

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA USO EM PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

**JOGÉRIO EVANGELISTA DE FREITAS**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD.**

**COORIENTADOR: JOEL CARLOS MOIZINHO, D.Sc.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**BRASILIA - DF MARÇO/2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ NA ESTABILIZAÇÃO DE  
SOLOS PARA USO EM PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

**JOGÉRIO EVANGELISTA DE FREITAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE**

**APROVADA POR**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (Unb)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**RENATO CABRAL GUIMARÃES, DSc (UEG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA, 29 DE MARÇO DE 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FREITAS, JOGÉRIO EVANGELISTA DE

Uso de Cinza da casca de arroz na Estabilização de solos para uso em Pavimento Rodoviário. Distrito Federal 2018

xv, 114 p., 297mm (ENC/FT/Unb, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

- |                             |                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1. Solo cimento             | 2. Sucção matricial                  |
| 3. Resistência a compressão | 4. Absorção solo cinza, solo cimento |
| I. ENC/FT/Unb               | II. Título (série)                   |

## REFEÊNCIA BILIOGRAFICA

FREITAS, J.E. (2018). Uso de Cinza da casca de arroz na Estabilização de solos para uso em Pavimento Rodoviário. Dissertação de Mestrado, Publicação nº 302/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xxxxx.xp.

## CESSÃO DE DIREITOS

**NOME DO AUTOR:** Jogério Evangelista de Freitas

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:** Uso de Cinza da casca de arroz na Estabilização de solos para uso em Pavimento Rodoviário.

**GRAU:** Mestre

**ANO:** 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Jogério Evangelista de Freitas  
Rua das Mozendras, 293, Pricumã  
CEP: 69.309-414 Boa Vista/RR - Brasil

## DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar a Deus, aos meus Pais José e Gerisa, por ter me proporcionado a educação para vencer os obstáculos presentes na nossa vida, a minha esposa Alexandra e ao meu filho Pedro Alexandre pelo incentivo e compreensão ao longo dessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor, mestre e ser humano José Camapum de Carvalho pelo interesse, incentivo, orientação, ensinamentos ministrados e pela busca de melhoria de conhecimento geotécnico.

Aos meus irmãos, meus pais, sobrinhos e demais familiares.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Geotecnia, pela dedicação em transmitir conhecimento.

A professora Cláudia Marcia Gurjão pelo sempre apoio recebido desde a época da graduação.

Aos laboratórios da Empresa Coema Paisagismo Ltda, das Universidades de Brasília e da Universidade Federal de Roraima, em especial aos respectivos técnicos Ketlen e Glebisson.

Aos colegas de curso, em especial ao Didier pelo convívio e ensinamentos e a companheira de luta Janeth que esteve sempre presente e disponível para a divisão de conhecimento.

Aos colegas de trabalho do Departamento de Infra-Estrutura de Transportes – DEIT da Secretaria de Infra-Estrutura de Roraima, em especial ao topógrafo Numeriano Dantas e a Engenheira Jucilene Vieira pelo apoio durante essa jornada.

Ao professor Roberto do Departamento de física da Universidade Federal de Roraima, pela disposição em realizar os ensaios de DRX.

Ao professor Joel, pela paciência e divisão de conhecimentos.

A minha esposa Alexandra pelo apoio incondicional ao longo dessa jornada.

Ao meu filho Pedro Alexandre, fonte de inspiração para vencer os obstáculos que a vida insiste em nos apresentar.

Ao Renato Batista de Oliveira de Furnas pela Análise e interpretações dos ensaios de DRX.

# USO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA USO EM PAVIMENTO RODOVIÁRIO

## RESUMO

Esta pesquisa, avaliou a estabilização química de um solo do Estado de Roraima Brasil com adição de cinza da casca de arroz e ou cimento Portland. O objetivo principal é potencializar o uso da cinza da casca de arroz produzida na indústria cerâmica de Roraima visando estabilização para uso em pavimento rodoviário. Foram pesquisados diversos traços com misturas de solo e cinza, como também solo com cinza e cimento. Para o solo natural procedeu-se os ensaios de caracterização (granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade), massa específica real e aparente e absorção a água da fração gráuda. Para todos os traços foram realizados os ensaios de limite de liquidez e plasticidade, compactação, CBR, resistência a compressão simples, resistência a tração diâmetral e sucção pelo método do papel filtro. Para a cinza foram realizados análise química e mineralógica. Os ensaios foram realizados no laboratório da Empresa COEMA PAISAGISMO LTDA e nos laboratórios da Universidade Federal de Roraima (UFRR) e Universidade de Brasília (UNB). A granulometria do solo natural se mostrou desuniforme, limite de liquidez de 21%, limite de plasticidade igual a 16% e índice de plasticidade de 5%, indicando solo de baixa plasticidade sendo classificado pelo sistema HRB como solo do tipo A1-a e índice de grupo igual a zero. A classificação química mostrou ser tipo, classe IIA, resíduos não perigoso e inerte, não corrosivo e não tóxico. O difatograma de raio X mostrou que a cinza incinerada induz a formação de quartzo com presença de cristobalita, mostrando ser a cinza uma sílica cristalina. Foram realizados ensaios com vários teores de cinza, sendo o melhor resultado obtido com o teor de 6% de cinza para o CBR e resistência a compressão simples. O aumento do teor de cinza na mistura tendeu diminuir o valor do CBR em relação ao obtido para o solo natural. O cimento acelerou as reações pozolânicas nas misturas percebendo-se ganho de resistência já com a incorporação de 1% de cimento. O ensaio de sucção mostrou a capacidade da cinza em absorver água, reduzindo a sucção das misturas. De um modo geral a estabilização com cinza pode ser recomendado para uso em camadas de sub-base, e com cimento e cinza pode ser aplicado em camada de base de pavimentos.

**Palavras chaves:** Solo cimento, Sucção matricial, Resistência a compressão simples, Absorção solo cinza, solo cimento

# USAGE OF RICE BARK GRAY IN SOIL STABILIZATION FOR ROAD FLOOR USE

## ABSTRACT

This research evaluated the chemical stabilization of a soil from the State of Roraima Brazil, with the addition of ash from rice husk and/or Portland cement. The principle goal is to show the importance of the use of rice husk ash produced in the ceramic industry of Roraima, wanting to establish the use of soil in paving highways.

Various traces were examined with a mixture of soil and ash; and also with ash and cement mixed with soil. For the natural soil, experiments were conducted of the characteristics (granulometry, atterberg limits, plasticity limit), real specific matter and apparent, and water absorption of the bigger pieces. For all the experiments were conducted osatterberg limits, and plasticity limits, compaction , CBR, resistance to simple compression, diameter traction resistance and suction by the paper filter method. For the ash, chemical and mineralogical analysis were done. The samples were analyzed in the laboratory of Roraima's Federal University (UFRR), and the University of Brasilia (UNB). The granulometry of the natural soil showed uneven, atterberg limit of 21,5%, plasticity limit equal to 16,3%, and plasticity index of 5,2%, showing low plasticity soil being classified by the HRB system as a soil type AI-a with group index equal to zero.

The chemical classification of ash show to be class type IIA residues that are not harmful and inert, not corrosive and non-toxic. The results of difatogram x-ray showed that the burnt ash produces quartz formation with the presence of cristobalite, demonstrating to be crystal silic ash. The best result found with 6% ash CBR and simple compression resistance. When more ash was added to the mixture, the CBR ratio diminished compared to that with regular soil. The cement accelerated the pozolamics reaction in the mixtures showing resistance gain with incorporation of 1% of cement. The suction sample showed the capacity of ash to absorb water, reducing the mixtures suction. In this way, the establishment with ash can be recommend to be used in sub-base layers, and with cement and ash can be applied in base layers of pavements.

Keywords:; Cement soil matrix Suction, simple compression Resistance, absorption gray soil, soil cement

## ÍNDICE

CAPITULO 1 .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Objetivo geral.....	2
1.1.2Objetivos específicos: .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1 SITUAÇÃO DAS RODOVIAS no brasil .....	3
2.2 solos lateríticos.....	5
2.2.1 Definição e ocorrências no Brasil e no Mundo .....	5
2.2.2.2 Solos lateríticos na pavimentação .....	9
2.5 cinzas usaDAS na estabilização de solos .....	11
2.5.1 Cinza de bagaço de cana .....	12
2.5.2 Cinza pesada.....	14
2.5.3 Cinza da Casca de arroz (CCA) .....	15
2.6 SOLOS LATERITICOS ESTABILIZADOS .....	17
2.6.1 Solos Lateríticos estabilizados com cimento .....	19
2.7 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA COM UTILIZAÇÃO DE CINZAS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	20
2.8 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS COM CINZAS PARA PAVIMENTAÇÃO .....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
3.1MATERIAIS .....	30
3.1.1 Solos.....	30
3.1.2 Cimento .....	33
3.1.3 Cinza.....	33
3.2. MÉTODOS.....	35
3.2.1 Caracterização física do solo e da cinza.....	37
3.2.2.1 Analise Granulometrica.....	37
3.2.2.2 Limites de Consistência .....	37
3.2.2.3 Ensaio com as frações finas e graúdas do solo e da cinza.....	38
3.2.2.4 Analise química do solo e das misturas pesquisadas .....	40
3.2.2.5 Caracterização química da cinza.....	42
3.3.2.6 Caracterização mineralógica do solo e da cinza.....	42

3.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA COM O SOLOS E AS MISTURAS PROPOSTAS .....	43
3.4.1 Ensaio de CBR .....	44
3.4.2 Ensaio de resistência a compressão simples (RCS) .....	44
3.4.3 Determinação da resistência à tração por compressão diametral: .....	46
3.4.4 Ensaio de sucção .....	48
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	50
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CCA .....	50
4.2 Mineralogia da cca, do solo e das msturas estudadas .....	50
4.3 Propriedades Físicas DO solo e Misturas ESTUDADAS .....	54
4.3.1 Massa específica dos grãos, massa específica aparente dos grãos e absorção de água... ..	54
4.3.2 Granulometria do solo estudado .....	58
4.3.3 Limites de Atterberg .....	59
4.4 Comportamento mecânico DOS MATERIAIS .....	63
4.4.1 Curvas de compactação .....	63
4.4.1 Curva de compactação dinâmica da matriz fino do solo .....	66
4.4.3 Ensaio de sucção .....	70
4.4.4 Ensaio de índice de suporte califórnia .....	77
4.4.5 Ensaio de compressão simples .....	81
4.4.6 Ensaio de tração por compressão diametral.	
94	
CAPITULO 5 .....	101
5. CONCLUSÕES .....	101
5.1 sugestões para pesquisas futuras .....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	104
ANEXO .....	126

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Malha rodoviária brasileira (Pesquisa CNT 2017).....	4
Figura 2. 2 - Perfil de solo laterizado, horizontes A, B e C (Maragon, 2004) .....	6
Figura 2. 3 - Extensão no fenômeno de laterização na superfície do globo (Melfi, 1997) .....	8
Figura 2. 4 - Distribuição das coberturas lateríticas no Brasil (Villibor et. al, 2000). .....	8
Figura 2. 5 Gráfico de resistência a compressão simples (28 dias) por traço (Lopes et. al. 2016, adaptado) .....	12
Figura 2. 6 – Resistência a compressão simples do solo estabilizados com cimento (Dias, 2012). .....	20
Figura 2. 7 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade (Fristscher 2016) .....	22
Figura 2. 8 - Influencia do tempo de cura na RCS (Leon 2015) .....	23
Figura 2. 9 - Índice de suporte califórnia das misturas de argila e cinza da casca de eucálio (Silva 2017) .....	24
Figura 2. 10 - Índice de Suporte Califórnia (Bonfante et. al. 2016) .....	24
Figura 2. 11 - Resistencia à compressão simples-solo-cimento-cinza por traço (Pereira 2012). .....	26
Figura 3. 1 Localização da Jazida. Autoria própria (2018) .....	31
Figura 3. 2 - Jazida de solo laterítico com cascalho usada na pesquisa .....	32
Figura 3. 3 - Aspecto do solo laterítico usado na pesquisa .....	32
Figura 3.4 - Estocagem da casca de arroz na olaria .....	33
Figura 3.5 - Queima da casca de arroz na olaria .....	34
Figura 3.6 - Estocagem da cinza da casca de arroz na olaria .....	34
Figura 3.7 - Coleta da Cinza da casca de arroz da pesquisa .....	34
Figura 3. 8 - Fluxograma de elaboração da pesquisa .....	36
Figura 3. 9 - Preparação dos amostras - ensaio de compressão simples .....	45
Figura 3. 10 - Rompimento do corpo de prova .....	47
Figura 3. 11 - Molde metálico usado para compactação das amostras .....	48
Figura 4. 1- Difratograma de raios X da amostra de CCA produzida na indústria cerâmica e utilizada na pesquisa. ....	51
Figura 4. 2 - -Difratograma de raios X da amostra de solo puro. ....	52
Figura 4. 3 - Teor de hematita mais goethita em função do teor de caulinita. ....	54
Figura 4. 4 - Peso específico dos grãos do solo estudado. ....	56
Figura 4. 5 - Absorção do solo estudado .....	56
Figura 4. 6 - Peso específica aparente dos grãos do solo estudado. ....	57
Figura 4. 7 - Relação massa específica aparente dos grãos x absorção. ....	57
Figura 4. 8 - Relação massa específica dos grãos x absorção .....	58
Figura 4. 9 - Curvas Granulométricas do material estudado. ....	59
Figura 4. 10 - Influência dos aditivos CCA e CCA + Cimento no Índice de plasticidade do solo. ....	60
Figura 4. 11 - Curvas de fluidez das misturas solo – CCA. ....	61
Figura 4. 12 - Curvas de fluidez das misturas solo – CCA – Cimento. ....	61
Figura 4. 13 - $\Delta$ pH em função do teor de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio dividido pelo teor de caulinita .....	63
Figura 4. 14 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA. ....	64
Figura 4. 15 - Curva de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA – cimento. 65	65

Figura 4. 16 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA.....	67
Figura 4. 17 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA - Cimento	67
Figura 4. 18 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA.....	69
Figura 4. 19 - Curvas de compactação das misturas solo - CCA.....	69
Figura 4. 20 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA - Cimento	70
Figura 4. 21 - Curvas características obtidas para o solo natural.....	71
Figura 4. 22 - Curva característica obtida para o solo natural somando-se os efeitos físicos e de forças adsorcivas. ....	71
Figura 4. 23 Resultados de medida de sucção no solo natural e nas misturas solo - CCA.....	72
Figura 4. 24 - Resultados de medida de sucção no solo natural e nas misturas solo - CCA....	73
Figura 4. 25 - Resultados de medida de sucção no solo natural e nas misturas solo – CCA - Cimento. ....	73
Figura 4. 26 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo - CCA.....	74
Figura 4. 27 - Curvas características transformadas do solo natural e do conjunto de misturas. ....	74
Figura 4. 28 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de $w_p$ . ....	75
Figura 4. 29 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA -Cimento incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de $w_p$ .....	75
Figura 4. 30 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA -Cimento incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de $w_p$ . ....	76
Figura 4. 31 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de $w_l$ . ....	76
Figura 4. 32 - Resultados de ISC em função da umidade para o solo puro e misturas com CCA.....	78
Figura 4. 33 - Resultados de expansão em função do teor de umidade de compactação para o solo puro e misturas solo – CCA.....	78
Figura 4. 34 - Resultados de ISC em função da expansão para o solo puro e misturas solo – CCA.....	79
Figura 4. 35 - Resultados de ISC em função da umidade para o solo puro e misturas com CCA.....	80
Figura 4. 36 - Resultados de ISC em função do grau de saturação ( $S_r$ ) para o solo puro e misturas com CCA e cimento.....	80
Figura 4. 37 - Resultados de expansão em função do teor de umidade de compactação para o solo puro e misturas solo – CCA - Cimento.....	81
Figura 4. 38 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função do Grau de Saturação ( $S_r$ ). ....	82
Figura 4. 39 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função da Umidade ( $w$ ). ....	83
Figura 4. 40 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função do índice de vazios ( $e$ ).....	84
Figura 4. 41 - - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função de $pF$ (a) e de $pF/e$ (b). ....	85
Figura 4. 42 - . RCS em função do teor de outros minerais que não o quartzo e a cristobalita. ....	86

Figura 4. 43 - RCS em função do teor de outros minerais que não o quartzo e a cristobalita considerando os dois períodos de cura analisados. ....	87
Figura 4. 44 - RCS em função do teor de outros minerais que não o quartzo e a cristobalita considerando os dois períodos de cura analisados e absorção de água pelos agregados. ....	87
Figura 4. 45 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função do Grau de Saturação (Sr). ....	88
Figura 4. 46 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função da Umidade (w) ....	88
Figura 4. 47 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função do índice de vazios (e).....	89
Figura 4. 48 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função do teor de cimento. ....	89
Figura 4. 49 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA - Cimento em função de pF (a) e de pF/e (b). ....	90
Figura 4. 50 - Variação da resistência a compressão simples (RCS) com o tempo de cura e teor de aditivo.....	90
Figura 4. 51 - RCS em função de 1-( teor de quartzo mais teor de cristobalita).....	91
Figura 4. 52 - RCS em função de Sr / (1-( teor de quartzo mais teor de cristobalita).....	92
Figura 4. 53 - RCS em função do teor de hematita mais goethita.....	92
Figura 4. 54 - Influência dos óxi-hidróxidos de ferro na RCS.....	93
Figura 4. 55 - Influência dos óxi-hidróxidos de ferro na RCS.....	94
Figura 4. 56 - Resultados de resistência à tração em função do índice de vazios para o solo puro e misturas solo – CCA. ....	95
Figura 4. 57 - Resultados de resistência à tração em função do índice de vazios para o solo puro e misturas solo – CCA - Cimento. ....	96
Figura 4. 58 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas solo – CCA. ....	96
Figura 4. 59 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas solo – CCA - Cimento. ....	97
Figura 4. 60 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas solo – CCA. ....	98
Figura 4. 61 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas – CCA - cimento.....	98
Figura 4. 62 - Resultados de resistência à tração em função do grau de saturação para o solo puro e misturas solo – CCA (a) e solo – CCA – Cimento (b).....	99
(b) Figura 4. 63 - Resultados de resistência à tração em função da sucção matricial para o solo puro e misturas solo – CCA (a) e solo – CCA – Cimento (b). ....	100

## LISTA DAS TABELAS

Tabela 2. 1 - Classificação de solos lateríticos (Winterkorn e Chandrasenkharan, 1951).....	7
Tabela 2. 2 - Valores de índice de atividade pozolânica com diferentes temperaturas.....	13
Tabela 2. 3 –Composição química da cinza do bagaço de cana (Marcos 2009, adaptado) .....	13
Tabela 2. 4 - Composição química da cinza pesada, (Moulton 1973). .....	14
Tabela 2. 5 - composição química da cinza pesada de elementos maiores (Pozzobom, 1997) 15	
Tabela 2. 6 - Porcentagem molecular dos compostos nas amostras de CA e CCA do Estado de Roraima (Carneiro 2010) .....	17
Tabela 2. 7 - Resistencia à tração indireta ou resistência à compressão diametral (RCD), (Parente et. al.(2002). .....	18
Tabela 2. 8 - Resistencia a compressão simples (Klamt 2012).....	22
Tabela 2. 9 - Dosagens executadas (Leon 2015).....	23
Tabela 2. 10 - Limites de Atterber do solo natural e com misturas, (Modificado Alcantara at.al, 2017).....	25
Tabela 2. 11 - Traço para o ensaio de compressão simples (Pereira 2012). .....	25
Tabela 2. 12 - Lugares onde foram utilizados materiais residuais em serviços de pavimentação (SCHROEDER, 1994) .....	27
Tabela 3. 1 - Ensaio realizados com solos da jazida.....	37
Tabela 3.2 -Ensaio realizados com a cinza da casca de arroz incinerada na olaria e pulverizada em moinho de bola no laboratório do NUPENG/UFRR .....	42
Tabela 3. 3 Proporções das misturas solo-CCA e solo-CCA-cimento.....	43
Tabela 4. 1 Tabela de teor de minerais presentes no solo e nas misturas pesquisadas .....	52
Tabela 4. 2 - Índice de plasticidade.....	60
Tabela 4. 3 - pH do solo e das misturas com CCA e CCA mais cimento.....	62
Tabela 4. 4 - Valores médios de RCS obtidos para o solo natural e misturas.....	82
Tabela 4. 5 - Percentuais de misturas .....	94

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas;  
ASTM – American Society for Testing materials;  
BPR – Bureau of public roads;  
C – Cimento  
CA – Casca de arroz;  
CBR – Índice de Suporte Califórnia;  
CCA – Cinza casca de arroz;  
CNT - Confederação nacional do transportes;  
CP – Corpo de prova  
DENATRAM – Departamento nacional de transito;  
DER/PR – Departamento de Estradas e Rodagens do Estado do Paraná;  
DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte;  
 $\Delta pH$  – Variação do potencial hidrogeniônico;  
DSC – Calorimetria exploratória diferencial;  
EDX – Espectroscopia de Raio X;  
HRB – Highway research board;  
IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística;  
IG – Índice de grupo;  
IP - Índice de plasticidade;  
m - Metro;  
MCT – Miniatura compactado tropical;  
ME – Método de ensaio;  
MEV – Microscópio eletrônico de varredura;  
NBR – Norma brasileira;  
PCZ – Ponto de carga zero;  
pF – Logarítmo da sucção em centímetros de coluna de água  
pH – Potencial Hidrogeniônico;  
RCD - Resíduo de demolição de construção;  
RCS – Resistencia a compressão simples  
RR – Roraima;  
Sr – Grau de saturação;  
T – Temperatura;  
t – Toneladas;

UFRR – Universidade Federal de Roraima;

UNB – Universidade de Brasília;

USC – Unified soil classification system;

W – Umidade;

w<sub>L</sub> – Limite de liquidez;

w<sub>p</sub> – Limite de plasticidade;

e = índice de vazios

## CAPITULO 1

### 1.0 INTRODUÇÃO

O Brasil tem sofrido um aumento significativo da frota de veículos no Brasil, que segundo o DENATRAM entre os anos de 2007 a 2017, onde a frota de veículos no Brasil saiu de 49.228.783 (2007) para 96.790.495 (2017) representado um aumento de 96% em apenas 01 década.

Aumento de frota requer investimentos para restauração e implantação de rodovias, bem como, aumento de capacidade das existentes, no entanto segundo os dados disponibilizados pela Confederação Nacional dos Transportes – CNT (2017) entre os anos de 2005 e 2015 houve somente um aumento de apenas 2,36 % das rodovias federais pavimentadas.

Diante do crescente aumento da frota de veículos no País e a falta de acompanhamento da capacidade de tráfego da rodovia, tem surgido muitos problemas na qualidade do pavimento, como a redução da vida útil do mesmo, necessitando de intervenções cada vez mais frequentes e daí a necessidade de busca de fontes de matérias cada vez mais escassos ou inexistente em alguns Estado do País, sobretudo nos Estados da Região Norte elevando assim os custos de implantação ou de restauração de rodovias.

Considerando a crescente busca por fonte de recursos naturais não renováveis para o uso em pavimento rodoviário, muitas pesquisas passaram a ser realizadas, com o intuito de buscar novas fontes de materiais ou de se melhorar as disponíveis, seja mecânica ou quimicamente, seja com a adição de produtos industriais ou ainda com o aproveitamento de resíduos gerados por outras atividades de consumo humano.

Entre as diversas pesquisas voltadas para melhoria dos materiais empregados na construção de pavimento rodoviário, pode-se destacar as que buscam aproveitar resíduos da produção agroindustrial, em especial a produção de arroz, levando em conta seus derivados e subprodutos como a sua casca que corresponde a 20% do total do produto e que está presente em todos os Estados da Federação.

A destinação final da casca do arroz (CA) constituem-se hoje em uma das principais preocupações, pois sua disposição ou incineração de maneira impropria tem causado a

contaminação de grandes áreas. Não raro, a casca do arroz é lançada nos leitos dos rios e nos igarapés provocando poluição ambiental.

Para tentar reduzir o impacto ambiental e visando dar uma melhor destinação final a tais resíduos é que foi estudada a inclusão da cinza (CCA) proveniente da queima da casca do arroz (CA) para estabilização dos solos em substituição total ou parcial a outros materiais estabilizantes utilizados já conhecidos comercialmente como é o caso do calcário, cimento e a cal.

Desta forma buscar-se-á contribuir, não só para a melhoria da qualidade do solo utilizado em pavimento rodoviário, como também a mitigação dos problemas ambientais oriundos da destinação inadequada da casca de arroz, seja pelo depósito em locais impróprios ou pela queima sem controle e destinação final da casca de arroz.

## **1.1 1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Analisar a potencialidade do uso de cinza da casca de arroz produzida pela indústria cerâmica do Estado de Roraima na estabilização de um solo lateríticolocal para fins de emprego em aterros de pavimentos.

### **1.1.2 Objetivos específicos:**

- a) Caracterizar, classificar e identificar a composição mineralógica do solo de uma jazida do Estado de Roraima;
- b) Determinar a composição química do resíduo da cinza da casca de arroz usado na pesquisa;
- c) Avaliar o comportamento mecânico das misturas compactadas de solo, cinza e ou cimento Portland;
- d) Mitigar danos ambientais.

## **CAPITULO 2**

### **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

A presente pesquisa mostra o comportamento de um solo laterítico e seu potencial de estabilização com uso de cinza e ou cimento. Diante deste fato a revisão literária procura mostrar a atual situação das rodovias no Brasil, a ocorrência de solos lateríticos no País e no mundo, o uso de solos lateríticos em pavimentação, além de estudos realizados com incorporação de cinza e cimento na estabilização desses tipos de solos para fins de aterro.

#### **2.1 SITUAÇÃO DAS RODOVIAS NO BRASIL**

De acordo com a pesquisa da confederação nacional dos transportes - CNT 2017 (Figura 2.1), o Brasil possui 1.735.621 Km de rodovias, sendo 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas (78,70%), 157.309 km de rodovias planejadas (9,10%) e 212.886 km de rodovia pavimentada (12,30%), sendo 64.825 km de rodovias federais e 148.061 km de rodovias estaduais e municipais pavimentadas.

Ainda de acordo com a CNT (2017), verifica-se a necessidade de investimento não só para a pavimentação de rodovias, como também para a manutenção destas. Manter e recuperar rodovias significa adição de material e com isso a necessidade de utilização de novas fontes de materiais e estas nem sempre estão em disponibilidade para exploração, seja pela localização, seja pela qualidade geotécnica do material.

Na Região Amazônica a disponibilidade de material é algo disperso e com grandes variações de Estado para Estado ou mesmo dentro de muitos Municípios.

Outro fator a ser levado em consideração é o chamado inverno amazônico que acelera o desgaste natural das rodovias necessitando de uma manutenção constante, o que gera a necessidade de adição de material e em consequência a utilização de novas fontes de recursos naturais já não tão disponível.

No Brasil, cerca de 61% da movimentação de cargas, segunda a CNT (2017) e 95% da movimentação de passageiros ocorrem pelas rodovias. Apesar de possuir preço de frete superior ao hidroviário e ferroviário, as rodovias são, no Brasil, mais usadas para o

transporte de mercadorias de alto valor ou perecíveis, produtos acabados ou semiacabados, em especial por apresentar um baixo custo inicial de implantação.

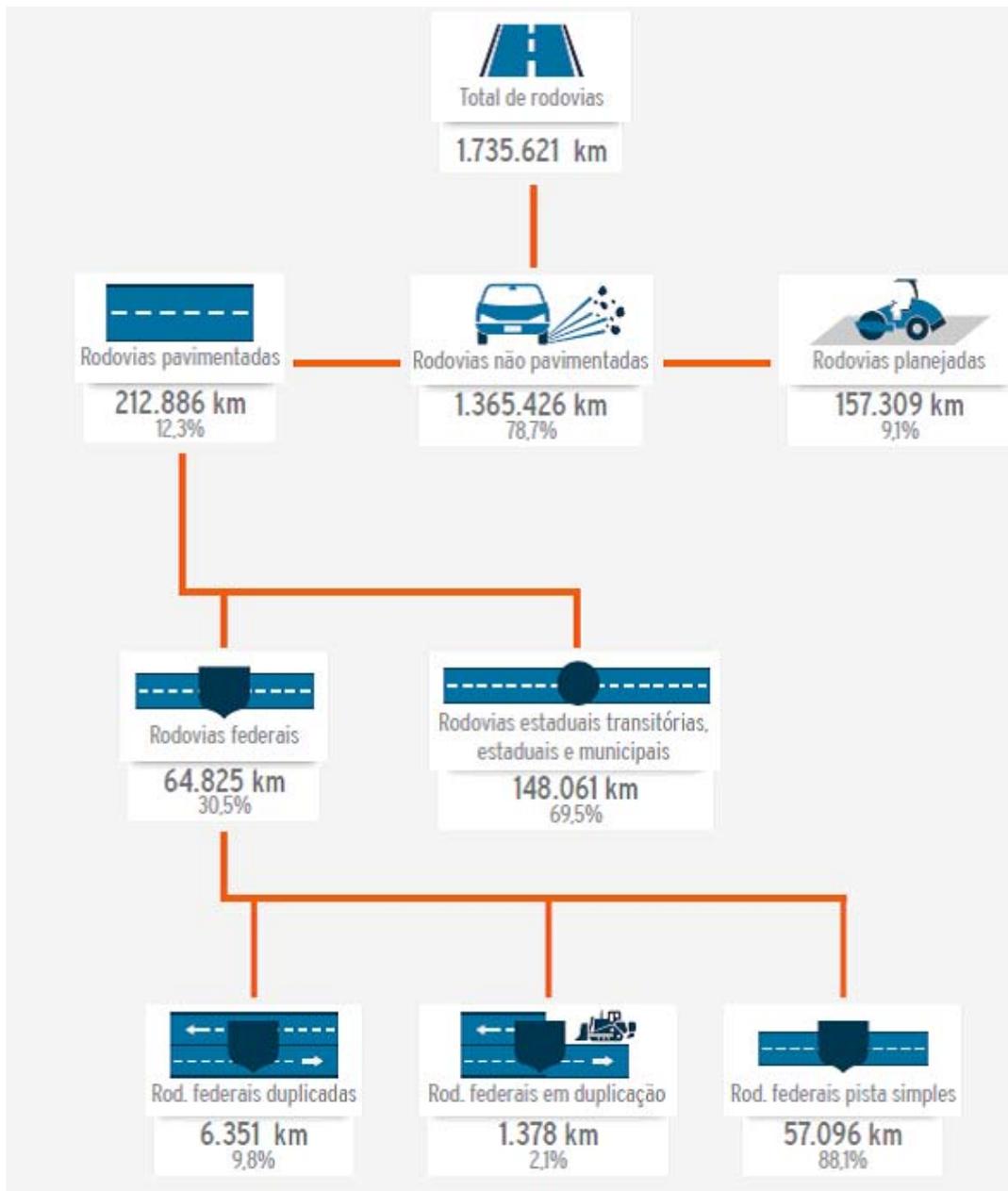


Figura 2. 1 - Malha rodoviária brasileira (Pesquisa CNT 2017)

O transporte rodoviário, não apresenta apenas vantagens, mas também, desvantagens, entre as quais se destaca o alto custo de sua manutenção em particular quando esta não é realizada de modo preventivo. Para muitos, este alto custo está ligado diretamente à escassez e esgotamento de fontes de material próximas às rodovias. A necessidade de

manutenção ou restauração é uma realidade, assim como, a necessidade de utilização de novas fontes de materiais adequados e de qualidade.

Na ausência de jazidas de solos naturais, próximas a obra, com características geotécnicas aceitáveis para uso em camadas de pavimentos, a estabilização seja, Granulométrica, mecânica, ou química surge como uma alternativa corretiva na tentativa de enquadrar os parâmetros geotécnicos, tais como: Faixa granulométrica, CBR, expansão, limite de liquidez, índice de plasticidade de modo a satisfazer as especificações técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte ou especificações próprias dos departamentos regionais ou ainda da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

## **2.2 SOLOS LATERÍTICOS**

### **2.2.1 Definição e ocorrências no Brasil e no Mundo**

O solo laterítico é uma subdivisão dos solos tropicais que predominam em quase todo o território brasileiro. A ocorrência de solos tropicais geralmente está localizada na faixa de terra com denominação geográfica de intertropical, onde existe as condições climáticas para o intemperismo constante, ou seja, bastante chuva e possibilidade de percolação d'água.

Para Melfi (1997), os solos tropicais apresentam peculiaridade de propriedade e de comportamento em decorrência da atuação de processo geológicos e/ou pedológicos típicos nas regiões dos trópicos. Para que um solo possa ser considerado tropical, não basta que tenha sido formado na faixa astronômica tropical ou em região de clima tropical úmido. É indispensável analisar o processo de formação do material e os minerais que o constituem. Os solos tropicais são subdividido em dois grandes grupos: Solos lateríticos e solos saprolíticos.

Solo de comportamento geotécnico laterítico – pedologicamente é uma variedade de solo do horizonte superficial laterítico (latossólico), típico das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. Os solos lateríticos de ocorrência mais comum são os argilossolo e os latossolo.

Solo de comportamento geotécnico saprolítico – é aquele que não apresenta comportamento laterítico” – é resultado da decomposição e/ou desagregação “in situ” da

rocha, mantendo, ainda, de maneira nítida, a estrutura da rocha que lhe deu origem. – Solo Residual.

A Figura 2.2 mostra um perfil de solo laterizado com a ocorrência dos horizontes B e C, além do horizonte A que trata da camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica.



Figura 2. 2 - Perfil de solo laterizado, horizontes A, B e C (Maragon, 2004)

O primeiro registro científico da ocorrência de laterita é atribuído a Buchman (1807), citado por Espindola & Daniel (2008), na Índia. Esse tipo de solos tem sido objeto de intensas investigações, onde os estudos iniciais deram-se por meio de análises químicas, quando ainda não se dispunha de um suporte metodológico analítico como nos dias atuais.

Shellman (1980) considera a definição de laterita como acumulações superficiais ou sub superficiais de produtos provenientes do intenso intemperismo de rochas, desenvolvidos sob condições favoráveis a uma maior mobilidade de elementos alcalinos, alcalinos terrosos e sílica, imobilização de ferro e alumínio”.

Winterkom & chandrasenkham (1951) apresentam para os solos lateríticos a seguinte classificação com base na relação molecular sílica/sesquióxidos da fração argilosa do solo (abaixo de  $\mu\text{m} = 2$  micra), de acordo com a equação 2.1 e resumida na Tabela 2.1.

$$K_r = \left( \frac{SiO_2/60}{Al_2O_3/102 + Fe_2O_3/160} \right) \quad \text{Equação (2.1)}$$

Tabela 2. 1 - Classificação de solos lateríticos (Winterkorn & Chandrasenkharan, 1951)

Solo	Kr
Solos de laterita (lateritesoil)	$Kr \leq 1,33$
Solos laterítico (lateriticsoil)	$1,33 \leq Kr \leq 2,00$
Solos não laterítico	$Kr \geq 1,33$

A engenharia geotécnica quando voltada para o meio rodoviário e de acordo com o DNIT (2006), considera que o solo laterítico é um solo que ocorre sob a forma de crosta contínuas, como concreções pisolíticas isoladas ou, ainda, na forma de solos de textura fina mas pouco ou nada ativos. Suas cores variam do amarelo ao vermelho mais ou menos escuro e mesmo ao negro. Diversas designações locais existem para os solos lateríticos, tais como: piçarra, recife, tapiotinga e mocró.

Segundo Dias (2007), a macrofábrica dos solos lateríticos apresenta-se quase sempre homogênea e sua peculiaridade mais característica, é a agregação das argilas, formando torrões quase sempre bem distinguíveis e resistentes, mesmo após a molhagem ou umedecimento.

Melfi (1997) denomina de laterita o manto de alteração espesso e de cor vermelha, endurecido ou friável, que nos países tropicais recobre o substrato rochoso. As lateritas estão distribuídas sobre os atuais cinturões tropicais da terra. Considerando a proporção mundial, observa-se que 40% das terras estão cobertas por lateritas e que no Brasil representam cerca de 65% das terras. As Figuras 2.3 e 2.4 mostram a ocorrência de solos lateríticos no mundo Global e no Brasil.

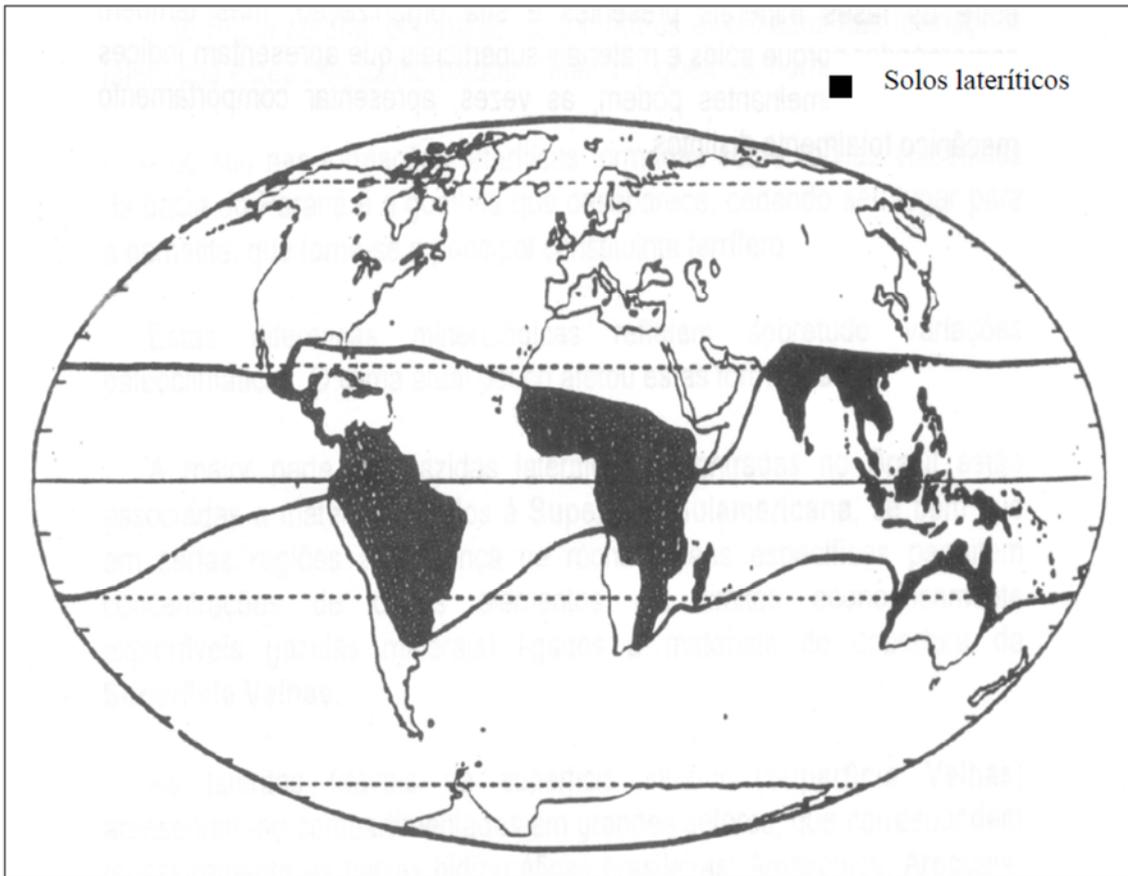


Figura 2. 3 - Extensão no fenômeno de laterização na superfície do globo (Melfi, 1997)



Figura 2. 4 - Distribuição das coberturas lateríticas no Brasil (Villibor et. al, 2000).

