,90	54,50
Massa Úmida para Sedimentação	(g)	100,00		Nº 50	0,25	99,50	154,40	33,14
Massa Seca para Sedimentação	(g)			Nº 100	0,15	116,50	37,90	8,14
Número do Densímetro				Nº 200	0,075	37,90	0,00	0,00

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de granulometria do solo como mostrado na Tabela 9, foi obtida a seguinte curva de distribuição granulométrica ilustrada no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M1



Fonte: Autora (2019)

A partir da curva apresentada no Gráfico 2, define-se as seguintes porcentagens de cada material presente no solo: pedregulho 39,4%, areia grossa 12,6%, areia média 30%, areia fina 18%.

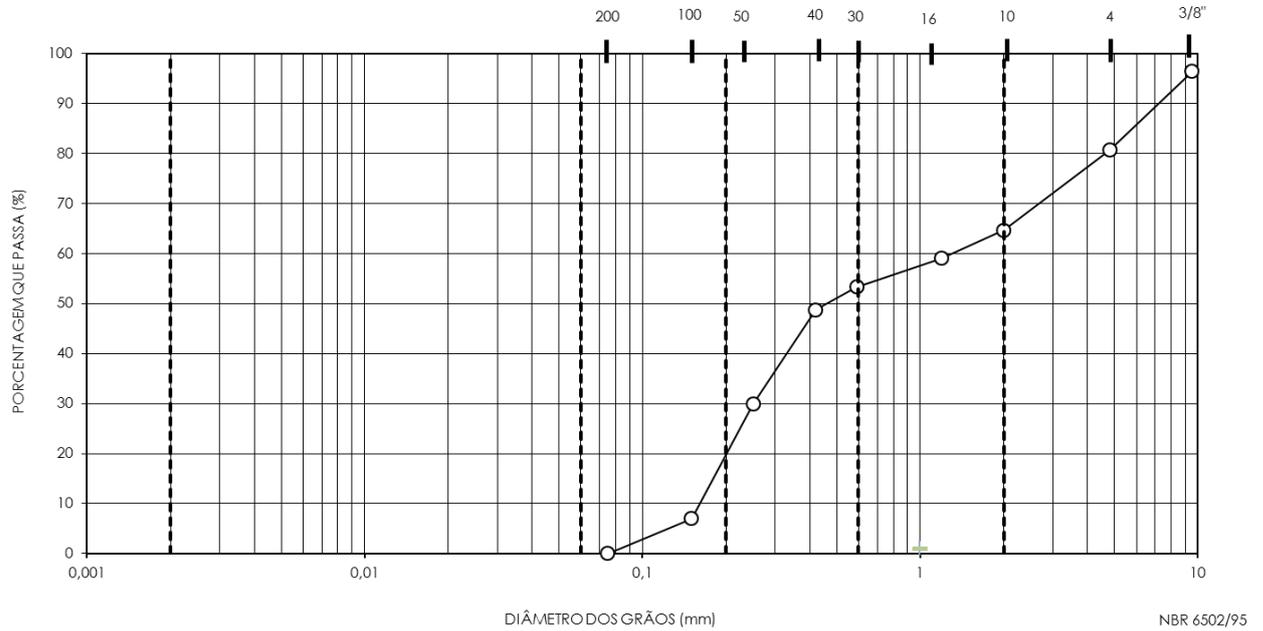
Tabela 10 - Planilha de Ensaio Granulometria M2

TEOR DE UMIDADE				PENEIRAMENTO GROSSO				
Nº Cápsula	#	1	2	Amostra Total Úmida (g)				
C + S + A	(g)	65,80	69,30	Amostra Total Seca (g)				1000,00
C + S	(g)	64,00	67,40	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
C - Cápsula	(g)	15,70	17,20			Retido	Passante	
S - Solo	(g)	48,3	50,2	2"	50,8		1000,00	100,00
A - Água	(g)	1,80	1,90	1 1/2"	38,1		1000,00	100,00
w - Umidade	(%)	3,73	3,78	1"	25,4		1000,00	100,00
Umidade Média	(%)	3,76		3/4"	19,0	0,00	1000,00	100,00
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS passante na peneira Nº 10				3/8"	9,5	23,80	976,20	97,62
				Nº 4	4,8	103,00	873,20	87,32
Picnômetro Nº	#	1	2	Nº 10	2,0	104,60	768,60	76,86
Pic+Solo+Água				PENEIRAMENTO FINO				
Pic+Água	(g)	667,7	667,1	Massa Úmida (g)				
T°C de Ensaio	(°C)	27,0	27,0	Massa Seca (g)				422,40
Massa Solo Úmido	(g)	50,0	50,0	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
Massa Solo Seco	(g)	48,2	48,2			Retido	Passante	
ME da Água, T°C Ens	(g/cm ³)	1,0	1,0	Nº 16	1,19	36,40	386,00	70,24
ME dos grãos	(g/cm ³)	2,777	2,529	Nº 30	0,59	37,30	348,70	63,45
ME dos grãos média	(g/cm ³)	2,653		Nº 40	0,42	30,20	318,50	57,95
Massa Úmida para Sedimentação	(g)	100,00		Nº 50	0,25	123,40	195,10	35,50
Massa Seca para Sedimentação	(g)			Nº 100	0,15	149,60	45,50	8,28
Número do Densímetro				Nº 200	0,075	45,50	0,00	0,00

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de granulometria do solo como mostrado na Tabela 10, foi obtida a seguinte curva de distribuição granulométrica ilustrada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M2



Fonte: Autora (2019)

A partir da curva apresentada no Gráfico 3, define-se as seguintes porcentagens de cada material presente no solo: pedregulho 35,4%, areia grossa 11,4%, areia média 33,3%, areia fina 20%.

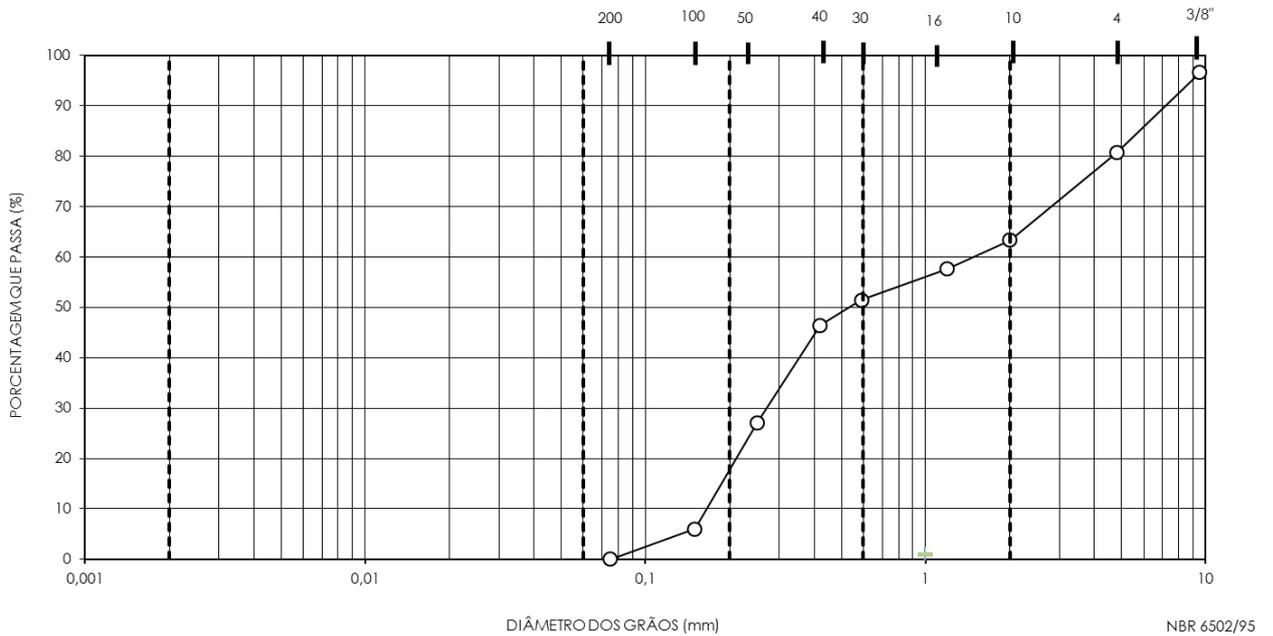
Tabela 11 - Planilha de Ensaio Granulometria M3

