



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA
DIONE MARCELO GERTZ

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM ADIÇÃO DE CIMENTO E CINZA
DE CASCA DE ARROZ

CERRO LARGO

2021

DIONE MARCELO GERTZ

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM ADIÇÃO DE CIMENTO E CINZA
DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo

CERRO LARGO

2021

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Gertz, Dione Marcelo
Estabilização de solo argiloso com adição de cimento e cinza de casca de arroz / Dione Marcelo Gertz. -- 2021.
80 f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS, 2021.

1. Estabilização de Solos. 2. Cimento. 3. Cinza de Casca de Arroz. I. Vendruscolo, Márcio Antônio, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

DIONE MARCELO GERTZ

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM ADIÇÃO DE CIMENTO E CINZA
DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal da Fronteira Sul.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

26/05/2021


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Fabiano Cassol



Prof. Dra. Juliana Marques Schöntag



Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais Edgar e Mairi, minha esposa Cherla, e a meus irmãos Cristian e Neiva que nunca mediram esforços para me ajudar a realizar esta importante etapa da minha vida.

Agradeço ao professor orientador Márcio Antônio Vendruscolo, pela sua orientação e incentivo na elaboração deste trabalho de conclusão, pela disponibilidade, apoio e amizade.

A todos os professores do curso de Engenharia Ambiental, por serem profissionais inspiradores que contribuíram com minha formação acadêmica e pessoal.

A Universidade Federal da Fronteira Sul pela oportunidade de ter acesso à um ensino de qualidade.

Aos meus amigos que fiz durante a graduação, pelos inúmeros momentos de alegria convividos juntos e pelo apoio nos momentos de dificuldade.

Aos colegas de curso, pelas alegrias e dificuldades compartilhadas durante esse período de graduação.

À empresa EKOSIL de Itaqui- RS e seus responsáveis por terem cedido o material para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para que eu chegasse à este momento especial.

RESUMO

Com o aumento da demanda mundial por alimentos, têm-se buscado pelo aumento das áreas cultivadas e da produtividade, com o uso de novas técnicas de produção, desenvolvimento de equipamentos e métodos de gestão do agronegócio. Entretanto, o cultivo e o beneficiamento da produção têm gerado uma série de problemas ambientais, gerando uma quantidade muito grande de resíduos, muitos dos quais não têm uma utilização adequada, sendo descartados, muitas vezes de forma incorreta. Tendo em vista essa percepção ambiental, neste trabalho foi proposto fazer o uso do subproduto cinza de casca de arroz (CCA), oriundo de resíduo agrícola abundante, que sem a destinação final adequada é um passivo ambiental, agregando valor a este, e diminuindo de certa forma a exploração de jazidas naturais usadas para a produção do cimento, além de utilizar o solo, recurso abundante, adicionado de material cimentante, visando a diminuição de custos de obras. Este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento mecânico (resistência à compressão) de um solo argiloso estabilizado através da adição de cimento e cinza de casca de arroz (CCA), verificando através de pesquisa bibliográfica e investigando através de ensaios laboratoriais, se a CCA proporciona melhor desempenho de resistência adicionando-se os percentuais de 4%, 7% e 10% de cimento e 5%, 10% e 15% de CCA (em massa), ao solo, através da avaliação de corpos de prova. Os ensaios de compactação comprovaram que com a adição de cimento e CCA ao solo, há uma redução da umidade ótima e um aumento na densidade aparente seca máxima da mistura. Os melhores resultados com ganho de resistência obtidos foram com os teores de cimento de 4%, 7% e 10% de cimento para adição de até 5% CCA, com ganhos significativos de resistência dos corpos de prova, devido ao melhoramento da resistência à compressão da mistura solo-cimento, de modo a conferir as características necessárias para uso como material estabilizante em aterros. Os resultados dos ensaios de compressão simples mostram que o solo natural, resiste a uma tensão maior antes do rompimento em relação as misturas de solo de até 5% CCA, acima desse teor a resistência do solo diminui, devido à dificuldade de interação entre as partículas de solo e CCA. Conforme adiciona-se somente cimento ao solo, ocorre ganho gradativo de resistência devido ao aumento do teor de cimento pois ocorrem mais interações das partículas, formando uma camada cimentante devido a umidade da mistura. Ocorreu dificuldade da homogeneização da mistura e perda de resistência para os teores de 10% e 15% CCA respectivamente.