### 2.2.2.2 Solos lateríticos na pavimentação

Em geral as normas tradicionais limitam superiormente o limite de liquidez ( $W_l$ ) em 25% e o índice de plasticidade ( $I_p$ ) em 6%, com a finalidade de controlar a variação do volume dos solos compactados, conseqüentemente da variação do teor de umidade por secagem ou imersão a água. Entretanto, tais limites não se aplicam a solos tropicais.

Experiências tem mostrado que existem vários exemplos de solos tropicais com elevados ( $W_l$ ) e que se expandem muito pouco quando compactados e imersos em água o que contraria as normas tradicionais.

Segundo Nogami & Villibor, (1995) a elevada porosidade aparente natural do solo, a baixa resistência e a baixa capacidade de suporte são características dos solos lateríticos tropicais. Entretanto, quando corretamente compactados adquirem elevadas resistências, grande capacidade de suporte, baixa permeabilidade, além de pequena perda da capacidade de suporte quando imerso em água.

Ainda segundo Nogami & Villibor (1995), o quartzo é o mineral forte na fração de areia dos solos tropicais, presença de óxido de ferro e alumínio, permite identificar seu caráter laterítico. Além do quartzo, há presença de minerais com a magnetita, termalina e zircão, materiais mecanicamente resistentes e quimicamente estáveis. Na fração de argila a caulinita é o argilo mineral predominante com altos percentuais de óxido de ferro e alumínio.

Segundo Villibor (1993), as metodologias tradicionais consideram os solos finos lateríticos inadequados para construção de aterros rodoviários. Segundo o autor daí a necessidade de critérios de escolha de solo lateríticos tendo em vista seu comportamento mecânico e hidráulico quando compactado, que na prática apresentou ótimos resultados.

Reschetti (2008), descreve que é comum a curva de compactação de um solo laterítico ter uma grande inclinação no ramo seco e pico acentuado, gerando assim um acréscimo de densidade conforme se aumenta a umidade de compactação no ramo seco da curva.

Delgado (2007) afirma que a dificuldade de se localizar materiais granulares e a predominância de solos tropicais no Brasil contribui para o desenvolvimento de novos métodos de identificação de solos e procedimentos laboratoriais que objetivem caracterizar melhor os solos tropicais.

Devido à ocorrência de solos lateríticos no Brasil, na década de 1970, foi elaborado um sistema de classificação especialmente para solos tropicais chamado sistema de classificação Miniatura, Compactado, Tropical (MCT). Os solos lateríticos são solos intemperizados que são encontrados em abundância principalmente nas regiões tropicais do Brasil. Esse sistema desenvolvido por Nogami & Villibor (1993) classifica os solos em duas categorias: solos de comportamento lateríticos (LA, LA', LG') e não lateríticos (NA, NA', NS' e NG'), passando a classificar tipo de solo por processo tecnológico ao invés de análise puramente pedológica.

Segundo (Villibor et. al, 1993), a primeira tentativa para o uso sistemática de solos lateríticos como base de pavimento foi realizada pelo DER-SP num dos acessos a Campinas, no início da década de cinquenta, sob a orientação da Eng<sup>o</sup> Francisco Pacheco e Silva. Depois da experiência pioneira da década de cinquenta, outros trechos foram construídos no Estado de São Paulo com a utilização de argila laterítica, destacando-se os seguintes: Acesso a Santa Gertrudes (1971); Acesso a usina Zanin (1985), Sertãozinho a Dumont (1986) e Terra Roxa a Viradouro (1987).

Ainda segundo Villibor et. al (1993), a grande dificuldade no uso de solos lateríticos em bases são as consequências do intenso desenvolvimento de trincas de contração por perda de umidade. Foram experimentados vários procedimentos para minorar ou eliminar os efeitos desse trincamento, tais como: preenchimento das trincas com areia fina, empedramento, uso de geotêxtil e uso de revestimento tipo macadame betuminoso selado. Os melhores resultados foram obtidos com o uso de macadame selado.

Para o reforço do subleito e sub bases no fim da década de cinquenta começou-se a utilizar solos cada vez mais argilosos e plásticos porém lateríticos, contrariando os procedimentos tradicionais. Verificou-se que, além do menor custo de transporte, havia facilidades de compactação e um desempenho não inferior aos tipos mais arenosos, plástico ou não plásticos e coesivos, tradicionalmente mais recomendados (Villibor et. al, 1993).

Com o objetivo de se comparar as eventuais diferenças de desempenho da sub-base argilosa e arenosa foi construído em 1976, um trecho experimental entre as cidade de Jaboticabal e Pradópolis no Estado de São Paulo, não sendo constatado nem uma diferença de desempenho entre os trechos (Villibor & Nogami,1990).

Já a primeira utilização de base de Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL), no DER –SP, ocorreu na Regional de Araraquara, em maio de 1967, com a construção de duas variantes

de trânsito na Via Washington Luiz (SP-310). A inclusão do Fino para solos em SAFL se deu em função da necessidade de não se confundir com os pedregulhos lateríticos.

O uso de solos lateríticos, tidos como SAFL no Estado de São Paulo mostrou que a solução superou as expectativas de vida útil inicialmente prevista para três anos tendo apresentado um período de até seis anos sem a necessidade de recapeamento ou recuperação maior. (Nogami & Villibor, 2009)

Os solos tropicais além de se constituírem uma importante fonte de matéria-prima para a construção viária, devido a seu excelente comportamento estrutural, seu custo é menor em relação aos outros tipos de matéria-prima, assim como abundantemente encontrado, daí porque são empregados na constituição de estruturas de pavimentos (reforço do subleito, sub-base e base), aterros, camadas de proteção de taludes, recuperação de áreas degradadas, camadas de proteção de bacias de decantação, clayliners, etc.

## **2.5 CINZAS USADAS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

As cinzas sempre estiveram presentes no cotidiano do ser humano, seja pela simples queima de um cigarro, seja queima do lixo produzido de forma inadequada.

As cinzas passaram a se tornar um problema quando da produção agrícola em larga escala, com produtos tais como o bagaço de cana e arroz entre outros produtos que geram combustão. Mas foi a revolução industrial a responsável pelo crescimento desordenado da quantidade de cinzas produzidas pelas indústrias, seja pela queima de produtos para geração de energia, seja exploração de jazidas para obtenção de produtos industrialização como o ferro, aço e o alumínio.

Diante da oferta e da necessidade de dar destinação final a cinza produzida, seja pela atividade rural ou pela indústria de transformação diversas pesquisas passaram a ser realizadas dando ênfase ao chamado ambientalmente correto.

Os tipos de cinzas mais pesquisados para uso na engenharia são: Cinza de bagaço de cana, advindo da queima do bagaço de cana; cinza pesada, gerado pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas; cinza de madeira advinda de diversas atividades, tais como cadeiras, indústria de beneficiamento de madeira e a cinza da casca de arroz, oriunda da queima da casca de arroz.

### 2.5.1 Cinza de bagaço de cana

Segundo Sessa (2013), a cinza de bagaço de cana possui uma grande quantidade de dióxido de silício ( $SiO_2$ ) normalmente acima de 60% em massa.

O problema na utilização da cinza do bagaço de cana está na dificuldade de controlar a temperatura de queima uma vez que segundo Coelho (1999), a temperatura de queima varia em função da umidade do bagaço, quando um bagaço possui umidade de 50% a temperatura varia entre 500°C e 600°C, já para umidade de 35% a 40% a temperatura passa a variar de 300°C a 400°C.

Lopes et. al. (2016) realizou estudos para a utilização da cinza pesada da cana de açúcar para confecção de artefatos de cimento para pavimentação, sendo que a pesquisa consistia em substituir o agregado miúdo pela cinza de bagaço de cana. Foram realizados ensaios de resistência a compressão simples e absorção, com os percentuais de solo sem mistura (T0), solo com 5% de cinza de bagaço de cana - CBC (T1) e solo com 25% de CBC (T2). Os resultado de compressão simples obtidos são mostrados na Figura 2.5, no qual observa-se que a mistura com 25% de cinza de bagaço de cana (T2) aos 28 dias de cura se mostrou mais eficiente quando comparado com a mistura sem adição da cinza de bagaço de cana.

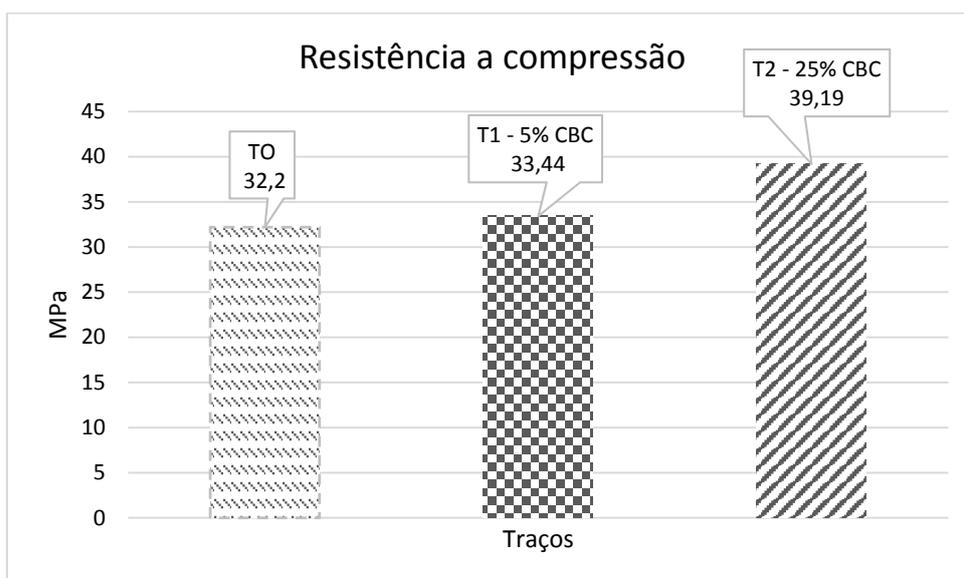


Figura 2. 5 Gráfico de resistência a compressão simples (28 dias) por traço (Lopes at. al. 2016, adaptado)

Para Marcos (2009), as cinzas minerais oriundas de diferentes atividades agroindustriais, como é o caso da cinza do bagaço de cana apresentam um teor de sílica de 84% e quando utilizados para confecção de argamassa, podem substituir o cimento em 20% sem prejuízo para a sua resistência aos 28 dias.

Cordeiro et. al. (2009) estudaram a caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolona em materiais cimentícios. A pesquisa buscou analisar o nível de atividade pozolânica da cinza a diferentes temperaturas através da produção da cinza com diferentes temperaturas, observou-se que a temperatura em torno de 600°C produz uma cinza na condição amorfa com elevado índice de atividade pozolânica, conforme observado na Tabela 2.2, como também podem ser observados a composição química da cinza a 600°C, na Tabela 2.3, que mostra o alto teor de sílica na cinza, outro fator importante foi o fato de que não se evidenciaram a presença de cinza cristalina a temperatura de 600°C.

Tabela 2. 2 - Valores de índice de atividade pozolânica com diferentes temperaturas  
Marcos 2009, adaptado)

Temperatura de queima (°C)	400	500	600	700	800	900
Índice de Atividade pozolânica (%)	28	73	77	63	69	73

Tabela 2. 3 –Composição química da cinza do bagaço de cana (Marcos 2009, adaptado)

Composto	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>CaO</i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	MnO	MgO	<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	P. ao fogo
Teor (% de massa)	60,96	0,09	0,09	5,97	0,7	9,02	0,48	8,65	8,34	5,70

## 2.5.2 Cinza pesada

A cinza pesada tem como origem a queima do carvão mineral em plantas de geração de energia termelétricas. As cinzas pesadas representam cerca de 20% do material queimado durante o processo de combustão.

Silva & Ceratti (1980), citam estudos realizados em 1947 pela American Society for Testing and Materials (ASTM) com o objetivo de estabelecer especificações para o uso de cinza de carvão mineral e que em 1948 foi construída uma pista experimental para estudar a sua aplicação. Já em 1956 surgiu então o cimento pozolânico com percentuais de 12 a 20% de cinza misturada ao clínquer durante a moagem e que em 1957 surgiu então o cimento artificial de alta resistência, com adição de 10% de cinza volante.

As propriedades físico-químicas da cinza pesada variam devido à composição do carvão, do grau de moagem adotado no beneficiamento, na pré-queima e do sistema de extração e transporte da cinza após a queima (GOTHE, 1990).

A composição química da cinza pesada varia de 40% a 70% de sílica, 15% a 30% de alumina e 2,0% a 14% de óxido de ferro, o que já corresponde a 95% do total da composição do material, conforme pode ser observado nas Tabelas 2.4 e 2.5.

Tabela 2. 4 - Composição química da cinza pesada, (Moulton 1973).

Tipo do carvão	Betuminoso		Sub-betuminoso	Linhita	
	West Virginia (%)	Ohio (%)			Texas (%)
SiO <sub>2</sub>	53,6	45,9	47,1	45,4	70,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,3	25,1	28,3	19,3	15,9
Fe <sub>s</sub> O <sub>3</sub>	5,8	14,3	10,7	9,7	2,0
CaO	0,4	1,4	0,4	15,3	6,0
MgO	4,2	5,2	5,2	3,1	1,9
Na <sub>2</sub> O	1,0	0,7	0,8	1,0	0,6
K <sub>2</sub> O	0,3	0,2	0,2	-	0,1

Tabela 2. 5 - composição química da cinza pesada de elementos maiores (Pozzobom, 1997)

Constituintes	Composição (%)	
	GOTHE (1990)	POZZOBOM (1997)
	Cinzas leves e pesadas	Cinza Pesada
SiO <sub>2</sub>	51,9 a 56,3	55,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,2 a 32,6	26,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,5 a 12,2	5,80
TiO <sub>2</sub>	-	1,33
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 a 0,1	0,24
CaO	0,6 a 2,2	0,84
MnO	-	0,02
MgO	0,1 a 1,4	0,59
Na <sub>2</sub> O	0,2 a 0,3	0,25
SO <sub>3</sub>	0,01 a 0,1	-
K <sub>2</sub> O	0,2 a 5,5	2,59

Diversas são as tentativas de aproveitamento da cinza de carvão mineral, seja com solo estabilizado com cinza, como também com adição de outros materiais, como é o caso da cal.

Farias (2005) realizou estudos com a utilização de mistura de solo/cinza e solo/cinza /cal realizando estudos de caracterização física, comportamento mecânico e análise das interações ambientais, seus resultados quando analisado apenas a adição da cinza nos solos não foram satisfatórios quanto resistência mecânica que pode ser devido a qualidade da cinza, como por exemplo a falta de controle de temperatura.

Pinheiro et. al. (2012) encontrou através de teste de fluorescência de raio-x os seguintes percentuais de elementos principais na composição do carvão mineral: Silica (59,17%), alumínio (13,17%) e ferro (10,74%).

### 2.5.3 Cinza da Casca de arroz (CCA)

A casca de arroz parcialmente queimada produzida a partir de plantas de moagem apesar de servir de combustível, também acarreta poluição ambiental. Entretanto, muitos esforços têm sido empregados para superar esse problema, entre os quais se destacam a utilização deste resíduo como um material que atua na cimentação (MARCOS, 2009).

A casca além de ser um resíduo vegetal que mais produz cinzas ao ser queimado, por ser rica em Sílica (SiO), constitui-se uma potencial fonte alternativa de matéria-prima para a aplicação em diversas áreas, principalmente na indústria cerâmica, na construção civil, através da produção de concreto, cimento e argamassa de alta qualidade e na produção de combustível vegetal, demonstrando, não apenas o seu alto poder calorífico, mas também seu alto conteúdo de compostos voláteis.

De acordo com Ferro (2009), a casca de arroz (CA) apresenta um percentual orgânico de 80% em peso, mas com amplas variações dos constituintes, tais como celulose, teor de umidade e cinzas quando queimada. A composição da CA apresenta 43,50% de celulose, 22% de hemicelulose, e 17,20% de lignina (compósito orgânico) e teor de cinzas de 11% após a queima. Essas cinzas geralmente contem 80 a 90% de sílica (SiO<sub>2</sub>), 5% de K<sub>2</sub>O, 4% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 1 a 2% de CaO e pequenas quantidades de Mg, Fe e Na, na forma de óxidos. Entretanto os principais constituintes orgânicos são a hemicelulose e a lignina (ARMESTRO, 2002).

Segundo Malhotra e Metha (1996), o bom desempenho das argamassas com 9%, 15%, 20% e 30% de cinza obtidos em sua pesquisa de argamassa com adição de cinza pode ser justificado pelo fato de haver preenchimento dos vazios da argamassa, denominado efeito filler, quando há incorporação de resíduos, aumentando o empacotamento das partículas e diminuindo conseqüentemente os vazios e favorecendo positivamente a resistência à compressão simples. Dentre as argamassas estudadas a que apresentou melhor comportamento mecânico foi a com 15% de CCA em substituição ao cimento, após os períodos de cura de 63 e 91 dias.

A adição de CCA aos solos apresenta duas vantagens: permite melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, habilitando seu emprego como material para reforço de subleito, sub-bases e bases de pavimentos; constitui-se em solução para a deposição final do subproduto residual. A transformação da CCA em produtos pozolânicos, quando combinada com a cal ou cimento e água ou seu encapsulamento de forma adequada reduz os efeitos sobre a saúde humana (BEAK, 2007).

Para Boteng & Skeete (1990), assinalam que o tipo de cinza apropriada para as reações pozolânicas é a amorfa e não a cristalizada. Segundo estes autores, a incineração da casca de arroz em uma faixa de temperatura de 550 a 700° C é geralmente determinada para produzir sílica amorfa na cinza, entretanto temperaturas além de 900°C produzem formas cristalinas não desejáveis. Contudo, Smith e Kamwanja (1986) observaram a formação

de sílica cristalina em pequenas proporções para temperaturas inferiores a 800° C mantidas durante 12h.

Carneiro (2010), através de Espectroscopia de Raio X na casca de arroz (CA) e na cinza da casca de arroz (CCA) produzidas no Estado de Roraima, encontrou elevado percentual de Sílica tanto para a casca de arroz como para a cinza da casca de arroz conforme mostrado na Tabela 2.6.

Tabela 2. 6 - Porcentagem molecular dos compostos nas amostras de CA e CCA do Estado de Roraima (Carneiro 2010)

Elemento	% Molecular	
	CA	CCA
O	56,34	52,45
Si	41,33	45,59
Cl	0,47	-
K	1,33	1,40
Ca	0,53	0,56
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Segundo Chaves et al. (2009), a composição química da cinza casca de arroz (CCA) varia em função do solo em que o arroz é plantado, dos tipos e teores de fertilizantes, das condições climáticas, bem como do tipo de arroz propriamente dito.

## 2.6 SOLOS LATERITICOS ESTABILIZADOS

O processo de estabilização é aquele que confere ao solo uma maior resistência estável às cargas, desgaste ou erosão através da compactação, diminuição da plasticidade, correção da granulometria ou através da adição de produtos que confirmam uma coesão por meio da aglutinação ou cimentação dos seus grãos (VARGAS, 1977).

Medrado (2009) realizou estudos para a caracterização de solo da região norte de Minas Gerais para a utilização em obras rodoviárias. O solo utilizado para a pesquisa foi um solo fino visando seu uso em camadas de pavimentos de rodovias de baixo custo. Os estudos foram realizados com solo natural, como também com a utilização de ligante hidráulico Pavifort, com também com cimento tipo CP II, onde observou-se que o percentual de 11% para o ligante e de 7% para o cimento foram percentuais ideais para atingir a estabilização do solo estudado.

Estudos realizados por Marques (1959) com 02 tipos de pavimentos experimentais em Inhambane, com 75m de extensão e 0,20m de espessura e submetidos a um tráfego médio de 120 veículos por dia, durante 01 ano e um período chuvoso. O estudo consistiu em um trecho com aplicação de lateritas britadas e revestimento superficial simples no qual apresentou um desgaste natural e visível ondulação. O segundo trecho experimental com as mesma estrutura de pavimento, mas com revestimento em material laterítico e pedra calcária em partes iguais apresentou melhor comportamento.

Marques (1959) ainda realizou estudos com trecho experimental de 4300 m, com tráfego média diária de 80 veículos pesados e 160 leves por dia, com 02 períodos chuvosos. A base do trecho experimental era de solo laterítico com espessura de revestimento asfáltico de 3 cm e que apresentou bons resultados. Ensaio realizados mostraram que o CBR quando em período não chuvoso era mais elevados que em períodos de chuva, sendo que os de períodos de chuva ainda eram superiores aos estipulados em laboratório

Parente et al. (2002), fizeram uma avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico de acordo com a classificação MCT, sendo estabilizados com cimento, os resultados obtidos evidenciam que o material laterítico quando adicionado cimento, tem um ganho de resistência ao solo não laterítico, como por exemplo o evidenciado na Tabela 2.7 que mostram os resultados de resistência a compressão diametral nas misturas pesquisadas.

Tabela 2. 7 - Resistencia à tração indireta ou resistência à compressão diametral (RCD), (Parente et. al.(2002).

Período de cura	Material	Teor de cimento (%)	RCD (kPa) Sem imersão	RCD (kPa) Após imersão
3 dias	Solo laterítico	4	88	79
		7	307	250
		10	426	368
	Solo não laterítico	4	75	50
		7	206	175
		10	343	266
7 dias	Solo laterítico	4	140	115
		7	392	370
		10	531	486
	Solo não laterítico	4	110	79
		7	305	227
		10	400	312
28 dias	Solo laterítico	4	307	200
		7	772	695
		10	908	763
	Solo não laterítico	4	200	171
		7	483	405
		10	724	540

### **2.6.1 Solos Lateríticos estabilizados com cimento**

O uso de cimento para estabilização de solos é um método que permite obter consideráveis melhorias na resistência mecânica do solo (DIAS, 2012).

Já em 1915 os Estados Unidos usavam cimento para a estabilização de solos para uso em camadas de pavimento. O Uso do cimento na mistura contribui para uma melhoria de várias propriedades no comportamento do solo, como também pelo fato de poder ser aplicado em diversos tipos de solos como os granulares, siltosos e argilosos (ZHANG et al., 2008)

A classificação da mistura de solo com cimento para uso em pavimento, abrange: solo cimento ou solo melhorado com cimento de acordo com o DNIT (2006), ou ainda solo-cimento e solo tratado com cimento de acordo com a especificação DER/PR-ESP 11/05 que traz a classificação não em função do percentual de cimento adotado, mas sim em função da resistência a compressão simples da mistura, aos sete dias de idade, com valores variando da seguinte forma:

Solo tratado com cimento: de 1,20 a 2,10 MPa;

Solo-cimento: superior a 2,10 MPa.

A mistura do cimento deve apresentar de acordo com a especificação DER/PR-ESP 11/05, resistência a compressão simples atendendo os seguintes limites:

Solo tratado com cimento:

a) Para sub-base: 1,20 a 2,10 MPa

b) Para base: 1,50 a 2,10 MPa

Solo-cimento

Sub-base ou base: 1,50 a 2,10 MPa

Dias (2012), realizou estudos para tratamento de solos cimento visando obter melhores características mecânicas. O solo estudado foi do tipo silto-argiloso, onde foram adicionadas cimento com percentuais de 8% (S8C) e 12% de cimento (S12C). Os resultados mostraram que por se tratar da mistura com cimento, a resistência tende a continuar crescendo mesmo após o período de 28 dias normalmente estimados a nível de estudo por se tratar de material pozolânico, conforme mostrado na Figura 2.6.

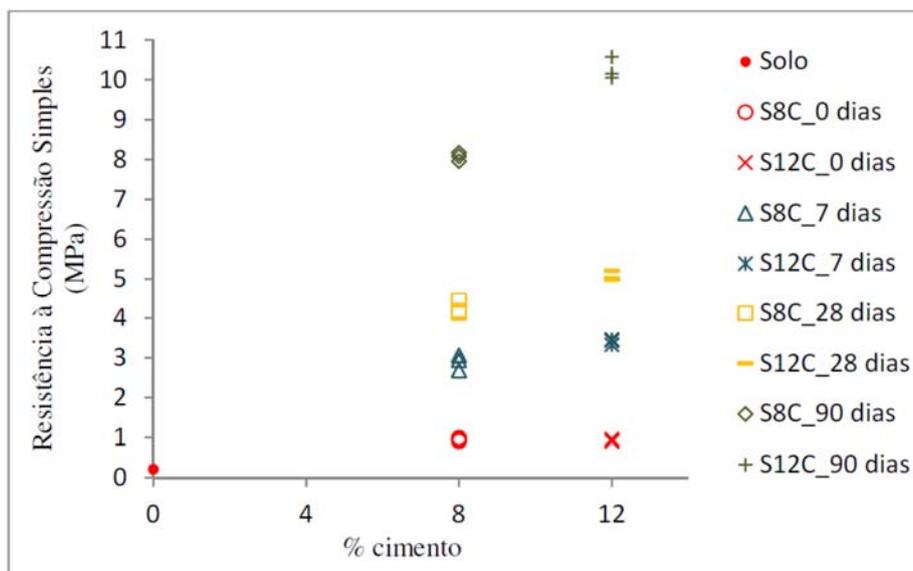


Figura 2. 6 – Resistência a compressão simples do solo estabilizados com cimento (Dias, 2012)

## 2.7 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA COM UTILIZAÇÃO DE CINZAS PARA PAVIMENTAÇÃO

As cinzas podem advir de várias origens, como por exemplo a queima do bagaço de cana, onde se produz energia para a própria indústria de processamento da cana de açúcar, da queima de carvão Mineral, que no Brasil acontece na substituição de parte do clínquer Portland por cinza leve (flyash) na fabricação do cimento Portland pozolânico. Como exemplo o complexo termelétrico Jorge Lacerda em Santa Catarina, que é o consumidor de carvão mineral do Brasil para fins de produção de energia, tem 100% da sua cinza utilizada na indústria do cimento (FARIAS, 2005).

O desenvolvimento de compósitos polímeros adicionando cinzas pesadas e leves, oriundas da queima de carvão mineral também foi objeto de estudo de Nascimento e Abreu (1990), que observou a presença de microesferas ocas com cerca de 100  $\mu\text{m}$  nas cinzas pesadas e a presença de finos esféricos nas cinzas leves, com possibilidade de separação, poderiam ser introduzidas em matrizes polímeras.

Ainda segundo Nascimento e Abreu (1990), os resultados foram bastante otimistas, sendo que as partículas esféricas mostraram-se facilmente incorporadas e dispersas na matriz do polímero, produzindo compósitos de cor cinza, brilhantes, homogêneos e aptos para a

aplicação em boias utilizadas na exploração de petróleo em águas profundas e em diversos equipamentos da indústria náutica.

Na prática foram utilizadas cinzas pesadas em obras de infraestrutura e urbanização nas áreas periféricas dos Municípios de Charqueadas e São Jerônimo, no rio Grande do Sul. (UFRGS/Centro de Ecologia, 2000)

Nardi (1975), realizando ensaio de resistência a compressão simples e de compressão diametral demonstrou a eficiência e a viabilidade de uso de cinza volante, com adição de outras mistura como a cal e a brita.

Os trabalhos desenvolvidos por Nardi (1975) resultaram na implantação de um trecho experimental localizado à margens da BR-101, no Município de Imbituba/SC, onde, sobre o subleito de areia, foi construída uma sub-base de areia estabilizada com cal e cinza volante em base de pavimento. Nesse trecho foram instaladas seções de instrumentação e os resultados monitorados foram bastantes satisfatórios e aprovaram o desempenho do material.

Marcon (1977), deu continuidade aos estudos de Nardi (1975) através de estudos complementares, analisando a durabilidades, módulos de elasticidade, resistência a compressão simples e resistência a compressão diametral em corpos moldados na umidade ótima, sendo observado bons resultados e com aptidão para uso em camadas de pavimento, tais como sub base e base. No entanto o autor sugere atenção as condições de cura do material empregado na mistura, as condições de trafego e avaliação da rigidez da camada de base.

Jaines e Arns (2016) estudaram a estabilização de um solo com cinza da casca de arroz em camadas de pavimento com percentuais de 5%, 10% e 15% de CCA, obtendo aumento da resistência do solo em todos os percentuais quando comparado com o solo sem mistura.

Klamt (2012) estudou a utilização da cinza da casca de arroz no melhoramento das propriedades mecânicas de um solo não laterítico, seus estudos foram focados basicamente com a realização de ensaios de compressão simples com variação de tempo de cura de 07 a 56 dias. A Tabela 2.8 mostra os resultados obtidos onde se observa um aumento da resistência quando da adição na mistura da CCA.

Tabela 2. 8 - Resistencia a compressão simples (Klamt 2012)

Tempo de Cura (dias)	RCS (MPa)	Cal (%)			Cal/CCA (%)		
	Solo Natural	6	10	13	10/5	10/10	10/15
7	0,46	0,32	0,70	0,89	0,79	1,05	1,23
14	0,44	0,33	0,53	0,87	0,88	1,45	1,64
28	0,89	0,38	0,73	1,15	1,55	2,16	2,23
56	1,17	0,57	1,16	1,37	2,32	2,6	2,89

A cinza da casca de arroz foi estudada com o objetivo de se obter estabilização de solo residual de lajeado com adição de cimento e cinza da casca de arroz por Fritscher (2016), A cinza utilizada na pesquisa foi produzida em temperatura controlada de 500°C, sendo caracterizada como uma cinza amorfa. O autor observou que a cinza da casca de arroz pode produzir uma redução da porosidade da mistura quando adicionado em conjunto com o cimento, conforme verificado na Figura 2.7.

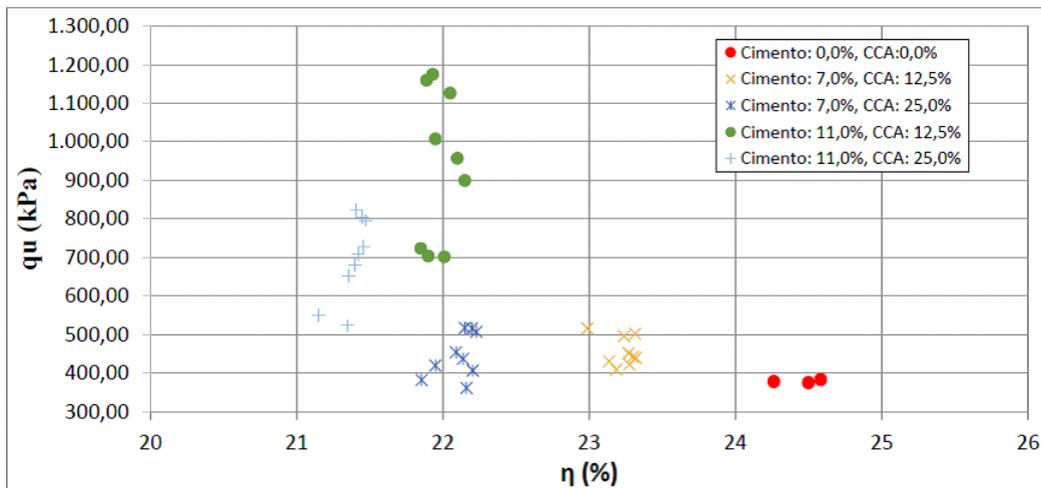


Figura 2. 7 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade (Fritscher 2016)

Leon (2015), estudou a estabilização de solo com a adição de cal e, ou CCA. Foram utilizados diversos percentuais de acordo com a Tabela 2.9, e os resultados demonstraram uma dispersão de valores, conforme pode ser observado na Figura 2.8, houve uma redução dos valores de resistência a compressão simples quando comparado ao solo natural, tal fato pode estar relacionado em função da origem da CCA, uma vez que a mesma tem origem de usina termelétrica e sem controle de temperatura de queima.

Tabela 2. 9 - Dosagens executadas (Leon 2015)

	Solo	Solo + Cal	Solo + Cal + CCA	Solo + CCA
Massa Específica	1,98 g/cm <sup>3</sup>	1,94 g/cm <sup>3</sup>	1,95 g/cm <sup>3</sup>	1,96 g/cm <sup>3</sup>
Umidade Ótima	28%	29%	27%	28,8%
Solo	100%	94%	94%	94%
Cal	-	6%	2,4%	-
CCA	-	-	3,6%	6%

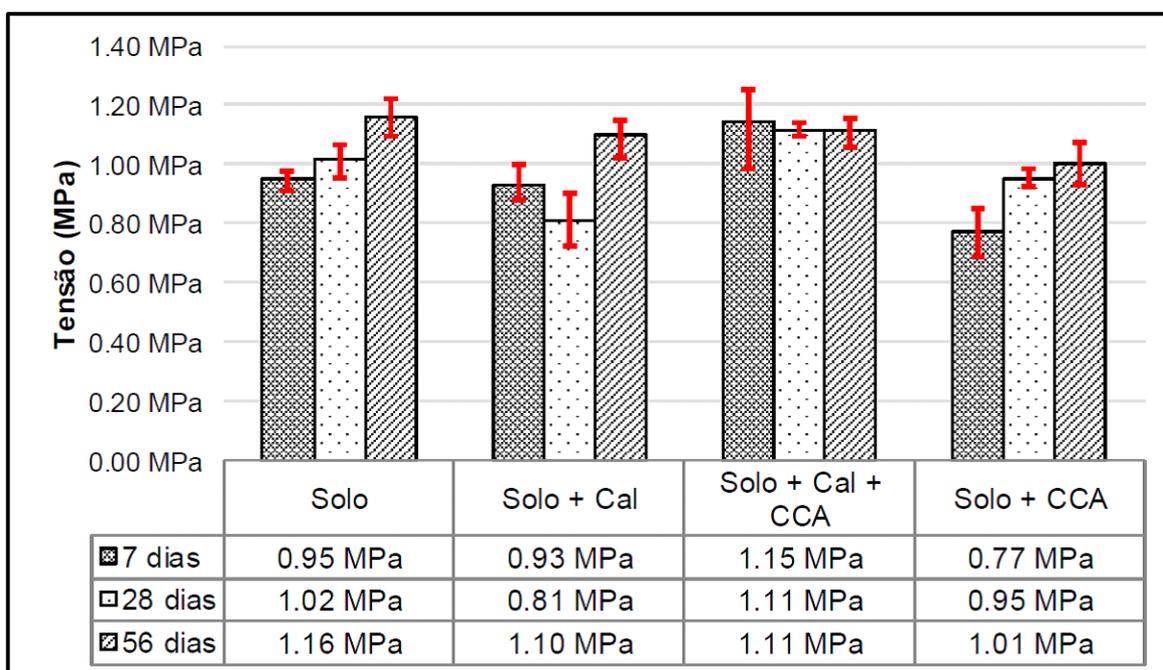


Figura 2. 8 - Influencia do tempo de cura na RCS (Leon 2015)

Outros tipos de cinza de resíduos também são estudados para uso em pavimentação com melhoria da resistência do solo, como é o caso dos estudos realizados por Silva (2017) que avaliou o reforço para infraestrutura de pavimentos com cinza de cavaco de eucalipto, mostrando um ganho de resistência mecânica da mistura quando comparado com o solo natural, cabe observar que a cinza utilizada na pesquisa foi de origem de caldeira e produzida sem o controle de temperatura.

A Figura 2.9 mostra os resultados de CBR compactados nas energias N = Normal, I = Intermediária, M = Modificada, das misturas pesquisadas por Silva (2007).

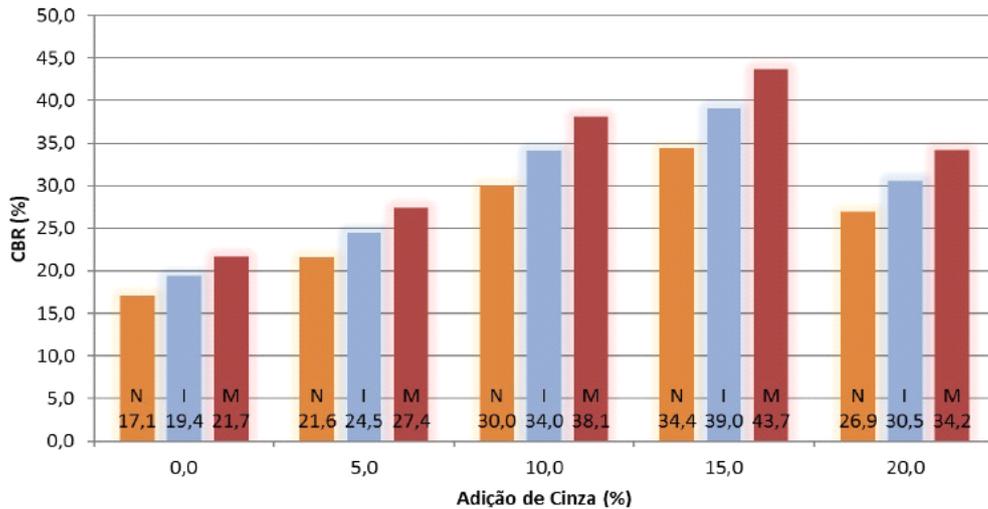


Figura 2. 9 - Índice de suporte califórnia das misturas de argila e cinza da casca de eucalipto (Silva 2017)

Bonfante et al. (2016), pesquisaram a estabilização de um solo arenoso com cinza da casca de arroz e cal para utilização em camadas de pavimento. As misturas estudadas com percentuais fixos de CCA – 15% variando o percentual de cal, compactado na energia normal (N) e modificada (M), conforme mostrado na Figura 2.10. O autor observou aumento de capacidade de suporte, mas sem demonstrar tendência de variação de resultados. Cabe ressaltar que a cinza utilizada na pesquisa foi adquirida em fornos de indústria de beneficiamento de arroz sem controle de temperatura, mas na condição amorfa conforme afirma o autor.

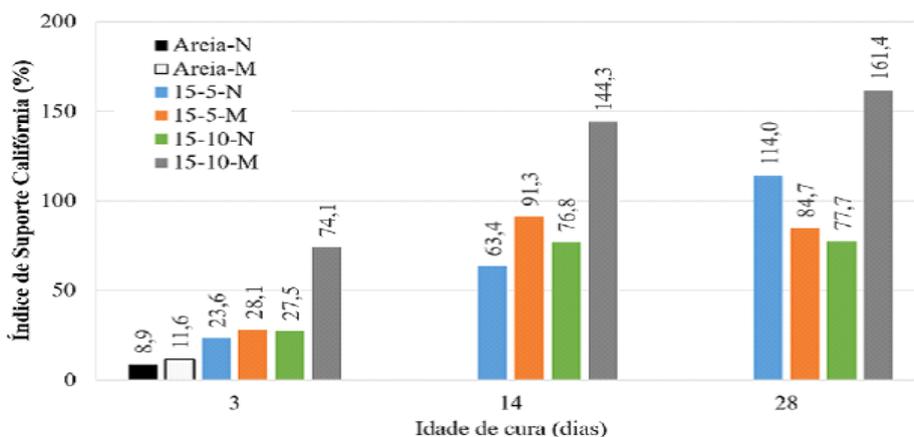


Figura 2. 10 - Índice de Suporte Califórnia (Bonfante At. al. 2016)

Alcantara et al. (2017), et. al. estudaram o efeito de cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal, com o objetivo de avaliar uso potencial da cinza da casca de arroz (CCA) como pozolana, atuando juntamente com cal no processo de estabilização química de um solo residual da região de Ilha Solteira, Estado de São Paulo, Brasil. A Tabela 2.10 mostra os resultados obtidos com valores decimais para fins de comparação.