TEOR DE UMIDADE				PENEIRAMENTO GROSSO				
Nº Cápsula	#	1	2	Amostra Total Úmida (g)				
C + S + A	(g)	65,80	69,30	Amostra Total Seca (g)				1000,00
C + S	(g)	64,00	67,40	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
C - Cápsula	(g)	15,70	17,20			Retido	Passante	
S - Solo	(g)	48,3	50,2	2"	50,8		1000,00	100,00
A - Água	(g)	1,80	1,90	1 1/2"	38,1		1000,00	100,00
w - Umidade	(%)	3,73	3,78	1"	25,4		1000,00	100,00
Umidade Média	(%)	3,76		3/4"	19,0	0,00	1000,00	100,00
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS passante na peneira Nº 10				3/8"	9,5	21,80	978,20	97,82
				Nº 4	4,8	99,70	878,50	87,85
Picnômetro Nº	#	1	2	Nº 10	2,0	108,60	769,90	76,99
Pic+Solo+Água				PENEIRAMENTO FINO				
Pic+Água	(g)	667,6	668,2	Massa Úmida (g)				
T°C de Ensaio	(°C)	27,0	27,0	Massa Seca (g)				397,60
Massa Solo Úmido	(g)	50,0	50,0	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
Massa Solo Seco	(g)	48,2	48,2			Retido	Passante	
ME da Água, T°C Ens	(g/cm ³)	1,0	1,0	Nº 16	1,19	36,40	361,20	69,94
ME dos grãos	(g/cm ³)	2,611	2,777	Nº 30	0,59	38,50	322,70	62,49
ME dos grãos média	(g/cm ³)	2,694		Nº 40	0,42	31,20	291,50	56,45
Massa Úmida para Sedimentação	(g)	100,00		Nº 50	0,25	122,10	169,40	32,80
Massa Seca para Sedimentação	(g)			Nº 100	0,15	131,90	37,50	7,26
Número do Densímetro				Nº 200	0,075	37,50	0,00	0,00

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de granulometria do solo como mostrado na Tabela 11, foi obtida a seguinte curva de distribuição granulométrica ilustrada no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M3



Fonte: Autora (2019)

A partir da curva apresentada no Gráfico 4, define-se as seguintes porcentagens de cada material presente no solo: pedregulho 36,7%, areia grossa 11,9%, areia média 33,4%, areia fina 18%.

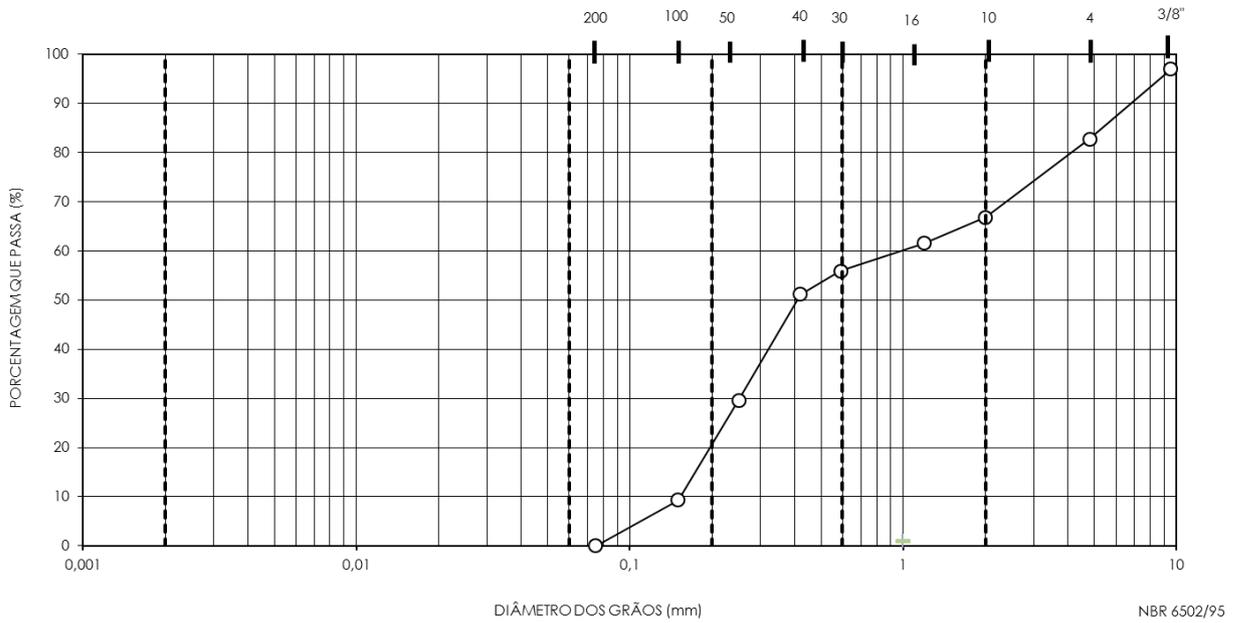
Tabela 12 - Planilha de Ensaio Granulometria M4

TEOR DE UMIDADE				PENEIRAMENTO GROSSO				
Nº Cápsula	#	1	2	Amostra Total Úmida (g)				
C + S + A	(g)	65,80	69,30	Amostra Total Seca (g)				1000,00
C + S	(g)	64,00	67,40	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
C - Cápsula	(g)	15,70	17,20			Retido	Passante	
S - Solo	(g)	48,3	50,2	2"	50,8		1000,00	100,00
A - Água	(g)	1,80	1,90	1 1/2"	38,1		1000,00	100,00
w - Umidade	(%)	3,73	3,78	1"	25,4		1000,00	100,00
Umidade Média	(%)	3,76		3/4"	19,0	0,00	1000,00	100,00
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS passante na peneira Nº 10				3/8"	9,5	21,30	978,70	97,87
				Nº 4	4,8	98,40	880,30	88,03
Picnômetro Nº	#	1	2	Nº 10	2,0	109,50	770,80	77,08
Pic+Solo+Água				PENEIRAMENTO FINO				
Pic+Água	(g)	664,3	665,3	Massa Úmida (g)				
T°C de Ensaio	(°C)	27,0	27,0	Massa Seca (g)				461,40
Massa Solo Úmido	(g)	50,0	50,0	Peneira	Diâmetro (mm)	Peso da Amostra Seca (g)		% Passante
Massa Solo Seco	(g)	48,2	48,2			Retido	Passante	
ME da Água, T°C Ens	(g/cm ³)	1,0	1,0	Nº 16	1,19	36,60	424,80	70,97
ME dos grãos	(g/cm ³)	2,640	2,669	Nº 30	0,59	38,90	385,90	64,47
ME dos grãos média	(g/cm ³)	2,655		Nº 40	0,42	32,50	353,40	59,04
Massa Úmida para Sedimentação	(g)	100,00		Nº 50	0,25	148,70	204,70	34,20
Massa Seca para Sedimentação	(g)			Nº 100	0,15	140,30	64,40	10,76
Número do Densímetro				Nº 200	0,075	64,40	0,00	0,00

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de granulometria do solo como mostrado na Tabela 12, foi obtida a seguinte curva de distribuição granulométrica ilustrada no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Curva de distribuição granulométrica da amostra M4



Fonte: Autora (2019)

A partir da curva apresentada no Gráfico 5, define-se as seguintes porcentagens de cada material presente no solo: pedregulho 33,2%, areia grossa 10,9%, areia média 35,9%, areia fina 16%.