Palavras-Chave: *Estabilização de Solos; Cimento; Cinza de Casca de Arroz.*

ABSTRACT

With the increase in world demand for food, efforts have been made to increase cultivated areas and productivity, with the use of new production techniques, development of equipment and agribusiness management methods. However, the cultivation and processing of production has generated a series of environmental problems, generating a very large amount of waste, many of which do not have a proper use, being discarded, often incorrectly. In view of this environmental perception, in this work it was proposed to use the gray rice husk by-product (CCA), derived from abundant agricultural waste, which without an appropriate final destination is an environmental liability, adding value to it, and in a way, the exploration of natural deposits used for the production of cement, in addition to using the soil, an abundant resource, with the addition of cementing material, in order to reduce construction costs. This work aims to assess the mechanical behavior (compressive strength) of a clayey soil stabilized by adding cement and rice husk ash (CCA), checking through bibliographic research and investigating through laboratory tests, whether CCA provides better resistance performance by adding the percentages of 4%, 7% and 10% cement and 5%, 10% and 15% CCA (by mass), to the soil, through the evaluation of specimens. The compaction tests proved that with the addition of cement and CCA to the soil, there is a reduction of the optimum moisture content and an increase in the maximum dry apparent density of the mixture. The best results with resistance gain obtained were with the contents of cement of 4%, 7% and 10% of cement for addition of up to 5% CCA, with significant gains in strength of the specimens, due to the improvement of the compressive strength of the soil-cement mixture, in order to provide the necessary characteristics for use as a stabilizing material in landfills. The results of the simple compression tests show that the natural soil, resists to a higher tension before the breaking in relation to the soil mixtures of up to 5% CCA, above that content the resistance of the soil decreases, due to the difficulty of interaction between the particles soil and CCA. As only cement is added to the soil, there is a gradual gain of resistance due to the increase in the cement content because more interactions of the particles occur, forming a cement layer due to the moisture in the mixture. There was difficulty in homogenizing the mixture and loss of resistance for the levels of 10% and 15% CCA respectively.