Tabela 2. 10 - Limites de Atterber do solo natural e com misturas, (Modificado Alcantara et al., 2017)

MATERIAL	$W_l$	$W_p$	IP
Solo	27,4	15,6	11,8
C1; Solo + 8% cal	26,6	17,3	9,2
C2: Solo + 8% cal + 5% CCA	29,0	17,9	11,1
C3: Solo + 8% de Cal + 10 CCA	28,4	18,6	9,8

Pereira (2012) realizou estudos com o objetivo de estabilizar um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos, sendo a cinza utilizada na pesquisa originada de uma lagoa de estabilização anaeróbica de esgoto. O estudo envolveu inicialmente a realização de ensaio de CBR, com resultados para o solo natural de 6,13%. Realizou estudos com solo e cimento, como também solo, cimento e cinza de lodo, sendo destacado aqui a utilização do solo + cinza + cimento. A Tabela 2.11 e a Figura 2.11 mostram os resultados obtidos na pesquisa.

Tabela 2. 11 - Traço para o ensaio de compressão simples (Pereira 2012).

Energia	Traço	Nomenclatura	Material (%)		
			Solo	Cimento	Cinza
Intermediária	T <sub>5</sub>	S86C9CLE5	86	9	5
	T <sub>6</sub>	S81C9CLE10	81	9	10
	T <sub>7</sub>	S71C9CLE20	71	9	20
	T <sub>8</sub>	S61C9CLE30	61	9	30

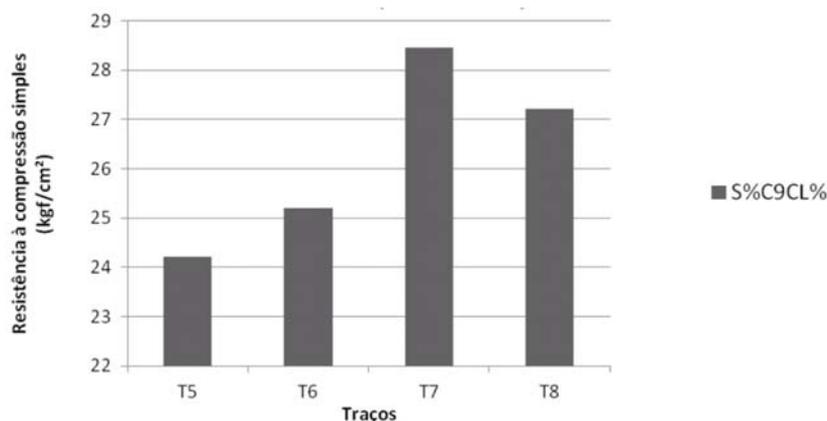


Figura 2. 11 - Resistencia à compressão simples-solo-cimento-cinza por traço (Pereira 2012)

Observa-se que houve um ganho de resistência quando da mistura T7, no entanto cabe registrar que o solo natural apresentou índice de plasticidade de 10,50%, já muito alto para uso em camadas de sub base e base de pavimento e que não foram realizados estudos da variação do índice de plasticidade quando da adição de matérias como cimento e a cinza para a estabilização do material.

## 2.8 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS COM CINZAS PARA PAVIMENTAÇÃO

A escassez de bons materiais ou de materiais nobres para uso em pavimentação e a disponibilidade de grandes quantidades de resíduos pelo mundo tem sido a grande força motivadora para pesquisas com aproveitamento de cinzas provenientes de várias atividades, seja da agroindústria ou de outros setores da economia.

Segundo Shroeder (1994), diversos pesquisadores ao redor do mundo têm buscado o uso de rejeitos em pavimentação, seja escoria de alto forno, tapete de fibra, vidro, plástico, pneus, escoria de alto-forno, como também os diversos tipos de cinzas produzidas pela indústria com resultados bastante satisfatórios, como é caso das cinzas pesadas produzidas por termoelétricas movidas a carvão em países como o Reino Unido ( Dawson et al, 1993) como também nos Estados Unidos (MOULTON, 1973).

Dawson et al. (1991), realizou ensaios de CBR em cinzas pesadas geradas por termelétricas britânicas, cuja granulometria é mais grossa quando comparada com a cinza produzida no Brasil e forneceram teores de umidade médios de 18%, peso específico

aparente seca variando de 9,9 KN/m<sup>3</sup> (9,7 KN/m<sup>3</sup> a 13,7 kN/m<sup>3</sup>) e CBR de 27% a 30%. Ainda segundo o autor, o poder cimentante da Cinza está diretamente relacionado com o tipo e a quantidade de carbonatos presentes, sendo que em virtude dos baixos percentuais de óxido de cálcio pode-se esperar limitações no desenvolvimento de reações autocimentantes.

Nos Estados Unidos e no Canadá, a aplicação de subprodutos da queima do carvão e de processos de incineração tem sido feita principalmente em rodovias não estaduais (SCROEDER, 1994).

A Tabela 2.12. cita alguns dos lugares onde foram utilizados cinzas residuais em serviços de pavimentação.

Tabela 2. 12 - Lugares onde foram utilizados materiais residuais em serviços de pavimentação (SCHROEDER, 1994)

<b>Projeto</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Materiais</b>
Route 2	6,4 km	404.000 m <sup>3</sup>	Escória de alto forno: 80 – 85%
Moundville, W. VA. (1972) <sup>a</sup>	Base granular 22,9 cm	225.000 tons	Escória de caldeira primária: 10 – 15%
Interstate 79 Bridgeport, W VA. (1972) <sup>b</sup>	Base granular 22,9 cm	161.000 m <sup>3</sup> 178.000 tons	Cinza pesada – 100%
Highway 18 Saskatchewan, Canadá (1976 e 1977) <sup>c</sup>	Base granular 53,3 cm	32.000 m <sup>3</sup> 35.000 tons	Mistura de cinza pesada retirada de lagoa cinza pesada de pilha e cinza volante
Highway 47 Estevan, W. VA. (1977) <sup>b</sup>	Base granular 25,0 cm	135.000 m <sup>3</sup> 150.000 tons	Mistura de cinza pesada retirada de lagoa cinza pesada de pilha e cinza volante
Subdivision Development Cartersville, GA (1892) <sup>d</sup>	Base granular 10,1 cm	1150 m <sup>3</sup>	Cinza pesada

(a) BLOCKER et al, (1973); (b) SEALS et al, (1972); (c) CULLEY et al, (1979); (d) JONES, (1982)

Nunes et al. (1996), citado por (Farias, 2005), avaliaram juntamente com outros materiais residuais o emprego da cinza pesada oriunda da queima do carvão mineral na pavimentação. Os estudos realizados indicam os seguintes benefícios dessas matérias na pavimentação:

- a) Redução da demanda de materiais primários;
- b) Redução dos custos energéticos relacionados a extração e transporte de agregados convencionais;
- c) Redução dos custos ambientais associados com a recuperação dos passivos ambientais gerados pela exploração de jazidas de materiais convencionais;
- d) Redução dos problemas ambientais e econômicos associados com a estocagem e disposição final dos resíduos; e.
- e) Prováveis benefícios comerciais advindos do uso de materiais residuais, visto que são financiados pelos processos que os geram, não são vendidos até o momento, pois os geradores têm custos associados com a estocagem e a disposição final dos produtos.

Os autores avaliaram o desempenho de diversos resíduos em relação aos aspectos mecânicos voltados para aplicação do material em camadas de sub-base de pavimentos e os riscos para o meio ambiente, sendo que a metodologia usada em seus estudos para avaliação do desempenho mecânico dos materiais secundários pode ser subdividida em 3 estágios principais:

Estágio 1 - Consistiu da avaliação geral dos materiais usando testes convencionais de caracterização e classificação, tais como: distribuição granulométrica, plasticidade da fração fina ( $<0,42\text{mm}$ ), absorção, densidade da partícula, integridade ao sulfato de magnésio e testes de compatibilidade;

Estágio 2 – Os materiais foram testados sem a adição de qualquer agente cimentante. Foram realizados ensaios de compressão triaxial dinâmico para determinar o comportamento das deformações resilientes e permanentes. Os resultados obtidos através destes ensaios foram analisados com o objetivo de avaliar se o material tem um comportamento aceitável para ser usado em seu estado natural em camadas do pavimento. Valores que poderiam ser esperados dos materiais convencionais são tidos como referência para determinar a adequação do material. Por exemplo, é reconhecido que um módulo resiliente ( $M_r$ ) acima de  $200\text{MPa}$  deve ser esperado de um material convencional granular não ligante oriundo de rocha britada de boa qualidade; e

Estágio 3 - Caso os materiais em seu estado natural não apresentassem uma performance satisfatória, considerando o módulo resiliente, realiza-se-ia tratamentos com a adição de materiais cimentantes até atingir os critérios de aceitação, que foram definidos pela

performance adequada nos testes de compressão triaxial dinâmico (após 28 dias de cura) e pela durabilidade apropriada da mistura.

Tais estudos buscam mostrar a necessidade e viabilidade da utilização segura e econômica de resíduos satisfazendo à necessidade da indústria da construção rodoviária, assim como, a necessidade de produção de materiais de construção de baixo custo para a sociedade.

## **CAPITULO 3**

### **1.2 3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Tendo em vista a otimização dos trabalhos ao longo da pesquisa, os ensaios foram desenvolvidos em quatro laboratórios distintos, com o objetivo de se obter uma melhor rendimento, sendo o laboratório de solos e asfalto da empresa Coema Paisagismo Ltda e o Laboratório do Núcleo de Pesquisa em Engenharia (NUPENG) da Universidade Federal de Roraima (UFRR), ambos localizado na Cidade de Boa Vista Roraima, laboratório da empresa Green Lab Análises Químicas e Toxicológicas, além do Laboratório de Geotécnica da Universidade de Brasília (UnB), localizado na Cidade de Brasília Capital do Brasil.

As etapas da pesquisa são detalhadas neste capítulo desde a coleta dos materiais, preparação das amostras, até os ensaios que avaliaram o comportamento mecânico das misturas estudadas visando a estabilização do solo em estudo.

### **3.1MATERIAIS**

#### **3.1.1 Solos**

Foram realizadas diversas visitas a jazidas de solos já exploradas para fins de serviços de pavimentação no Estado de Roraima, tendo sido escolhida a que já possuía um histórico de uso em estrutura de pavimentos de rodovias. Apesar de possuir histórico de uso não foi possível localizar eventuais estudos geotécnicos com os solos dessa jazida.

A jazida selecionada encontra-se localizada a 15 km do Município de Boa Vista/RR, próximo a BR 174. As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 mostram respectivamente, o mapa da cidade de Boa Vista com as coordenadas da jazida de solo usada nesta pesquisa (N 02°43'16.3" e W 60°48'28,3"), uma foto da jazida de solo laterítico com cascalho e o aspecto do solo coletado para pesquisa.

A jazida possui um volume explorável de 25.000 m<sup>3</sup>, com uma espessura média de 2,00 m. A coleta do solo foi realizada a uma profundidade entre 0,40 e 1,00 m.

Após a coleta o solo foi transportado para o laboratório da empresa Coema Paisagismo e secado ao ar livre.

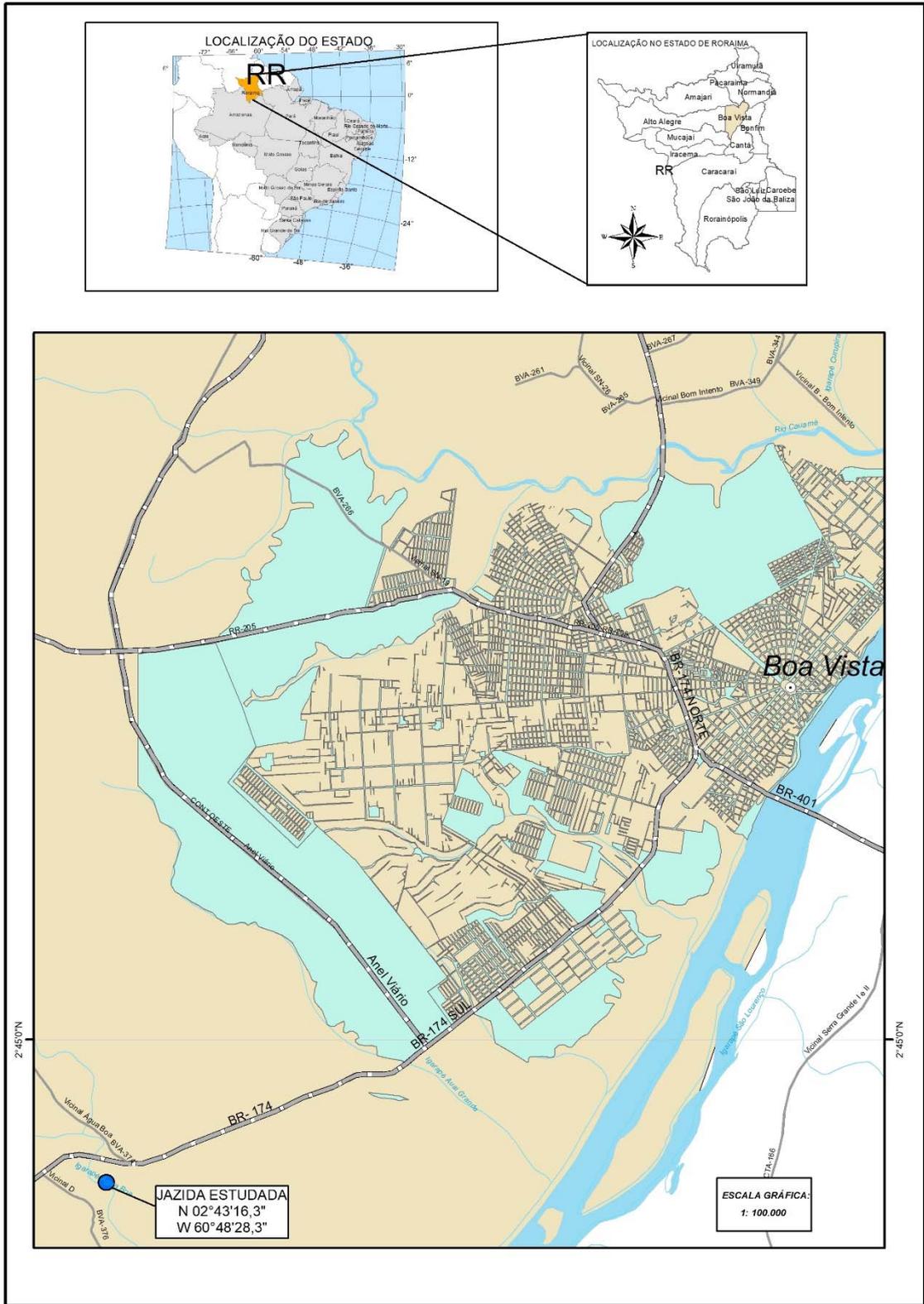


Figura 3. 1 Localização da Jazida. Autoria própria (2018)



Figura 3. 2 - Jazida de solo laterítico com cascalho usada na pesquisa



Figura 3. 3 - Aspecto do solo laterítico usado na pesquisa

### 3.1.2 Cimento

O aglomerante hidráulico utilizado foi o cimento Portland tipo CP-F-32 produzido no Estado do Amazonas. O insumo foi adquirido em loja de material de construção no comércio local de Boa Vista-RR. O cimento foi estocado em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados para que não sofresse contaminação, nem ação de umidade.

### 3.1.3 Cinza

A cinza utilizada foi coletada na indústria cerâmica Nova Aliança localizada no Distrito Industrial de Boa Vista - RR, sendo proveniente da queima da casca de arroz a uma temperatura média variando entre 700 °C e 800 °C de acordo com informações da empresa.

A cinza da casca de arroz (CCA) na olaria, após a incineração é disposta em depósito e levemente umedecida com o objetivo de evitar a dispersão no ar, por se tratar de material fino e leve. As Figuras de 3.4 a 3.7 mostram o processo de produção da cinza da casca de arroz (CCA) na industrial cerâmica.



Figura 3.4 - Estocagem da casca de arroz na olaria



Figura 3.5 - Queima da casca de arroz na olaria



Figura 3.6 - Estocagem da cinza da casca de arroz na olaria



Figura 3.7 - Coleta da Cinza da casca de arroz da pesquisa

A cinza foi coletada em sacos plásticos no estado úmido e conduzida ao laboratório de pavimentação a UFRR para posterior tratamento.

A preparação das amostras de cinza após a secagem foi realizada da seguinte forma:

- a) Secagem em estufa a 100° C por um período de 24 horas;
- b) Moagem em moinho de bola;
- c) Peneiramento da cinza na peneira nº 200 (0,074 mm) com o aproveitamento do material passante.
- d) Armazenamento em local apropriado com o objetivo de evitar o aumento de umidade na amostra.

### **3.2. MÉTODOS**

A pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas, como mostra o fluxograma da Figura 3.8. Na primeira foi feita a coleta dos materiais; a segunda fez-se a caracterização química ou física dos materiais empregados; na terceira definiu-se os traços e ensaios mecânicos e ou químicos das misturas usadas e por último precedeu-se a análise do comportamento dos materiais e misturas pesquisadas.

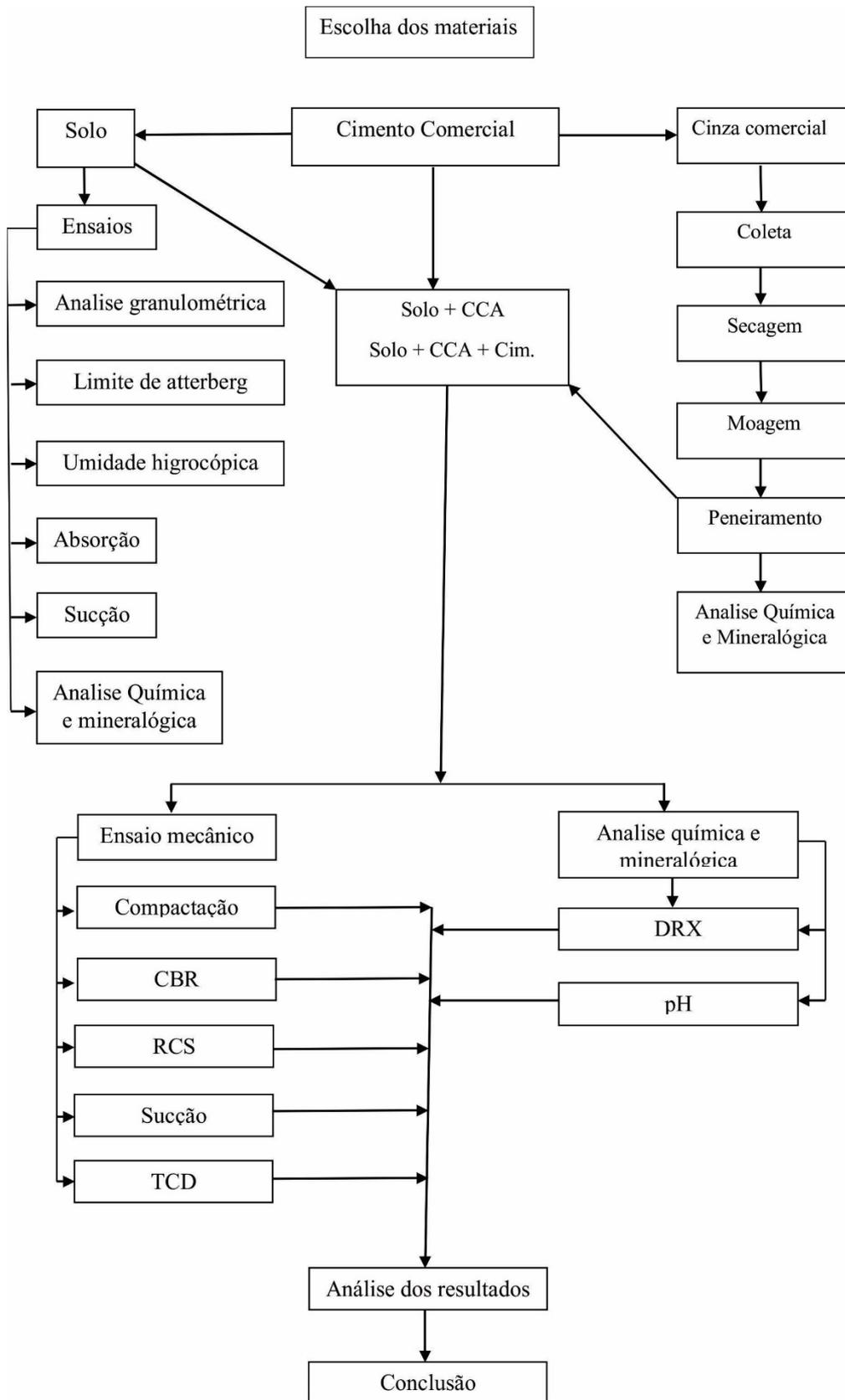


Figura 3. 8 - Fluxograma de elaboração da pesquisa

### 3.2.1 Caracterização física do solo e da cinza

Após a seleção dos materiais, as mesmas foram preparadas para os ensaios de caracterização física conforme o caso.

Para o solo foram feitos ensaio de caracterização geotécnica, limite de liquidez ( $W_l$ ), limite de plasticidade ( $W_p$ ), para a cinza foi determinada a massa específica do solo, granulometria e massa específica dos grãos. A Tabela 3.1 mostra as normas utilizadas para caracterizar o solo e a cinza usada na pesquisa.

Tabela 3. 1 - Ensaios realizados com solos da jazida

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	NBR 7181:2016
Limite de liquidez	NBR 6459:2016
Limite de plasticidade	NBR 7180:2016
Massa específica real do solo	NBR 6458:2016
Massa específica real da cinza	NBR NM 23:1998

#### 3.2.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 7181:2016. Como o solo estudado é constituído de cascalho e fração fina foi realizado esse ensaio por meio de granulometria conjunta, isto é, peneiramento e sedimentação. Para a etapa correspondente a sedimentação foram realizados ensaios com uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio).

#### 3.2.2.2 Limites de Consistência

Os limites de consistência foram realizados para todas as misturas pesquisadas, tais como: solo natural, solo com mistura de cinza e solo com mistura de cinza e cimento.

O limite de liquidez ( $W_l$ ) foi executado de acordo com NBR 6459:2016 e o limite de plasticidade ( $W_p$ ) de acordo com a NBR 7180:2016. Para o estudo de materiais visando uso em pavimento rodoviário, a determinação do índice de plasticidade é fator

determinante para determinação a aceitação ou não do material em função da camada a ser utilizada.

### **3.2.2.3 Ensaio com as frações finas e graúdas do solo e da cinza**

Considerando-se que um dos problemas que podem surgir na avaliação dos resultados de compactação em laboratório em relação ao campo quando do uso de materiais agregados como é o caso dos solos lateríticos e dos materiais reciclados oriundos da demolição e da construção civil – RCD (Camapum de Carvalho 2017 e Oliveira 2007) diz respeito à secagem do solo na fase de preparação de amostras, isso porque, grande parte dos microporos existentes nos agregados que em campo se encontram saturados, ao se desidratarem com a secagem em estufa ou mesmo ao ar não restabelecem a saturação no momento da compactação. Buscando analisar o problema foram realizadas as determinações das massas específicas dos grãos das frações granulares (diâmetro  $d > 19$  mm,  $19 \text{ mm} > d > 12,5$  mm e  $12,5 \text{ mm} > d > 4,8$  mm). Determinou-se ainda a massa específica dos grãos da fração fina do solo ( $d < 2$  mm).

#### **a) Massa específica dos grãos**

A massa específica dos grãos da matriz fina do solo, fração inferior a 2 mm, foi determinada fazendo-se uso do pentapicnômetro existente no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. O equipamento utilizado adota o princípio de Arquimedes (deslocamento de fluido) e a lei de Boyle (expansão de gás) para encontrar o volume real de material sólido e com uma balança com precisão de 0,0001 g obtém-se a massa de solo viabilizando-se assim a determinação da massa específica dos grãos do solo.

Para a cinza da casca de arroz a determinação da massa específica por ser um material leve, o ensaio foi realizado de acordo com a NBR 6458:2016. A água destilada prevista para a execução do ensaio tradicional foi substituída por querosene na mesmas condições prevista em norma.

**b) Ensaio de absorção, massa específica e massa específica aparente da fração graúda do solo.**

A sequência de ensaio de absorção, massa específica e massa específica aparente foi apresentada a seguir:

- a) Foram realizados ensaios usando o agregado graúdo em três granulometrias  $d > 19$  mm,  $12,5 < d < 19$  mm e  $4,8 < d < 12,5$  mm;
- b) Para cada faixa utilizou-se 1 kg de agregado;
- c) O ensaio foi realizado com secagem prévia e sem secagem prévia das amostras;
- d) As amostras foram lavadas sobre a peneira de 4,80 mm sendo levemente escovada com o objetivo de remover o material fino;
- e) As amostras foram imergidas em água por um período de 24 horas e agitada de 4 em 4 horas;
- f) Após as 24 horas as amostras foram enxugadas em tecido absorvente com o objetivo de remover somente a água superficial;
- g) Com as amostras enxutas foram realizadas as pesagens das mesmas e anotadas as massas úmidas ( $M_h$ );
- h) Em seguida as amostras foram colocadas em um sexto vazado e totalmente submersas em água e obtendo-se sua massa submersa ( $M_i$ );
- i) Durante a pesagem imersa das amostras foram anotadas as temperaturas da água para fins de correção da massa específica;
- j) As amostras foram colocadas em estufa a 100°C por um período de 24 horas;
- k) Passado o período de 24 horas foram determinadas as massas secas ( $M_s$ )

O cálculo da massa específica, massa específica aparente e da absorção do agregado graúdo foi realizada de acordo com as equações 3.1, 3.2 e 3.3:

$$D_i = \frac{M_s}{M_s - M_i} \times \delta_T \quad \text{Equação 3.1}$$

$$D = \frac{M_s}{M_h - M_i} \times \delta_T \quad \text{Equação 3.2}$$

$$S = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

$D_i$  = massa específica dos grãos em g/cm<sup>3</sup>.

$D$  = massa específica aparente dos grãos, em g/cm<sup>3</sup>.

$S$  = absorção de água, em porcentagem de material seco.

$M_s$  = massa seca da amostra.

$M_h$  = massa da amostra saturada, superficialmente seca.

$M_i$  = massa da amostra totalmente imersa em água destilada.

$\delta_T$  = massa específica da água à temperatura T do ensaio.

A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com a equação 3.4.

$$G = \frac{\delta x D_i}{\delta x M_2 + D_i x M_1} \times 100 \quad \text{Equação 3.4}$$

### 1.3 Em que:

$G$  = massa específica dos grãos do solo contendo frações passadas e retidas na peneira de 4,8 mm, em g/cm<sup>3</sup>.

$\delta$  = massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm.

$D_i$  = massa específica dos grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm.

$M_1$  = porcentagem em massa, da fração da amostra que passa na peneira de 4,8 mm.

### 1.4 $M_2$ = porcentagem em massa, da fração da amostra retida na peneira de 4,8 mm.

### 1.5

#### 3.2.2.4 Análise química do solo e das misturas pesquisadas

Os ensaios químicos são utilizados com mais frequência em solos para utilização agrônômica visando definição das correções necessárias, dependendo do cultivo a ser realizado, como por exemplo solos com alta CTC (capacidade de troca catiônica), são

solos de alta fertilidade, etc. Ao nível de pesquisa, estes ensaios são realizados na área geotécnica para avaliação da intemperização dos solos.

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de pH em água e em solução de KCL, segundo os procedimentos recomendados pela EMBRAPA (1997). O ensaio teve como objetivo determinar o valor de  $\Delta\text{pH}$  que constituem-se um indicativo da composição mineralógica predominante no solo e determinar o ponto de carga zero PCZ que é um marco importante quando se trabalha com a incorporação de aditivos químicos ao solo susceptíveis de alterar o seu pH. O PCZ corresponde ao equilíbrio de cargas positivas e negativas, quando o pH aproxima do PCZ o solo fica mais susceptível aos fenômenos de desagregação e/ou deflocação.

O ensaio foi realizado da seguinte forma:

- a) Primeiramente foi separada amostras com 100 g para cada mistura sendo estas: Solo natural, solo + 8% de cinza e solo + 3% de cimento e 3% de cinza. A massa de 100 g foi definida de modo a possibilitar a realização de ensaios de pH com água e os ensaios de pH em KCL.
- b) Foi adicionado as misturas 10% de água destilada e deixado em repouso por um período de 24 horas em saco plástico fechado;
- d) Após as 24 horas as misturas foram separadas seis partes com 10g para cada amostra de solo;
- d) Das seis partes de solo, 03 foram adicionadas 25 ml de água destilada e 03 foram adicionadas com uma solução de KCL em copo plástico sendo agitado com bastão de vidro e deixado em repouso por 01 hora;
- e) Passado uma hora a amostra foi agitada novamente com bastão de vidro e mergulhados os eletrodos na solução homogeneizada para a leitura do pH;
- f) O valor do pH em água e pH em KCL, foi determinado pela média da leitura das 03 partes de cada percentual de mistura, sendo o valor de  $\Delta\text{pH}$ , a diferença entre os dois valores obtidos;
- g) Antes da realização das leituras no pHmetro o mesmo foi aferido e deixado ligado por 30 minutos antes da leitura.

### 3.2.2.5 Caracterização química da cinza

Com o objetivo de se conhecer as propriedades da cinza referente ao meio ambiente, por exemplo, inflamabilidade foram realizados ensaios conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 -Ensaio realizados com a cinza da casca de arroz incinerada na olaria e pulverizada em moinho de bola no laboratório do NUPENG/UFRR

Ensaio	Norma	Quantidade de amostras
Classificação da amostra	NBR 10.006:2004	01
Determinação da massa bruta	NBR 10.004:2004	01
Ensaio de lixiviação	NBR 10.005:2004	01
Ensaio de solubilização	NBR 10.006:2004	01

É importante conhecer as propriedades cinza da casca de arroz (CCA) sob o aspecto ambiental, com o objetivo de se avaliar e classificar a sua periculosidade quando disposto em locais impróprios ou ainda quando em uso em misturas, como é o caso do possível uso em pavimento rodoviário.

### 3.3.2.6 Caracterização mineralógica do solo e da cinza

Para avaliar as reações que acontecem durante a estabilização do solo, como também nas misturas de solo e cinza de casca de arroz (CCA) e solo + CCA e cimento, foram realizados difratogramas de Raios X no Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Roraima (UFRR).As amostras das misturas utilizadas nesse ensaio foram obtidas dos corpos de prova com 28 dias de cura e após submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples.

O ensaio foi realizado seguindo as etapas:

- a) Após a realização do ensaio de compressão simples foram retiradas as amostras de cada corpo de prova;
- b) O material retirado das amostras foram destorroadas e passadas na peneira 200 (# 0,074mm) uma vez que o método utilizado para a execução do ensaio foi o método pó;
- c) Nesta pesquisa não houve aquecimento da lâmina uma vez que o objetivo era avaliar as reações que acontecem durante a estabilização das mistura de solos.
- d) Com o material já pulverulento foram preparadas então as lâminas e realizado o ensaio;

### **3.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA COM O SOLOS E AS MISTURAS PROPOSTAS**

Com o objetivo de verificar a potencialidade da cinza da casca de arroz na estabilização do solo foram realizados ensaios com as misturas de solos com os percentuais de cinza com os percentuais de 2% de CCA + solo, 4% de CCA + solo, 6% de CCA + solo e 6% de CCA + solo, como também a mistura de CCA + cimento e solo, com os percentuais de 1% de CCA + 1% de cimento, 2% de CCA + 2% de cimento, 3% de CCA + 3% de cimento. A tabela 3.3 mostra os traços de adição com cinza e ou cimento.

Tabela 3. 3 Proporções das misturas solo-CCA e solo-CCA-cimento

<b>MISTURAS</b>	<b>SOLO (%)</b>	<b>CINZA (%)</b>	<b>CIMENTO (%)</b>
M.0	100,00	0,00	0,00
M.98.2	98,00	2,00	0,00
M.96.4	96,00	4,00	0,00
M.94.6	94,00	6,00	0,00
M.92.8	92,00	8,00	0,00
M.98.1.1	98,00	1,00	1,00
M.96.2.2	96,00	2,00	2,00
M.94.3.3	94,00	3,00	3,00

### **3.4.1 Ensaio de CBR**

Tanto no caso do solo natural como das misturas com cinza e ou cimento conforme a Tabela 3.3, a capacidade de suporte e a expansibilidade do solo foi avaliada utilizando o ensaio de CBR, medindo a resistência a penetração de amostras saturadas compactadas na umidade ótima e energia intermediária. Foram verificadas as expansões após a saturação dos corpos de prova durante 96 horas e em seguida os valores de CBR do solo e das misturas. A norma utilizada para a execução do ensaio foi a NBR 9895:2016 – Índice de Suporte Califórnia.

A execução dos ensaios de CBR foi dividida nas seguintes etapas:

A execução dos ensaios de CBR pode ser dividida nas seguintes etapas:

- a) Preparação das amostras de solo material passando na peneira 19 mm de abertura);
- b) Compactação dos copos de prova na umidade ótima, densidade máxima e energia intermediária definida preliminarmente nos ensaios de compactação;
- c) Preparação do corpo de prova para imersão em água pelo período de 96 horas, com leitura de expansão a cada 24 hora;
- d) Passado o período de 96 horas, o corpo de prova foi submetido ao ensaio de CBR, fazendo penetrar na amostra um pistão medindo 5cm de diâmetro a uma velocidade de 1,27 mm/mim anotando-se as cargas e as penetrações correspondente ao pistão da amostra. As leituras foram realizadas a cada 30 segundo até o limite de 6 mim.
- e) Concluídos os ensaios foram realizados os cálculos do CBR traçando-se os gráficos que relacionam a carga em ordenadas e às penetrações, nas abscissas, verificando-se a necessidade de correção ou não da curva. O CBR foi definido dividindo-se as pressões encontradas para 2,5 e 5 mm de penetração do pistão e as respectivas pressões padrões são respectivamente 70 kgf/cm<sup>2</sup> e 105 kgf/cm<sup>2</sup> para penetrações de 2,50mm e 5,00mm.

### **3.4.2 Ensaio de resistência a compressão simples (RCS)**

O ensaio de resistência a compressão simples é utilizado normalmente com o objetivo de verificar o efeito da cimentação na estabilização dos solos. O solos utilizado foram seco

ao ar. A Figura 3.9 mostra a preparação das amostras para a execução dos ensaios de RCS das misturas com cinza e ou cimento.



Figura 3. 9 - Preparação dos amostras - ensaio de compressão simples

Os ensaios foram realizados de acordo com o método de ensaio DNIT-ME 180:94, com adaptações da seguinte forma:

- a) O material coletado na jazida foi armazenado de modo a manter suas características iniciais;
- b) A amostra de solo para as misturas foi seca ao ar;
- c) A amostra foi previamente destorroada;
- d) A amostra foi passada na peneira de 19mm (3/4 pol), sendo que o material retido foi substituído por igual peso de outra amostra representativa de solo;
- e) Tomou-se 5000g de solo da amostra representativa;
- e) Determinou-se a umidade higroscópica da mistura;
- f) Foram moldados 05 corpos de prova para cada percentual de mistura previsto na pesquisa com dimensões de 10cm de diâmetro e 20cm de altura;
- g) Os corpos de prova foram moldados na máxima densidade e umidade ótima obtida através de ensaio de compactação com energia intermediária;
- h) Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram pesados e acondicionados em sacos plásticos de modo a evitar a perda de umidade, bem como permitir condições

de haver possíveis reações químicas e equilíbrio das mistura através de reações pozolânicas na presença da cinza da casca de arroz e do cimento;

i) Os corpos de provas foram acondicionados em ambiente fechado em câmara úmida de modo a evitar a variação da temperatura, com tempo de cura de 07 e 28 dias.

n) O rompimento dos corpos de prova a compressão simples foram realizados em prensa hidráulica com velocidade controlada.

o) Após o rompimento dos corpos de prova foi verificada a umidade dos corpos de prova;

p) O valor da resistência a compressão simples foi determinado dividindo a carga de ruptura pela área da seção da seção transversal do corpo de prova sendo seu resultado expresso em KN/m<sup>2</sup>, de acordo com a equação 3.5.

$$RCS = \frac{F}{A} \quad \text{equação (3.5)}$$

Onde,

F = Força em KN

A = Área da seção transversal em m<sup>2</sup>

RCS = Resistência a compressão simples em KN/m<sup>2</sup>

### **3.4.3 Determinação da resistência à tração por compressão diametral:**

O ensaio de resistência a tração por compressão diametral foi desenvolvido por Lobo Carneiro (1953) para determinação à tração de corpos de prova de concreto cimento, por solicitações estáticas.

A execução do ensaio de compressão diametral foi realizada nos corpos de prova fabricados para determinação da curva de retenção de água. A Figura 3.10, mostra o momento do rompimento de um corpo de prova usado na pesquisa por compressão diametral.

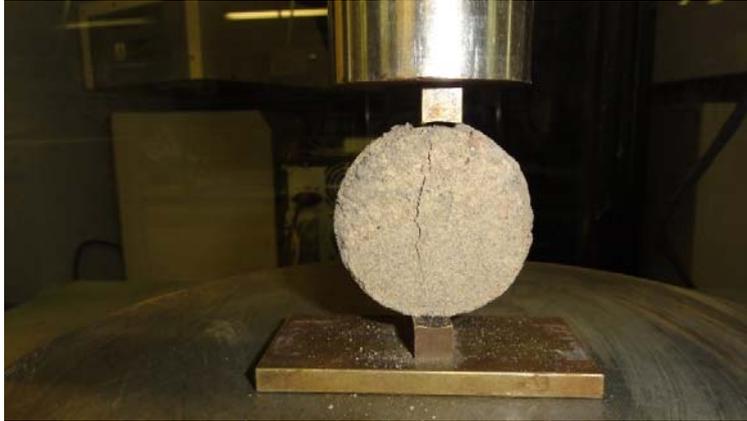


Figura 3. 10 - Rompimento do corpo de prova

Para a realização do ensaio de resistência a tração por compressão diametral foi seguida as seguintes etapas:

- a) Medido das alturas dos corpos de prova com paquímetro, sendo utilizado a média das leituras;
- b) Centrou-se o corpo de prova na prensa de ensaio, tomando-se o cuidado com relação ao posicionamento dos frisos metálicos;
- c) A prensa foi ajustada até se obter uma pequena compressão para fixar o corpo de prova na posição desejada. Após foi aplicada a carga progressivamente fazendo a leitura de carga e do deslocamento até observa-se o rompimento do corpo de prova ao longo do plano diametral;
- d) Foi anotado a sequência de carga até a ruptura.
- e) O ensaio possui uma particularidade de que em função dos frisos utilizados a carga no corpo de prova é do tipo distribuído, sendo então calculado através da equação 3.6.

$$\sigma_r = \frac{2 * F}{100 * \pi * D * H} \quad \text{Equação 3.6}$$

Em que:

$\sigma_r$  = Resistência a tração, Mpa;

F = Carga de ruptura, N;

D = Diâmetro do corpo de prova, cm;

H = Altura do corpo de prova, cm

### 3.4.4 Ensaio de sucção

Esse ensaio foi realizado usando o método do papel filtro de acordo com a norma ASTM D 5298-92, com moldes desenvolvidos especificamente para a pesquisa e medindo 5 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura (Figura 3.11).