Figura 6 – Preparação de amostra para Granulometria Solo Referência



Fonte: Autora (2019)

Figura 7 - Ensaio de Análise Granulométrica amostra M4



Fonte: Autora (2019)

4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Já no que se refere ao ensaio de massa específica, foi encontrado um valor de 2,707 g/cm³ para o solo de referência, de 2,684 g/cm³ para a amostra M1, de 2,653 g/cm³ para a amostra M2, e 2,694 g/cm³ para a amostra M3 e 2,655 g/cm³ para a amostra M4 como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Massa Especifica das Amostras

Amostra	Massa Específica dos Grãos
Solo Jazida	2,707
M1	2,684
M2	2,653
M3	2,694
M4	2,655

Fonte: Autora (2019)

Percebe-se na Tabela 13 que a densidade real dos grãos apresentou pouca variação nos resultados, ficando entre 2,653 e 2,707 g/cm³. Os menores valores de densidade são das amostras com percentagens de CCA, justificada pelo seu baixo peso específico. O valor da densidade real dos grãos da CCA foi de 2,1 g/cm³.

Figura 8 – Ensaio de Massa Especifica do Solo de Referência.



Fonte: Autora (2019)

4.3 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE

Tabela 14 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade Solo Referência

W _L - LIMITE DE LIQUIDEZ - SOLO REFERENCIA						
Determ.	nº	1	2	3	4	5
Cápsula	nº	11	4	33	4	3
S + T + A	g	40,20	41,70	42,60	47,70	54,20
S + T	g	35,10	36,40	36,90	41,60	47,50
Tara (T)	g	17,40	17,10	16,10	19,10	17,90
Água (A)	g	3,69	5,30	5,70	6,10	6,70
Sólidos (S)	g	10,72	19,30	20,80	22,50	29,60
w	%	36,0	27,5	27,4	27,1	22,6
Golpes	nº	16	22	28	34	40

W _P - LIMITE DE PLASTICIDADE - SOLO REFERENCIA						
Determ.	nº	1	2	3	4	5
Cápsula	nº	55	44	41	22	77
S + T + A	g	10,70	11,20	10,40	9,60	10,00
S + T	g	10,30	10,80	10,00	9,30	9,70
Tara (T)	g	8,20	8,80	8,20	8,00	8,20
Água (A)	g	0,40	0,40	0,40	0,30	0,30
Sólidos (S)	g	2,10	2,00	1,80	1,30	1,50
w	%	19,0	20,0	22,2	23,1	20,0

LIMITE DE LIQUIDEZ

Nº DE GOLPES

Nº de Deterri	5	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DE VALORES INTERVALO DE VARIÇÃO	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>19,8</td> <td>-----</td> <td>21,9</td> </tr> <tr> <td>19,0</td> <td>-----</td> <td>21,0</td> </tr> </table>	19,8	-----	21,9	19,0	-----	21,0	W _L	29
19,8	-----			21,9							
19,0	-----	21,0									
Nº de Deterri	2	W _P	20								
W _P médio	20,9	IP	9								
W _P médio	20,0										

Fonte: Autora (2019)

Através dos ensaios de limite consistência, foram determinados os seguintes parâmetros para o solo de referência o limite de liquidez (WL) = 29, limite de plasticidade (WP) = 20, índice de plasticidade (IP) = 9. A partir do ensaio, o solo é classificado como medianamente plástico já que está no intervalo $7 < IP < 15$ segundo Caputo (1988).

Figura 9 – Ensaio de Limite de Liquidez do Solo de Referência.



Fonte: Autora (2019)

Figura 10 – Ensaio de Limite de Plasticidade do Solo de Referência.



Fonte: Autora (2019)

Para as amostras com adição de cinza de casca de arroz e cimento não foi possível executar o ensaio de limite de plasticidade como mostrados nas tabelas de ensaios das amostras M1, M2, M3 e M4. O solo natural possui característica arenosa, com as adições o solo foi considerado não plástico (NP), na Figura 11 mostra o como não foi possível chegar próximo as dimensões de 3 mm de diâmetro exigidas pela ABNT NBR 7180:2016.

Para o caso do LL as variações ocorreram, provavelmente, em decorrência da ação de finos como formadores de pasta, consequência do aumento da superfície específica e da capacidade de troca catiônica Alcântara (2017).

Figura 11– Amostra M1 considerada NP.



Fonte: Autora (2019)

Tabela 15 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M1

W _L - LIMITE DE LIQUIDEZ - M1						
Determ.	nº	1	2	3	4	5
Cápsula	nº	11	4	33	4	3
S + T + A	g	51,60	44,30	39,80	39,30	38,90
S + T	g	43,50	37,80	34,10	34,30	34,20
Tara (T)	g	16,50	16,50	15,30	17,50	18,30
Água (A)	g	3,69	6,50	5,70	5,00	4,70
Sólidos (S)	g	10,72	21,30	18,80	16,80	15,90
w	%	36,0	30,5	30,3	29,8	29,6
Golpes	nº	16	22	28	34	40

LIMITE DE LIQUIDEZ

w (%)

Nº DE GOLPES

Fonte: Autora (2019)

Já para as amostras M1 o limite de liquidez (WL) = 32 e índice de plasticidade (IP) = NP. O solo possui uma característica arenosa, com isso não foi possível executar o ensaio de limite de plasticidade.

Tabela 16 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M2

W _L - LIMITE DE LIQUIDEZ - M2						
Determ.	nº	1	2	3	4	5
Cápsula	nº	11	4	33	4	3
S + T + A	g	35,00	41,10	41,60	42,50	51,80
S + T	g	30,50	35,40	35,50	36,10	43,40
Tara (T)	g	17,90	19,00	18,10	17,60	18,90
Água (A)	g	3,69	5,70	6,10	6,40	8,40
Sólidos (S)	g	10,72	16,40	17,40	18,50	24,50
w	%	36,0	34,8	35,1	34,6	34,3
Golpes	nº	16	22	28	34	40

LIMITE DE LIQUIDEZ

O gráfico mostra a relação entre o número de golpes (eixo X) e a umidade (w em %, eixo Y). O eixo X varia de 0 a 50, e o eixo Y varia de 34 a 37. Uma linha vertical tracejada indica o limite de liquidez (WL) em 25 golpes. Os pontos de dados são os seguintes:

Nº de Golpes	w (%)
16	36,0
22	34,8
28	35,1
34	34,6
40	34,3

Uma linha sólida conecta os pontos de dados, e uma linha vertical tracejada indica o limite de liquidez (WL) em 25 golpes.

Fonte: Autora (2019)

Para a amostra M2 o limite de liquidez (WL) = 35 e índice de plasticidade (IP) = NP. O solo possui uma característica arenosa, com isso não foi possível executar o ensaio de limite de plasticidade.

Tabela 17 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M3

W _L - LIMITE DE LIQUIDEZ - M3						
Determ.	nº	1	2	3	4	5
Cápsula	nº	11	4	33	4	3
S + T + A	g	32,50	46,70	38,90	40,20	51,20
S + T	g	28,90	40,20	33,60	35,10	44,10
Tara (T)	g	17,20	18,50	16,50	17,80	19,40
Água (A)	g	3,69	6,50	5,30	5,10	7,10
Sólidos (S)	g	10,72	21,70	17,10	17,30	24,70
w	%	36,0	30,0	31,0	29,5	28,7
Golpes	nº	16	22	28	34	40

LIMITE DE LIQUIDEZ

Nº DE GOLPES

Fonte: Autora (2019)

Para a amostra M3 o limite de liquidez (WL) = 32 e índice de plasticidade (IP) = NP. O solo possui uma característica arenosa, com isso não foi possível executar o ensaio de limite de plasticidade.