Key words: *Soil Stabilization; Cement; Rice Husk Ash.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe-I por setor industrial..... | 18 |
| Figura 2: Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe-I..... | 19 |
| Figura 3: Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe-II por setor industrial..... | 19 |
| Figura 4: Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe-II..... | 20 |
| Figura 5: Composição da casca de arroz, porcentagem em massa..... | 22 |
| Figura 6: Aplicações para a casca de arroz..... | 24 |
| Figura 7: Mapa de Solos do Rio Grande do Sul..... | 31 |
| Figura 8: Compactação de solo em vias públicas..... | 32 |
| Figura 9: Compactação de solo em área de aterro..... | 32 |
| Figura 10: Exemplo de Curva de Compactação..... | 33 |
| Figura 11: Relação vazios/cimento versus resistência à compressão simples..... | 42 |
| Figura 12: Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados e curados por 7 dias..... | 43 |
| Figura 13: Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento..... | 43 |
| Figura 14: Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cimento..... | 44 |
| Figura 15: Permeabilidade ao longo da curva de compactação..... | 45 |
| Figura 16: Estrutura de solos compactados..... | 45 |
| Figura 17: Solo utilizado nos ensaios..... | 47 |
| Figura 18: Almofariz e pistilo..... | 48 |
| Figura 19: Ponto de coleta de solo..... | 49 |
| Figura 20: CCA utilizada nos ensaios..... | 49 |
| Figura 21: Cimento aplicado sob a amostra de solo..... | 50 |
| Figura 22: Peneiras usadas nos ensaios de granulometria..... | 51 |
| Figura 23: Granulometria do solo..... | 53 |
| Figura 24: Limite de Liquidez..... | 54 |
| Figura 25: Cilindro utilizado nos ensaios de compactação..... | 55 |
| Figura 26: Ensaio de Próctor normal..... | 56 |
| Figura 27: Prensa hidráulica..... | 57 |
| Figura 28: Composição química e densidade da CCA conforme fabricante..... | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 29: Curva Granulométrica CCA..... | 59 |
| Figura 30: Curvas de compactação de solo +4%,7% e 10% cimento..... | 60 |
| Figura 31: Curvas de compactação de solo +5%,10% e 15% CCA..... | 61 |
| Figura 32: Curvas de compactação de solo +4% cimento +5%,10% e 15% CCA..... | 62 |
| Figura 33: Curvas de compactação de solo+ 7% cimento +5%,10% e 15% CCA..... | 62 |
| Figura 34: Curvas de compactação de solo +10% cimento+5%,10% e 15% CCA..... | 63 |
| Figura 35: Corpos de prova rompidos utilizados nos ensaios de compressão simples..... | 64 |
| Figura 36: Tensão aplicada amostra solo+ 5%,10% e 15%CCA..... | 65 |
| Figura 37: Tensão aplicada amostra solo+4%, 7% e 10% cimento..... | 66 |
| Figura 38: Tensão aplicada amostra solo+4% cimento +5% , 10% e 15%CCA..... | 66 |
| Figura 39: Tensão aplicada amostra solo+7% cimento +5%,10% e 15% CCA..... | 67 |
| Figura 40: Tensão aplicada amostra solo+10% cimento +5%,10% e 15% CCA..... | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Quantidade de cinza gerada por resíduo agrícola..... | 22 |
| Tabela 2: Disponibilidade de cinza..... | 23 |
| Tabela 3: Análise cronológica do conhecimento do resíduo da CCA..... | 23 |
| Tabela 4: Exigências químicas para pozolanas..... | 26 |
| Tabela 5: Exigências físicas para as pozolanas..... | 26 |
| Tabela 6: Abertura das peneiras utilizadas na análise granulométrica de acordo com a NBR 7181/1984..... | 28 |
| Tabela 7: Classes de Solo..... | 29 |
| Tabela 8: Previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo..... | 36 |
| Tabela 9: Composição da amostra de solo-cimento-CCA..... | 50 |
| Tabela 10: Abertura das peneiras na análise granulométrica..... | 52 |
| Tabela 11: Valores de densidade aparente seca máxima e umidade ótima diferentes teores de cimento..... | 60 |
| Tabela 12: Valores de densidade aparente seca máxima e umidade ótima para diferentes teores de CCA..... | 61 |
| Tabela 13: Tensões máximas necessárias para o rompimento dos moldes..... | 65 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 OBJETIVOS | 16 |
| 1.1.1 Objetivo geral | 16 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 16 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL | 17 |
| 2.2 CLASSIFICAÇÃO DA CCA SEGUNDO AS LEGISLAÇÕES | 20 |
| 2.3 CULTURA DO ARROZ | 21 |
| 2.4 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA E DAS CINZAS DE CASCA DE ARROZ | 24 |
| 2.5 ATIVIDADE FÍSICO-QUÍMICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ | 26 |
| 2.6 SOLOS | 27 |
| 2.7 TIPOS DE SOLO | 28 |
| 2.7.1 Latossolos | 29 |
| 2.7.2 Solos Compactados | 31 |
| 2.8 A ESTABILIZAÇÃO DE SOLO-CIMENTO | 34 |
| 2.8.1 Características do comportamento solo-cimento | 37 |
| 2.8.2 Efeitos do cimento | 38 |
| 2.8.3 Efeitos da densidade e compactação | 39 |
| 2.8.4 Efeito do teor de umidade e do fator água/cimento | 39 |
| 2.8.5 Efeito da relação vazios/cimento | 41 |
| 2.9 COMPORTAMENTO FÍSICO DO SOLO/CIMENTO | 42 |
| 2.9.1 Resistência à compressão simples | 42 |
| 2.9.2 Condutividade hidráulica | 44 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 47 |
| 3.1 MATERIAIS | 47 |
| 3.1.1 Solo | 47 |
| 3.1.2 Cinza De Casca de Arroz | 49 |
| 3.1.3 Água | 49 |
| 3.1.4 Cimento | 50 |

| | |
|--|----|
| 3.2 MÉTODOS..... | 50 |
| 3.2.1 Umidades..... | 51 |
| 3.2.2 Granulometria..... | 51 |
| 3.2.3 Limites de Atterberg..... | 53 |
| 3.2.4 Densidade real dos grãos..... | 54 |
| 3.2.5 Ensaios de compactação (Próctor Normal)..... | 55 |
| 3.2.6 Ensaios de resistência à compressão simples..... | 56 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 58 |
| 4.1 GRANULOMETRIA | 58 |
| 4.1.1 CINZA DE CASCA DE ARROZ..... | 58 |
| 4.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR NORMAL)..... | 59 |
| 4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES..... | 63 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 69 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 70 |