O ensaio teve por finalidade determinar a sucção matricial atuante no solo. O solo utilizado nesse ensaio foi o passante na peneira nº 10 obtido por meio do peneiramento do solo seco ao ar. Para a realização do ensaio foi efetuada compactações do solo puro e das misturas na energia intermediária utilizando-se o método de compactação dinâmica.

Após compactação os corpos de prova foram extraídos do molde, sobre eles foram colocados os papeis filtro já devidamente pesados em balança com precisão de 0,0001g, e os mesmos foram identificados e envolvidos com filme plástico (insulfilm), colocados em recipiente hermeticamente fechado e guardados em câmara úmida por um período de 42 dias.

O tempo de armazenamento maior que o normalmente adotado se deu por uma questão de logística. Destaca-se que o termo geral sucção pode representar a sucção propriamente dita devida a forças de adsorção das partículas de argila e a capilaridade que predomina nos solos finos. Nos solos comumente os dois fenômenos ocorrem de modo conjunto e é nesse sentido que o termo está sendo usado nessa dissertação;



Figura 3. 11 - Molde metálico usado para compactação das amostras

Após o período de 42 dias de cura, o filme plástico foi removido e os papeis filtro retirados com o auxílio de uma pinça e pesados. Um cuidado especial foi tomado durante o manuseio com o objetivo de evitar a contaminação e a variação da umidade do papel adotando-se um tempo máximo de 5 segundos entre a retirada e a pesagem do papel. Cabe

destacar que foi cometido um erro de procedimento não sendo os papeis filtro retirados dos contatos com as amostras secos em estufa a 105°C – 110°C.

Como se dispunha dos pesos iniciais dos papeis filtro em umidade correspondente a umidade higroscópica, para recuperar os resultados foi efetuada a determinação da umidade higroscópica dos mesmos em condições de umidade relativa do ar e temperatura similares.

De posse das umidades dos papeis filtro corrigidas foram determinadas as sucções matriciais utilizando-se a equação 3.7 para umidades dos papeis filtro superiores a 47% e a equação 3.8 para umidades dos papeis filtro inferiores a 47%. Essas equações foram determinadas por Chandler et al. (1992) usando na calibração o papel filtro Whatman nº 42 e a sucção do solo em kPa.

- $\psi = 10^{(6,05-2,48\log w)}$  equação (3.7)

- 

- $\psi = 10^{(4,84-0,0622w)}$  equação (3.8)

Em que  $\psi$  = sucção (KPa)

W = Umidade (%)

## **CAPITULO 4**

### **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

#### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CCA**

Como já definido no capítulo anterior a cinza utilizada nessa pesquisa (CCA) é oriunda da queima da casca de arroz em Indústria Cerâmica situada no Distrito Industrial de Boa Vista/RR.

São mostrados neste item os resultados que interessam diretamente a essa pesquisa e as principais conclusões constantes do Relatório Técnico nº 22293/2017-1 emitido pela empresa GreemLab – Análise Químicas e Toxicológicas (Anexo A).

A CCA analisada e utilizada nessa pesquisa foi classificada como de classe II A, ou seja, é um resíduo não perigoso e não inerte e segundo o relatório apresentado no Anexo A não produz fogo em condições normais de temperatura e pressão nem sob fricção, absorção de umidade ou por alterações químicas espontâneas. É classificada como não corrosiva, pois apresenta pH em solução 1:1 igual a 10, ou seja, superior a 2 e inferior a 12,5.

A CCA teve sua classificação quanto à massa bruta segundo a NBR 10.004:2004 satisfazendo os limites permitidos (Anexo A).

Na análise do Lixiviado, segundo a NBR 10.005:2004 a CCA atendeu os limites permitidos sendo classificada como não tóxica.

Quanto a solubilização da CCA, segundo a NBR 10.006:2004, indicou que o bário, o manganês, o mercúrio, o nitrato e os Fenóis Totais ultrapassam os limites máximos permitidos.

Já quanto a classificação, o resíduo sólido pertencente à classe II A e não perigoso.

#### **4.2 MINERALOGIA DA CCA, DO SOLO E DAS MISTURAS ESTUDADAS**

Observando-se os resultados de raios X obtidos para a cinza da casca de arroz utilizada na pesquisa (Figura 4.1), nota-se que como a temperatura utilizada para a confecção da CCA foi superior a 700 °C, tendo em vista a presença de cristais e que a combustão se deu com auxílio de aeradores para acelerar o processo e manutenção da temperatura interna dos fornos, ocorreu a formação da sílica cristalina cristobalita, um polimorfismo do quartzo dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>). O silício na forma cristalina geralmente não contribui

de forma significativa para a estabilização química do solo por processo de simples mistura e compactação, sendo a forma amorfa mais eficiente. A análise semiquantitativa do diagrama de raios X dessa amostra (Figura 4.1), forneceu 91,7% de cristobalita e 8,3% de quartzo, não aparecendo compostos amorfos em destaque.

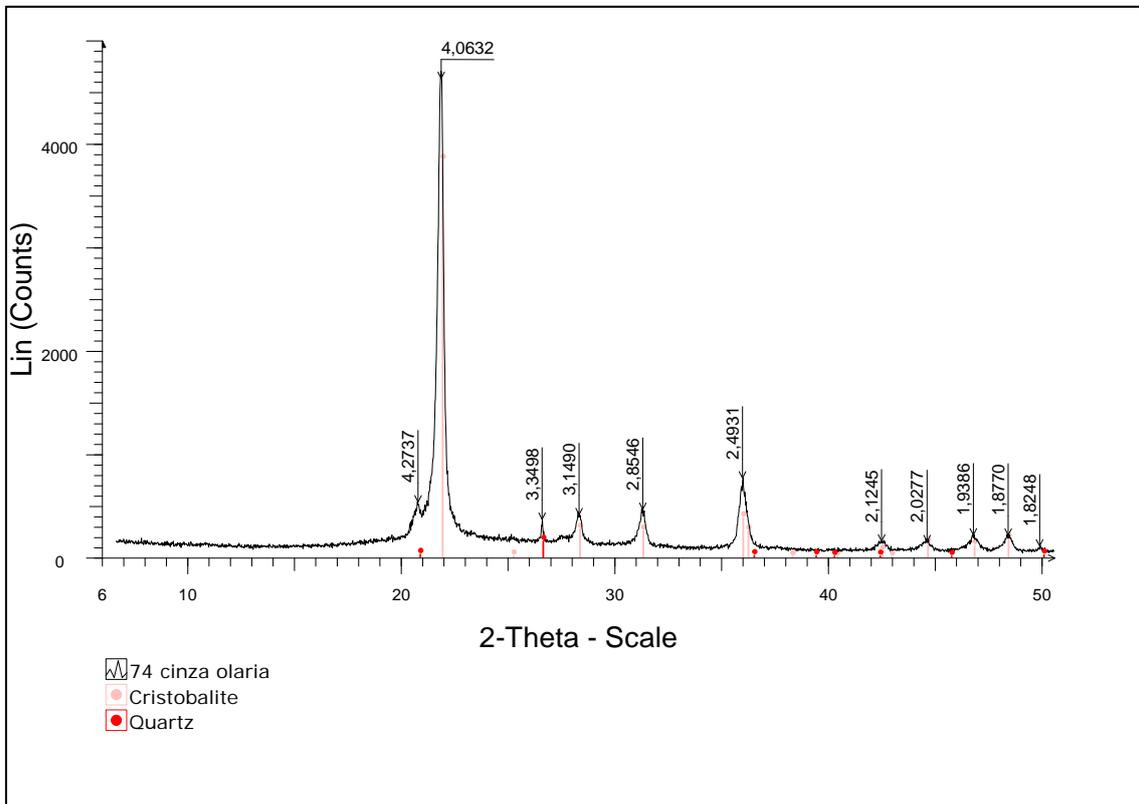


Figura 4. 1- Difratograma de raios X da amostra de CCA produzida na indústria cerâmica e utilizada na pesquisa.

A Figura 4.2 apresenta os resultados obtidos para o solo puro. São predominantes no solo puro a caulinita (40,1%) e o quartzo (37,2%). Em menor quantidade aparecem a cristobalita (13,5%), os óxi-hidróxidos de ferro somando (5%) e a mica (2,4%). Como traço tem-se ainda o spinel (1%) e a calcita (0,8%).

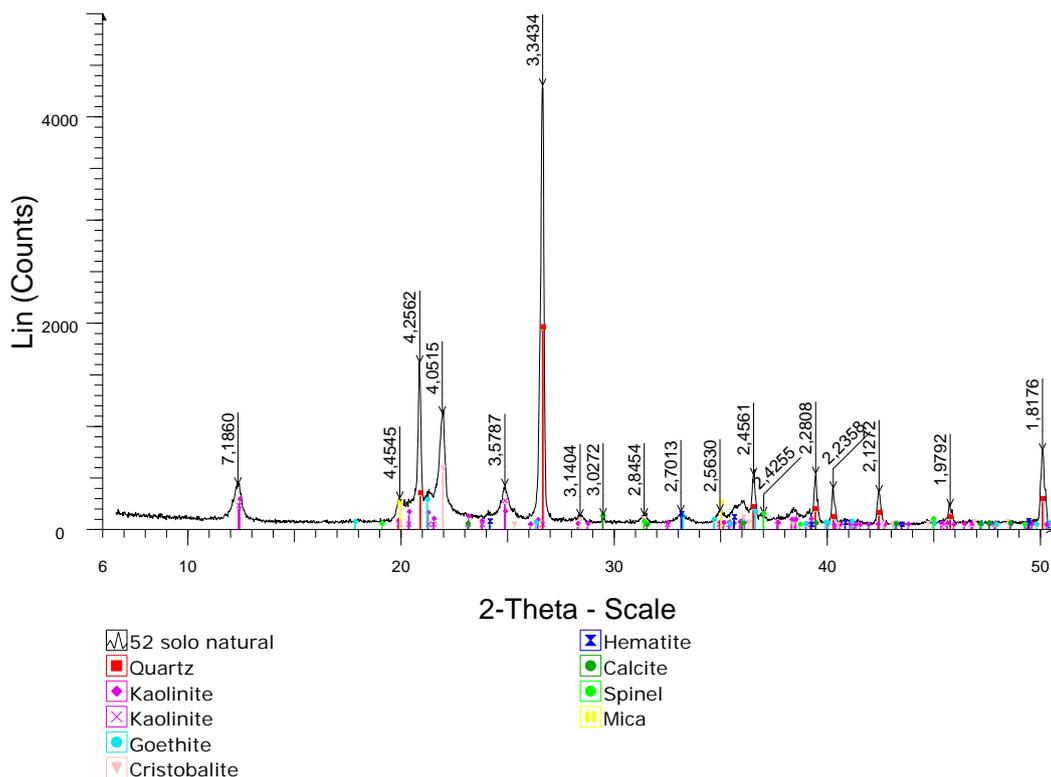


Figura 4. 2 - -Difratograma de raios X da amostra de solo puro

A Tabela 4.1 apresenta comparativamente os teores de minerais obtido para a CCA, o solo puro e as misturas solo – CCA e Solo – CCA – cimento.

Para a determinação do teor de minerais presentes na mistura foi utilizado o método semiquantitativo por ser a melhor solução para análise indicativa de materiais.

Tabela 4. 1 Tabela de teor de minerais presentes no solo e nas misturas pesquisadas

Mineral	Cinza (CCA)	Solo puro	2% CCA	4% CCA	8% CCA	1% CCA + 1% Cimento	2% CCA + 2% Cimento	3% CCA + 3% Cimento
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Quartz	8,3	37,2	47,5	43,4	44	48,8	22,8	17,1
Kaolinite	-	40,1	36,6	43,2	34,8	39,3	55,2	58,7
Goethite	-	3,6	4,4	5,5	4,6	1,6	6,1	5,6
Cristobalite	91,7	13,5	7,2	4,4	12,7	4,2	6,9	8,3
Hematite	-	1,4	0,9	1,3	0,5	1	1,8	2,8
Calcite	-	0,9	-	-	-	1,3	2,5	2,9
Spinel	-	1	1	0,4	1	1	0,6	0,6
Mica	-	2,4	2,4	1,9	1,9	2	4,1	4,1
Zirconolite	-	-	-	-	0,6	-	-	-
Ettringite	-	-	-	-	-	0,8	-	-

Analisando-se comparativamente os resultados apresentados na Tabela 4.1 os seguintes aspectos merecem destaque tendo em vista ser a análise semiquantitativa:

a) A cinza (CCA) é predominantemente formada por cristobalita e em menor quantidade o quartzo, ambos cristalinos, não aparecendo amorfos para atuarem em reações com o solo;

b) A cristobalita se faz presente no solo puro em maior teor que nas misturas e apesar de em menor teor, estando ela presente em maior teor nas misturas que o teor adicionado pela CCA confirma a sua presença no solo puro, o que significa que a CCA terá do ponto de vista da estabilização química pouca ou nenhuma contribuição a dar às misturas, embora possa intervir no que tange ao aspecto físico;

c) A maior quantidade de modo significativo da caulinita e menor de quartzo nas misturas contendo 2% e 3% de cimento Portland apontam para duas possibilidades sendo a primeira mais provável, embora seja necessário um maior número de análises: 1) mineralogicamente essas amostras considerando o solo puro são distintas das demais; 2) a partir do quartzo e componentes de alumínio presentes no cimento estaria sendo formada a caulinita;

d) Nas misturas com cimento tem-se a ampliação do teor de calcita nas misturas em relação ao solo natural.

Com fundamento nessa análise de resultados a expectativa é de pouca influência da CCA no comportamento do solo e alguma influência quando da adição do cimento. Destaca-se no entanto, de que mesmo não influenciando ou influenciando pouco no comportamento do solo, do ponto de vista ambiental, caso não tenha outros usos economicamente adequados e ambientalmente sustentáveis, o uso da CCA incorporada ao solo destinado ao uso rodoviário pode do ponto de vista ambiental, ser considerado adequado.

Por se tratar de um solo laterítico é interessante verificar a relação entre o teor dos óxi-hidróxidos de ferro e alumínio e o teor de caulinita tendo em vista que esse argilomineral é o último na cadeia evolutiva do solo estudado e esses óxi-hidróxidos devem, em princípio, terem sido formados dentro da cadeia evolutiva do solo. Destaca-se que no solo estudado os óxi-hidróxidos de alumínio não se mostraram presentes. A Figura 4.3 apresentando os resultados obtidos para todas as amostras analisadas considerando-se o solo natural e o solo com adição de CCA e CCA mais cimento Portland. Essa figura mostra que maior o teor de caulinita maior o teor de hematita mais goethita, sendo que

dos resultados obtidos apenas um ponto foge à tendência, o ponto correspondente ao solo mistura a 1% de CCA mais 1% de cimento Portland, o que indica ser esse ponto uma variabilidade da amostra.

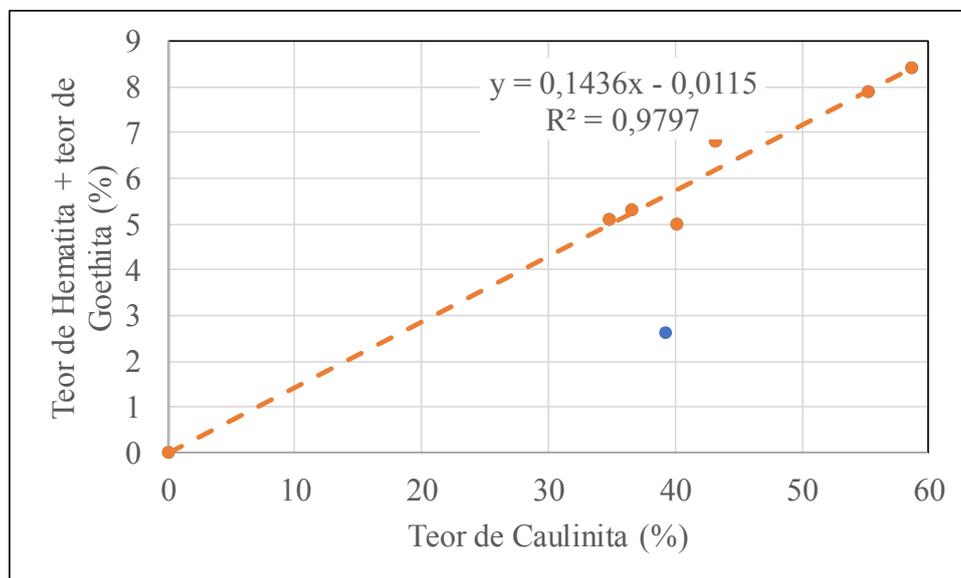


Figura 4. 3 - Teor de hematita mais goethita em função do teor de caulinita.

### 4.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E MISTURAS ESTUDADAS

É importante conhecer as características e as propriedades físicas do material quando da avaliação de seu potencial de uso na construção de estrutura de pavimento rodoviário, com o objetivo de inicialmente classificá-lo quanto ao seu melhor aproveitamento.

Diante da necessidade de se conhecer o solo a ser usado quanto às suas propriedades físicas foram realizados ensaios de massa específica dos grãos, umidade natural, absorção, granulometria e limites de Atterberg.

#### 4.3.1 Massa específica dos grãos, massa específica aparente dos grãos e absorção de água.

Considerando-se que um dos problemas que podem surgir na avaliação dos resultados de compactação em laboratório em relação ao campo quando do uso de materiais agregados

como é o caso dos solos lateríticos e dos materiais reciclados oriundos da demolição e da construção civil – RCD (Camapum de Carvalho 2017 e Oliveira 2007) diz respeito à secagem do solo na fase de preparação de amostras, isso porque, grande parte dos microporos existentes nos agregados que em campo se encontram saturados, ao se desidratarem com a secagem em estufa ou mesmo ao ar não restabelecem a saturação no momento da compactação. Buscando analisar o problema foram realizadas as determinações das massas específicas dos grãos das frações granulares (diâmetro  $d > 19$  mm,  $19 \text{ mm} > d > 12,5$  mm e  $12,5 \text{ mm} > d > 4,8$  mm). Determinou-se ainda a massa específica dos grãos da fração fina do solo ( $d < 2$  mm).

Como a determinação da massa específica dos grãos dos materiais granulares envolve a saturação dos grãos de modo a se evitar a influência dos vazios nos resultados, optou-se por apresentar nesse item os resultados de massa específica dos grãos, absorção e massa específica aparente dos grãos destacando-se que essa última inclui os vazios permeáveis e não permeáveis presentes nos grãos do solo.

A Figura 4.4 apresenta as massas específicas dos grãos do solo com e sem secagem prévia ao ar das frações granulares e da matriz fina do solo seca em estufa. Verifica-se que a secagem ao ar do solo conduz a valores inferiores de massa específica dos grãos. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que não se reidrata completamente durante o ensaio com a metodologia de ensaio usada os vazios desidratados com a secagem. Destaca-se que existem técnicas que podem viabilizar tal hidratação como uso de vácuo ou banho maria. Os resultados dessa figura mostram que com a secagem ao ar que quanto maior o tamanho dos grãos maior a massa específica dos grãos apontando para o fato de que o volume residual de vazios não saturados durante o ensaio aumentou com o tamanho dos grãos. Para explicar as variações registradas nas massas específicas dos grãos na amostra natural com o seu diâmetro faz-se necessário análises mineralógicas complementares e uma análise estatística dos resultados o que impõe a necessidade de se ampliar o volume de ensaios. Ambas avaliações não serão possíveis de serem analisadas nessa dissertação, cabendo, no entanto, destacar que o valor médio obtido para o material granular em estado natural se aproxima do valor obtido para a matriz fina seca em estufa o que aponta para similaridade mineralógica.

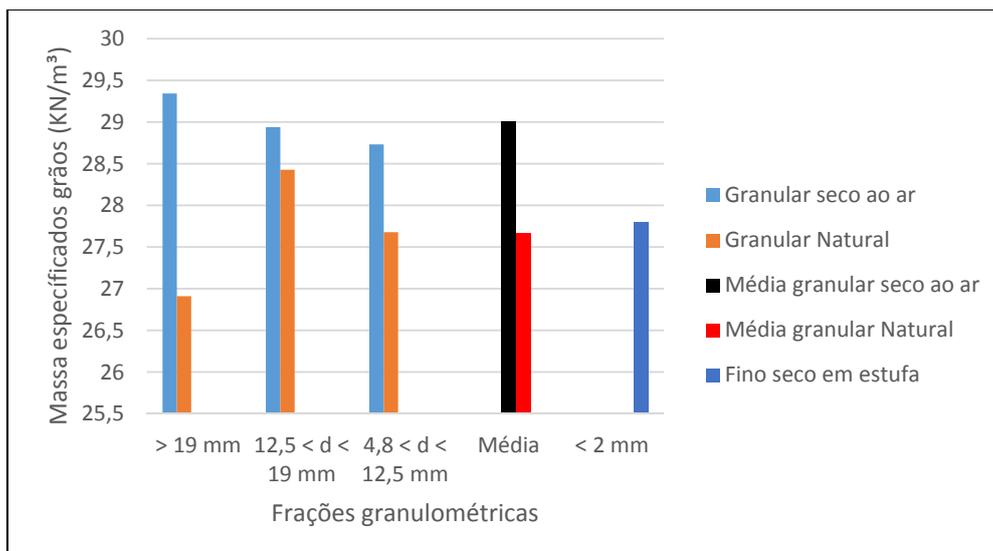


Figura 4. 4 - Peso específico dos grãos do solo estudado.

A Figura 4.5 apresenta os resultados de absorção obtidos para amostras secas ao e na umidade natural. Esses resultados mostram que a absorção medida no solo natural é maior que a medida no solo seco ao ar o que corrobora com a hipótese de que os vazios desidratados quando da secagem ao ar não são ao todo saturados com a imersão por 24 horas, enquanto no solo natural eles tendem a permanecer saturados antes, durante e após a imersão.

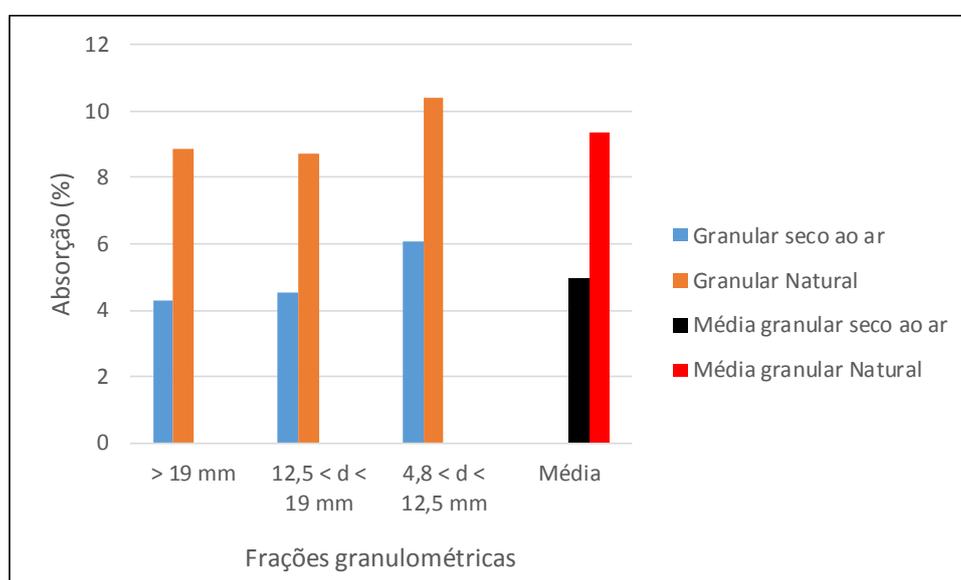


Figura 4. 5 - Absorção do solo estudado

A Figura 4.6 apresenta os resultados de massa específica aparente do grãos em função das frações granulométricas. Observa-se que tanto nas amostras secas ao ar como nas amostras naturais os resultados variam pouco sendo, no entanto, maiores para o solo seco

ao ar o que mais uma vez reflete a influência do estado de saturação dos vazios presentes nos agregados.

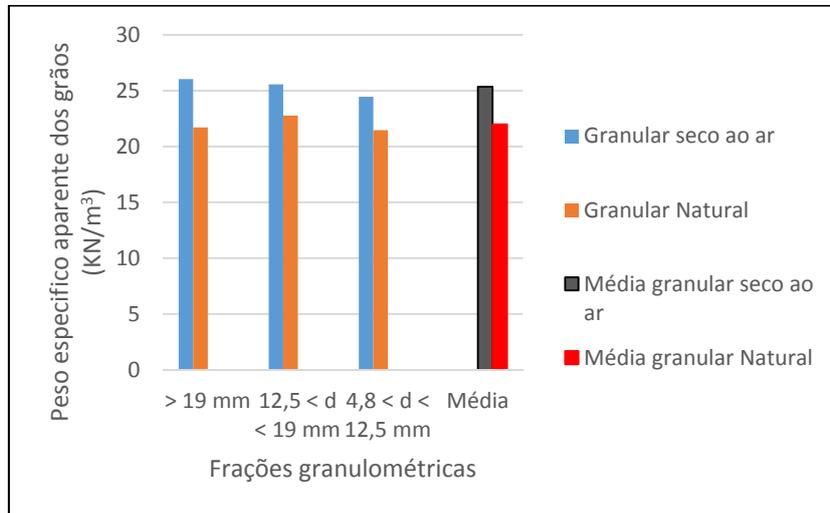


Figura 4. 6 - Peso específica aparente dos grãos do solo estudado.

As Figura 4.7 e 4.8 mostra que existe uma boa correlação entre a massa específica aparente e a absorção medida nos grãos das diferentes faixas granulométricas consideradas no estudo. Embora continue existindo correlação entre a massa específica dos grãos e a absorção ao se considerar as diferentes faixas granulométricas a maior dispersão dos resultados remete à necessidade de estudos estatísticos e de mineralogia das diferentes frações granulométricas, o que não será objeto dessa dissertação.

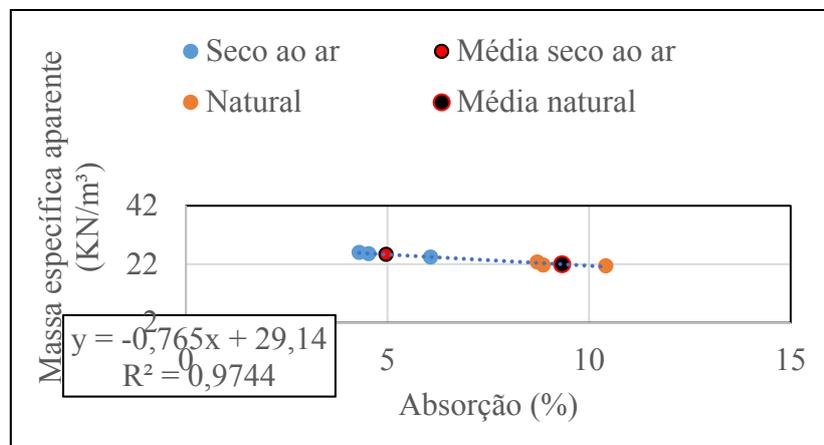


Figura 4. 7 - Relação massa específica aparente dos grãos x absorção.

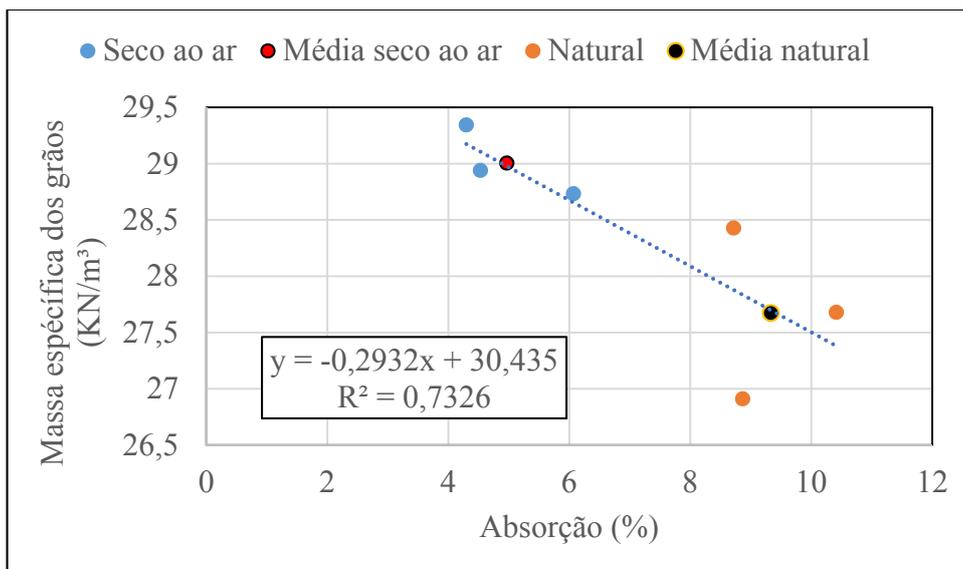


Figura 4. 8 - Relação massa específica dos grãos x absorção

Ao longo dessa dissertação se fará quando necessário referência e uso do peso específico dos grãos do solo seco em estufa ( $27,8 \text{ KN/m}^3$ ) quando se tratar da matriz fina ( $d < 2 \text{ mm}$ ) e do peso específico dos grãos média do solo seco ao ar quando se tratar do uso do solo granular, ou seja, com diâmetro de grãos inferior a  $19 \text{ mm}$  nesse caso a média adotada será igual  $29,01 \text{ KN/m}^3$ .

#### 4.3.2 Granulometria do solo estudado

Foram utilizados o material em dois estados, um compreendendo a amostra total e o outro compreendendo apenas a fração fina com diâmetro inferior a  $2 \text{ mm}$ , ou seja, nesses caso o material passando na peneira de número 10. Observando os ajustes de norma quanto a textura do solo granular (amostra total) e textura que foi também adotada para os ensaios de compressão simples devido as dimensões dos corpos de prova ( $D = 10 \text{ cm}$  e  $H = 20 \text{ cm}$ ), foram feitas as correções granulométricas recomendadas, sendo que em todos os casos usou-se amostras com diâmetro máximo inferior a  $19 \text{ mm}$ . Analisou-se ainda a textura do solo em estado natural, ou seja, sem secagem prévia ao ar, para se averiguar a influência da secagem na forma da curva granulométrica. A Figura 4.9 apresenta as quatro curvas granulométricas, a do solo como um todo, a do solo ajustada para uso na compactação e nos ensaios de compressão simples e a da matriz fina do solo usada na determinação da curva característica e ensaios de resistência à tração.

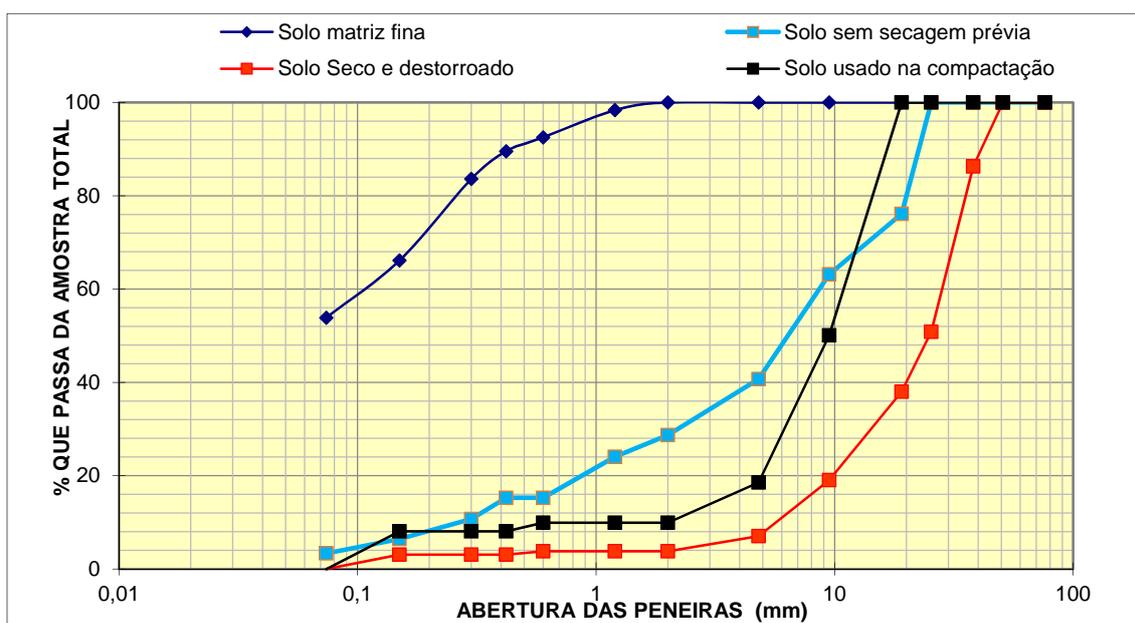


Figura 4. 9 - Curvas Granulométricas do material estudado.

Observa-se ao comparar os resultados obtidos para a amostra global com e sem secagem prévia que a secagem confere certa estabilidade aos agregados o torna texturalmente mais uniforme. Essa constatação é importante, pois tal tratamento pode também induzir diferenças de comportamento entre o laboratório e o campo.

### 4.3.3 Limites de Atterberg

A Tabela 4.2 apresenta os Limites de Liquidez ( $W_L$ ), os Limites de Plasticidade ( $W_p$ ) e os Índices de Plasticidade ( $I_p$ ) obtidos para as amostras de solo natural e com as misturas solo e cinza e solo, cinza e cimento. Os ensaios foram efetuados logo após a mistura na condição de umidade higroscópica. Dos resultados apresentados nessa tabela observa-se que a CCA tende a diminuir o índice de plasticidade. Considerando-se a mistura solo-CCA-cimento não se vislumbra claramente uma tendência de influência sobre os limites de Atterberg e por consequência sobre o índice de plasticidade.

Na Figura 4.10 é possível uma melhor análise comparativa entre os resultados de índice de plasticidade obtidos. Nela se observa a tendência da CCA gerar uma redução no  $I_p$  na medida em que é aumentado o seu teor de incorporação ao solo.

Tabela 4. 2 - Índice de plasticidade

Misturas	Teor de	Teor de	Teor de	WL (%)	WP (%)	IP (%)
	solo (%)	cinza(%)	cimento (%)			
M.0	100,00	0,00	0,00	22	16	5
M.98.2	98,00	2,00	0,00	20	16	4
M.96.4	96,00	4,00	0,00	21	17	3
M.94.6	94,00	6,00	0,00	20	18	1
M.92.8	92,00	8,00	0,00	18	16	2
M.98.1.1	98,00	1,00	1,00	19	17	2
M.96.2.2	96,00	2,00	2,00	20	16	4
M.94.3.3	94,00	3,00	3,00	21	17	4

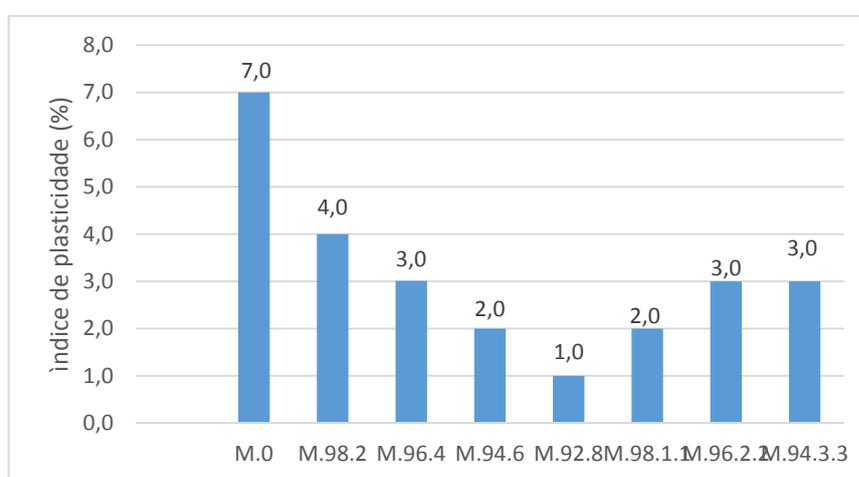


Figura 4. 10 - Influência dos aditivos CCA e CCA + Cimento no Índice de plasticidade do solo.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam as curvas de fluidez obtidas para as misturas com CCA e com CCA mais cimento em relação à obtida para o solo natural. Se na maioria dos casos um paralelismo entre elas sendo que apenas para 8% de CCA e 1% de CCA mais 1% de cimento ocorrem variações significativas nas declividades das curvas o que aponta para a necessidade de mais ensaios para confirmar tal mudança e análises químicas complementares em especial no que tange aos cátions trocáveis. O paralelismo das curvas aponta para semelhança na interação água – partículas de argila. Esperava-se maior interferência no caso do cimento, no entanto, tal interferência não foi observada.

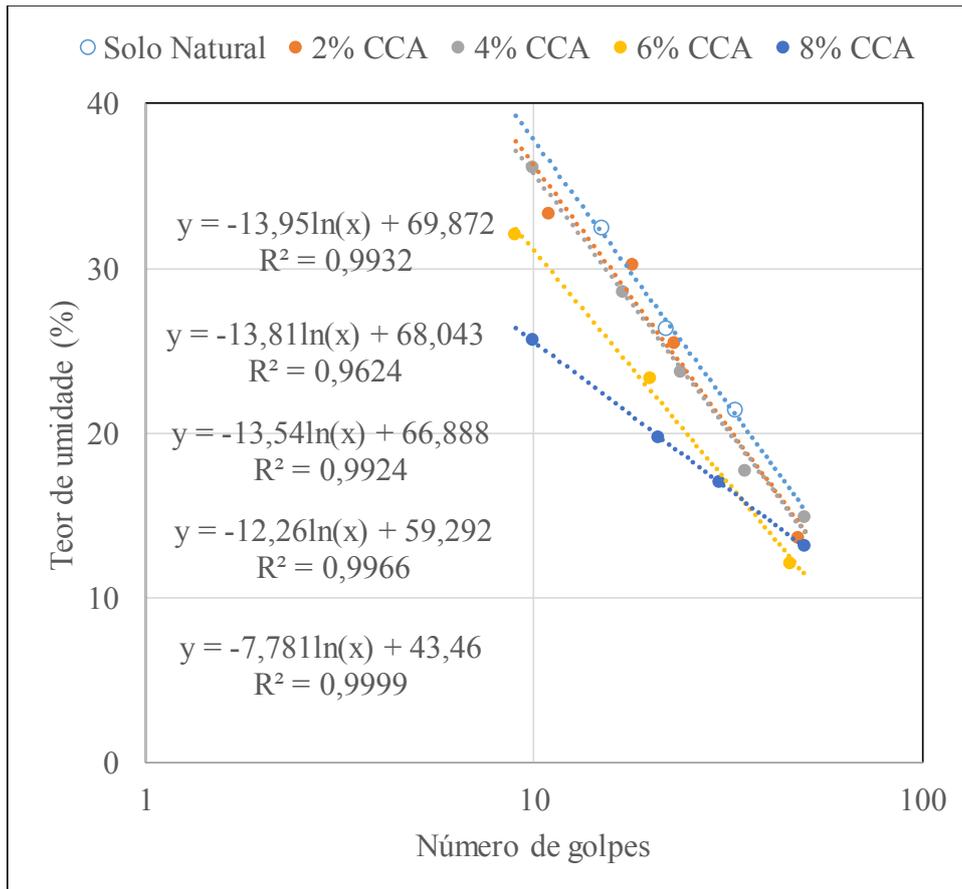


Figura 4. 11 - Curvas de fluidez das misturas solo – CCA.