Tabela 18 - Planilha de Ensaio Limites de Liquidez e Plasticidade M4

W _L - LIMITE DE LIQUIDEZ - M4						
Determ.	n°	1	2	3	4	5
Cápsula	n°	11	4	33	4	3
S + T + A	g	42,10	41,40	42,80	41,60	43,40
S + T	g	39,60	35,50	36,40	35,80	37,90
Tara (T)	g	17,90	19,00	18,10	17,60	18,90
Água (A)	g	3,69	5,90	6,40	5,80	5,50
Sólidos (S)	g	10,72	16,50	18,30	18,20	19,00
w	%	36,0	35,8	35,0	31,9	28,9
Golpes	n°	16	22	28	34	40

LIMITE DE LIQUIDEZ

w (%)

N° DE GOLPES

Fonte: Autora (2019)

Para a amostra M4 o limite de liquidez (WL) = 34 e índice de plasticidade (IP) = NP. O solo possui uma característica arenosa, com isso não foi possível executar o ensaio de limite de plasticidade.

Figura 12 – Determinação Massa Seca Limite de Liquidez



Fonte: Autora (2019)

Figura 13 - Determinação Massa Seca Limite de Plasticidade Solo Referencia



Fonte: Autora (2019)

4.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Tabela 19 – Ensaio de Compactação Solo Referência

COMPACTAÇÃO - NBR-7182						
Teor de Umidade						
Nº Cápsula	#	1	2	3	4	5
C + S + A	(g)	97,9	98,6	97,7	97,6	79,2
C + S	(g)	93,1	92,3	90,1	88,9	71,6
C - Cápsula	(g)	19,4	18,9	18,1	19,1	17,6
A - Água	(g)	4,8	6,3	7,6	8,7	7,6
S - Solo	C	73,7	73,4	72,0	69,8	54,0
w - Umidade	(%)	6,5	8,6	10,6	12,5	14,1
Umid.Média	(%)	6,5	8,6	10,6	12,5	14,1
Dados de Compactação dos Corpos de Prova						
Água Adic.	(g)	200	300	400	500	600
% Água Adic.	(%)	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
Umid.Calc.	(%)	6,5	8,6	10,6	12,5	14,1
Nº do Molde	#	17	17	17	17	17
M + S + A	(g)	9690	9870	10130	9870	9800
M - Molde	(g)	5550	5390	5520	5333	5460
S + A	(g)	4140	4480	4610	4537	4340
γ úmida	(g/cm ³)	1,984	2,147	2,209	2,174	2,080
γ seca	(g/cm ³)	1,862	1,977	1,998	1,933	1,823
Curva de Compactação						
<p>O gráfico apresenta a curva de compactação do solo referência. O eixo horizontal representa a Umidade (%) variando de 6,0 a 15,0. O eixo vertical representa o peso específico aparente seco (γ aparente seca) em g/cm³, variando de 1,8000 a 2,0200. A curva é parabólica, com o ponto máximo (umidade ótima) em 10,0% de umidade e 2,000 g/cm³ de peso específico aparente seco. Os pontos experimentais são: (6,5, 1,862), (8,6, 1,977), (10,6, 1,998), (12,5, 1,933), (14,1, 1,823).</p>						

Fonte: Autora (2019)

Para o solo referência o valor de umidade ótima é de W ótima = 10 % e Peso Específico Seco $\gamma_s = 2,0$ g/cm².

Tabela 20 - Ensaio de Compactação M1

COMPACTAÇÃO - NBR-7182						
Teor de Umidade						
Nº Cápsula	#	1	2	3	4	5
C + S + A	(g)	57,3	63,8	58,2	59,5	57,2
C + S	(g)	54,4	59,5	53,8	54,4	51,8
C - Cápsula	(g)	17,3	17,8	18,1	19,1	17,6
A - Água	(g)	2,9	4,3	4,4	5,1	5,4
S - Solo	(g)	37,1	41,7	35,7	35,3	34,2
w - Umidade	(%)	7,8	10,3	12,3	14,4	15,8
Umidade Média	(%)	7,8	10,3	12,3	14,4	15,8
Dados de Compactação dos Corpos de Prova						
Água Adic.	(g)	400	500	600	700	800
% Água Adic.	(%)	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
Umidade Calc.	(%)	7,8	10,3	12,3	14,4	15,8
Nº do Molde	#	17	17	17	17	17
M + S + A	(g)	9520	9550	9970	9520	9510
M - Molde	(g)	5550	5383	5600	5310	5360
S + A	(g)	3970	4167	4370	4210	4150
γ úmida	(g/cm ³)	1,902	1,997	2,094	2,017	1,989
γ seca	(g/cm ³)	1,764	1,810	1,864	1,763	1,717
Curva de Compactação						

Umidade (%)	γ aparente seco (g/cm ³)
7,8	1,764
10,3	1,810
12,3	1,864
14,4	1,763
15,8	1,717

Fonte: Autora (2019)

Para a amostra M1 o valor de umidade ótima é de W ótima = 12,3 % e Peso Especifico Seco $\gamma_s = 1,86 \text{ g/cm}^2$.

Tabela 21 - Ensaio de Compactação M2

COMPACTAÇÃO - NBR-7182						
Teor de Umidade						
Nº Cápsula	#	1	2	3	4	5
C + S + A	(g)	61,9	60,6	63,2	60,5	62,2
C + S	(g)	57,8	55,9	57,6	54,6	55,0
C - Cápsula	(g)	19,4	18,9	18,1	19,1	16,5
A - Água	(g)	4,1	4,7	5,6	5,9	7,2
S - Solo	C	38,4	37,0	39,5	35,5	38,5
w - Umidade	(%)	10,7	12,7	14,2	16,6	18,7
Umidade Média	(%)	10,7	12,7	14,2	16,6	18,7
Dados de Compactação dos Corpos de Prova						
Água Adic.	(g)	400	500	600	700	800
% Água Adic.	(%)	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
Umidade Calc.	(%)	10,7	12,7	14,2	16,6	18,7
Nº do Molde	#	17	17	17	17	17
M + S + A	(g)	9220	9480	9670	9370	9290
M - Molde	(g)	5550	5590	5520	5333	5460
S + A	(g)	3670	3890	4150	4037	3830
γ úmida	(g/cm ³)	1,759	1,864	1,989	1,934	1,835
γ seca	(g/cm ³)	1,589	1,654	1,742	1,659	1,546
Curva de Compactação						
<p>g aparente seca (g/cm³)</p> <p>Umidade (%)</p>						

Fonte: Autora (2019)

Para a amostra M2 o valor de umidade ótima é de W ótima = 14,2 % e Peso Especifico Seco $\gamma_s = 1,742$ g/cm².