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda mundial por alimentos, têm-se buscado pelo aumento das áreas cultivadas e da produtividade, com o uso de novas técnicas de produção, desenvolvimento de equipamentos e métodos de gestão do agronegócio. Entretanto, o cultivo e o beneficiamento da produção têm gerado uma série de problemas ambientais, gerando uma quantidade muito grande de resíduos, muitos dos quais não têm uma utilização adequada, sendo descartados, muitas vezes de forma incorreta.

A estimativa da geração de resíduos oriundos das agroindústrias associadas à agricultura para as culturas temporárias e permanentes mais representativas em termos de área cultivada no Brasil, representa um total de 291 milhões de toneladas de resíduos (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA,2012). Ainda segundo o Ipea (2012), o aproveitamento de subprodutos agrícolas é um assunto que têm despertado interesse de pesquisadores e empresas, devido a sua possibilidade de aplicações com finalidades diversas. O Brasil é conhecido por seu grande potencial de recursos renováveis tais como produtos agrícolas e florestais. Como consequência, há uma grande diversidade de resíduos gerados, como o bagaço de cana-de-açúcar, a fibra de coco, a casca de arroz, a casca da aveia e aparas de madeira. A estimativa da produção de arroz para 2017 alcançou 11,6 milhões de toneladas (IBGE, 2017). O principal resíduo gerado pela produção do arroz em seu processamento é a casca.

Segundo Amick (1982) as cascas de arroz representam 23% dos grãos. Essa casca possui um alto volume e baixa densidade. Estima-se que para cada hectare de cultura de arroz sejam produzidas de 4,0 a 6,0 toneladas de casca (VIEIRA, 2012). É um material fibroso composto principalmente por celulose, lignina e sílica, insolúveis em água, com baixas propriedades nutritivas e resistência à intempéries.

A casca de arroz pode ser usada como combustível por apresentar um alto poder calorífico e um alto conteúdo de materiais voláteis (ARMESTO et al., 2002). A casca de arroz pode variar sua composição de acordo com a variedade plantada, clima e das condições do solo, sendo composta principalmente de celulose (50%), lignina (30%) e resíduo orgânico (20%), possuindo baixa densidade e elevado volume (FERNANDES, 2006; BEZERRA, 2010). Boa parte desse resíduo é depositado no solo sem qualquer tratamento e parte é queimada ao ar livre, com emissão de monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO₂) (DELLA, KUHN e HOTZA, 2001).

A queima controlada é bastante usada na geração de energia térmica inclusive no próprio beneficiamento do arroz. Entretanto, isso gera uma grande quantidade de cinzas, um resíduo de difícil degradação e com alto teor de silício que, disposto de forma inadequada, pode

causar danos ao meio ambiente e aos seres humanos (CHAVES, et al., 2009).

A compostagem é, para a maioria dos produtores de arroz, o primeiro destino da casca, com o objetivo de reduzir sua carga orgânica. Geralmente é depositada diretamente no solo. No entanto, o tempo que a casca de arroz leva para se decompor é extremamente elevado, além de liberar um grande volume de metano (CH_4), apresentar baixa densidade, resultando em um grande volume a ser disposto e conter baixas quantidades de nutrientes (OLIVEIRA; TANNOUS, 2009). Segundo Armesto (2002), a casca do arroz é a capa que encobre o grão, pesa cerca de 20% de sua massa, apresenta poder calorífico de cerca de 16 MJ/kg, teor de voláteis de 74% e cerca de 12,8% de cinzas, o que indica que esta pode ser um bom combustível.