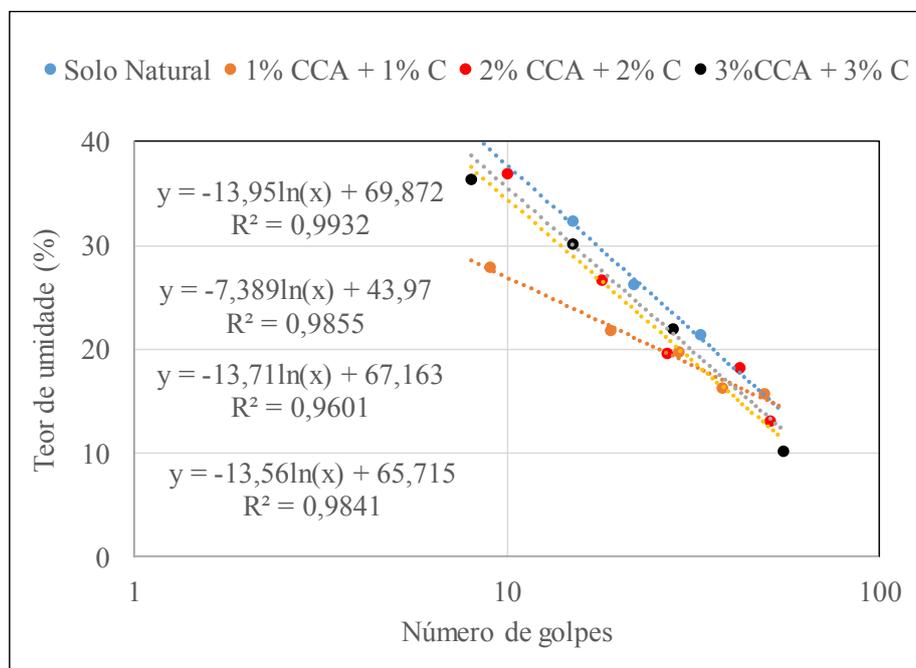


Figura 4. 12 - Curvas de fluidez das misturas solo – CCA – Cimento.

Buscando um melhor entendimento dos resultados foram realizados ensaios de pH para o solo natural e destorroado e para misturas com os teores máximos usados de CCA (8%) e de CCA mais cimento (3% de CCA + 3% de cimento). Os resultados são mostrados na Tabela 4.3. Observa-se que o destorroamento do solo natural aumentou no sentido negativo o  $\Delta$ pH do solo apontando para a liberação de argilominerais.

O ponto de carga zero (PCZ) obtido para o solo natural foi igual a 4,77, valor este inferior ao do pH do solo em água (5,11) o que indica que como a incorporação da CCA e da CCA mais cimento ampliam o pH do solo, não ocorre tendência à sua desagregação oriunda da incorporação dos aditivos, pois estas não levariam as misturas a passarem pelo ponto de carga zero. No entanto, quando do destorroamento o PCZ do solo natural passa a 6,62 surgindo a possibilidade de desagregação do solo e alteração nos limites de Atterberg e no próprio comportamento hidromecânico do solo. Sendo assim, um eventual maior manuseio do solo poderia explicar as alterações nas curvas de fluidez das misturas contendo 8% de CCA e 1% de CCA mais 1% de cinza. Tais constatações abrem espaço para a necessidade de mais estudos, pois o processo dispensado no tratamento das misturas pode levar a alteração do comportamento.

Tabela 4. 3 - pH do solo e das misturas com CCA e CCA mais cimento.

Misturas	pH amostra natural			pH amostra destorroada		
		KCL	$\Delta$ pH		KCL	$\Delta$ pH
M.0	5,11	4,94	-0,17	5,07	3,52	-1,55
M.92.8	7,38	6,08	-1,30	7,03	5,63	-1,40
M.94.3.3	12,53	12,41	-0,12	12,51	12,44	-0,07

A acidez do solo está ligada a sua mineralogia e o  $\Delta$ pH nos solos tropicais geralmente está associado à relação composicional entre os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio e o teor de argilominerais. A Figura 4.13 mostra que os  $\Delta$ pH do solo natural e da mistura do solo com CCA enquadra-se dentro da tendência que se observa dos resultados apresentados por Valentim da Silva *et al.* (2008) ao se relacionar esse parâmetro com relação entre o teor de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio dividido pelo teor de caulinita, argilomineral geralmente predominante nos solos tropicais profundamente intemperizados. O ponto obtido para a mistura do solo com CCA mais 3% de cimento Portland fugiu, como se era de esperar, à tendência observada.

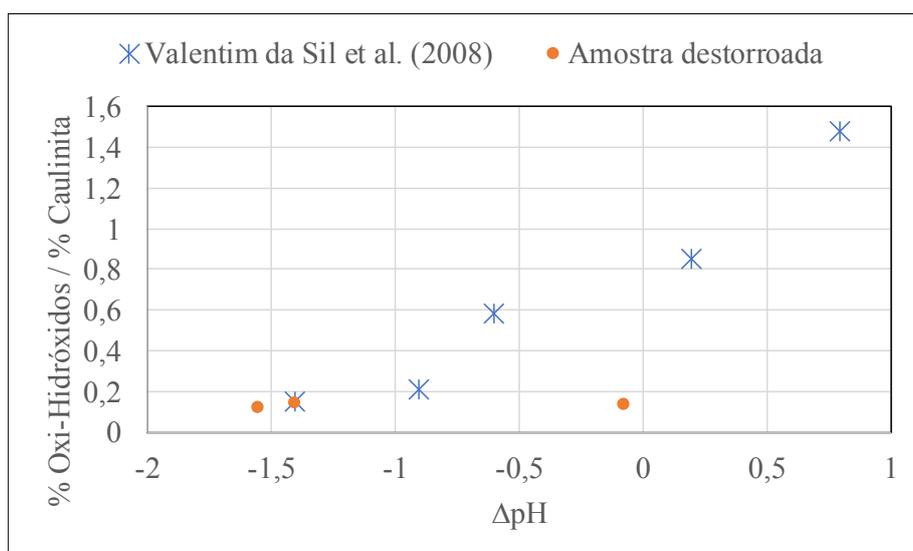


Figura 4. 13 -  $\Delta$ pH em função do teor de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio dividido pelo teor de caulinita

## 4.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

### 4.4.1 Curvas de compactação

A Figura 4.14 apresenta para o solo granular as curvas de compactação do solo no estado natural e com adição de 2%, 4%, 6% e 8% de cinza de casca de arroz (CCA). Os resultados obtidos para as misturas solo – CCA – Cimento estão apresentados na Figura 4.15.

Algumas questões devem ser levantadas a partir dos resultados obtidos e apresentados nessas duas figuras para maior reflexão. A primeira delas diz respeito aos graus de saturação correspondentes as linhas ótimas da amostra natural e das amostras com a adição de CCA e de CCA mais Cimento. No caso do solo em estado natural entende-se que o grau de saturação correspondente à linha ótima é baixo (aproximadamente 81%). Esse valor pode ser explicado com base nos resultados dos ensaios de absorção que mostraram que enquanto no solo natural sem secagem ao ar a absorção média do solo granular foi de 9,33% no solo com secagem ao ar ela foi de 4,97%, ou seja, grande parte dos vazios internos aos agregados não se saturaram.

Segundo Camapum de Carvalho (2017) a umidade que comanda a compactação e o próprio comportamento mecânico é a umidade presente nos poros interagregados, logo,

esses poros estarem ou não saturados interferem pouco na compactação. É importante destacar que no processo de compactação parte dos agregados serão destruídos e essa absorção certamente diminuirá no solo como um todo, mas mesmo assim, ela indica que o grau de saturação dos macroporos seria superior aos 81% obtidos, carecendo de mais estudos a respeito do assunto.

Ainda segundo Camapum de Carvalho (2017), a observação segue a mesma linha de raciocínio, sendo provável que tanto a adição de CCA como de CCA mais cimento ao solo previamente ao umedecimento para compactação bloqueia parcialmente a entrada de ar nos microporos presentes nos agregados fazendo com que a umidade dos macroporos entre agregados se torne artificialmente maiores e que por consequência globalmente se necessite de menos água para que se atinja a umidade ótima. Ambas as reflexões são importantes, pois indicam a necessidade de maiores cuidados nos estudos de laboratório em relação à execução dos serviços em campo.

Constata-se nessas figuras que as umidades ótimas das misturas encontram-se aproximadamente com o mesmo grau de saturação destacando-se que para o teor de 8% de CCA foi feita uma interpolação polinomial dos resultados para verificar se também para esse teor a umidade ótima se enquadrava na mesma tendência de linha ótima das demais misturas

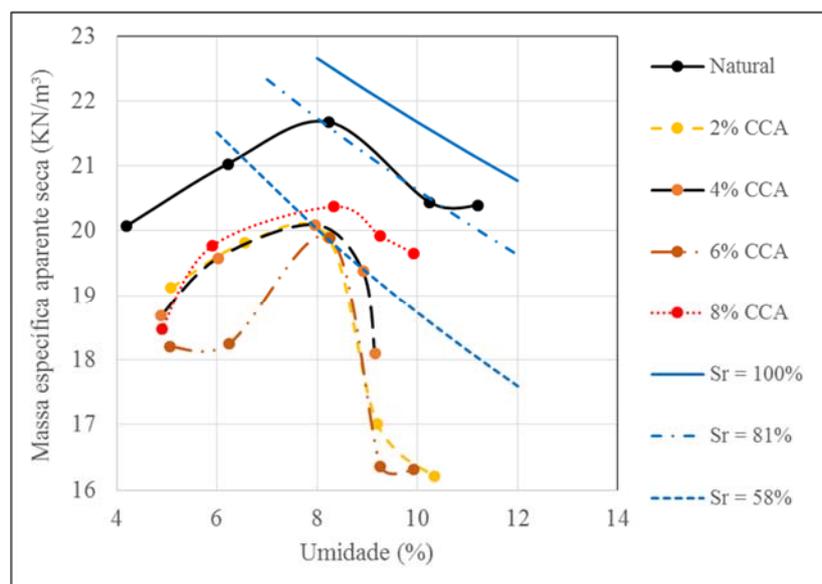


Figura 4. 14 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA

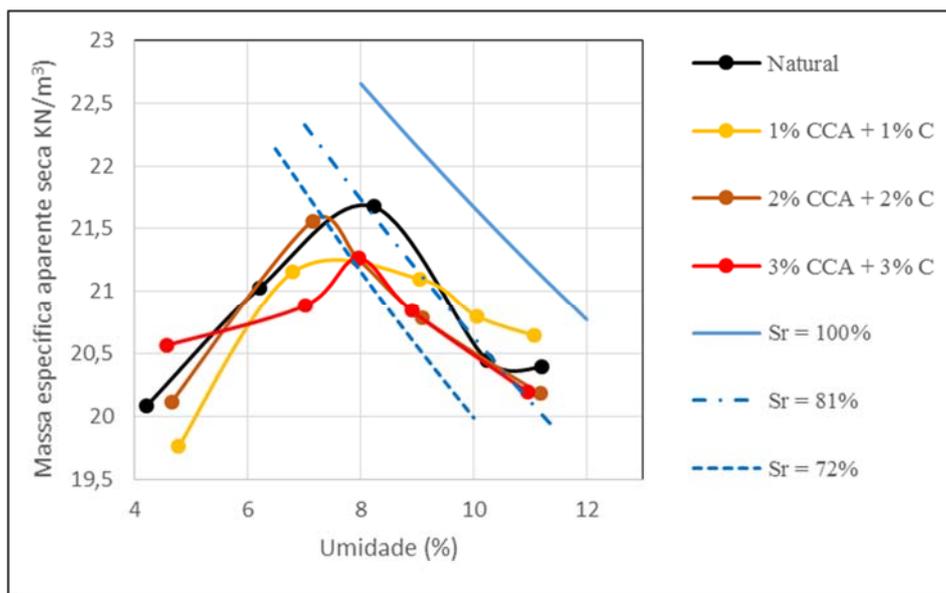


Figura 4. 15 - Curva de compactação do solo natural e das misturas solo - CCA - cimento.

Analisando-se agora o comportamento das misturas comparativamente ao solo natural verifica-se uma redução do peso específico aparente seco das misturas tanto com a cinza de casca de arroz (CCA) como de CCA mais cimento. Entretanto, a presença de certa aleatoriedade nas curvas em função do teor de aditivo dificulta ligar essa redução físico-quimicamente à presença dos aditivos. Considerando-se o fato de que a umidade ótima corresponde à oclusão da fase ar, a inclinação do ramo seco da curva de compactação varia com a variação da sucção, com a quebra de agregados e com o efeito lubrificador da água e a inclinação do ramo úmido é função da geração de pressão neutra positiva quando da compactação chega-se as seguintes ponderações:

Como a umidade ótima de um modo geral, exceto para 2% de CCA mais 2% de cimento, variou pouco diminuindo o grau de saturação porque os pesos específicos aparentes secos diminuíram nas misturas, depreende-se que houve uma redução da entrada de água nos microporos dos agregados fazendo com que nos macroporos o grau de saturação se elevasse. Outros efeitos podem ainda atuarem como, por exemplos, a interação da CCA e da CCA mais Cimento com a água e a menor quebra de agregados devido a menor absorção de água pelos mesmos;

Apesar de alguns pontos gerarem alterações no ramo seco de algumas curvas (6% de CCA e 2% de CCA mais 2% de cimento), pode-se dizer que houve uma tendência a não modificação da inclinação do ramo seco com o teor de aditivo em relação ao solo natural,

ou seja, o deslocamento do ramo seco se deve provavelmente à interações entre os aditivos e o solo dificultando a compactação um vez que a quantidade de água disponível nos macroporos tenderia a se tornar maior facilitando a compactação e não dificultando-a como parece ser o caso;

Nas misturas com CCA o ramo úmido das curvas, exceto para 8% tende a ser mais íngreme que para o solo natural o que aponta para uma maior geração de pressão neutra positiva durante a compactação. Já nas misturas com CCA mais Cimento observa-se tendência contrária a essa para todas as misturas em relação ao solo natural apontando para uma menor geração de pressão neutra positiva o que pode estar ligado a trocas catiônicas ou a certa ação agregadora do cimento provocando assim menor geração de pressão neutra positiva com o aumento do teor de umidade. Cabe aqui lembrar que as análises feitas sobre o PCZ do solo natural indicaram que a adição de CCA e de CCA mais cimento não favorecem a desagregação do solo sendo por consequência cabível o fenômeno de agregação.

#### **4.4.1 Curva de compactação dinâmica da matriz fino do solo**

Foi realizada compactação dinâmica com equipamentos da metodologia MCT para o solo fino ( $d < 2,00\text{mm}$ ), energia equivalente ao Proctor intermediário, de corpos de prova para determinação da sucção atuando na matriz fina do solo quando compactado na mesma faixa de umidade do solo granular natural e das misturas granulares. Logo, nesse item são apenas mostrados os resultados dessas compactações considerando-se a forma de apresentação das curvas de compactação.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam respectivamente os resultados obtidos para o solo fino natural e misturas solo - CCA e para o solo fino natural e misturas solo – CCA – Cimento. Observa-se para as misturas com CCA a presença de uma condição ótima para misturas entre 8% e 10% de umidade, não sendo no entanto possível estabelecer uma relação entre o teor de CCA e a umidade ótima. Para o solo natural, embora apareça um pico nesse intervalo não é possível afirmar que ele corresponde a uma condição ótima, pois a massa específica do último ponto supera a desse pico. Para as misturas do solo com CCA mais Cimento embora apareça um pico entre 8% e 10% de umidade para a mistura solo – 3% CCA – 3% cimento, nos demais casos não aparece a definição de uma condição ótima.

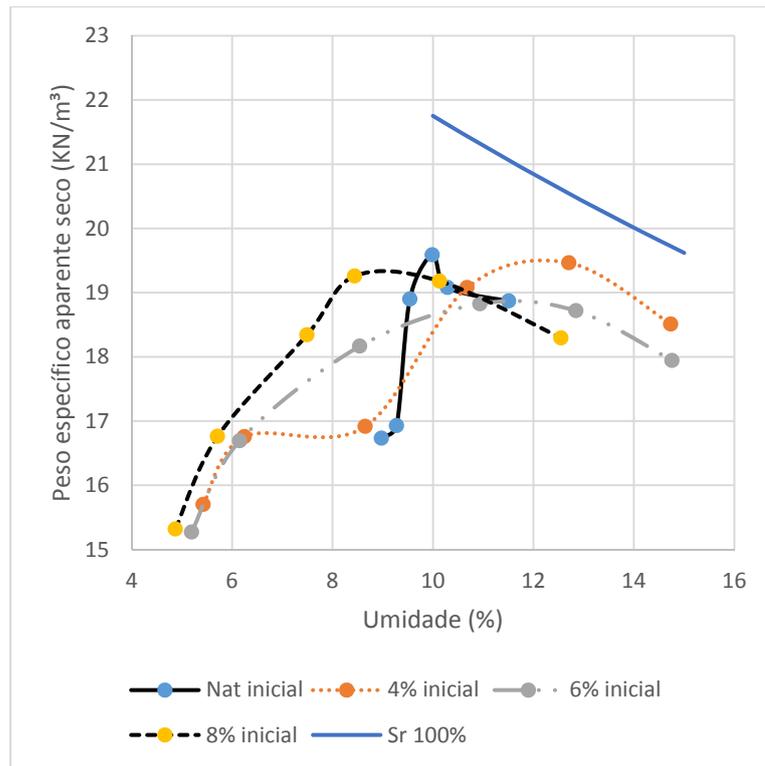


Figura 4. 16 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA.

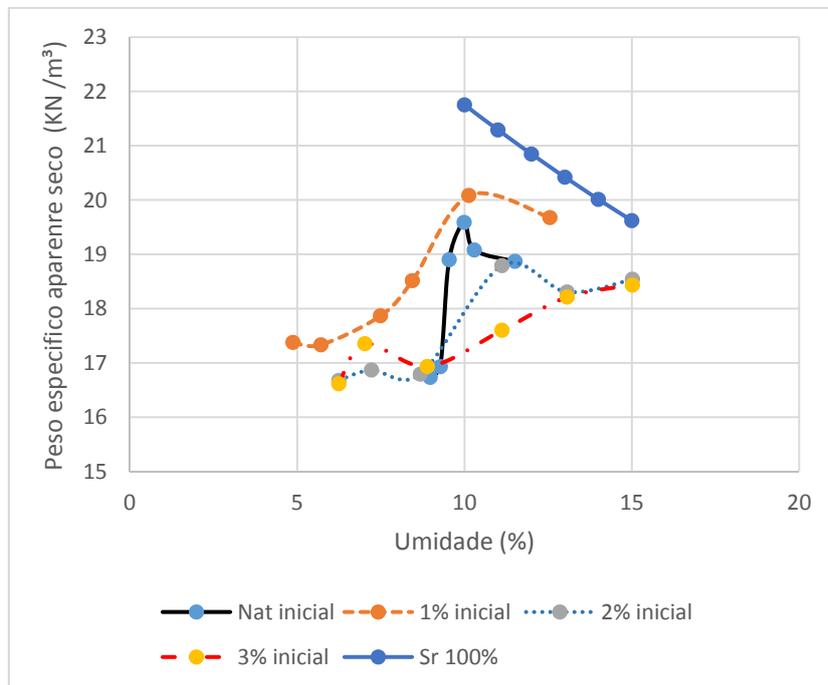


Figura 4. 17 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA - Cimento

As Figuras 4.18,4.19 e 4.20 apresentam os resultados e a sobreposição dos resultados obtidos para o solo fino e misturas com o solo fino em relação às curvas de compactação obtidas para o solo granular e misturas com o solo granular.

No solo fino e nas misturas do solo fino com CCA se verifica uma tendência à diminuição da massa específica aparente seca máxima e ao aumento do teor de umidade ótimo em relação aos resultados obtidos para o solo granular. Embora tratando-se de um mesmo solo e de misturas semelhantes, tal resultado já seria esperado tendo em vista que ao se alterar a textura se modifica também a distribuição de poros e por consequência de ambas também é modificado o potencial de retenção de água pela matriz de solo e sua resposta à energia de compactação.

Outro aspecto relevante diz respeito à diferenças entre os métodos de compactação adotados para o solo granular e o solo fino, embora ambos consistam da aplicação de energia dinâmica. Na metodologia Proctor o diâmetro do soquete de compactação é inferior ao diâmetro do molde e os golpes distribuídos sobre a camada em processo de compactação, já na metodologia MCT o diâmetro do soquete é semelhante ao molde. Ao se analisar os resultados obtidos para as misturas solo – CCA – cimento observa-se um maior distanciamento dos resultados obtidos para o solo fino em relação ao solo granular, no entanto, essa diferença advém do comportamento registrado para o solo granular, pois, respeitada a dispersão entre eles, os resultados obtidos para essa mistura no solo fino guarda similaridade com os resultados obtidos para as misturas apenas com CCA, ou seja, aparentemente o tipo de aditivo não estaria tendo impacto marcante sobre o resultado da compactação do solo fino o que guarda coerência com a proximidade desses resultados com o do solo fino natural.

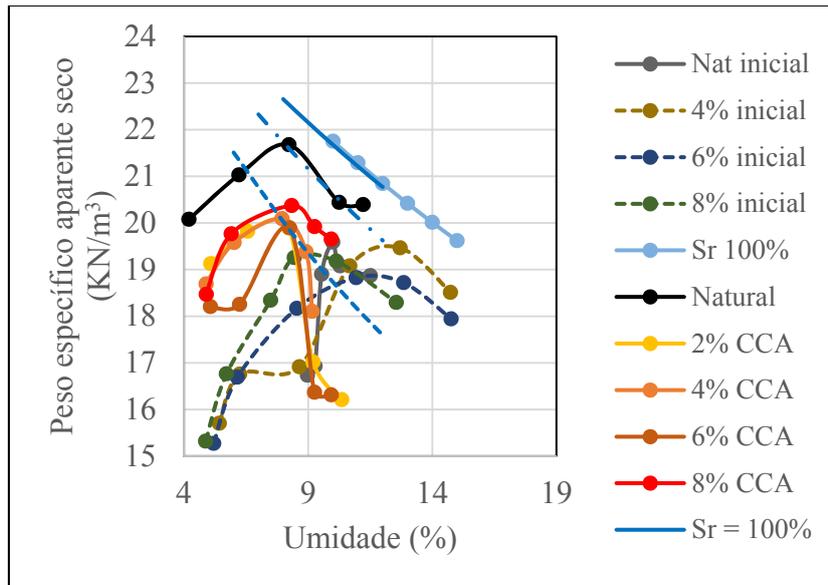


Figura 4. 18 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA.

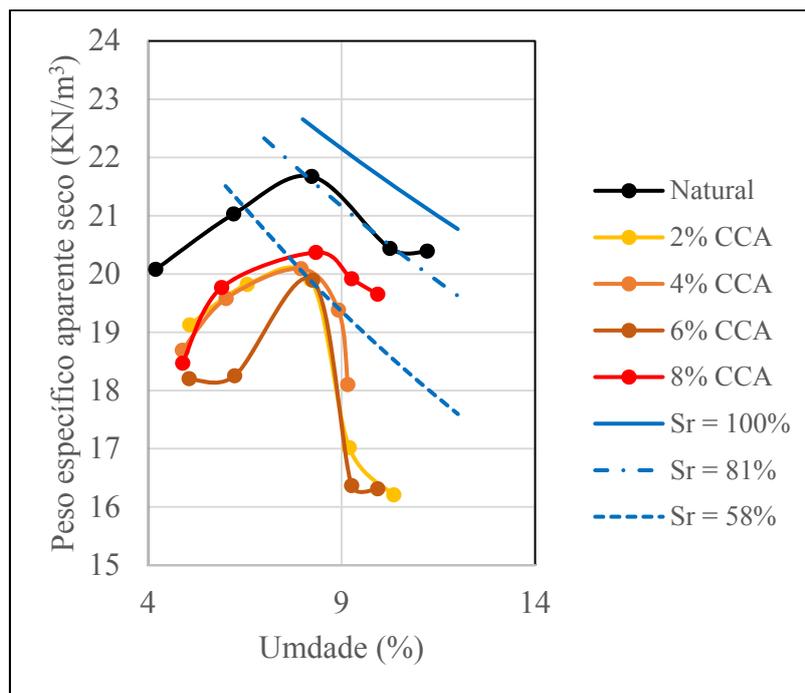


Figura 4. 19 - Curvas de compactação das misturas solo - CCA

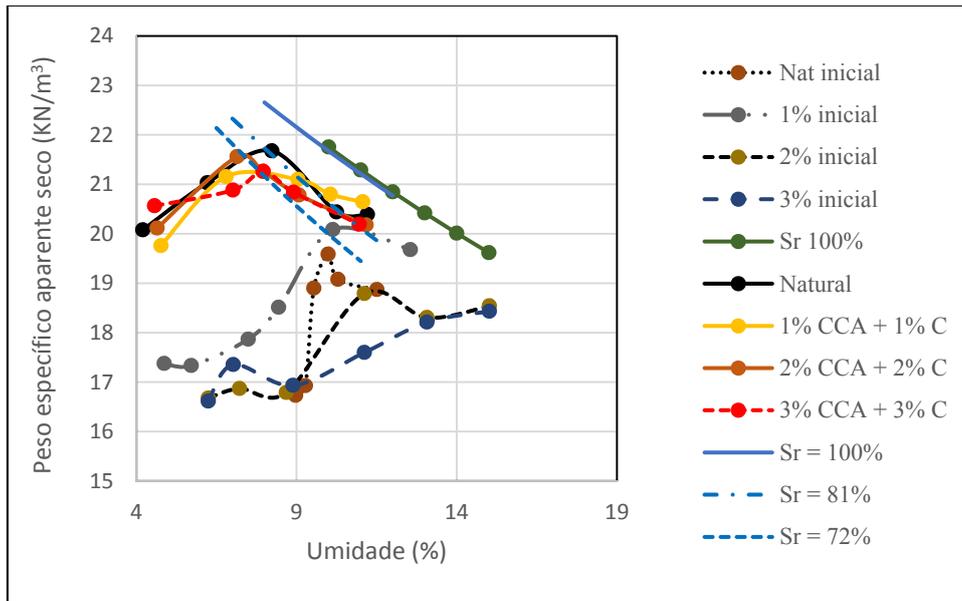


Figura 4. 20 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA - Cimento

#### 4.4.3 Ensaio de sucção

Embora as determinações das sucções não constituam um estudo do comportamento mecânico os resultados serão aqui analisados por guardarem no presente caso uma relação com a compactação do solo tratada nesse item, e também por ter como objetivo subsidiar o estudo do comportamento mecânico do solo natural e das misturas.

A Figura 4.21 apresenta as curvas características obtidas para o material granular usado na compactação, ensaios de CBR e ensaios de Compressão Simples. Para obtê-las utilizou-se o método proposto por Arya & Dierolf (1989) citado por Santos *et al.* (2015). Esse método se fundamenta na física do solo, ou seja, faz a avaliação em termos de capilaridade. Nessa figura são apresentadas duas curvas uma obtida com base no índice de vazios global do solo ( $e=0,269$ ), ou seja, englobando os microporos existentes nos agregados e os macroporos presentes entre eles. A outra curva foi definida considerando-se apenas o macroporos existentes entre os agregados ( $e=0,020$ ). Verifica-se que nesse segundo tratamento dado ao solo, devido a menor porosidade considerada ocorreu um aumento na sucção atuante no solo, no entanto, é provável que tal curva ainda esteja a fornecer valores de sucção inferiores ao real, pois nos cascalhos lateríticos dada a natureza

mineralógica dos minerais que compõem o solo é provável que o efeito adsorativo predomine sobre o capilar.

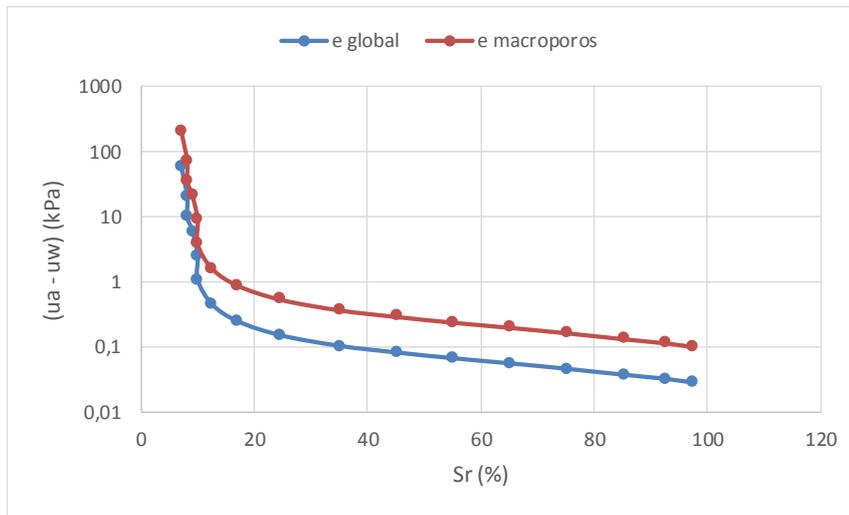


Figura 4. 21 - Curvas características obtidas para o solo natural

Camapum de Carvalho *et al.* (2017) propuseram um método para se estimar a pressão de entrada de ar na curva características dos solos argilosos, ou seja, solos com predomínio de forças de adsorção. Considerando-se esse efeito, ou seja, somando-se ao efeito físico oriundo da estimativa da curva característica a partir da curva granulométrica para o índice de vazios global e a pressão de entrada de ar oriunda da estimativa a partir dos ensaios de plasticidade conforme proposto por Camapum de Carvalho *et al.* (2017), obtém-se a Figura 4.22.

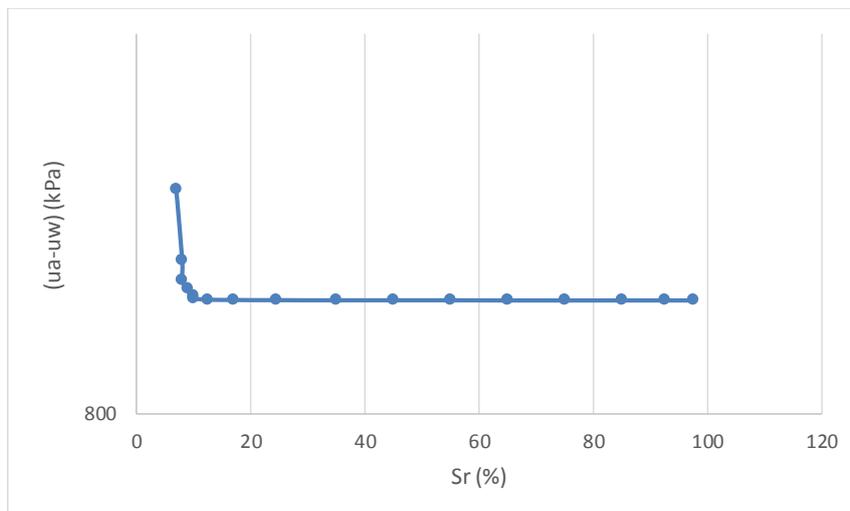


Figura 4. 22 - Curva característica obtida para o solo natural somando-se os efeitos físicos e de forças adsorcivas.

Para o solo fino ( $d < 2 \text{ mm}$ ) foram determinadas as sucções atuantes nos corpos de prova compactados na faixa de umidade adotada para o solo granular e por consequência, com diferentes índices de vazios e provável diferença na distribuição de poros ao se variar o teor de umidade, logo, não é possível considerar os resultados obtidos como curvas características. Apesar dessas considerações optou-se por apresentar os resultados unidos por segmentos de reta de modo a se ter uma ideia comparativa entre as sucções dos diferentes materiais.

Na Figura 4.23 são apresentados os resultados de sucção obtidos para o solo natural e para as misturas solo - CCA analisadas. Essa Figura aponta para a redução da sucção com o aumento do teor de CCA embora as curvas para 6% e 8% se encontrem muito próximas. A análise desses resultados em termos de  $e.pF$  (Camapum de Carvalho e Leroueil 2004), Figura 4.24, confirmam a similaridade entre os resultados obtidos para 6% e 8% de CCA e o fato de que 4% de CCA tende assumir um valor inferior ao solo natural e superior a 6% e 8% de CCA. Destaca-se que para a obtenção da Figura 4.24 considerou-se a mesma distribuição de poros para cada material.

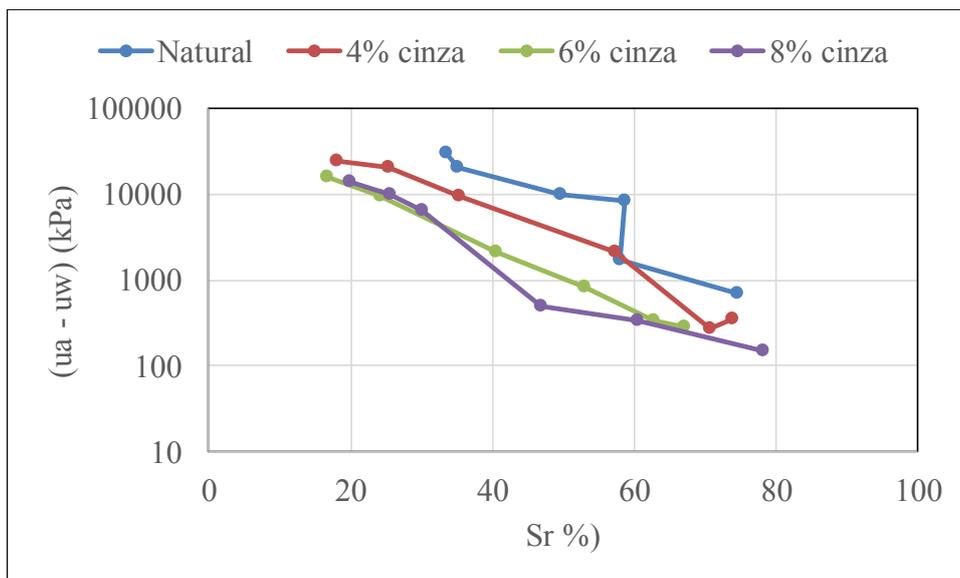


Figura 4. 23 Resultados de medida de sucção no solo natural e nas misturas solo - CCA  
CCA

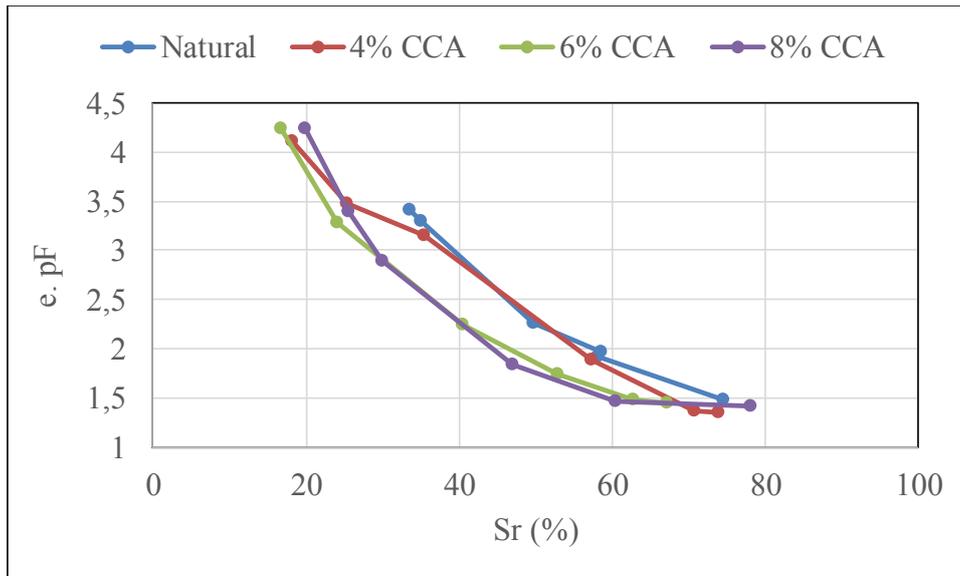


Figura 4. 24 - Resultados de medida de sucção no solo natural e nas misturas solo - CCA.

A Figura 4.25 apresenta os resultados de sucção obtidos para o solo natural e para as misturas solo – CCA – cimento analisadas. Essa figura aponta para a redução da sucção com o aumento do teor de cimento e cinza ficando clara a influência do seu teor na sucção. A análise desses resultados em termos de e.pF (Camapum de Carvalho e Leroueil 2004), Figura 4.26, sugerem que o composto CCA – cimento não afeta de modo claro a sucção do solo, pois a variação das curvas entre elas não guardam uma relação com o teor do composto.

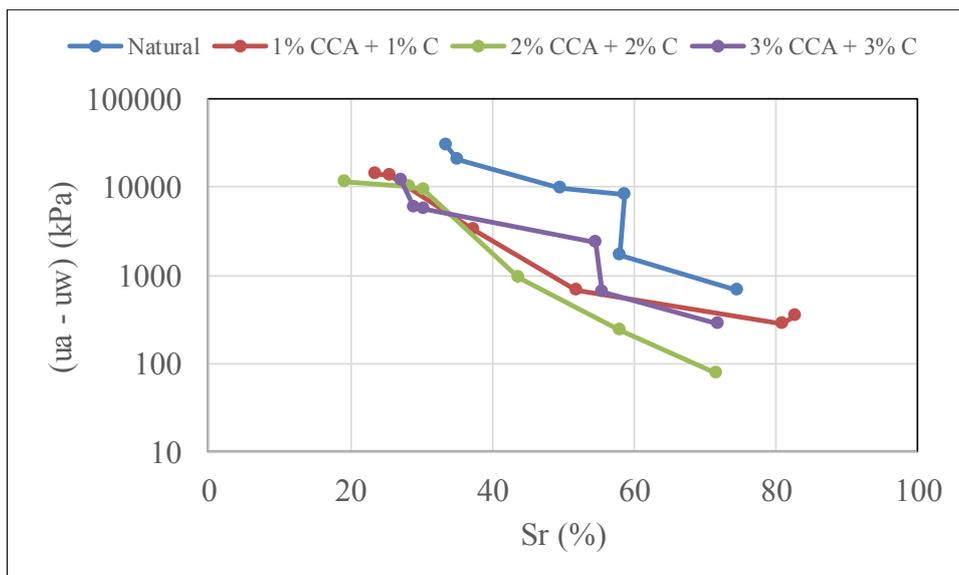


Figura 4. 25 - Resultados de medida de sucção no solo natural e nas misturas solo – CCA - Cimento.