Tabela 22 - Ensaio de Compactação M3

COMPACTAÇÃO - NBR-7182						
Teor de Umidade						
Nº Cápsula	#	1	2	3	4	5
C + S + A	(g)	57,8	63,3	59,2	58,3	56,1
C + S	(g)	54,9	59,0	54,6	53,4	50,7
C - Cápsula	(g)	17,3	17,8	18,1	19,1	17,6
A - Água	(g)	2,9	4,3	4,6	4,9	5,4
S - Solo	(g)	37,6	41,2	36,5	34,3	33,1
w - Umidade	(%)	7,7	10,4	12,6	14,3	16,3
Umidade Média	(%)	7,7	10,4	12,6	14,3	16,3
Dados de Compactação dos Corpos de Prova						
Água Adic.	(g)	400	500	600	700	800
% Água Adic.	(%)	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
Umidade Calc.	(%)	7,7	10,4	12,6	14,3	16,3
Nº do Molde	#	17	17	17	17	17
M + S + A	(g)	9480	9530	9890	9490	9520
M - Molde	(g)	5550	5383	5600	5310	5360
S + A	(g)	3930	4147	4290	4180	4160
γ úmida	(g/cm ³)	1,883	1,987	2,056	2,003	1,993
γ seca	(g/cm ³)	1,748	1,799	1,826	1,753	1,714
Curva de Compactação						

Fonte: Autora (2019)

Para a amostra M2 o valor de umidade ótima é de $W_{ótima} = 12,3\%$ e Peso Especifico Seco $\gamma_s = 1,828 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 23 - Ensaio de Compactação M4

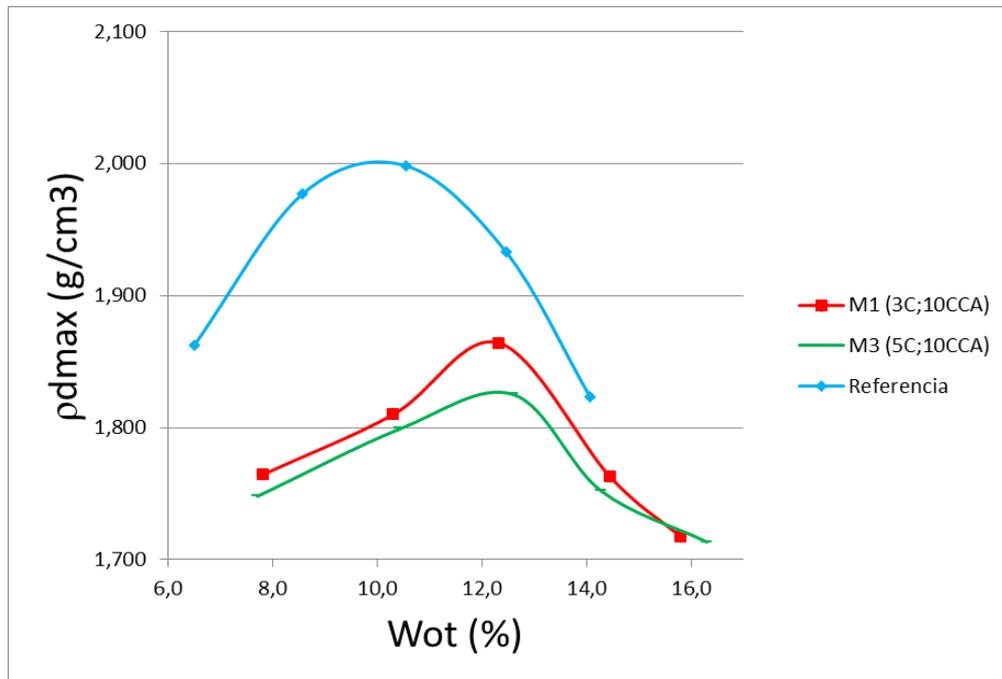
COMPACTAÇÃO - NBR-7182						
Teor de Umidade						
Nº Cápsula	#	1	2	3	4	5
C + S + A	(g)	58,5	57,3	62,5	59,3	58,4
C + S	(g)	54,2	52,4	56,1	53,1	51,7
C - Cápsula	(g)	19,4	18,9	18,1	19,1	16,5
A - Água	(g)	4,3	4,9	6,4	6,2	6,7
S - Solo	(g)	34,8	33,5	38,0	34,0	35,2
w - Umidade	(%)	12,4	14,6	16,8	18,2	19,0
Umidade Média	(%)	12,4	14,6	16,8	18,2	19,0
Dados de Compactação dos Corpos de Prova						
Água Adic.	(g)	400	500	600	700	800
% Água Adic.	(%)	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
Umidade Calc.	(%)	12,4	14,6	16,8	18,2	19,0
Nº do Molde	#	17	17	17	17	17
M + S + A	(g)	9220	9480	9640	9370	9290
M - Molde	(g)	5550	5590	5520	5333	5460
S + A	(g)	3670	3890	4120	4037	3830
γ úmida	(g/cm ³)	1,759	1,864	1,974	1,934	1,835
γ seca	(g/cm ³)	1,565	1,626	1,690	1,636	1,542
Curva de Compactação						

Umidade (%)	γ aparente seco (g/cm ³)
12,4	1,565
14,6	1,626
16,8	1,690
18,2	1,636
19,0	1,542

Fonte: Autora (2019)

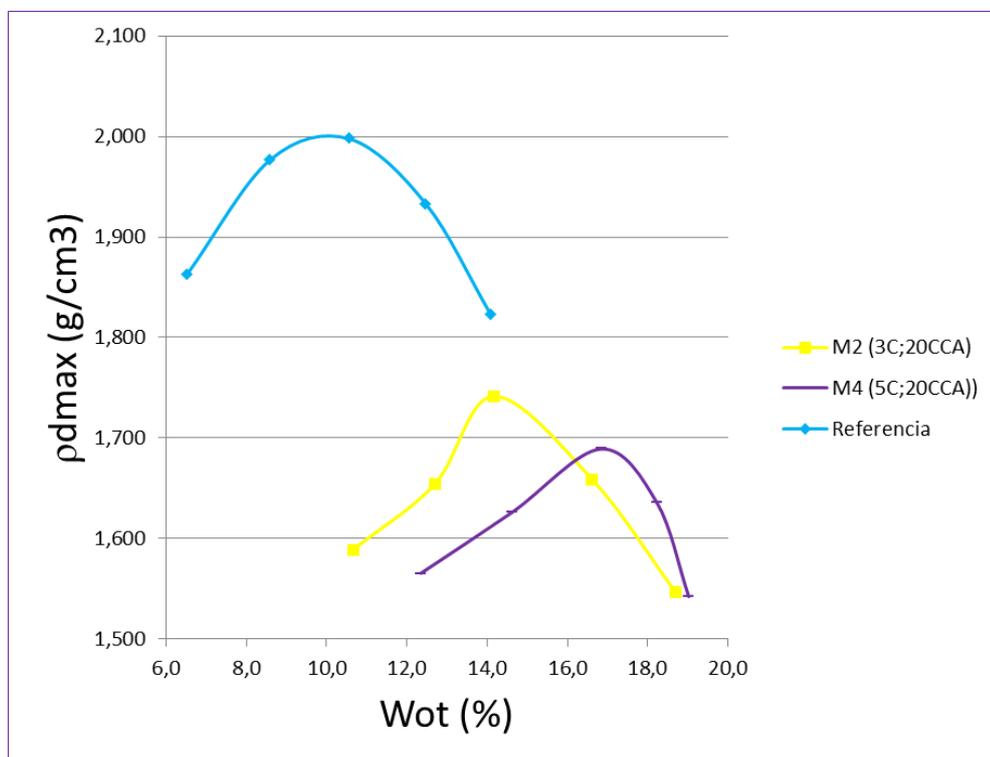
Para a amostra M4 o valor de umidade ótima é de W ótima = 16,8 % e Peso Especifico Seco $\gamma_s = 1,69$ g/cm³.

Gráfico 6 – Comparativo entre Curvas de Compactação Solo Referencia, M1 e M3



Fonte: Autora (2019)

Gráfico 7 - Comparativo entre Curvas de Compactação Solo Referencia, M2 e M4



Fonte: Autora (2019)

Através das curvas de compactação, pode-se obter um gráfico comparativo entre elas, como mostrado nos Gráfico 6 e 7 o teor de umidade ótima (Wot) aumenta e o peso específico aparente seco máximo (ρ_{dmax}) diminui para uma mesma energia de compactação com a presença de CCA no solo. Segunda Souza (2016) a CCA é um material capaz de absorver e reter grandes quantidades de água. Esta característica pode ser benéfica para tratar solos com alto teor de umidade natural.