Em função do elevado poder calorífico, a casca de arroz tem sido utilizada como biomassa na alimentação de reatores para geração de energia e/ou vapor, o que reduz o impacto ambiental causado pela destinação desse resíduo, além de contribuir para a redução da dependência dos derivados de petróleo e uso de fontes renováveis. As vantagens de utilizar a casca de arroz fazem com que, atualmente, várias indústrias no Rio Grande do Sul tenham pequenas centrais termoelétricas utilizem esse resíduo como combustível para geração de vapor e energia (KIELING, 2009).

O excedente da indústria de arroz, como a palha e as cascas, que não são queimadas para a obtenção de energia, constituem um problema ambiental e, ao mesmo tempo, desperdício de insumos renováveis. O aproveitamento de tal rejeito têm se revelado uma possível alternativa econômica, com possibilidade de geração de bioprodutos, com elevado valor agregado, demonstrando oportunidades para a sua reutilização, evitando o descarte indevido no meio ambiente e valorizando o resíduo como matéria prima. (RAMBO, 2009). Particularmente, têm-se desenvolvido pesquisas e aplicações para reutilizar os subprodutos residuais do cultivo do arroz como aditivos estabilizantes de solos, onde o baixo custo é mais uma vantagem do seu uso. Portanto, resulta em soluções técnica, econômica e ambientalmente ótimas. Destacam-se neste campo as escórias de aciaria e as cinzas diversas.

Existem diversas alternativas para resolver o problema da disposição final da cinza de casca de arroz (CCA) como resíduo, tais como: seu emprego como pozolana para concretos, ou como agente estabilizante de solos, combinado com cal ou com cimento Portland, para materiais de pavimentos de baixo volume de tráfego. Metha (1975), na Universidade de Berkeley, na Califórnia (EUA), desenvolveu um processo para produzir pozolanas a partir de casca de arroz. O mesmo autor afirma que a pozolana obtida pelo processo é altamente reativa e estruturalmente tão boa quanto o cimento Portland. No Uruguai, Rodríguez (2000) estudou a potencialidade de uso da CCA como aditivo de concretos tradicionais e de alta resistência.

A adição de CCA aos solos apresenta como vantagens melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, habilitando seu emprego como materiais para subleitos, sub-bases e bases de pavimentos. É uma solução à deposição final do subproduto residual (METHA, 1975). Transformando a CCA em produtos pozolânicos, quando combinada com cal ou cimento e água ou encapsulado de forma adequada, é possível reduzir os efeitos nocivos sobre a saúde humana. Conclui-se que pesquisar a potencialidade de uso deste resíduo, para a melhoria das propriedades mecânicas de solos, é interessante, por suas vantagens técnicas, econômicas e ambientais, sobretudo visando sua aplicação nas regiões orizícolas.

Diante deste cenário, o presente trabalho traz como sugestão a reutilização da CCA, incorporada a solos compactados misturados ao cimento, buscando a estabilização química de solo, e possibilitando a utilização desses em aterros, utilizando o resíduo cinza de casca de arroz de pronto uso industrial denominada Sílica Verde. É um produto industrial derivado da calcinação controlada e constante da casca de arroz em termoelétricas. Seu composto com até 95% de dióxido de silício (SiO_2) com baixa quantidade de carbono e traços de metais, pode ser aplicada como carga em compostos de borracha, plástico e concreto. A sílica usada na realização deste trabalho foi fornecida gratuitamente pela empresa Ekosil, situada no município de Itaquí-RS, empresa que atua no ramo da produção de CCA com diversas aplicações industriais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento mecânico (resistência à compressão e tensão de cisalhamento) de um solo argiloso compactado com adição de diferentes percentuais de cimento (4%, 7% e 10%) e cinza de casca de arroz (CCA) (5%, 10% e 15%), visando sua utilização em aterros de solos estabilizados.