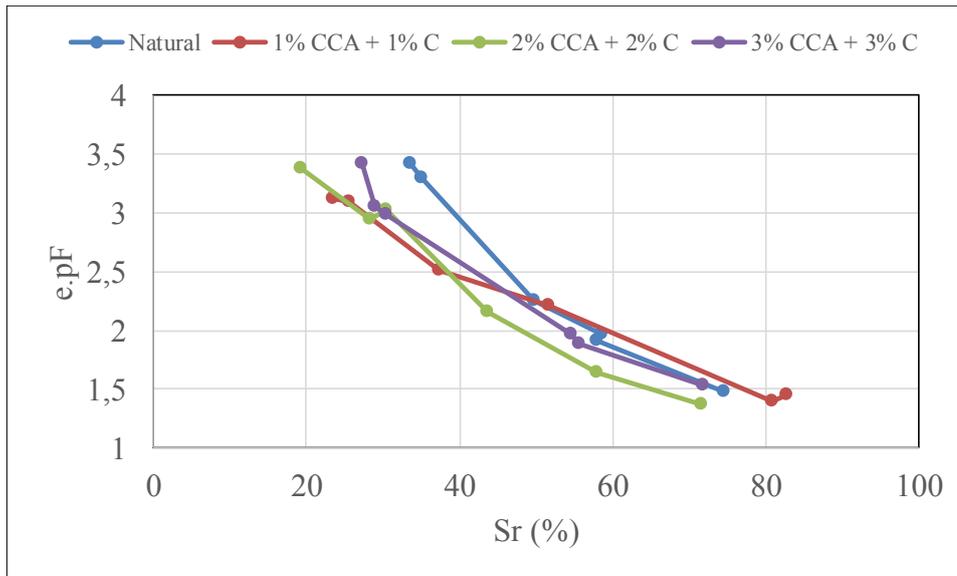


Figura 4. 26 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo - CCA

A Figura 4.27 apresenta o conjunto de resultados analisado em função do e.pF. Verifica-se nessa figura que para graus de saturação inferiores a 50% ocorre uma tendência ao e.pF das misturas serem inferiores ao do solo natural. Para graus de saturação superiores a este, as misturas contendo cimento, exceto a mistura solo mais 2% de CCA, mais 2% de Cimento, tendem a apresentarem resultados similares ao obtido para o solo natural e essa, e as demais misturas contendo apenas CCA, continuam com valores de e.pF inferiores ao solo natural.

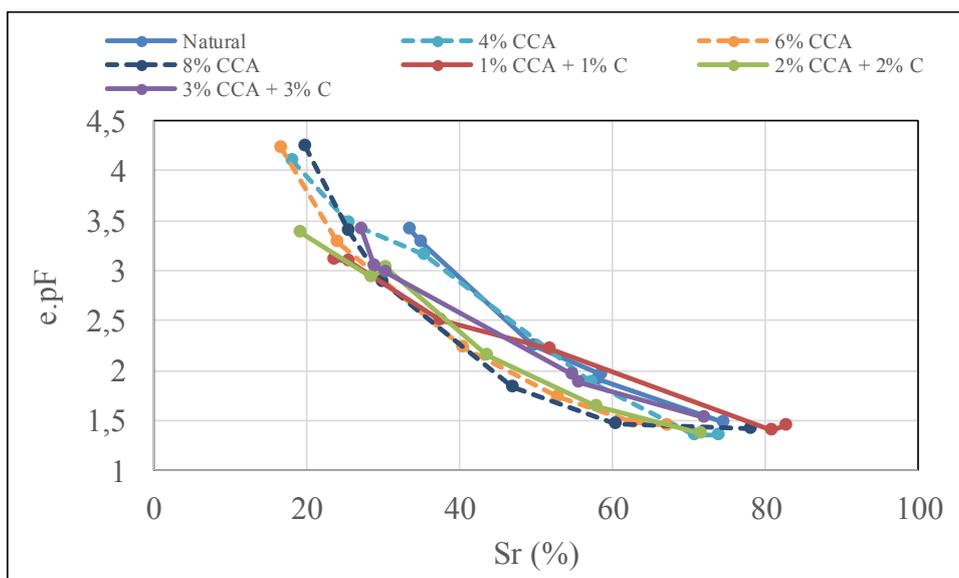


Figura 4. 27 - Curvas características transformadas do solo natural e do conjunto de misturas.

Considerando-se agora a estimativa da pressão de entrada de ar levando-se em conta os valores estimados a partir dos limites de plasticidade e de liquidez conforme proposto por Camapum de Carvalho *et al.* (2017), verifica-se um bom ajuste desses pontos às curvas experimentais e.pF versus Sr (Figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31) confirmando ser esta uma alternativa viável para ser usada como estimativa na definição da entrada de ar nas curvas características.

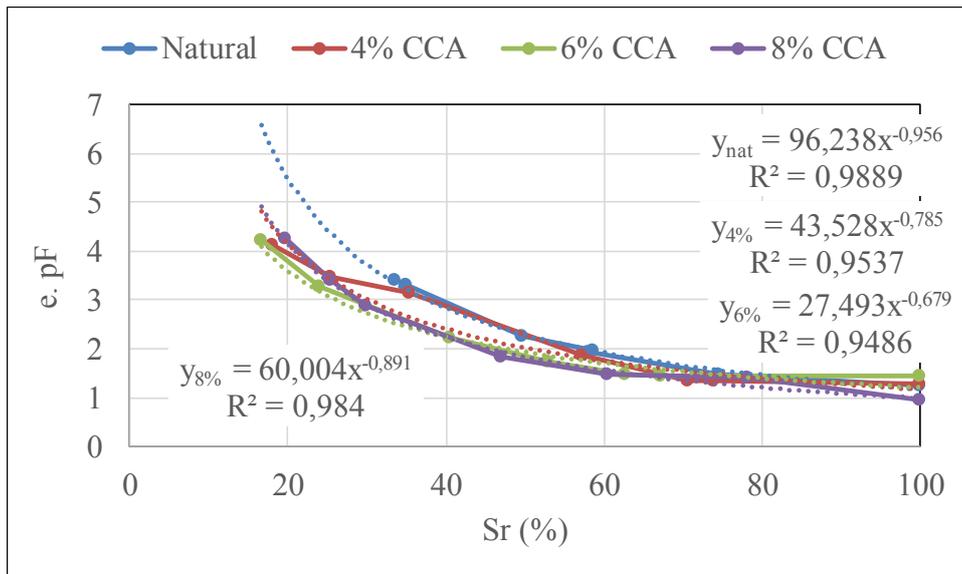


Figura 4. 28 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de wp.

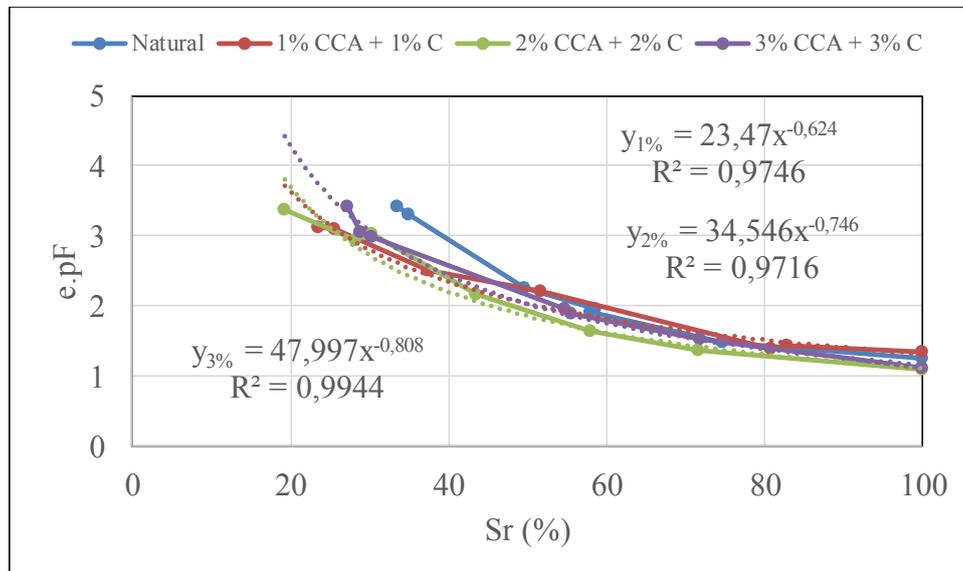


Figura 4. 29 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA -Cimento incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de wp

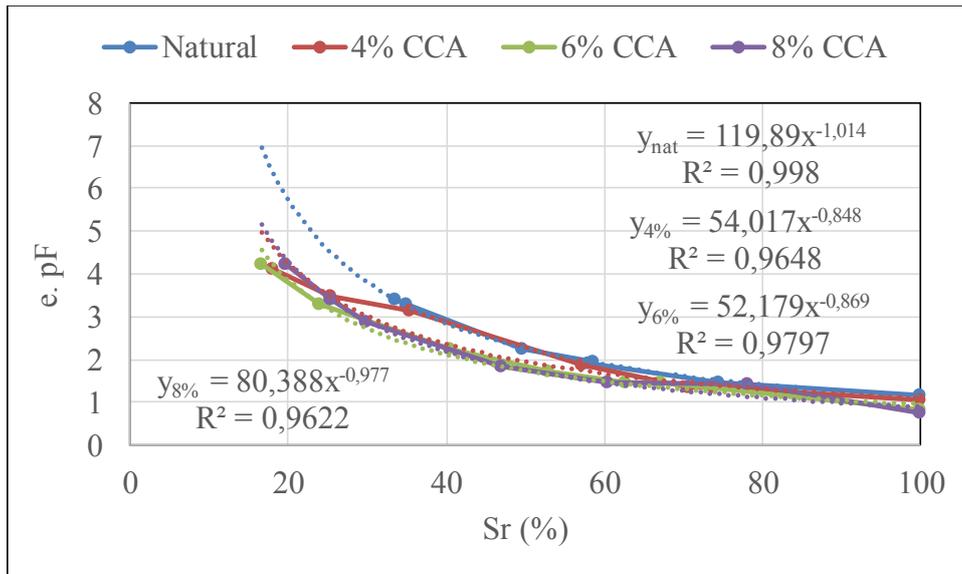


Figura 4. 30 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA -Cimento incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de wp.

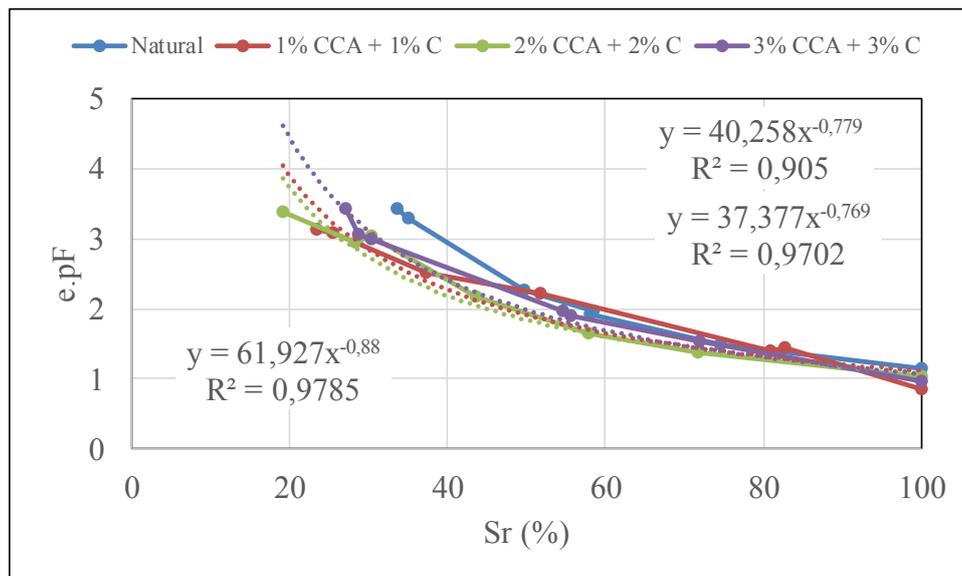


Figura 4. 31 - Curvas características transformadas do solo natural e das misturas solo – CCA incluindo a pressão de entrada de ar estimada a partir de wl.

#### 4.4.4 Ensaio de índice de suporte Califórnia

A avaliação do comportamento do solo diante das misturas com CCA e CCA mais cimento por meio do ensaio ISC foi realizada tomando como base a comparação com o solo natural. Previamente aos ensaios de ISC foram realizados sobre cada corpo de prova ensaios de expansão.

A Figura 4.32 apresenta comparativamente os resultados de ISC os obtidos para o solo natural e para o solo com adição de 2%, 4%, 6% e 8% de CCA com rompimento após quatro dias de cura em imersão. Observa-se que o valor do ISC obtido para o solo natural é superior aos obtidos para as misturas com a cinza da casca de arroz (CCA). Outro aspecto a ser observado é o fato de que o valor máximo de ISC para todas as misturas e para o solo natural encontra-se no ramo seco da curva de compactação.

Os resultados mostrados na Figura 4.32 ainda coloca em evidência os seguintes aspectos considerados relevantes:

A faixa de umidade onde ocorre a queda nos valores de ISC nas misturas com CCA é muito estreita o que forçosamente amplia a necessidade de maior controle tecnológico em campo;

Eliminado o valor de pico todos os demais obtidos para as misturas encontram-se em uma faixa relativamente estreita de ISC (10% a 25%) se comparada ao solo natural (10% a 52%);

Apesar de inferiores os valores obtidos para as misturas em relação ao solo natural no ramo úmido suas variações são menores que para o solo natural, o que pode ser interessante para regiões úmidas;

Comparando-se os máximos valores obtidos para as misturas, o fato de o maior valor nas misturas corresponder ao teor 6% de CCA concorda com os resultados obtidos no ensaio de compressão simples e aponta esse teor como o ideal para o solo estudado.

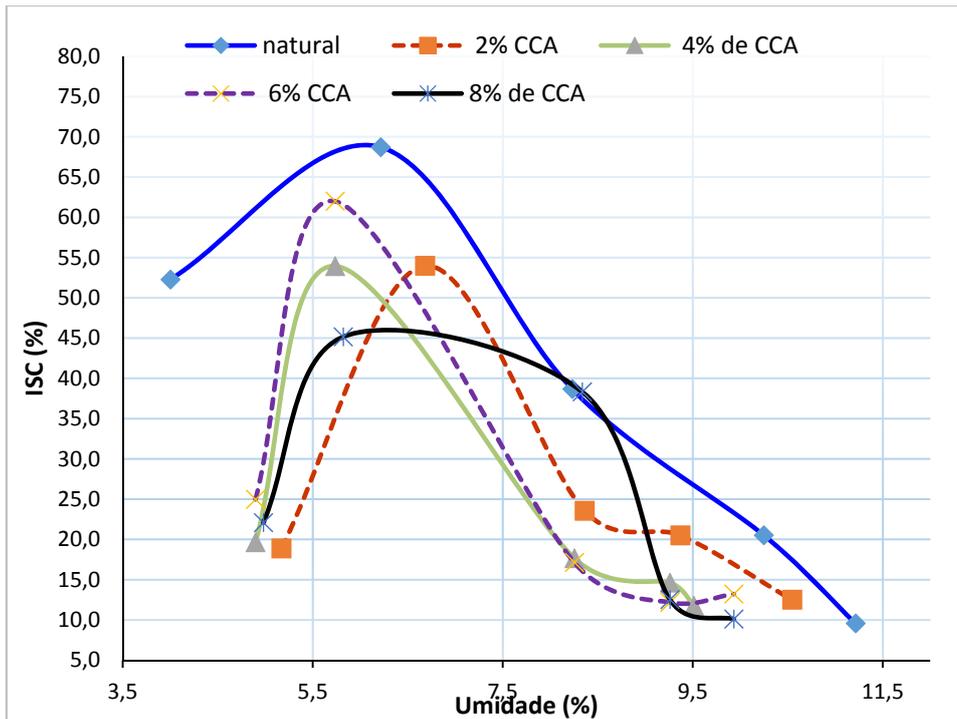


Figura 4. 32 - Resultados de ISC em função da umidade para o solo puro e misturas com CCA.

A Figura 4.33 apresenta os gráficos de expansão em função da umidade de compactação. Observa-se que de um modo geral, exceto alguns pontos correspondentes a 6% de CCA, a expansão diminuiu com o aumento do teor de CCA.

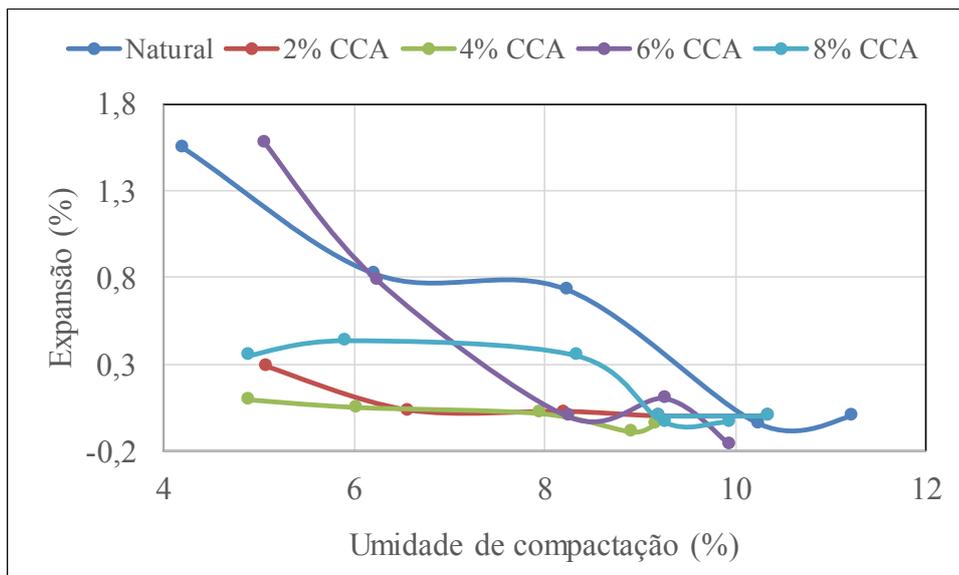


Figura 4. 33 - Resultados de expansão em função do teor de umidade de compactação para o solo puro e misturas solo – CCA.

A Figura 4.34 apresenta os resultados de ISC em função da expansão medida nos corpos de prova. O fato dos valores de maior ISC não corresponderem aos menores valores de expansão registrados para o solo apontam para o fato de que a expansão não se constitui em um problema para o solo puro e para as misturas. Observa-se ainda que as maiores expansões foram registradas para o ramo seco (Figura 4.33) e se deve provavelmente à perda de sucção tendo em vista que o solo não apresenta minerais expansivos sendo que o melhor ISC obtido para o ramo seco está a indicar um maior preservação estrutural dos agregados sendo recomendável em estudos futuros a realização de análises microestruturais do solo compactado com diferentes umidades.

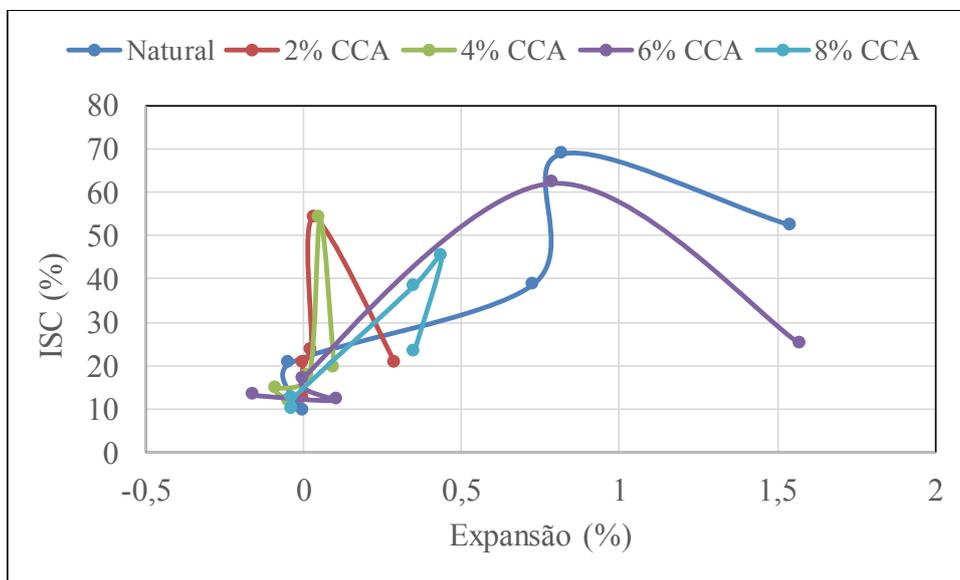


Figura 4. 34 - Resultados de ISC em função da expansão para o solo puro e misturas solo – CCA.

A Figura 4.35 mostra que a adição do composto cinza – cimento amplia de modo significativo o ISC do solo. O fato aponta, apesar do curto período de cura, para a ocorrência de reações pozolânicas na mistura sendo provável que esteja ocorrendo entre a sílica da CCA e o cimento, produzindo então uma melhora na capacidade de suporte do solo estabilizado. Cabe destacar que para o teor 1% de CCA mais 1% de Cimento, apenas um ponto da curva se distanciou dos resultados obtidos para o solo natural o que requer mais estudos e análises para esse teor de aditivos.

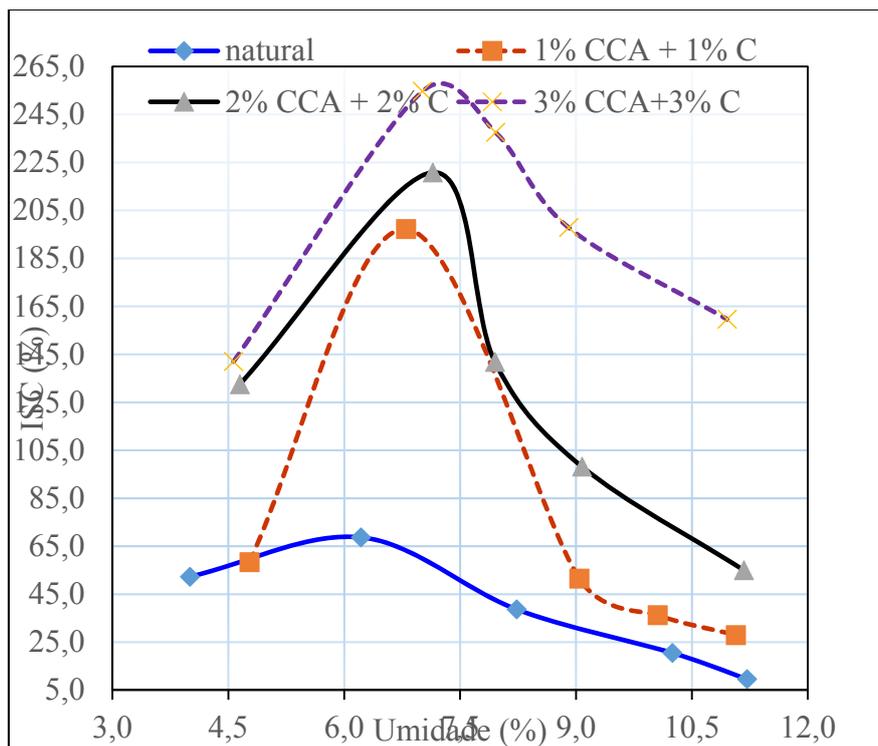


Figura 4. 35 - Resultados de ISC em função da umidade para o solo puro e misturas com CCA

A Figura 4.36 coloca em evidência o fato de que para o solo estudado os maiores valores de ISC obtidos para o solo puro e misturas encontra-se entorno de 60%. Esses resultados sinalizam para a relevância de se atentar para o grau de saturação de compactação.

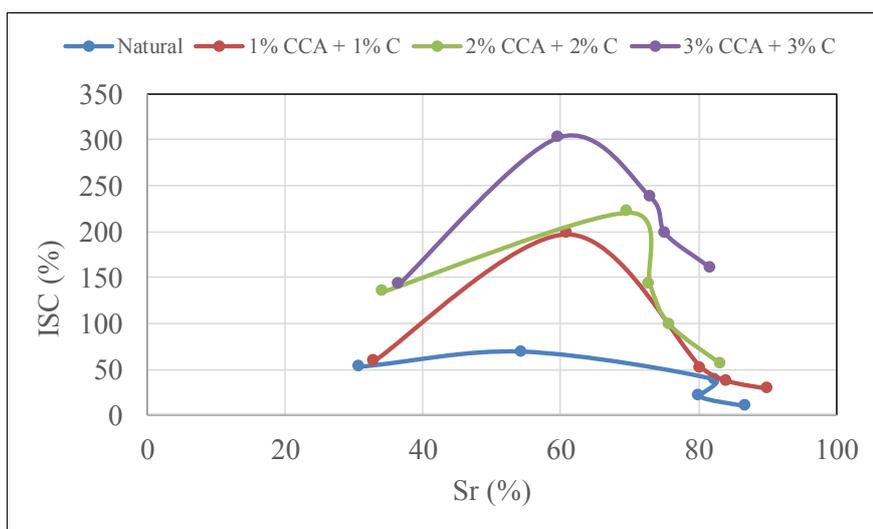


Figura 4. 36 - Resultados de ISC em função do grau de saturação (Sr) para o solo puro e misturas com CCA e cimento.

A Figura 4.37 apresenta os gráficos de expansão em função do teor de umidade. Os resultados mostram que apenas para 2% do composto CCA mais Cimento ocorre tendência a expansão ser menor que a registrada para o solo natural. Não é no entanto possível estabelecer um elo entre a expansão e os resultados de ISC, cabendo destacar que quanto ao quesito expansão faz-se necessário averiguar em cada caso o uso do composto, pois em vários pontos a expansão ultrapassou a tolerância de norma para as camadas que compõem a estrutura de pavimento.

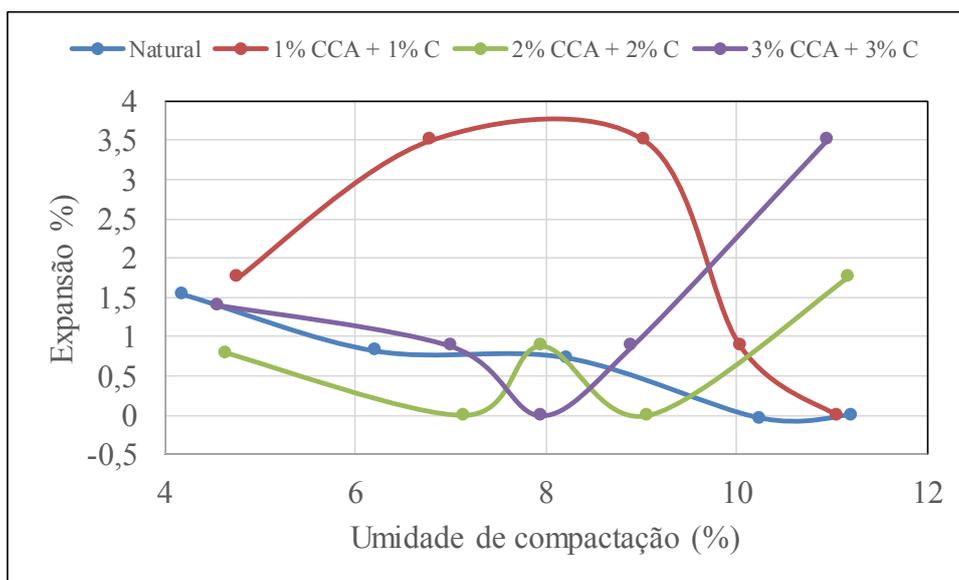


Figura 4. 37 - Resultados de expansão em função do teor de umidade de compactação para o solo puro e misturas solo – CCA - Cimento.

#### 4.4.5 Ensaio de compressão simples

Conforme exposto no capítulo Materiais e Métodos foi utilizado na preparação dos corpos de prova (CP) amostra de solo seca ao ar e passando na peneira com abertura de malha de 19 mm. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCC) com o solo sem mistura, o solo misturado com CCA e o solo misturado com Cinza da Casca de Arroz (CCA) e Cimento (C). No caso do solo com aditivos os ensaios foram realizados com vários percentuais de mistura conforme indicado no capítulo materiais e métodos. Os ensaios foram realizados observando-se dois períodos de cura, 07 e 28 dias, mesmo no caso do solo puro.

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios dos resultados obtidos segundo os quais se poderia estabelecer conclusões, no entanto, para um melhor entendimento dos resultados foram efetuadas várias análises fundamentadas nas figuras apresentadas à seguir onde se considerou o conjunto de resultados e valores médios desprezando-se resultados com mais de 15% de diferença em relação à média. Cabe destacar que a fixação dessa diferença se deu tão somente com base na observação dos resultados.

Tabela 4. 4 - Valores médios de RCS obtidos para o solo natural e misturas.

Misturas	Teor de solo (%)	Teor de cinza(%)	Teor de cimento (%)	Resistência - 7 dias			Resistência - 28 dias		
				Umidade	Densidade	RCS	Umidade	Densidade	RCS
				(%)	(KN/m <sup>3</sup> )	KPa	(%)	(KN/m <sup>3</sup> )	KPa
M.0	100,00	0,00	0,00	6,96%	21,41	147,70	7,40%	20,98	313,217
M.98.2	98,00	2,00	0,00	7,62%	21,22	224,09	6,84%	21,22	364,15
M.96.4	96,00	4,00	0,00	7,83%	20,99	193,53	7,31%	20,84	361,60
M.94.6	94,00	6,00	0,00	6,82%	20,17	313,22	6,82%	20,18	685,00
M.92.8	92,00	8,00	0,00	7,63%	19,73	277,57	7,01%	19,80	401,07
M.98.1.1	98,00	1,00	1,00	7,87%	20,99	415,08	7,65%	20,75	598,423
M.96.2.2	96,00	2,00	2,00	7,12%	21,39	993,13	6,81%	20,55	1.476,96
M.94.3.3	94,00	3,00	3,00	6,47%	21,48	1.273,24	7,19%	19,92	1.937,87

A Figura 4.38 apresenta o conjunto de resultados obtidos em função do grau de saturação (Sr) para o solo puro e para as misturas com CCA. Na legenda dessa figura aparece um círculo azul como representando as médias, no entanto, optou-se por manter o azul e com outro formatos representando a média, adotando-se porém os mesmos símbolos adotados para as diferentes situações.

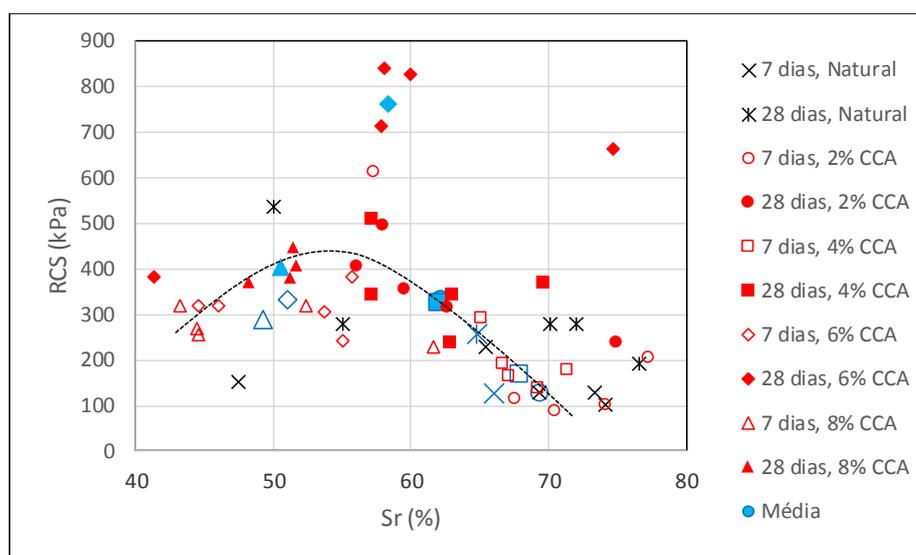


Figura 4. 38 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função do Grau de Saturação (Sr).

Normalmente o que se espera nesse tipo de análise é a diminuição da resistência com o aumento do grau de saturação, no entanto, os resultados mostram que até aproximadamente 55% verifica-se uma tendência contrária só então passando a ser verificado o comportamento esperado. Os resultados apresentados por Valência et al. (2007) indicam comportamento similar ao estudar um solo laterítico fino do Distrito Federal. Os autores atribuem o comportamento relacionado à queda da resistência ao aumento da sucção ao regimento de fissuras no solo que passam a interferir no comportamento. No presente caso, no entanto, como os CPs não foram submetidos a processos de secagem ou umedecimento, atribui-se tal comportamento ao fato de que para sucções elevadas perde-se parte dos contatos entre grãos onde atua a sucção, logo, embora essa aumente com a redução do grau de saturação ao ocorrer perda de contato termina gerando uma diminuição na resistência.

O entendimento de que o teor de umidade de absorção média determinada para as diferentes frações granulométricas superiores a 4,8 mm foi, conforme apresentado, de 5% e a Figura 4.39 que apresenta os resultados em função do teor de umidade mostra que se retirada essa umidade de absorção do solo o teor de umidade externo aos agregados varia entre zero e cinco por cento, podendo assim ocorrer falta de contato via água entre agregados para as umidades mais baixas. É evidente que essa é uma avaliação grosseira, pois nos CPs estão presentes, embora em pequena quantidade, frações com diâmetro inferior a 4,8 mm.

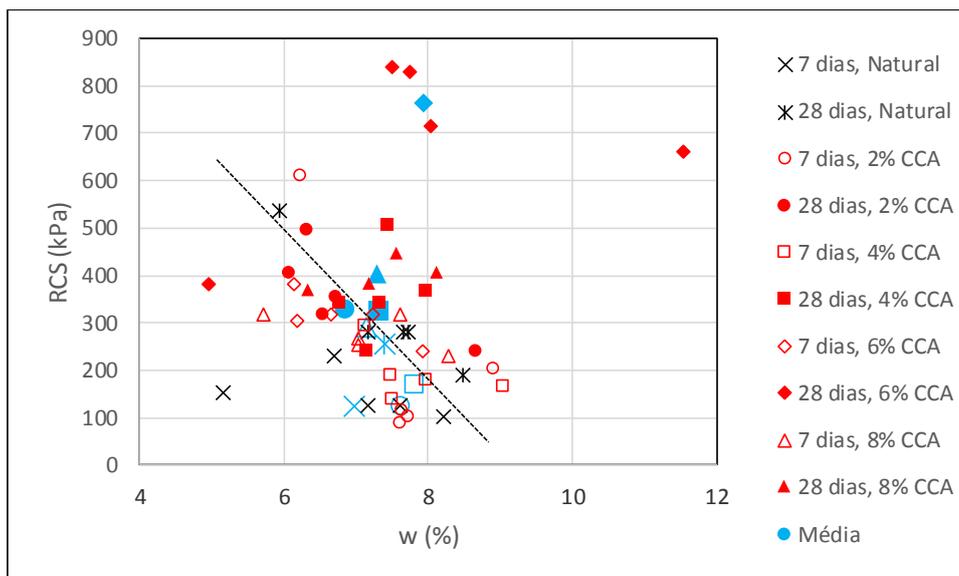


Figura 4. 39 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função da Umidade (w).

Considerando-se o conjunto de resultados mostrados na Figura 4.40, aparece em uma análise visual grosseira, uma certa tendência à diminuição da RCS com o aumento da umidade, o que corresponde ao esperado.

A Figura 4.40 apresenta os resultados de RCS em função do índice de vazios. Observa-se inicialmente um tendência ao aumento da resistência com o aumento do índice de vazios ocorrendo em seguida tendência a estabilização ou mesmo a sofrer uma pequena queda na resistência com o aumento do índice de vazios.

Nesse conjunto de resultados mostrados nas Figuras 4.40, 4.41 não é possível constatar, qualquer que seja o tempo de cura a influência da CCA na resistência do solo. Buscando verificar melhor a influência da CCA na RCS do solo plotou-se os resultados médios em função da sucção em pF (Figura 4.41a) e em função de pF/e (Figura 4.41 (b), onde pF é logaritmo da sucção em cm de coluna de água. Nessas figuras o símbolo vazio corresponde ao solo natural e os símbolos cheios aumentam de tamanho com o teor de CCA. Nessas figuras sobressai o melhor comportamento registrado para 6% de CCA, mas de um modo geral percebe-se a tendência ao aumento da resistência com a ampliação do teor de CCA até a taxa de 6% sofrendo em seguida pequena queda. O fato da mineralogia da cinza não apresentar compostos amorfos aponta na direção da expectativa de pequena contribuição da cinza para a resistência do solo. Cabe destacar que os resultados de sucção utilizados foram estimados a partir da granulometria e plasticidade do solo conforme exposto no item sobre sucção do solo granular.

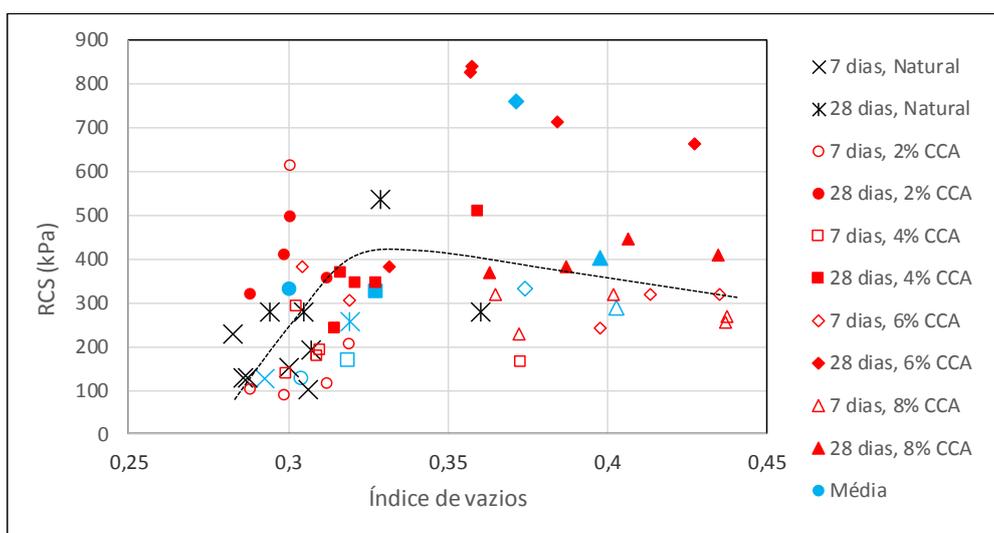


Figura 4. 40 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função do índice de vazios (e).

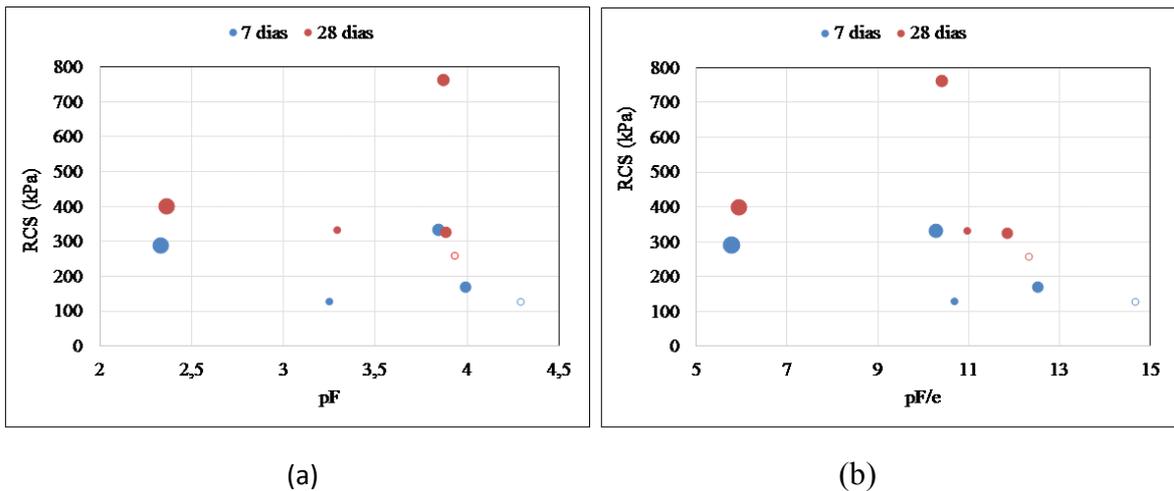


Figura 4. 41 - - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA em função de pF (a) e de pF/e (b).