A análise das curvas e dos parâmetros de compactação dos materiais em estudo permite comparar os resultados com os encontrados por Klamt et al., (2016) onde mostra que o índice de vazios aumenta, o peso específico aparente seco máximo diminui quando adicionados os novos materiais ao solo, a nova estrutura floclada se torna mais resistente devido ao efeito do aglomerante.

Estes resultados concordam com o estudo realizado por Bonfante (2015), que analisou misturas de solo arenoso com CCA e atribuiu a diminuição da densidade máxima seca de compactação à baixa densidade dos grãos de CCA.

4.5 ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR) E EXPANSÃO

Tabela 24 – Ensaio de CBR e Expansão Solo Referência

EXPANSÃO															
Molde (N°)		21			20			25							
Altura do molde (cm)		11,38			11,38			11,38							
-	-	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.					
Data	Hora	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%					
		2,10	0,00	0,00	1,90	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00					
		2,60	0,50	0,44	2,40	0,50	0,44	1,90	0,40	0,35					
		2,90	0,80	0,70	2,60	0,70	0,62	2,10	0,60	0,53					
		3,10	1,00	0,88	2,90	1,00	0,88	2,30	0,80	0,70					
		3,30	1,20	1,05	3,00	1,10	0,97	2,50	1,00	0,88					
Cil.+am. após embebição															
Peso da água absorvida															
PENETRAÇÃO															
Tempo	Penetração		Pressão	Molde	21			Molde	20			Molde	25		
Min.	mm	Pol.	Padrão	Leitura	Pressão Kg/m ²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m ²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m ²		ISC
-	-	-	-	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%
0,5	0,63	0,025	-	105	11,01			115	12,1			40	4,2		
1,0	1,27	0,050	-	161	16,88			185	19,4			65	6,8		
1,5	1,90	0,075	-	210	22,02			240	25,2			85	8,9		
2,0	2,54	0,100	70,31	250	26,21	26,2	37,3	295	30,9	30,9	44,0	101	10,6	10,6	15,1
3,0	3,81	0,150	-	305	31,98			375	39,3			130	13,6		
4,0	5,08	0,200	105,46	385	40,37	40,4	38,3	460	48,2	48,2	45,7	150	15,7	15,7	14,9
6,0	7,62	0,300	-	440	46,13			580	60,8			170	17,8		

Fonte: Autora (2019)

A partir das leituras realizadas e seguindo as especificações da NBR, podem-se obter os valores de CBR para o Solo de Referência de 44,85% e uma Expansão de 0,97%. Materiais com CBR nessa ordem de grandeza são tipicamente utilizados como sub-base, onde a exigência vigente é que o CBR seja maior que 20% e expansão inferior a 1%,

Tabela 25 – Ensaio de CBR e Expansão M1

EXPANSÃO										
Molde (Nº)		21			20			25		
Altura do molde (cm)		11,38			11,38			11,38		
-	-	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.
Data	Hora	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%
		0,50	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00
		0,70	0,20	0,18	0,40	0,10	0,09	0,30	0,10	0,09
		0,80	0,30	0,26	0,50	0,20	0,18	0,40	0,20	0,18
		1,00	0,50	0,44	0,70	0,40	0,35	0,50	0,30	0,26
		1,20	0,70	0,62	0,80	0,50	0,44	0,60	0,40	0,35
Cil.+am. após embebição										
Peso da água absorvida										

Anel dinamométrico
DIN 001
Constante do anel
0,10485
Relógio comparador
EXT 001
Área do pistão (cm²)
19,3221

PENETRAÇÃO															
Tempo	Penetração		Pressão	Molde	21			Molde	20			Molde	25		
	Min.	mm			Pol.	Leitura	Pressão Kg/m²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m²
-	-	-	-	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%
0,5	0,63	0,025	-	250	26,21			350	36,7			29	3,0		
1,0	1,27	0,050	-	340	35,65			410	43,0			360	37,7		
1,5	1,90	0,075	-	410	42,99			540	56,6			430	45,1		
2,0	2,54	0,100	70,31	590	61,86	61,9	88,0	660	69,2	69,2	98,4	560	58,7	58,7	83,5
3,0	3,81	0,150	-	660	69,20			750	78,6			610	64,0		
4,0	5,08	0,200	105,46	750	78,64	78,6	74,6	900	94,4	94,4	89,5	720	75,5	75,5	71,6
6,0	7,62	0,300	-	820	85,98							790	82,8		

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia na amostra M1, o valor de CBR encontrado foi de 96,2% e a Expansão de 0,44%.

Tabela 26 – Ensaio de CBR e Expansão M2

EXPANSÃO										
Molde (Nº)		21			20			25		
Altura do molde (cm)		11,38			11,38			11,38		
-	-	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.
Data	Hora	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%
		1,20	0,00	0,00	1,10	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
		2,50	1,30	1,14	2,40	1,30	1,14	1,10	0,10	0,09
		2,90	1,70	1,49	2,80	1,70	1,49	1,50	0,50	0,44
		3,10	1,90	1,67	3,00	1,90	1,67	1,70	0,70	0,62
		2,20	1,00	0,88	2,00	0,90	0,79	1,80	0,80	0,70
Cil.+am. após embebição										
Peso da água absorvida										

Anel dinamométrico
DIN 001
Constante do anel
0,10485
Relógio comparador
EXT 001
Área do pistão (cm²)
19,3221

PENETRAÇÃO																
Tempo Min.	Penetração		Pressão	Molde	21				20				25			
	mm	Pol.			o	Leitura	Pressão Kg/m²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m²	
-	-	-	-	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	
0,5	0,63	0,025	-	250	26,21			290	30,4			130	13,6			
1,0	1,27	0,050	-	290	30,41			400	41,9			210	22,0			
1,5	1,90	0,075	-	430	45,09			520	54,5			322	33,8			
2,0	2,54	0,100	70,31	510	53,47	53,5	76,1	640	67,1	67,1	95,4	400	41,9	41,9	59,7	
3,0	3,81	0,150	-	660	69,20			780	81,8			510	53,5			
4,0	5,08	0,200	105,46	700	73,40	73,4	69,6	892	93,5	93,5	88,7	610	64,0	64,0	60,6	
6,0	7,62	0,300	-	812	85,14			995	104,3			705	73,9			

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia na amostra M2, o valor de CBR encontrado foi de 92,05% e a Expansão de 0,79%.

Tabela 27 – Ensaio de CBR e Expansão M3

EXPANSÃO															
Molde (Nº)		21			20			25							
Altura do molde (cm)		11,38			11,38			11,38			Anel dinamométrico DIN 001				
-	-	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.					
Data	Hora	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	Constante do anel 0,10485				
		0,50	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	Relógio comparador EXT 001				
		0,60	0,10	0,09	0,40	0,10	0,09	0,40	0,00	0,00	Área do pistão (cm²) 19,3221				
		0,80	0,30	0,26	0,50	0,20	0,18	0,40	0,00	0,00					
		1,00	0,50	0,44	0,60	0,30	0,26	0,50	0,10	0,09					
		1,10	0,60	0,53	0,70	0,40	0,35	0,70	0,30	0,26					
Cil.+am. após embebição															
Peso da água absorvida															
PENETRAÇÃO															
Tempo	Penetração		Pressão	Molde	21			Molde	20			Molde	25		
Min.	mm	Pol.			Leitura	Pressão Kg/m²	ISC		Leitura	Pressão Kg/m²	ISC		Leitura	Pressão Kg/m²	ISC
-	-	-	-	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%
0,5	0,63	0,025	-	310	32,50			350	36,7			280	29,4		
1,0	1,27	0,050	-	390	40,89			410	43,0			360	37,7		
1,5	1,90	0,075	-	480	50,33			540	56,6			450	47,2		
2,0	2,54	0,100	70,31	560	58,72	58,7	83,5	670	70,2	70,2	99,9	510	53,5	53,5	76,1
3,0	3,81	0,150	-	660	69,20			720	75,5			590	61,9		
4,0	5,08	0,200	105,46	700	73,40	73,4	69,6	910	95,4	95,4	90,5	680	71,3	71,3	67,6
6,0	7,62	0,300	-	812	85,14							740	77,6		

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia na amostra M3, o valor de CBR encontrado foi de 95,2% e a Expansão de 0,35%.