1.1.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, podemos destacar os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar o solo (Latosolo) quanto a granulometria e a densidade real dos grãos;
- b) Avaliar percentuais de cimento e CCA adicionados ao solo e avaliar o grau de compactação através do método Próctor normal (peso específico e resistência ao cisalhamento, e uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade);
- c) Avaliar a resistência à compressão simples do solo estabilizado com cimento e cinza de casca de arroz para as diferentes adições de cimento e CCA.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados as principais características do resíduo cinza de casca de arroz (CCA) usado no estudo, sua classificação de acordo com as normas vigentes e os processos envolvidos na estabilização de um solo argiloso, através da adição de diferentes teores de cimento e cinzas de casca de arroz. Será discutido as problemáticas dos resíduos gerados após o beneficiamento do arroz, sua reutilização energética e aplicação da cinza oriunda da queima da casca e suas aplicações.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

Segundo a ABNT NBR 10.004/2004, resíduos sólidos são definidos da seguinte maneira:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT NBR 10.004/2004, p.1),

A norma que classifica os resíduos sólidos no Brasil de acordo com sua periculosidade é a NBR ABNT 10004/2004, que os divide em quatro classes:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos: são resíduos que em função de suas propriedades físico-químicas e infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente. São considerados perigosos os que apresentam ao menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos que recebem esta classificação requerem cuidados especiais de destinação.
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos: não apresentam nenhuma das características

acima, podem ainda ser classificados em dois subtipos:

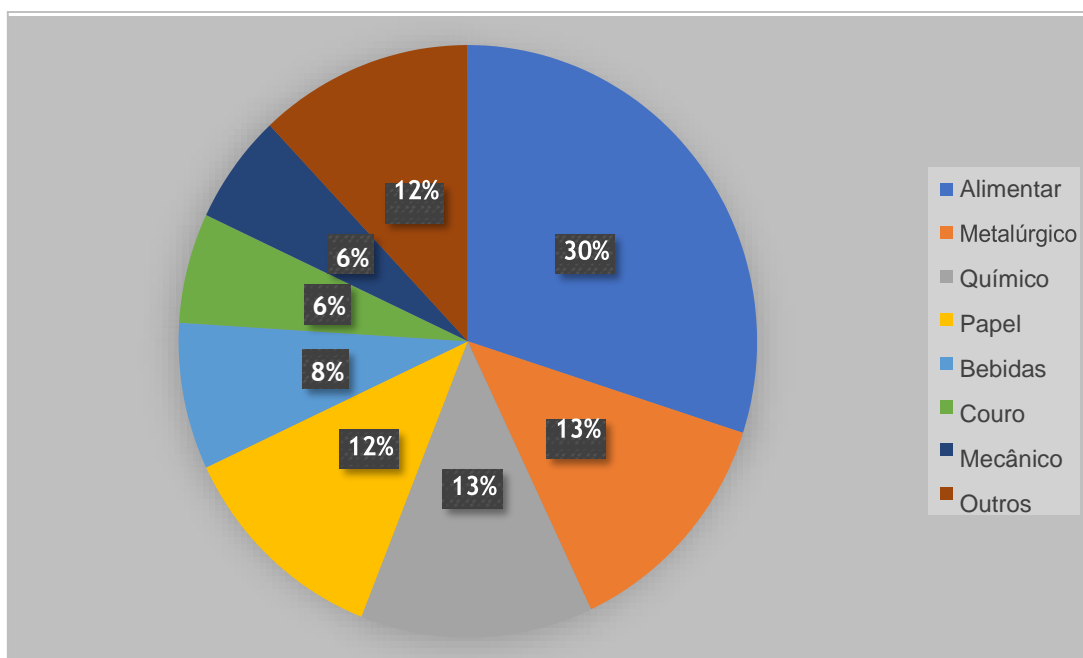
Classe II A – Não Inertes: são aqueles que não se enquadram no item anterior, Classe I, nem no próximo item, Classe II B. Geralmente apresenta alguma dessas características: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

Classe II B – Inertes: quaisquer resíduos que submetidos a um contato estático ou dinâmico com água, não tenham nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção da cor, turbidez, dureza e sabor.

Um estudo realizado pelo órgão ambiental do Rio Grande do Sul (FEPAM) em 2003 mostrou que a maior quantidade de resíduos industriais produzidos no estado, 92%, são de Classe II, ou seja, não perigosos. Entretanto causam muitos problemas justamente pela quantidade produzida.