Os resultados apresentados com misturas com adição de cinza nesta pesquisa foram de bons a pouco significativo, devendo ser observado com cautela uma vez que esse tipo de cinza usado foi do tipo amorfa, fato que poderá não refletir as condições quando ensaiadas com outros tipos de solos lateríticos ou não lateríticos.

Sendo a resistência a compressão simples (RCS) do solo função da mineralogia e da sucção atuante no solo e esta função do grau de saturação analisou-se a RCS em função do Grau de Saturação (maior  $S_r$  menor a sucção e por consequência menor a RCS) dividido por  $1 - \text{teor de Quartzo mais Cristobalita}$ , o que corresponde ao teor dos demais minerais influenciando no caso os teores de caulinita, mica, hematita e goethita (esses minerais ativos geralmente contribuem para o aumento da RCS e estando no denominador a resistência na análise realizada tenderá a aumentar com o seu teor).

A Figura 4.42 apresenta a RCS em função dessa relação considerando-se os resultados obtidos para o solo natural e para as misturas com CCA. Nessa figura não fica clara a influência do teor de CCA na RCS embora se perceba a influência do grau de saturação e do teor de minerais ativos. Buscou-se então agrupar os resultados segundo o tempo de cura (Figuras 4.43 e 4.44). Nessa figura, apesar de alguns resultados obtidos para os ensaios realizados após 7 dias de cura se situarem próximos aos obtidos para 28 dias de cura, tem-se uma aparente melhora do comportamento com o tempo de cura.

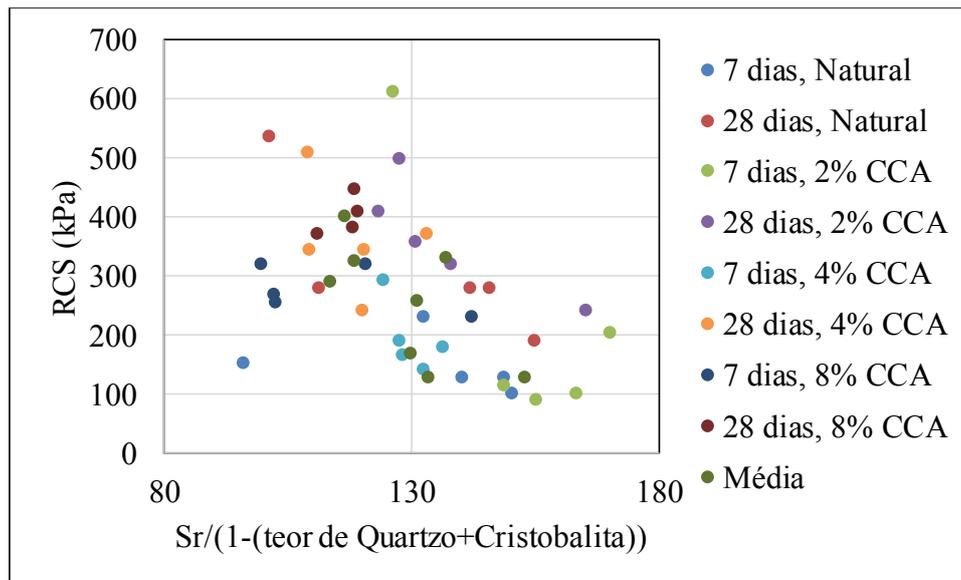


Figura 4. 42 - . RCS em função do teor de outros minerais que não o quartzo e a cristobalita.

Como não foi possível associar a melhoria do comportamento ao teor de CCA, os resultados dessa figura apontam para duas possibilidades: 1) ação tixotrópica não só nas misturas como no próprio solo natural aumentando a RCS, ou seja, a melhoria do comportamento mecânico tanto no solo natural como nas misturas com CCA estaria relacionada à tixotropia e não à presença de CCA propriamente dita; 2) como se compactou o solo seco ao ar, com o tempo de cura a água dos poros entre agregados estaria migrando para o interior dos agregados aumentando assim a sucção/capilaridade entre eles e por consequência a RCS. Para melhor entendimento dessa segunda hipótese refez-se a Figura 4.42 calculando-se o grau de saturação para uma umidade igual a que se tinha menos 1%, ou seja, admitindo-se que 1% da umidade de compactação teria sido absorvida pelos agregados após 28 dias de cura obtendo-se a Figura 4.44 na qual se observa uma melhor junção dos resultados obtidos para as curas de 7 dias e 28 dias. Esses resultados explicariam ainda a razão de alguns pontos obtidos para o solo natural após 7 dias de cura se aproximarem daqueles obtidos para 28 dias com incorporação da cinza, pois com a ausência desta estaria sendo facilitada a penetração da água nos agregados em menor intervalo de tempo.

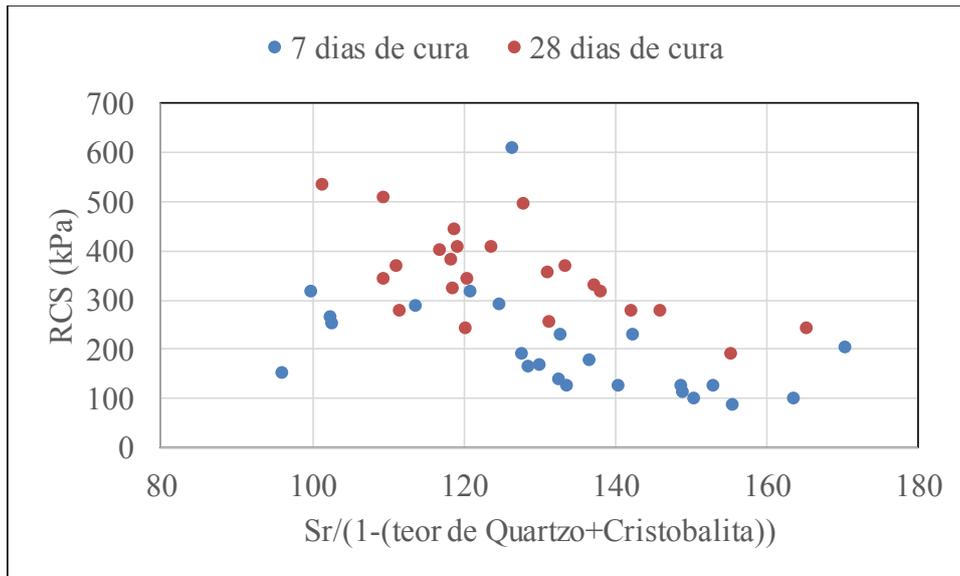


Figura 4. 43 - RCS em função do teor de outros minerais que não o quartzo e a cristobalita considerando os dois períodos de cura analisados.

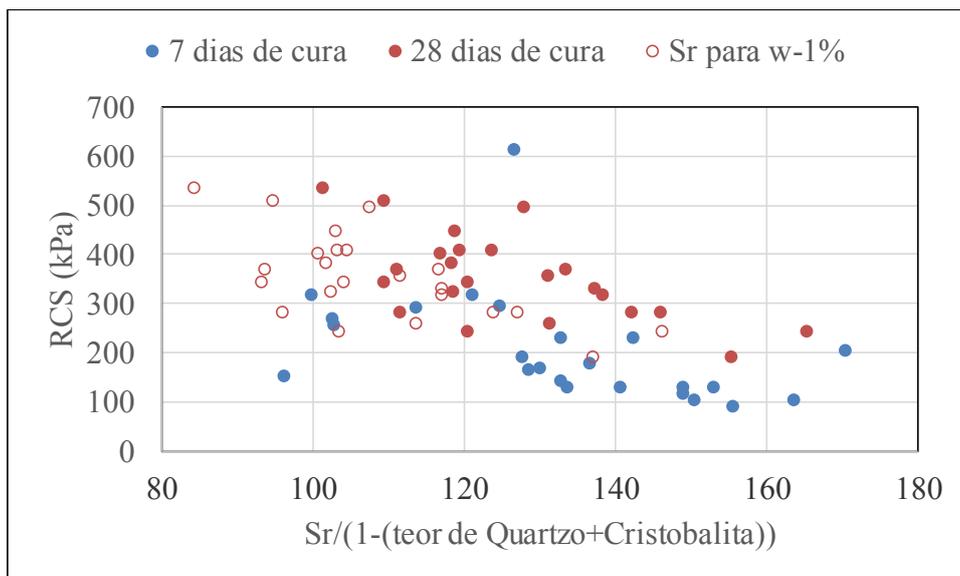


Figura 4. 44 - RCS em função do teor de outros minerais que não o quartzo e a cristobalita considerando os dois períodos de cura analisados e absorção de água pelos agregados.

Para as misturas solo – CCA – Cimento as Figuras 4.45, 4.46 e 4.47, apontam respectivamente, independentemente dos teores de CCA e cimento utilizados, para a inexistência de relação direta entre a RCS e o Grau de Saturação, a umidade (w) e o índice de vazios (e). No entanto, é possível constatar nessas mesmas figuras e na Figura 4.48

obtida para os valores médios de RCS, uma melhoria na resistência tanto com o tempo de cura como com o teor de aditivos (CCA mais Cimento).

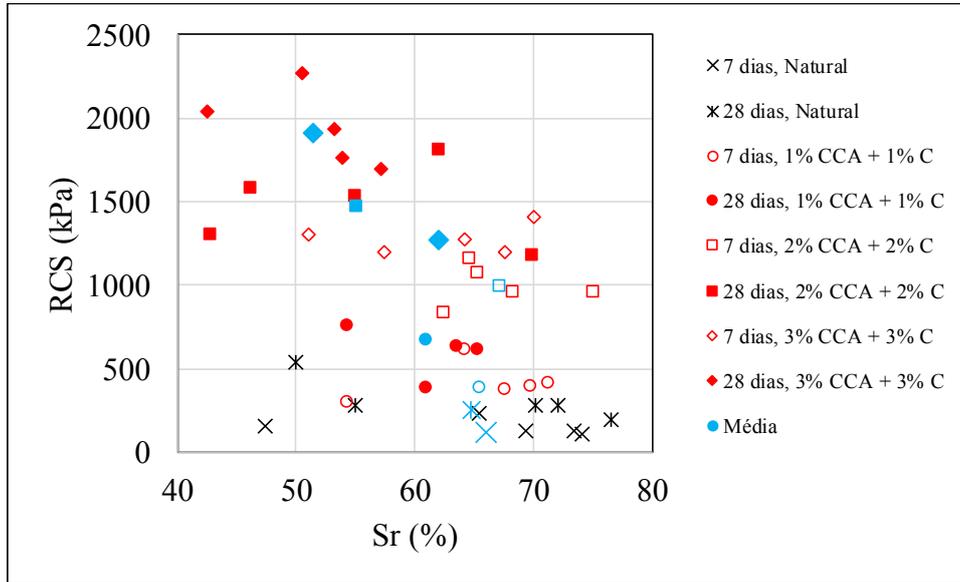


Figura 4. 45 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função do Grau de Saturação (Sr).

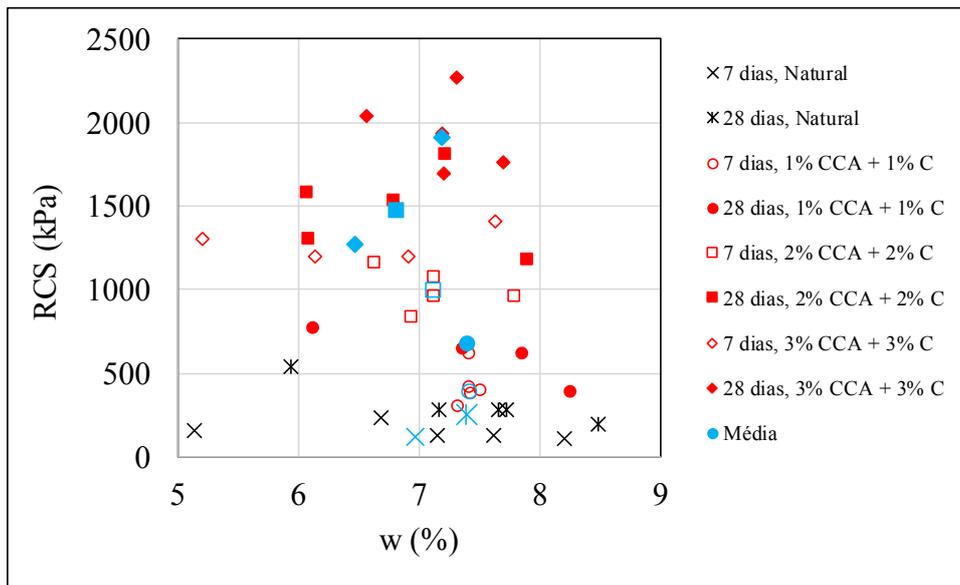


Figura 4. 46 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função da Umidade (w)

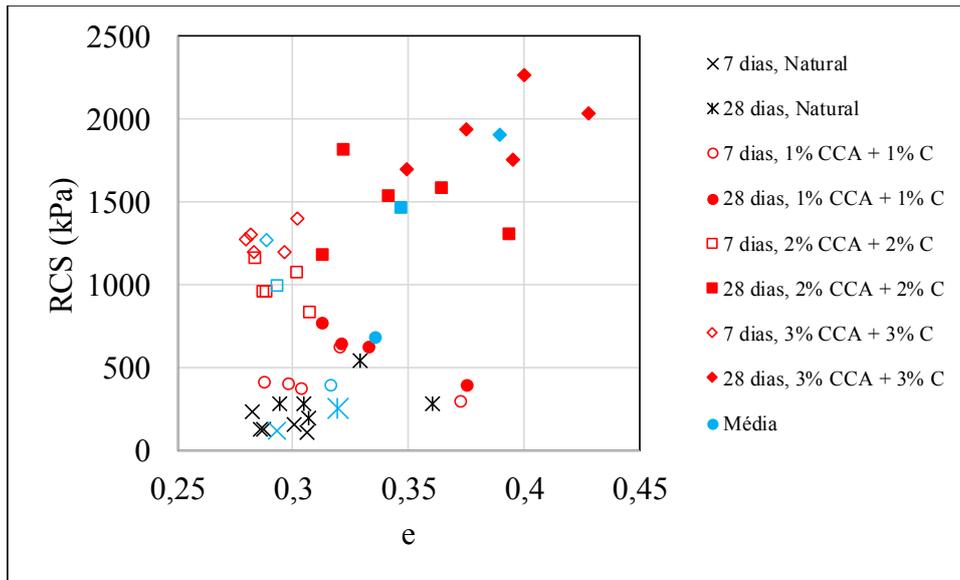


Figura 4. 47 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função do índice de vazios (e).

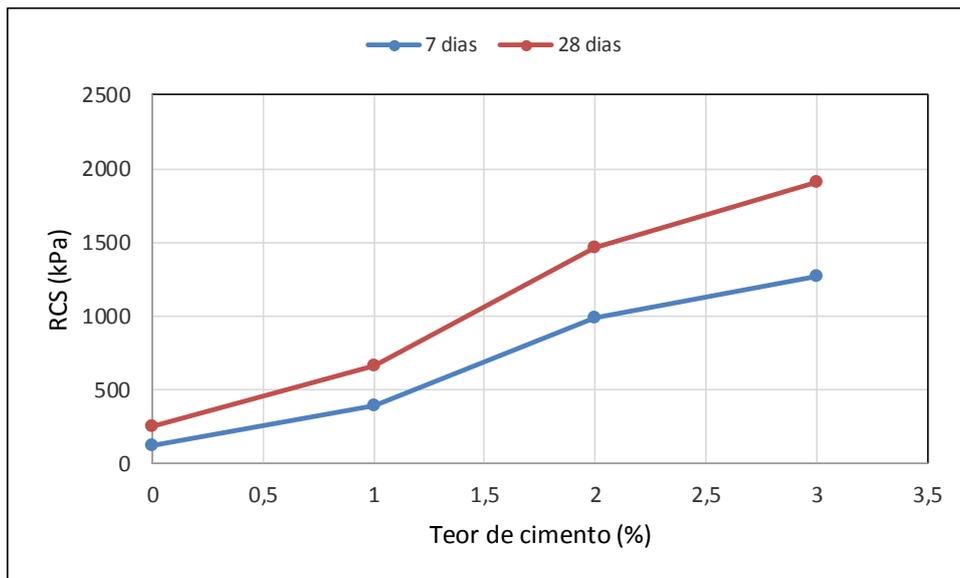


Figura 4. 48 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA – Cimento em função do teor de cimento.

Diante da dispersão dos resultados em função da sucção em pF (a) e de pF/e (b) (Figura 4.49), verifica-se que a resistência está contrariamente ao esperado diminuindo com o aumento da sucção e com a diminuição do índice de vazios o que indica a importância dos aditivos incorporados ao solo, sendo, no entanto, relevante em estudos futuros averiguar se o responsável pela melhoria do comportamento é o composto CCA – Cimento ou apenas o cimento. Outra observação de grande relevância é a tendência dos resultados obtidos para 7 dias e 28 dias tenderem a se enquadrarem em uma mesma

tendência o que indica que o ganho de resistência com o tempo de cura estaria associado apenas a variações de umidade e/ou porosidade e não à formação de cimentações propriamente dita.

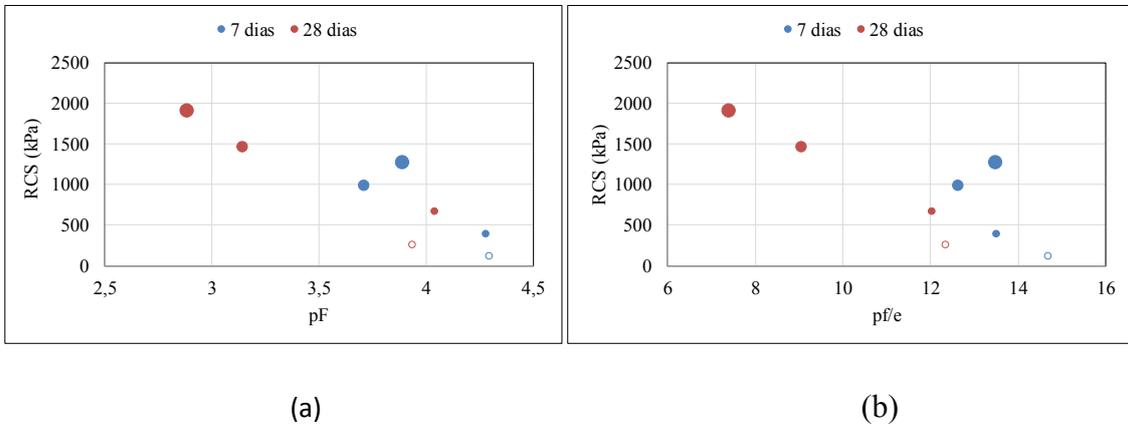


Figura 4. 49 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do solo natural e das misturas solo – CCA - Cimento em função de pF (a) e de pF/e (b).

A Figura 4.50 apresenta o conjunto de resultados obtidos em termos de média sobressaindo que os maiores ganhos se dão quando do uso do cimento.

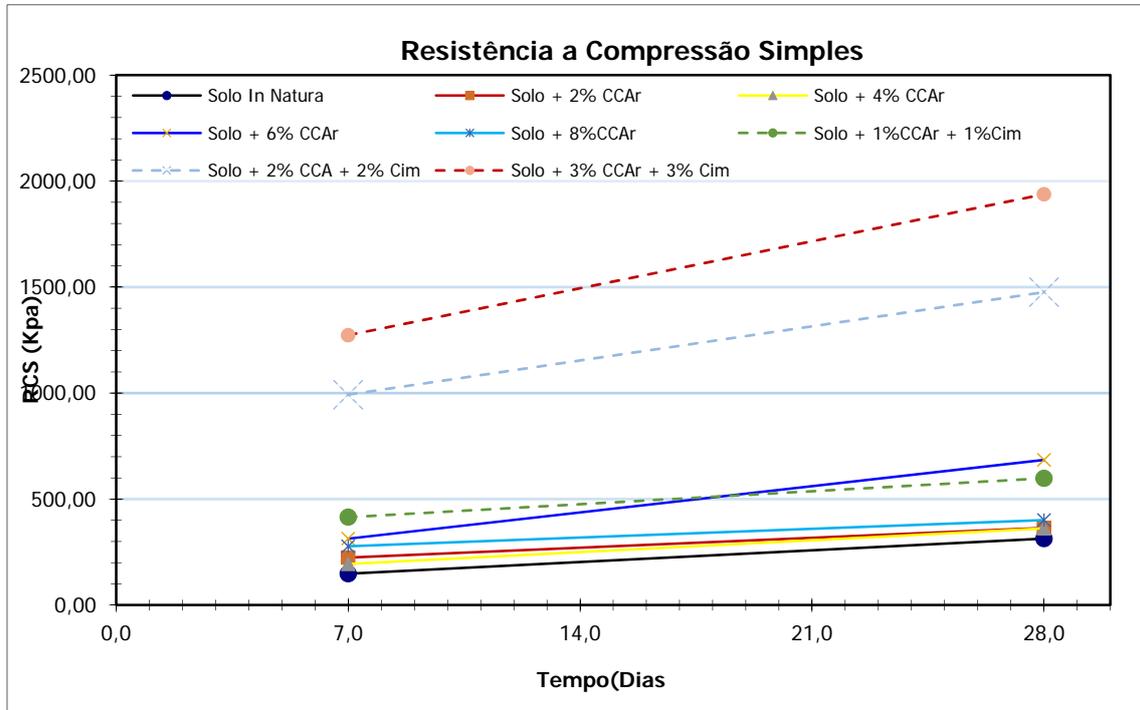


Figura 4. 50 - Variação da resistência a compressão simples (RCS) com o tempo de cura e teor de aditivo.

Diante da dispersão dos resultados em função dos índices físicos grau de saturação (Figura 4.51), teor de umidade (Figura 4.45) e índice de vazios (Figura 4.46), decidiu-se

avaliar a influência da mineralogia na resistência a compressão simples (RCS). A Figura 4.51 mostra que a RCS apresenta relação com o teor de minerais passíveis de interagir com o cimento tendo sido considerado nessa categoria todos os minerais menos o quartzo e a cristobalita. A figura mostra claramente a existência dessa relação para o solo estudado.

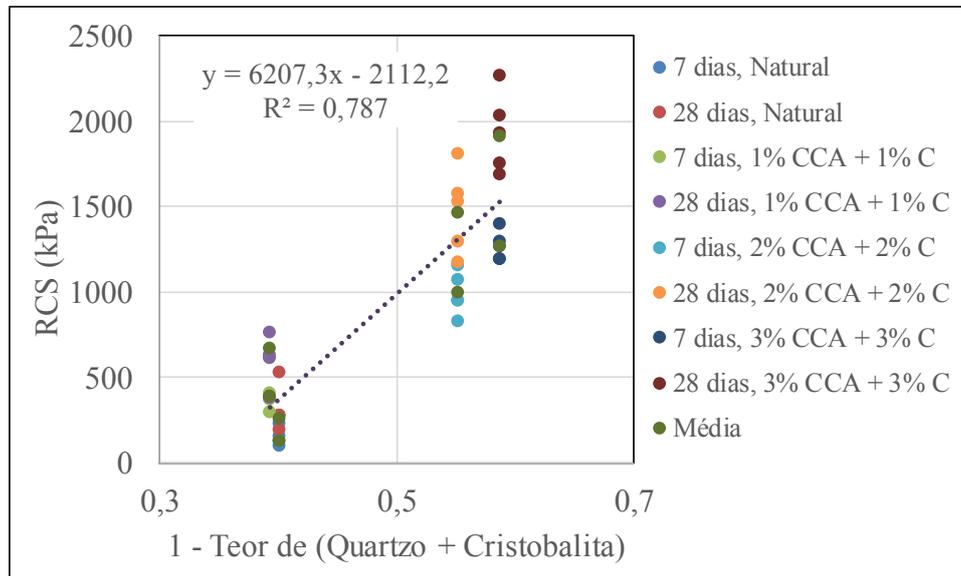


Figura 4. 51 - RCS em função de 1-( teor de quartzo mais teor de cristobalita).

Fazendo-se agora uma análise semelhante à realizada para misturas com CCA a Figura 4.52 mostra que a RCS em função da relação entre o grau de saturação e o total de minerais menos o teor de quartzo mais cristobalita aumenta com o teor de cimento incorporado ao solo. Comparando-se os resultados dessa figura (RCS / (1-(teor de quartzo mais teor de cristobalita))) com os mostrados na Figura 4.44 (RCS x Sr), verifica-se que a mineralogia exerce significativa influência sobre os resultados de estabilização do solo com CCA mais cimento Portland o que, diante da falta de clareza sobre a influência da CCA na RCS, requer estudos complementares fazendo-se uso apenas no cimento Portland nas misturas, pois não se pode nesse momento descartar nem imputar a melhoria da RCS ao conjunto CCA mais cimento. A Figura 5.52 mostra também que apesar de ser o solo um cascalho, portanto um material com sucção/capilaridade em princípio não muito elevada, que esta interfere na resistência das misturas, pois como se sabe a sucção matricial é função do grau de saturação a ao se fazer a relação entre o grau de saturação e o teor de umidade ativos houve uma melhoria da correlação.

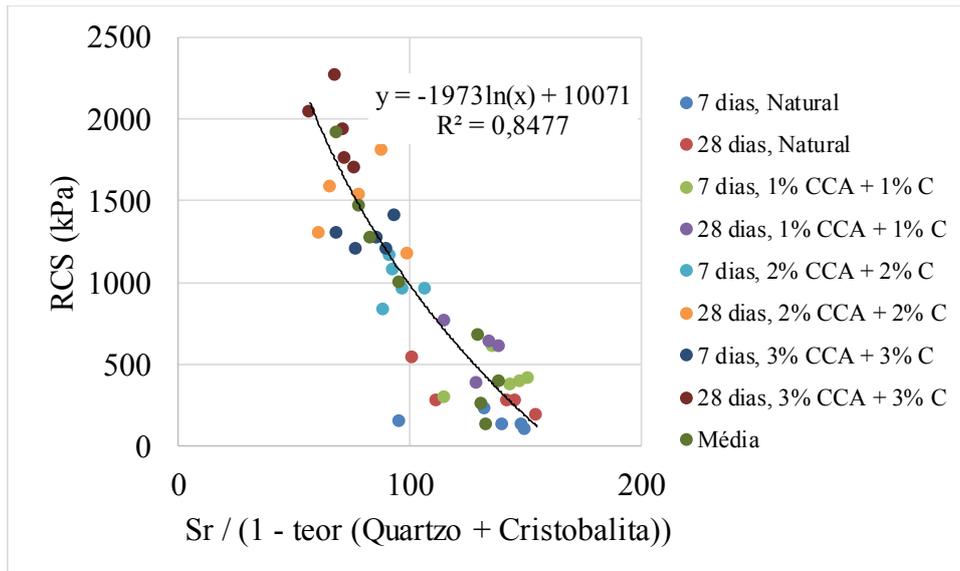


Figura 4. 52 - RCS em função de  $Sr / (1 - \text{teor (Quartzo + Cristobalita)})$ .

Buscou-se ainda avaliar se os óxidos hidróxidos de ferro e alumínio influíam nos resultados oriundos da estabilização do solo com o cimento. A Figura 4.53 mostra que a RCS varia com o teor de hematita mais o teor de goethita, sendo no entanto, que o teor 1% de CCA mais 1% de cimento foge a tendência. Corrigido o teor dos óxi-hidróxidos de ferro para esse teor de CCA mais cimento considerando-se a equação apresentada na Figuras 4.53 e 4.54, na qual fica clara a discrepância nos teores de hematita mais goethida definidos para essa mistura, observa-se que os pontos de enquadram na tendência registrada na Figura 4.53. Considerando-se os resultados corrigidos verifica-se que a RCS correlaciona-se com o teor de hematita mais goethita.

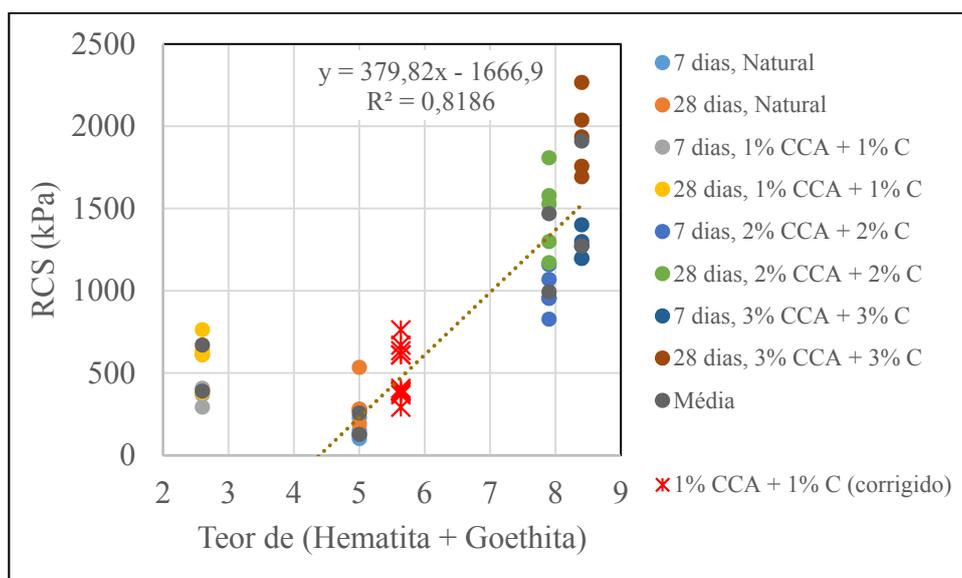


Figura 4. 53 - RCS em função do teor de hematita mais goethita

Analisando-se os resultados de RCS em função do Sr dividido pelo teor de hematita mais o teor de goethita (Figura 4.54) verifica-se que apenas as misturas contendo 1% de CCA mais 1% de cimento Portland fugiram à tendência de aumento da RCS com o teor de hematita mais goethita e não foram incluídos na correlação. Corrigido o teor dos óxi-hidróxidos de ferro para esse teor de CCA mais cimento considerando-se a equação apresentada na Figuras 4.53 e 4.54 na qual fica clara a discrepância nos teores de hematita mais goethita definidos para essa mistura, observa-se que os pontos de enquadram na tendência registrada na Figura 4.54 com pequena redução no coeficiente de correlação (Figura 4.55) salientando-se que foram excluídos da correlação anterior os pontos discrepantes correspondentes a 1% de CCA mais 1% de cimento Portland. A discrepância registrada no teor de Hematita mais Goethita se deve provavelmente a diferenças na amostragem das amostras submetidas ao DRX.

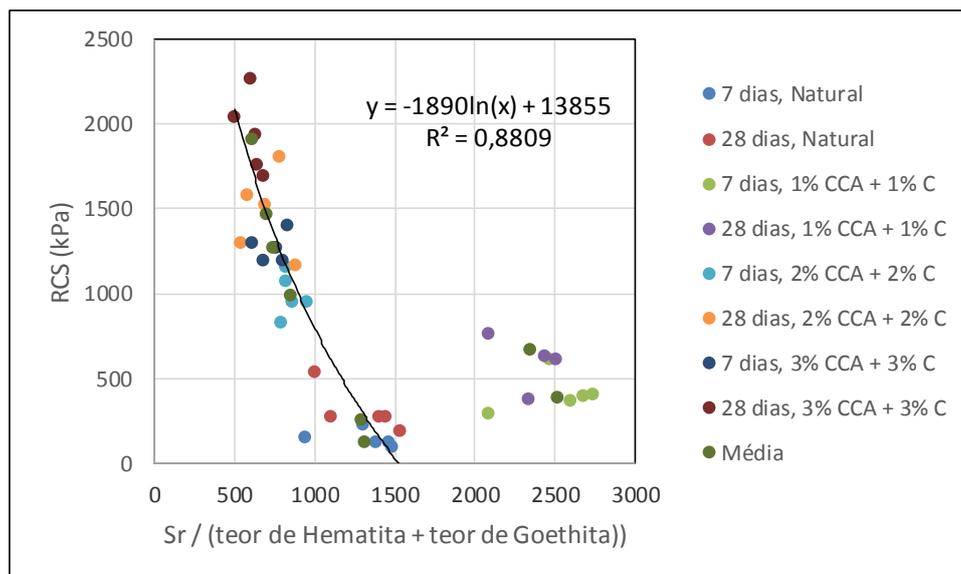


Figura 4. 54 - Influência dos óxi-hidróxidos de ferro na RCS.

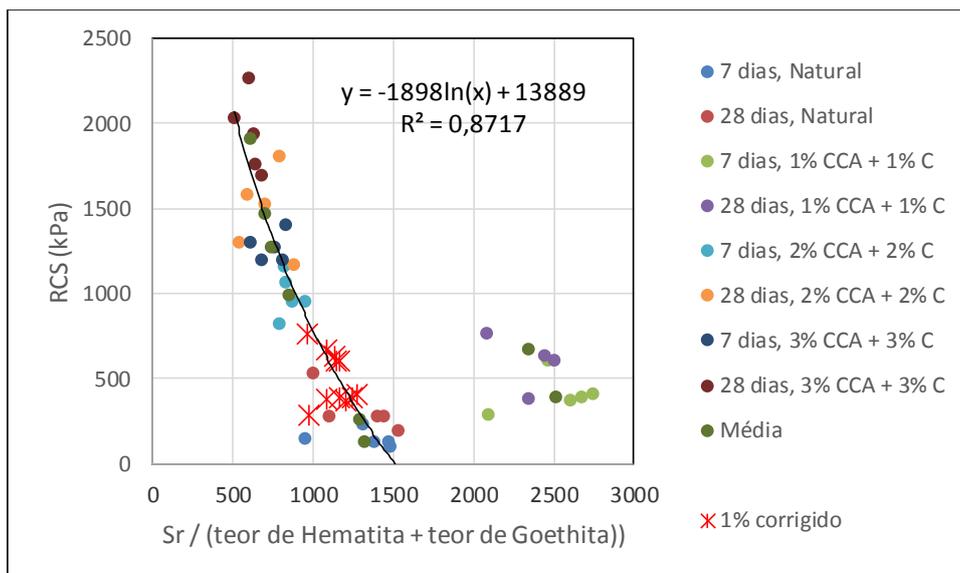


Figura 4. 55 - Influência dos óxi-hidróxidos de ferro na RCS.

As análises de RCS considerando-se a mineralogia mostram ser esta importante quando se analisa o comportamento de solo estabilizados com cimento Portland

#### 4.4.6 Ensaio de tração por compressão diametral.

Com o objetivo de se verificar a resistência à tração para os diversos percentuais e tipos de misturas utilizados para confecção dos corpos de prova foram moldados corpos de provas de acordo com a Tabela 4.5. Cabe realçar conforme já exposto no capítulo materiais e métodos que esses ensaios foram realizados sobre o solo comendo a matriz fina passante na peneira de malha número 10 ( $d = 2 \text{ mm}$ ). A opção por se trabalhar com a fração fina se deu buscando avaliar qual seria a contribuição dos aditivos utilizados para a melhoria da interação entre essas partículas.

Tabela 4. 5 - Percentuais de misturas

Misturas	Teor de	Teor de
	solo (%)	cinza(%)
M.0	100,00	0,00
M.94.6	94,00	6,00
M.92.8	92,00	8,00
M.98.1.1	98,00	1,00
M.96.2.2	96,00	2,00
M.94.3.3	94,00	3,00

As apresentações e análises dos resultados foram feitas considerando-se os principais fatores intervenientes na resistência a tração, quais sejam: umidade, índice de vazios, grau de saturação e sucção matricial.

A Figura 4.56 apresenta os resultados de resistência à tração em função do índice de vazios obtidos para o solo natural e para as misturas solo - CCA. Nessa figura separou-se colocando em círculos vazios os pontos que fugiam à tendências gerais do solo puro e das misturas. Adotando-se esse tratamento de separação visual, ou seja, não houve um tratamento estatístico, verifica-se uma diminuição da resistência à tração com o aumento do índice de vazios e uma tendência à redução dessa resistência com o aumento do teor de CCA.

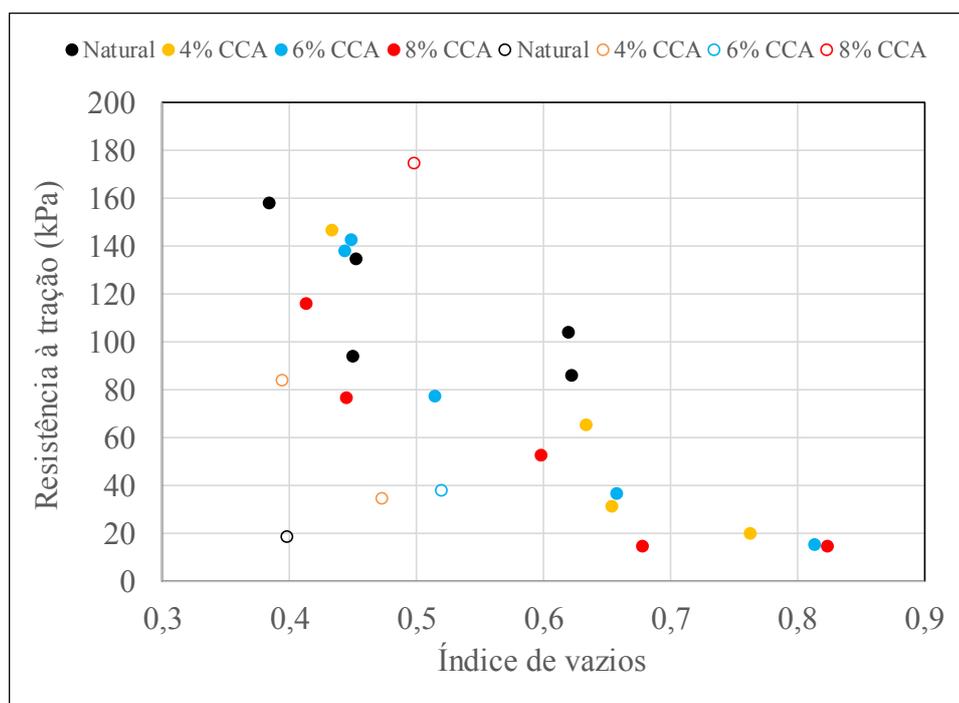


Figura 4. 56 - Resultados de resistência à tração em função do índice de vazios para o solo puro e misturas solo – CCA.

Para as misturas solo – CCA – cimento (Figura 4.57) observa-se a mesma tendência de diminuição da resistência à tração com a aumento do índice de vazios, no entanto, embora as misturas apresentem resultados inferiores aos do solo puro não se percebe uma nítida diferença entre elas.

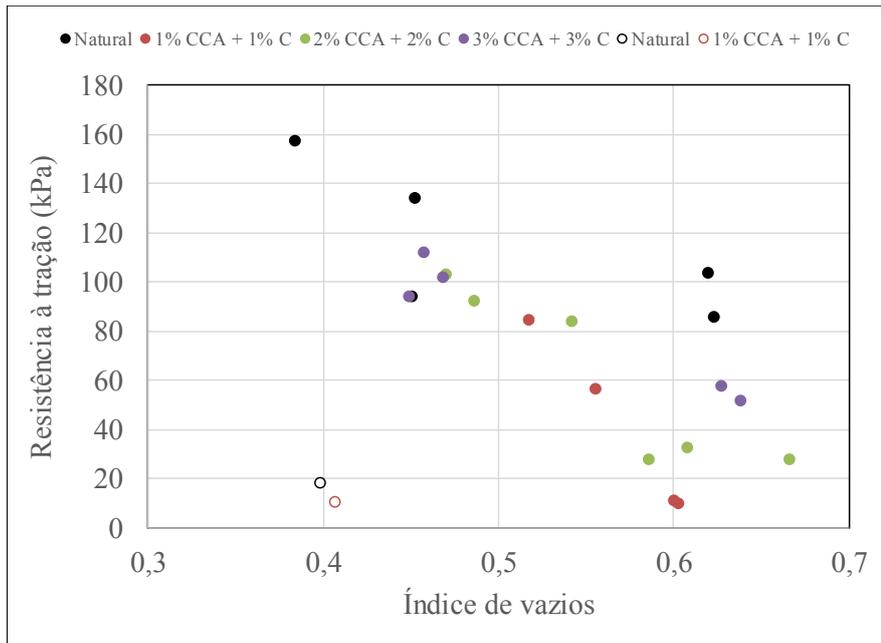


Figura 4. 57 - Resultados de resistência à tração em função do índice de vazios para o solo puro e misturas solo – CCA - Cimento.