Tabela 28 – Ensaio de CBR e Expansão M4

EXPANSÃO															
Molde (Nº)		21			20			25							
Altura do molde (cm)		11,38			11,38			11,38			Anel dinamométrico DIN 001				
-	-	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.					
Data	Hora	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	Constante do anel 0,10485				
		1,30	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00					
		1,60	0,30	0,26	2,30	1,10	0,97	1,30	0,30	0,26					
		2,20	0,90	0,79	2,70	1,50	1,32	1,50	0,50	0,44					
		2,30	1,00	0,88	2,90	1,70	1,49	1,80	0,80	0,70	Relógio comparador EXT 001				
		2,40	1,10	0,97	2,20	1,00	0,88	1,90	0,90	0,79	Área do pistão (cm²) 19,3221				
Cil.+am. após embebição															
Peso da água absorvida															
PENETRAÇÃO															
Tempo Min.	Penetração		Pressã o	Molde Leitura	21			Molde Leitura	20			Molde Leitura	25		
	mm	Pol.			Pressão Kg/m²	ISC	Pressão Kg/m²		ISC	Pressão Kg/m²	ISC				
-	-	-	-	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%
0,5	0,63	0,025	-	280	29,36			310	32,5			280	29,4		
1,0	1,27	0,050	-	350	36,70			420	44,0			320	33,6		
1,5	1,90	0,075	-	430	45,09			540	56,6			410	43,0		
2,0	2,54	0,100	70,31	590	61,86	61,9	88,0	650	68,2	68,2	96,9	580	60,8	60,8	86,5
3,0	3,81	0,150	-	650	68,15			780	81,8			650	68,2		
4,0	5,08	0,200	105,46	730	76,54	76,5	72,6	890	93,3	93,3	88,5	710	74,4	74,4	70,6
6,0	7,62	0,300	-	810	84,93							790	82,8		

Fonte: Autora (2019)

A partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia na amostra M4, o valor de CBR encontrado foi de 92,7% e a Expansão de 0,88%.

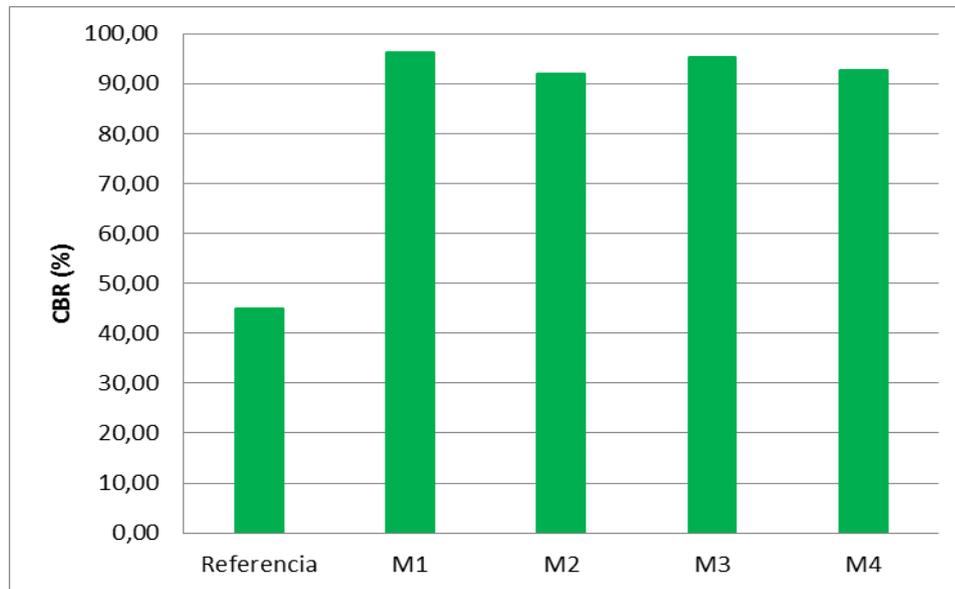
A figura 14 mostra a diferença na penetração das amostras com e sem adição de CCA. A amostra referência, apesar de já possuir uma boa resistência, apresenta uma grande diferença se comparada à amostra com adição.

Figura 14 – Comparativo de penetração das amostras depois de rompida



Fonte: Autora (2019)

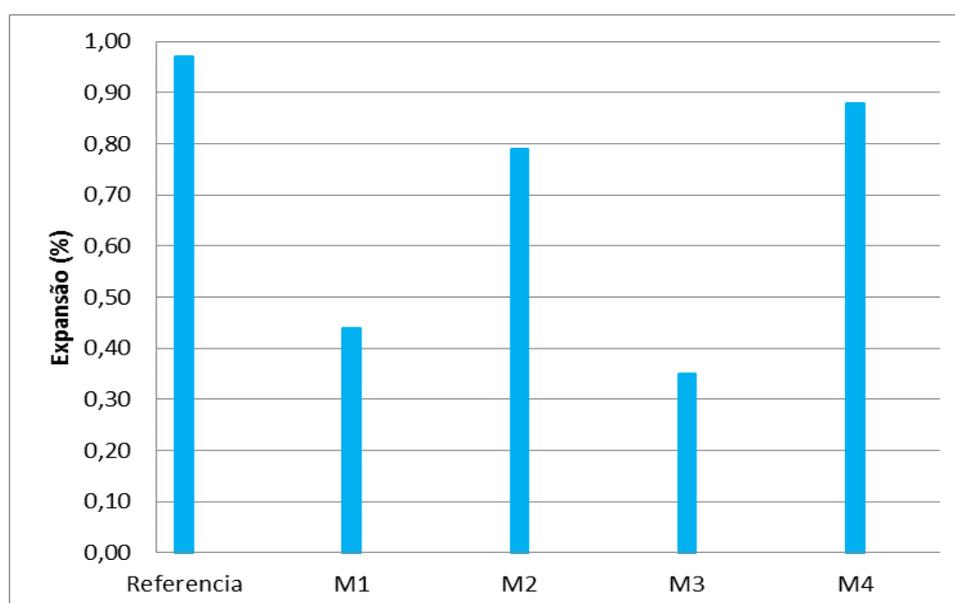
Gráfico 8 – Comparativo do CBR das Amostras



Fonte: Autora (2019)

A partir do Gráfico 8 pode-se concluir que todas as amostras tiveram aumento no CBR com a adição de CCA. Assim como todas as amostras com adição pode ser utilizada como material de base de rodovias, já que apresentou $CBR \geq 80\%$. O gráfico evidencia também que as amostras com 10% de adição de CCA foi as que obtiveram os maiores resultados.