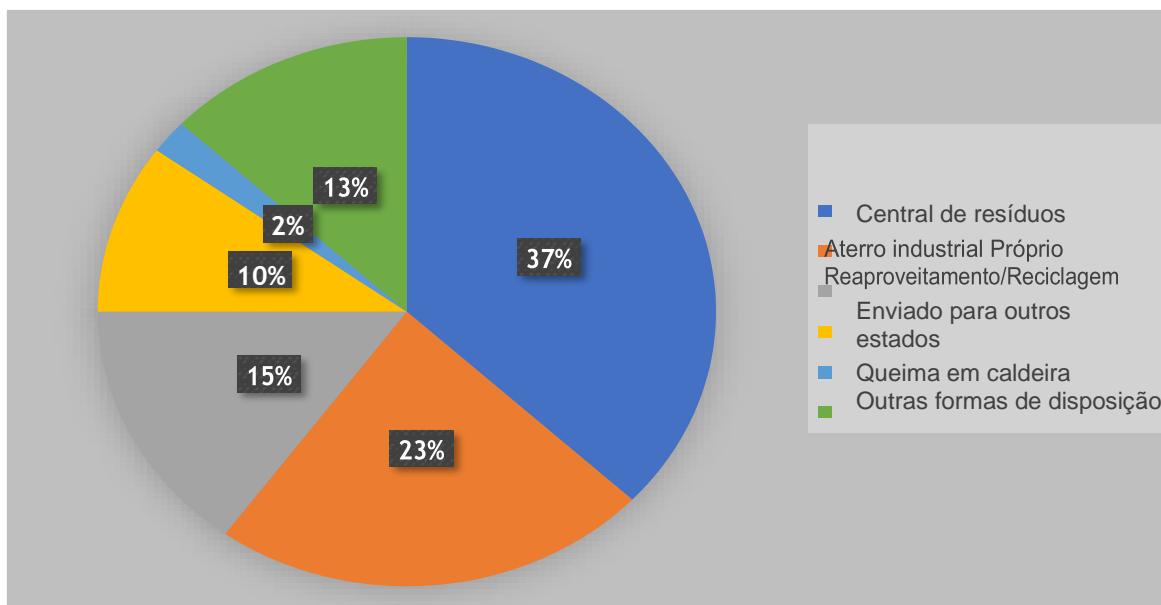
Nas Figuras 1 e 2 podemos verificar a porcentagem de resíduo produzida por cada setor industrial e o destino final mais comum destes resíduos no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 1 - Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe I por setor industrial



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003.

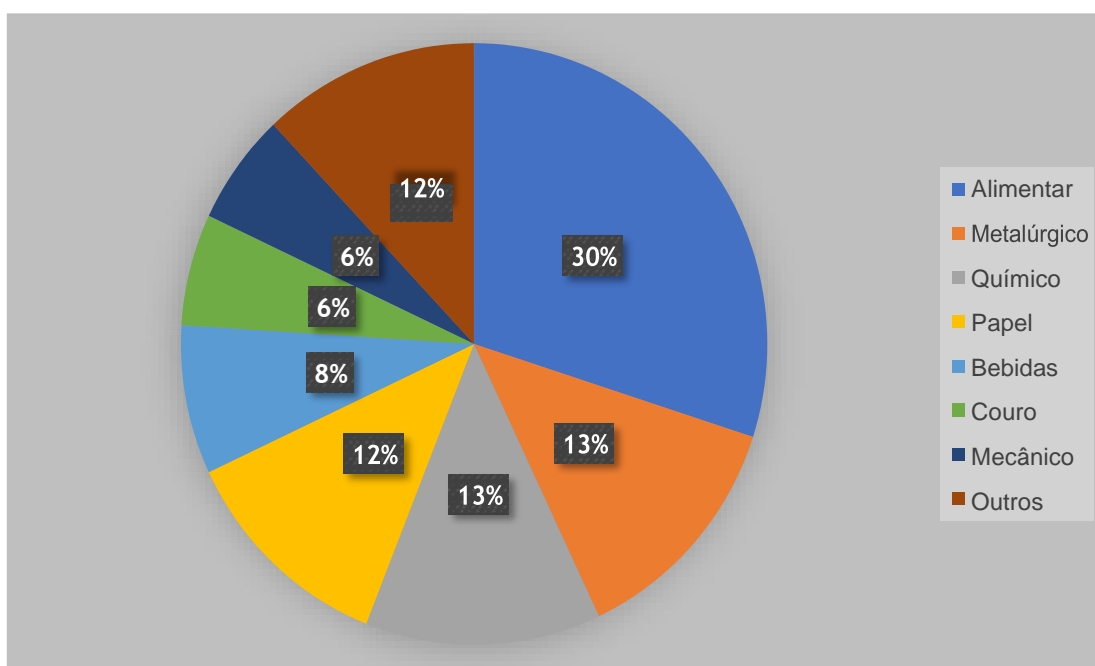
Figura 2- Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe I



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003.