A Figura 4.58 apresenta os resultados de resistência à tração em função do teor de umidade. Como no caso de outros ensaios como o ISC percebe-se uma tendência das curvas apresentarem formato semelhante ao das curvas de compactação. Dos resultados obtidos e apresentados nessa figura não fica clara a influência da CCA na resistência à tração em função do teor de umidade.

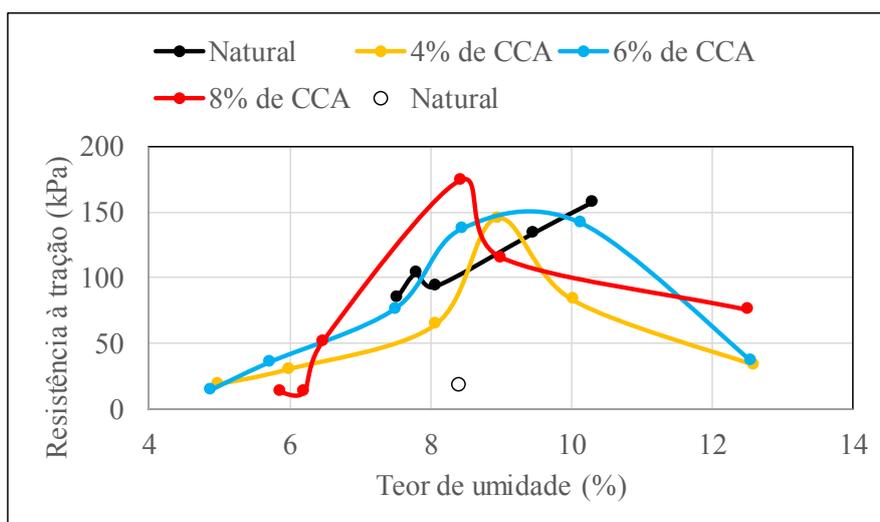


Figura 4. 58 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas solo – CCA.

Considerando-se as misturas solo – CCA – Cimento (Figura 4.59) se observa que apenas a curva obtida para a mistura com 1% de CCA e 1% de cimento tendeu a apresentar um formato similar ao das curvas de compactação. Para essas misturas apesar de todas elas apresentarem resultados inferiores aos obtidos para o solo puro, verifica-se uma tendência à melhoria do comportamento com o aumento do teor de CCA mais cimento.

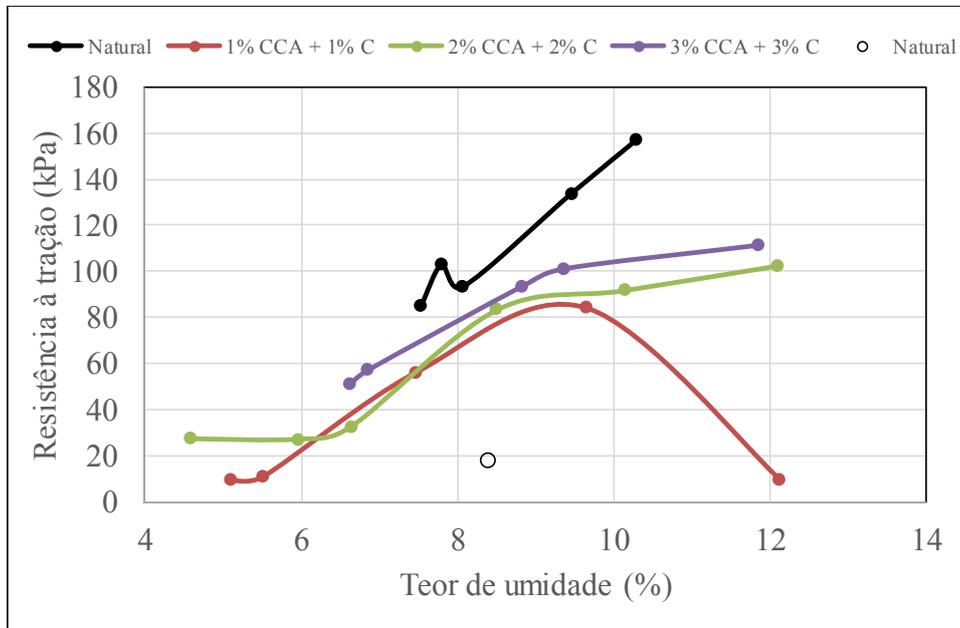


Figura 4. 59 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas solo – CCA - Cimento.

Tratando-se o conjunto de resultados independentemente das misturas e teores de aditivos, separando-se apenas os pontos visualmente destoantes das tendências, observa-se que a resistência à tração apresentou tendência a aumentar com o teor de umidade (Figura 4.60 e Figura 4.61). Nota-se ainda que os pontos excluídos da análise leva o comportamento para os teores de umidade mais elevados ao que seria esperado, ou seja, à diminuição da resistência com o aumento do teor de umidade.

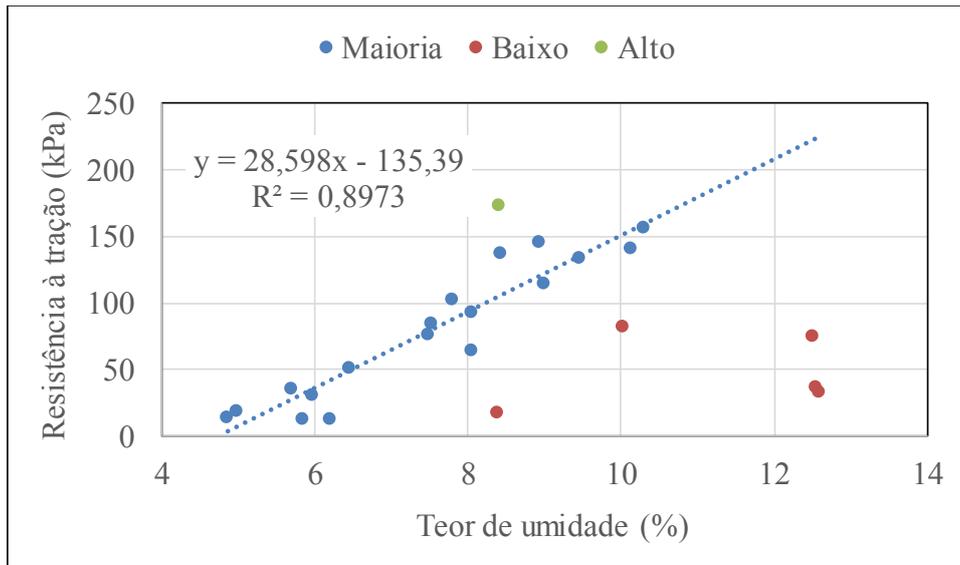


Figura 4. 60 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas solo – CCA.

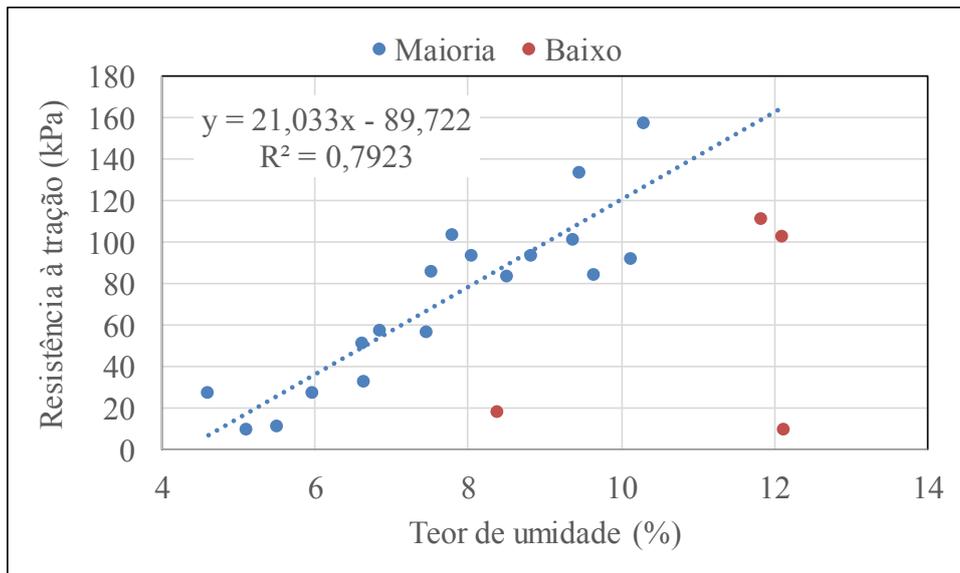
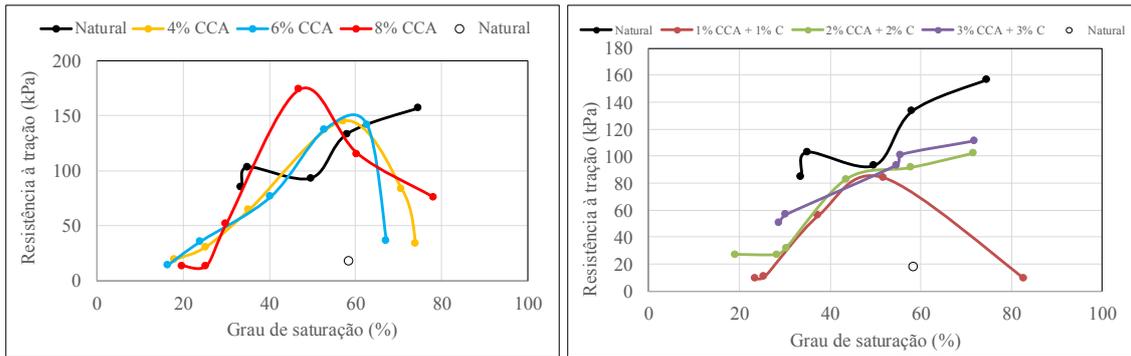


Figura 4. 61 - Resultados de resistência à tração em função do teor de umidade para o solo puro e misturas – CCA - cimento.

A Figura 4.62 mostra que em termos de grau de saturação são verificadas tendências semelhantes as observadas em relação ao teor de umidade.

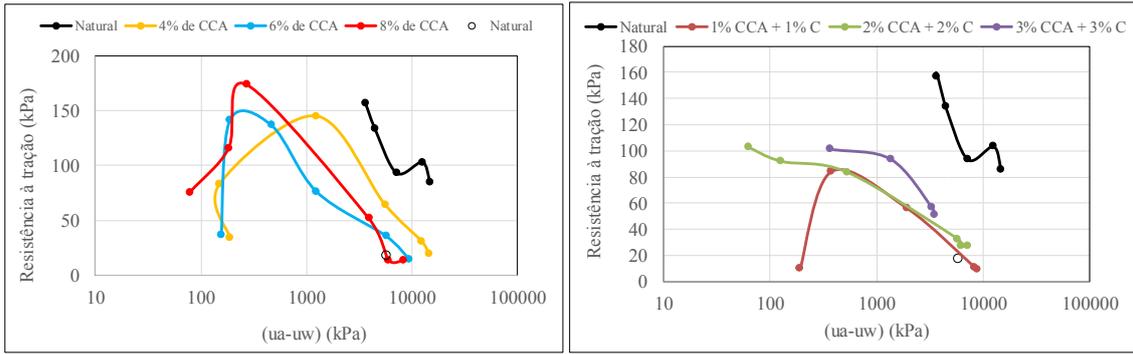


(a)

(b)

Figura 4. 62 - Resultados de resistência à tração em função do grau de saturação para o solo puro e misturas solo – CCA (a) e solo – CCA – Cimento (b).

As Figuras 4.63 a e b mostram, por meio da relação entre a resistência à tração e a sucção matricial, que os resultados mostrados nas Figuras 4.57 a 4.61 nos trechos onde ocorrem aumento da resistência à tração com o aumento da umidade e do grau de saturação, aumentos esses contrários ao esperado, que eles podem ser explicados pela redução no número de contatos entre os grãos com atuação da sucção/capilaridade. Diminuindo-se o número de contatos, e portanto, o número de pontos de atuação da sucção, mesmo que essa aumente tende a ocorrer perda de resistência. As Figuras 4.58 a e b mostram que a partir de um determinado nível de sucção ocorre a diminuição da resistência à tração. Esse comportamento já tinha sido observado por Valência *et al.* (2007) ao estudar um solo profundamente intemperizado do Distrito Federal. Para o solo estudado por esses autores, por se tratar de solo mais argiloso, o valor de sucção a partir do qual a resistência começava a diminuir com o aumento da sucção era mais elevado, aproximadamente 5.000 kPa. Outro aspecto a ser realçado é que naquele artigo os autores atribuíam a queda de resistência ao surgimento de fissuras nos corpos de prova.



(a)

(b)

(b) Figura 4. 63 - Resultados de resistência à tração em função da sucção matricial para o solo puro e misturas solo – CCA (a) e solo – CCA – Cimento (b).

## CAPITULO 5

### 5. CONCLUSÕES

O solo estudado apresenta resultados positivos quando aos de índices físicos sem a necessidade de correção da plasticidade ou expansão, no entanto apresenta baixa capacidade mecânica dependendo da camada do pavimento a ser submetido.

O solo apresenta uma classificação do tipo A-1-a em relação a classificação de solos HRB –highway ResearchBord – AASHTO – para finalidades rodoviárias.

A cinza utilizada foi proveniente da indústria cerâmica do Distrito Industrial de Boa Vista, utilizada em fornos para a queima de tijolos cerâmicos, sem o controle direto da temperatura, com ventilação para acelerar o processo de combustão. A cinza possui uma mineralogia com alto pico de cristobalita, ou seja, trata-se de uma sílica cristalina que normalmente se desenvolve a temperaturas superiores a 700° C, sendo esta temperatura capaz de gerar picos de cristais cristalizados uma vez que são submetidos ao processo de queima por um período superior a 12 horas, que poderá produzir uma cinza não amorfa, ou seja, uma cinza de baixa atividade pozolânica, com baixa capacidade de reação e o hidróxido de cálcio quando na presença de água.

As curvas de compactação se destacam pela redução do peso específico seco quando do tratamento com adição de cinza ou mesmo da adição de cinza e cimento no solo quando comparado com o solo natural.

Os resultados de limites de Atterberg das misturas, estudadas são significativos, uma vez a adição da cinza proporcionou uma redução do índice plasticidade, no entanto deve ser observado com cautela uma vez que o estudo realizado foi para um único solo.

Os resultados de capacidade de suporte (CBR) quando realizados somente com a adição da cinza da casca de arroz (CCA) obtiveram uma reação não esperada, mas ao mesmo tempo justificável uma vez que o tempo de 96 horas entre a confecção do corpo de prova e o rompimento não foi suficiente para que ocorresse as reações químicas necessárias, e por se tratar de uma cinza produzida na condição amorfa.

Quando a mistura utilizada para o ensaio de capacidade de suporte tem a adição de cinza com cimento já é possível se verificar um aumento considerável de sua capacidade já a partir do solo com 1% de cimento e 1% de cinza, tendo um aumento de em todos as

misturas utilizadas, Porém deve ser observado o fato de que a presença do cimento na mistura acelera as reações pozolânicas.

Os ensaios de resistência à compressão simples obtiveram bons resultados quando adicionados somente a cinza da casca de arroz, como também com a dição de cimento comparados com os obtidos com o solo em estado natural. O melhor resultado pode ser observado quando da adição de 3% de cinza e 3% de cimento. Esse aumento pode ser devido a presença de sílica na cinza que reage com o cimento causando as reações químicas pozolânicas na mistura. É possível identificar uma relação no aumento do teor do cimento, em que quanto maior o teor de cimento, maior é a aceleração das reações pozolânicas com a sílica da cinza, com isso esse aumento considerável na resistência a compressão simples, se dá inclusive na idade de 07 dias de cura

Quando comparado compressão simples com o ISC observa-se que o percentual de 6% uma concordância maior, no entanto sem deixar de levar em consideração o fato influência nos resultados poderá advim de outros fatores externos, tais como a presença de água que requer maior cuidado na utilização das misturas.

Para os ensaios de Difrátogramas de Raio X, pode-se verificar a importância da temperatura de incineração da cinza da casca de arroz com o surgimento de minerais, onde se observa uma formação de quartzo significativa em todas as misturas com 28 dias de cura, como também confirma a presença de cristobalita na cinza da casca de arroz da indústria cerâmica, mostrando ser uma cinza cristalina com um percentual ainda desconhecido.

Os ensaios de sucção mostraram a influência da cinza onde se pôde observa a capacidade da cinza em absorver água, reduzindo assim a sucção da mistura, o que deve ser analisado com cautela, o que dependendo do teor a ser adicionado na mistura a água absorvida poderá comprometer a resistência da mistura.

Diante do exposto pode-se afirmar que a utilização da cinza da casca de arroz para estabilização de solos para uso em pavimentação poderá ser viável desde que se observe o comportamento da mistura quanto ao seu comportamento e fazendo as correções necessários e viáveis para atender a definição de uso.

## 5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- a) Analisar a composição química de diferentes tipos de cinzas e sua influência na estabilização de solos de diferentes origens;
- b) Avaliar a influência da CCA na plasticidade de diferentes tipos de solos;
- c) Avaliar as propriedades mecânicas da CCA + cal + solos;
- d) Analisar o efeito da sucção em mistura solo, cinza da casca de arroz e ou cimento em solos finos lateríticos;
- e) Avaliar a temperatura de queima da cinza da casca de arroz e sua influência na estabilização de solos;
- f) Avaliar o comportamento mecânico de mistura de solo, betume e cinza, a frio e a quente.

compressão simples tenderam a se enquadrar em uma mesma tendência.

## • REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. Errata incorporada em 1988. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. Errata incorporada em 1988. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Granulométrica dos solos. Rio de Janeiro, 1984. Versão corrigida 1988. 7p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6458**: Solo – Grãos de pedregulhos retidos na peneira de abertura 438 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.005** - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004. 16p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.006** - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de solo. Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

ALCANTARA, M. A. de M.; SANTOS, L. P.; SOUZA, A.; LIMA, D. C. Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal. *Matéria (Rio de Janeiro)* [online]. 2017, vol. 22, n.3, e11875. Epub 10, 2017. ISSN 1517-7076. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170003.0209>.

ARMESTO, L.; BAHILL, A.; VEIJONEN, K.; CABANILLAS, A.; OTERO, J. Combustion (2002). Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidised Bed. *Biomass and Bioenergy*. 23, p. 171-179.

ARYA, L.M & DIEROLF, T. S. (1989) Predicting soil moisture characteristics by particle-size distributions na improved to calculate pore radii from particle radii. In Proc. Of the Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, p. 115-124.

BEHAK, L (2007). Estabilização de um solo sedimentar Arenoso do Uruguai com Cinza de Casca de Arroz e Cal. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 151 p.

BOATENG, A.A.; SKEETE, D.A (1990). Incineration of Rice Hull for uses as a Cementitious Material. The Guyana Experience. Cement and Concrete Reseaeach. C. 20, n.5 pp. 795-802, USA.

BONFANTE, M.; CARPIO, J. A. V. D.(2016) Estabilização de um solo arenoso com cinza da casca de arroz e cal para utilização em camadas de pavimento. Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – vol. 4: Congestas 2016 – ISSN 2318-7603.

BUCHMAN. J. Journey from though mysore, canara and malabar. Geol. Mag. V. 11 p. 436 1807.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2017). Solo como material de construção. São Paulo: IBRACON. Livro: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 3ª Edição. Organizador Geraldo C. Isaia. Vol 1, Cap. 17,pp 538-574.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2017). Solo como material de Construção. São Paulo: IBRACON. Livro: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 3ª Edição. Organizador Geraldo C. Isaia. Vol. 1, Cap. 17, pp. 538-574.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & Leroueil, S. Curva característica de sucção transformada. Solos e Rochas. 2004. (27) 3: 231-242.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; QUIMARÃES, R. C.; SIDDIQUA, S.; BIGDELI, A.; BARRETO, P.N.M. (2017). Relação entre a plasticidade do solo e o ponto de entrada de ar na curva característica de retenção de água. Simpósio de prática de engenharia geotécnica na região centro oeste (GEOCENTRO 2017). Goiânia GO.

CARNEIRO, C. N. (2010). Caracterização e aplicação de cascas de arroz como bio adsorvente na remoção de íons de cobre e chumbo em meio aquoso - UFRR, Boa Vista, RR.

CARNEIRO, F.L. (1953) Um Novo Método para a Determinação da Resistência à Tração dos Concretos. Comunicação 5 Reunião. Associação. Brasileira. Normas Técnicas. Publ. Inst. Nac. Tecnol, Rio de janeiro, (Publicado no Boletim nº 13, RILEM, série antiga. Paris, 1953, p. 103-107).

CHANDLER, R. J. CRILLY, M.S & MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for-rise buildings. In: Proceeding of he ICE-Civil Engineering. Thomas Telford, 1992. p. 82-89.

CHAVES, T. F.; QUEIROZ, Z. F. de; SOUSA, D.N.R. de; GIRÃO, J.H.S. Uso da cinza da casca do arroz (CCA) obtida da geração de energia térmica como absorvente de Zn(II) em soluções aquosas. Química Nova, São Paulo, V. 32, n.6, p. 1378-1383,2009.

CNT (2017); Pesquisa CNT de rodovias 2017, relatório gerencial, Brasília, CNT, SEST/SENAT.

COELHO, S.T.(1999). Mecanismo para implementação da co-geração de eletricidade a partir da biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.278 p.

CORDEIRO, G.C.; FILHO, R. D.T.; FAIRBAIRN, E.M.R. (2009); Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. Quim. Nova, Vol. 32, No. 1, 82-86,

DAWSON, A. R., BULLEN, F. (1991); Furnace Bottom Ash. Its Engineering Properties and its Use as Sub-base Material. Proc. Institute of Civil Engineers, 1991, pg. 992 - 1009.

DAWSON, A. R., NUNES, M. C. M. (1993); "Some British Experience of the Behavior of Furnace Bottom Ash and Slate Waste for Pavement Foundations", Symposium Proceedings - Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and Byproducts for Construction of Highway Facilities, October (1993). 13p.

DELGADO, A. K. C.(2007). Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado Universidade de Brasília, Brasília, DF, 329 p.

DELLA, V.P.; KUHN, I.; HOTZA, D. (2009). Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refletários de sílica. Química Nova, São Paulo, V.24, n.6p. 778-782.

DIAS, I.M. (2007). Estudo de solos tropicais para o uso em pavimentação a partir de ensaios triaxiais estáticos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, SP,

DIAS, J. J.F.M.S (2012). Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 97 p.

DNIT ME 138/94 (1994). Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte Determinação da resistência por compressão diâmetral, Rio de Janeiro, RJ.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA DE TRANSPORTES Manual de pavimentação. 2006. 273. Disponível em [http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%E7%E3o\\_05.12.06.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%E7%E3o_05.12.06.pdf): Acesso em 12 de Março de 2018.

DNIT-ME 180:1994. Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência a compressão simples, Rio de Janeiro, RJ.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997) Manual de métodos de análises de solos. Rio de Janeiro, 83 p.

ESPINDOLA, C.R & DANIEL, L.A. (2008). Lateritas e solos no Brasil. Bolim técnica da FATEC-SP-BR/24 – pag. 21-24.

FARIAS, E. R. (2005). A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 121 p.

FERRO, W. P. (2009). Utilização da cinza de casca de arroz como carga em matriz de poliamida 6.6 submetida à radiação Ionizante. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Universidade de São Paulo, São Paulo SP, 85 p.

FRITSCHER, S. V. (2016). Estabilização de solo residual de lajeado com adição de cimento e cinza de casca de arroz. Monografia de conclusão de curso de engenharia civil do centro universitário UNIVATES, Lajeado RS, 77 p.

GOTHE, C.A.(1990) Sistema de controle e disposição final das cinzas do complexo termelétrico Jorge Lacerda – SC e da Usina Terméletrica de Jacui – RS. I. e II seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral, 1º painel. Anais. Florianópolis ELETROSUL.

JAINES, L; ARNS, P. (2016) Estabilização de um solo com cinza da casca de arroz para uso em camadas de pavimento, Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC, Santa Caratina, SC.

KLAMT, R. A.(2012); Utilização da cal e da cinza da casca de arroz no melhoramento das propriedades geotécnicas de solos, Universidade Federal do Pampa, Santa Catarina, SC.

LEON, H. B.(2015). Estabilização de solos lateríticos: Uma alternativa para os resíduos de cinza da casca de arroz, Universidade Federal do Pampa, Alegrete RS.

LOPES, J. P.; ALTOÉ, S.P. S.; RUDNICK, T.; MARTINS, C.M.; SALES, A.(2016). Utilização da cinza pesada da cana de açúcar para confecção de artefatos de cimento para pavimentação. Congresso técnico científico da engenharia – CONTECC' 2016, Foz do Iguaçu, PR.

MALHOTA, V. M.; METHA, P. K. (1996) Pozzolanican and cementitious materials.1.ed. Amsterdam: Advances in Concrete Technology, 191p.

MARANGON, M., 2004, Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos lateríticos Locais a partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

MARCON, A. F. (1977) Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal cinza volante. Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Rio de Janeiro RJ, 119p.

MARCOS O. P., ILDA F.F. T, CONRADO, S. R., ELI, E. S. & SOUZA, C. F, (2009). Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13,p.353-357.

MARQUES L. (1959). As laterites do Ultramar Português. Laboratório nacional de engenharia civil, laboratório de engenharia de Angola (Luanda), laboratório de materiais e mecânica dos solos, Lisboa.

MEDRADO, W. A.(2009) Caracterização geotécnica da região norte de Minas Gerais para utilização em obras rodoviárias. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 124 p

MELFI, A.J. (1997). Mecânica e Processos de Laterização. Escola de Engenharia de São São Paulo, SP.

MOULTON, Lyle K. (1973); “Bottom Ash and Boiler Slag”, Proceedings of the Third International Ash Utilization Symposium. U.S. Bureau of Mines, Information Circular No. 8640, Washington, DC.

NARDI, J. V (1975). Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura. Tese: Mestre. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 167 p.

NASCIMENTO, R.S.V e ABREU, E.S.(1990) Utilização das cinzas de carvão da termelétrica Jorge Lacerda no desenvolvimento de compósitos poliméricos. I e II Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral - 60 painel. Anais: Florianópolis: ELETROSUL - Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Ed. Vilibor, São Paulo, 213 p.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D.F.(2009) Pavimentos econômicos: Tecnologia do uso solos finos lateríticos. São Paulo, Arte & Ciência.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.(2009). Pavimentos econômicos: Tecnologia do uso  
NUNES, M. C. B, BRIDGES M. G., DAWSON, A. R., Assessment of secondary material for pavement construction: Technical and Environmental Aspects. Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1996. pp 87-96.

NUNES, M.C, BRIDGES M.G., DAWSON, A.R., Assessment of secondary material for pavement construction: Technical and Environmental Aspects. Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1996. Pp 87-96.

PARENTE, E. B.; PARREIRA, A.B. e SOARES, J.B. (2002) Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico estabilizado com cimento. XVI Anpet – Congresso de pesquisa e ensino em transportes, 9p.

PEREIRA, K. L. A. (2012) Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 125 p.

PINHEIRO, H.S.; NOQUEIRA, R.E.F. Q; LOBO, C.J.S.; NOBRE, A.I.S.; SALES, J.C.M. (2012). Caracterização Química das Cinzas de Fundo Originadas pela Combustão, em Usina Termelétrica, de um Carvão Mineral do Nordeste da Colômbia. 56º Congresso

Brasileiro de Cerâmica, 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica, IX Brazilian Symposium on Glass and Related materials, 03 a 06 de junho de 2012, Curitiba, PR, Brasil.

POZZOBOM, C.E (1997) aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzido no complexo termelétrico Jorge Lacerda. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis SC – 122 p.

RESCHETTI, P.R. Jr. (2008). Avaliação do comportamento mecânico de uma solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 145p.

SCHELLMANN, W. (1980) considerations on the definition and classification of laterites. Proc. Int. Seminar on lateritisation process Trivandrum, (1979). Oxford IBH Publish. P1-10.

SCHROEDER, R. L.(1994), The Use of Recycled Materials in Highway, U. S. Department of transportation, Federal Highway Administration (FHWA), p8.

SESSA, T. C.(2013). Avaliação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concreto usando construções residenciais de menor impacto. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, RJ.

SILVA, M. A. M. & CERATTI, J.A.P.(1980) Estudo da utilização da cinza volante em blocos para construção civil caderno técnico CT-22/80. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS, Porto Alegre, RS, 157p.

SILVA, M. J. (2017). Reforço de solos utilizados em base e sub-base de pavimentos rodoviários com cinza com alto teor de cálcio. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 96p.

SMITH, R. G.; KAMWANJA, G. A. (1986). The use of Rice Husk for Making a Cementitious Joint symposium on the use of vegetable plants and their as building material. Baghdad.

Determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura em solos não saturados a partir de diversos ensaios simples de laboratório. VI Simpósio Brasileiro de Solos não saturados. Salvador, BA, 339-348.

VALENCIA, Y.G, FARIAS, M.M., CAMAPUM DE CARVALHO, J e CORDÃO NETO, M.P. (2007). Determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura em solos não saturados a partir de diversos ensaios simples de laboratório, VI Simpósio Brasileiro de solos não saturados. Salvador, BA, 339-348.

VALENTI DA SILVA, MOTTA, A. C. V, MELO V. F e LIMA V. C.(2008) Variáveis de acidez em função da mineralogia da fração argila solo. R. Bra. Ci. Solo, 32:551-559, 2008).

VARGAS, M. (1997) Introdução à mecânica do solos. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, 509p.

VILLIBOR D.F.; NOGAMI, J.S.; BELIGNI, M e CINCERRE, J.R. (2000). Pavimentos com Solos Lateríticos e Gestão e Manutenção de Vias Urbana. BPV/UFU.São Paulo, SP.  
VILLIBOR, D. F.,NOGAMI, J.S., SÓRIA, M.H. A., FABRRI, G.T.P (1993). Solos do Interior de São Paulo, Capítulo 11, São Paulo, SP.

WINTERKON, H, e CHANDRASEKHARAN, E.C. (1951). Laterite Soils and Their Stabilization. HRB. BULL. N° 44.

ZHANG, Z. e TAO, M. (2008) Durability of cement stabilized low plasticity soils, Journal Of Geotechnical and Geonvironmental Engineering, ASCE, pgs 203-213.

# ANEXO

**Dados do Interessado:**

<b>Interessado:</b>	JOGÉRIO EVANGELISTA DE FREITAS
<b>Endereço:</b>	Rua das Mozendras, 293 - Pricumã - Boa Vista/RR

**Dados da Amostra:**

<b>Local de coleta:</b> Cinza da casca de arroz	
<b>Material coletado:</b> Cinza	
<b>Data de coleta:</b> 15/7/2017	<b>Data de recebimento:</b> 29/12/17 13:38:40
<b>Responsável pela coleta:</b> Interessado	
<b>Observações:</b> Classificar amostra segundo NBR 10.004/2004	
<b>Período de análise:</b> 29/12/17 13:38:40 à 12/01/18 16:28:12	
<b>Data da publicação:</b> 19/01/18 11:28:51	<b>Data de emissão do relatório:</b> 19/01/18 16:39:20

**1. Origem do Resíduo**

O resíduo é proveniente da queima em indústria cerâmica.

**2. Descrição do processo de segregação e seus constituintes principais**

O resíduo é constituído de cinza de casca de arroz.

**3. Inflamabilidade**

Não produz fogo em condições normais de temperatura e pressão nem sob fricção, absorção de umidade ou por alterações químicas espontâneas.

**4. Corrosividade**

pH 1:1 = 10,0

Não corrosivo, pois o pH situa-se acima de 2,0 e abaixo de 12,5.

**5. Patogenicidade**

Não avaliado.

**Resultados da amostra**

**Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.004 - Massa Bruta**

<b>NBR 10.004/2004 - Massa bruta</b>					
Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	VR NBR 10.004:2004	Referência do Método Analítico
Cianeto	mg CN/Kg	< 0,005	0,005	250	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 CN E
pH Solução 1:1	-	10,00	---	---	ABNT NBR 10004:2004
Sulfeto	mg S-2/Kg	< 0,10	0,100	500	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 S2 - D
Umidade	%	0,743	0,0001	---	Gravimétrico

**Massa Bruta:** De acordo com a NBR 10.004:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Massa bruta: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos.

**Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.005 - Lixiviado**

<b>NBR 10.005/2004 - Lixiviado</b>
------------------------------------

Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	VR NBR 10.005:2004	Referência do Método Analítico
Arsênio	mg As/L	0,009	0,004	1,0	EPA 200.7/2001
Bário	mg Ba/L	0,184	0,001	70,0	EPA 200.7/2001
Cádmio	mg Cd/L	< 0,0006	0,0006	0,5	EPA 200.7/2001
Chumbo	mg Pb/L	0,035	0,004	1,0	EPA 200.7/2001
Cromo	mg Cr/L	0,009	0,003	5,0	EPA 200.7/2001
Fluoreto	mg F/L	< 0,07	0,070	150	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 F - D
Mercúrio	mg Hg/L	0,0063	0,0002	0,1	EPA 200.7/2001
pH à 25°C - Bancada	-	4,15	-	---	SMWW, 22ª Edição, Método 4500B
Prata	mg Ag/L	< 0,002	0,002	5,0	EPA 200.7/2001
Selênio	mg Se/L	< 0,007	0,007	1,0	EPA 200.7/2001

**Lixiviado:** De acordo com a NBR 10.005:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Lixiviado - anexo F.: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos, portanto o resíduo apresentou-se como **NÃO TÓXICO**.

**Tipo de Amostra: Resíduo Sólido - NBR 10.006 - Solubilizado**

NBR 10.006/2004 - Solubilizado					
Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	VR NBR 10.006:2004	Referência do Método Analítico
Alumínio	mg Al/L	0,049	0,006	0,2	EPA 200.7/2001
Arsênio	mg As/L	< 0,004	0,004	0,01	EPA 200.7/2001
Bário	mg Ba/L	1,905	0,001	0,7	EPA 200.7/2001
Cádmio	mg Cd/L	< 0,0006	0,0006	0,005	EPA 200.7/2001
Chumbo	mg Pb/L	< 0,004	0,004	0,01	EPA 200.7/2001
Cianeto	mg CN/L	< 0,005	0,005	0,07	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 CN E
Cloreto	mg Cl/L	78,7	5,00	250	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 Cl C
Cobre	mg Cu/L	< 0,006	0,006	2,0	EPA 200.7/2001
Cromo	mg Cr/L	< 0,003	0,003	0,05	EPA 200.7/2001
Fenóis Totais	mg Fenol/L	0,046	0,003	0,01	SMWW, 22ª Edição, Método 5530 D
Ferro	mg Fe/L	0,124	0,006	0,3	EPA 200.7/2001
Fluoreto	mg F/L	< 0,07	0,070	1,5	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 F - D
Manganês	mg Mn/L	0,262	0,001	0,1	EPA 200.7/2001
Mercúrio	mg Hg/L	0,0028	0,0002	0,001	EPA 200.7/2001
Nitrato	mg N-NO3/L	15,2	1,030	10,0	ABNT NBR12620/1992
pH à 25°C - Bancada	-	10,3	-	---	SMWW, 22ª Edição, Método 4500B
Prata	mg Ag/L	< 0,002	0,002	0,05	EPA 200.7/2001
Selênio	mg Se/L	< 0,007	0,007	0,01	EPA 200.7/2001
Sódio	mg Na/L	1,69	0,12	200	EPA 200.7/2001
Sulfato Total	mg SO4/L	147	20,2	250	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 SO4 E
Surfactantes	mg MBAS/L	< 0,1	0,100	0,5	SMWW, 22ª Edição, Método 5540 C
Zinco	mg Zn/L	0,107	0,006	5,0	EPA 200.7/2001

**Solubilizado:** De acordo com a NBR 10.006:2004 - Classificação de resíduos sólidos - item Solubilizado - anexo G.: O(s) parâmetro(s) Bário, Manganês, Mercúrio, Nitrato, Fenóis Totais ultrapassam os limites máximos permitidos.

**Classificação:** Em função dos resultados obtidos, o resíduo apresentou-se como NÃO PERIGOSO - CLASSE II A - NÃO INERTE.

**Legendas:**

L.Q. – Limite de Quantificação.

N.A. – Não se aplica.

N.D. – Não Detectado.

VR – Valor de Referência.

(\*\*\*) : Análise prejudicada em função da característica da amostra.

APHA : American Public Health Association.

EPA : Environmental Protection Agency.

Farmacopéia Brasileira 5ª edição-2010 / Método Cinético Turbidimétrico.

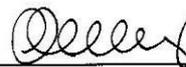
NBR: Norma Brasileira.

SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 22nd edition:2012

**Observações:**

- Para amostras sólidas: os resultados são expressos em base seca.
- Cadastro na FEPAM Nº 00049/2016-DL válido até 18/12/2018
- Os dados brutos referentes à amostra são armazenados em arquivo físico pelo prazo de 5 anos a contar da emissão deste relatório.
- Os Relatórios de Análise referentes à amostra serão armazenados eletronicamente pelo prazo de 10 anos a contar da emissão deste relatório.
- Os resultados contidos neste Relatório de Análise aplicam-se somente a amostra ensaiada.
- Padrão de Emissão: Padrão de emissão conforme Portaria/Resolução/Norma.
- Período de análise: Conforme Procedimento interno PP.COL.POP1 - Rev. 20 - Guia de Coleta e Preservação de Amostras.
- Proibida a reprodução parcial deste documento.
- Coleta: Coletas realizadas pelo Green Lab seguem os seguintes procedimentos internos disponíveis em nosso site:
  - PP.COL.POP1 – Rev. 20 - Guia de Coleta e Preservação de Amostras
  - PP.COL.POP2 – Rev. 12 - Coleta
  - PP.COL.IT2 – Rev. 10 - Coleta de Efluentes e Águas Gerais
  - PP.COL.IT5 – Rev. 13 - Coleta de Água de Diálise
  - PP.COL.IT6 – Rev. 11 - Coleta de Águas Superficiais
  - PP.COL.IT7 – Rev. 11 - Coleta de Águas Subterrâneas (Poços de Monitoramento e Piezômetros)
  - PP.COL.IT8 – Rev. 10 - Coleta de Resíduo Sólido
  - PP.COL.IT9 – Rev. 10 - Coleta de Águas Nobres
  - PP.COL.IT10 – Rev. 9 - Coleta de Solos
- “As coletas realizadas pelo Interessado seguem conforme os procedimentos disponibilizados pelo Green Lab ou procedimentos internos do cliente, neste caso, a veracidade das informações é de responsabilidade do mesmo.”

**Responsável Técnico**



Graciema Formolo Pellini  
Responsável Técnico - CRQ-V 05200428