Gráfico 9 – Comparativo de Expansão das Amostras



Fonte: Autora (2019)

Os resultados evidenciados no Gráfico 9 mostram que as leituras de expansão em todos os corpos de prova foram menores que 1%. Portanto, segundo as especificações do DNIT todas as amostras cumpriram com os requisitos de porcentagens de expansão para materiais de sub-base de pavimentos. As amostras M1 e M3 podem ser utilizadas também como materiais de base, já que seus valores de expansão foram menores que 0,5%.

Tabela 29 – Resumo Geral dos Resultados de Ensaio

	$\gamma_{s,max}$	W _{ótima}	Massa Específica	LL	LP	IP	CBR (%)	Exp. (%)
Referencia	2,000	9,800	2,707	29	20	9	44,85	0,97
M1	1,860	12,300	2,684	32	0	NP	96,2	0,44
M2	1,742	14,200	2,653	35	0	NP	92,05	0,79
M3	1,828	12,300	2,694	32	0	NP	95,2	0,35
M4	1,690	16,800	2,655	34	0	NP	92,7	0,88

Fonte: Autora (2019)

Para o solo referência, os resultados mostraram maiores valores de expansão mostrando que a tendência geral é sua redução com adição de CCA.

Tabela 30 – Variação em relação ao Solo Referência

Amostra	CBR (%)	EXP.(%)
M1	114 ↑	55 ↓
M2	105 ↑	19 ↓
M3	112 ↑	64 ↓
M4	107 ↑	09 ↓

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 29 mostra o percentual de variação do CBR e da Expansão nas misturas em relação ao solo referência. Como se podem observar todas as amostras aumentaram o CBR e reduziram a Expansão.

Tabela 31 – Aceitabilidade para materiais de base segundo DNIT

Amostra	CBR (%)	Exp.(%)	CBR \geq 80% Expansão \leq 0,5%
Referencia	✗ 44,85	✗ 0,97	Reprovada
M1	✓ 96,20	✓ 0,44	Aprovada
M2	✓ 92,05	✗ 0,79	Reprovada
M3	✓ 95,20	✓ 0,35	Aprovada
M4	✓ 92,70	✗ 0,88	Reprovada

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 30 mostra que as amostras M1 e M3 podem ser utilizadas como materiais de base em rodovias, já que atenderam os critérios de CBR \geq 80%, expansão \leq 0,5 exigidos para CBR e Expansão pelo DNIT.

5 CONCLUSÃO

Através dos ensaios desenvolvidos, buscou-se o levantamento de dados para verificar os efeitos quanto ao aumento do CBR do solo em relação ao solo natural e ao solo melhorado com cimento e CCA. Podem-se avaliar também as diferenças na expansão do material em diferentes situações propostas.

Para o solo de referência a densidade real dos grãos foi de $2,707 \text{ g/cm}^3$, os limite de liquidez (LL) = 29, limite de plasticidade (LP) = 20 e o índice de plasticidade (IP) = 9. A característica principal de acordo a classificação HRB para esse solo é A-3 definido como areia fina.

Foi usado como parâmetro de referência NBR 12254:2013, assim, definiram-se quatro amostras com diferentes teores de solo, cimento e CCA. A presença de CCA tende a elevar os valores do limite de liquidez e do limite de plasticidade, as amostras com adição ficou definida como não plástica (NP). A cinza da casca do arroz preencheu os vazios presentes no solo, com tal característica provocou uma correção granulométrica, desta maneira elevou o CBR do solo.

Conforme se pode observar, o teor de umidade ótima (Wot) aumenta e a massa específica aparente seca máxima (pdmax) diminui para uma mesma energia de compactação com a presença de CCA no solo.

A partir dos estudos pode-se concluir que todas as amostras tiveram aumento no CBR com a adição de CCA. Para o solo de referência anteriormente tínhamos o CBR de 44% após a adição o CBR subiu para valores superiores a 80% quando compactadas na energia de PI.

Para todos os corpos de prova os valores de expansão foram menores que 1%, portanto, segundo as especificações do DNIT todas as amostras cumpriram com os requisitos de expansão para materiais de sub-base de pavimentos. Entretanto quando analisado materiais para base, apenas as amostras M1 e M3 atenderam os requisitos de expansão menor que 0,5%. Para o solo referencia, os resultados mostraram maiores valores de expansão mostrando que a tendência geral é a diminuição do valor com a adição de CCA.

Avaliando o consumo do material, as amostras M2 e M4 foram as que mais utilizaram a CCA, sendo assim tornou-se a melhor no ponto de vista ambiental.

Analisando todos os resultados a amostra que melhor atendeu os critérios exigidos pelo DNIT para material de base com valores de CBR superior a 80% e expansão inferior a 0,5% foi a amostra M3.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a Resistência a Compressão Simples;
- Utilizar cinza da casca de arroz com diferentes finuras;
- Estudar amostras com teor de adição de CCA entre 10% e 20% para definir a porcentagem máxima que pode ser utilizada antes de começar a aumentar a expansão;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253: **Solo-cimento — Dosagem Para Emprego Como Camada De Pavimento — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais pozolânicos**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ALCÂNTARA, Marco Antônio de Moraes et al. **Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal**. revista *Matéria*, v.22, n.3, 2017.

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Lei nº 12.305, de 18 de maio de 2012. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2. ed. Brasília, DF: Edições Câmara, n. 81, p. 1-73.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01, Setembro de 2017.

CNT – Confederação Nacional do Transporte Rodoviário. 2018

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: [file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/ArrozZ-ZConjunturaZMensalZ-ZmaroZ2018%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/ArrozZ-ZConjunturaZMensalZ-ZmaroZ2018%20(1).pdf). Acesso em: 20 setembro 2018.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 2001.

DALLACORT, Rivanildo et al. **Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 6, n. 3, p.511-518, 29 abr. 2002.

DINIZ, Dayse Horta, Centro Federal de educação tecnológica de minas. **A influência dos finos de escória de aciaria como estabilizante de solos para uso em pavimentos**. 2009. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Minas Gerais, 2009.

DNIT (2006). **Manual de Pavimentação**. Publicação IDR – 179. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção Civil: novos materiais para construção civil**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. v2.

FRITSCHER, Sara Virgínia. **Estabilização De Solo Residual De Lajeado Com Adição De Cimento E Cinza De Casca De Arroz**. 2016. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Núcleo de Geotécnica, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

GERAIS, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas. **A Influência Dos Finos De Escória De Aciaria Como Estabilizante De Solos Para Uso Em Pavimentos**. 2009. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil.

JAINES, Lorrain; ARNS, Pedro. **Estabilização de um solo com cinza da casca de arroz para utilização em camadas de Pavimento**. 2016. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2016.

KAWABATA, Celso Yoji. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Zootecnia - Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

KLAMT, Rodrigo André et al. **Utilização de Cinza da Casca de Arroz no Melhoramento das Propriedades Mecânicas de um Solo Não Laterítico da Formação Botucatu**. In: Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte: ABMS, 2016.

LOPES JÚNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros De Controle Da Resistência Mecânica De Solos Tratados Com Cal, Cimento E Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. 151 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LOPES, Leonardo Emídio. **Dimensionamento de pavimentos flexíveis para aeroportos**. 2011. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

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

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON 2014.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. Pini. São Paulo, 1994. 1º ed. 573p.

NUNEZ, Washington Peres. **Estabilização Físico-química De Um Solo Residual De Arenito Botucatu Visando Seu Emprego Na Pavimentação**. 1991. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da Cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. 345 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SAIDELLES, Ana Paula Fleig et al. **Gestão de resíduos sólidos na indústria de beneficiamento de arroz.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v. 5, n. 5, p.904-916, jul. 2012.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra.** PUC – Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, Everton José da. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil.** 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Estruturas, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

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

SOUZA, João Vitor et al. **Estabilização de Solo Argiloso com Cinza de Casca de Arroz e Cal;** 2016; Trabalho de Conclusão de Curso; (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2016.