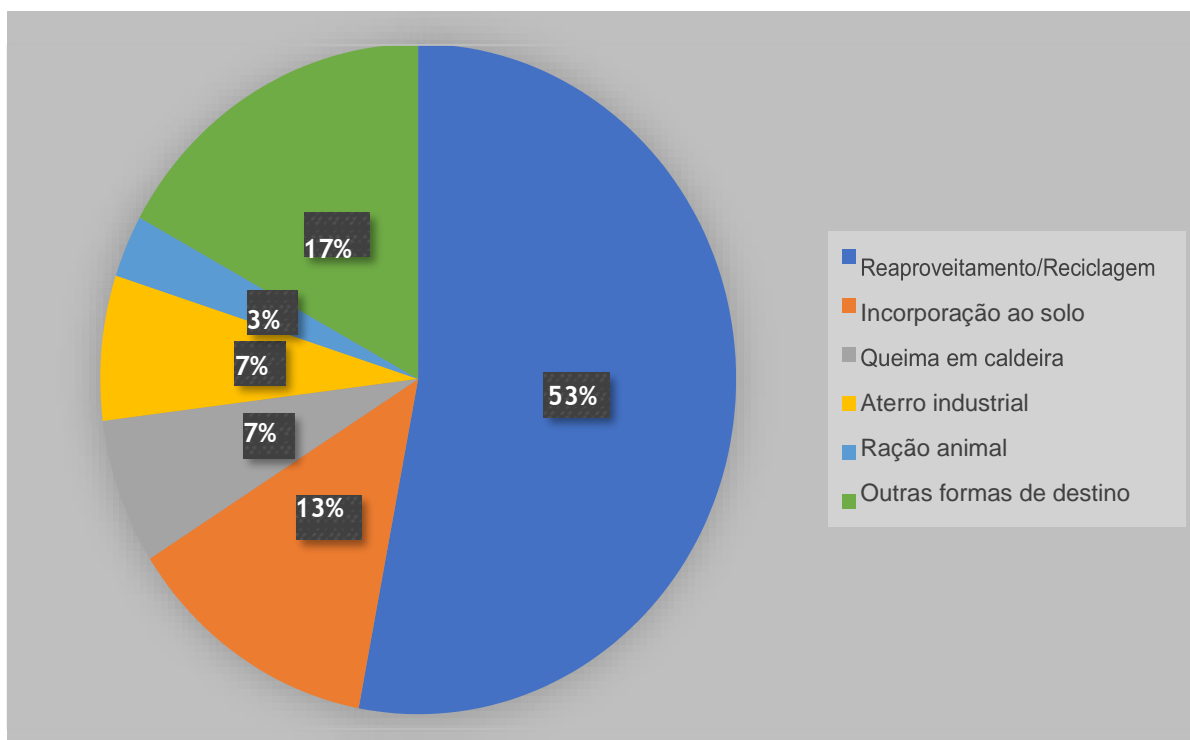
Em relação aos resíduos não perigosos, podemos observar na Figura 3 que o setor alimentar é um dos grandes responsáveis pela geração, contribuindo com 30%. Já a Figura 4 mostra que o reaproveitamento e a reciclagem era apenas 53% do destino mais comum dos resíduos não perigosos gerados.

Figura 3 - Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe II por setor industrial



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003.

Figura 4 - Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe II



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003.

A disposição dos resíduos (casca e cinzas das cascas de arroz) em aterros industriais, quando não monitorado, torna-se perigoso para a população e gera um sério problema ambiental. Devido ao volume produzido, além disso, acarreta um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais levam as empresas a destinar seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos. Além da empresa se preocupar cada vez mais com o cuidado de gerenciamento, tratamento, manutenção e destinação final dos resíduos ao aterro, se torna uma responsabilidade à empresa por toda a sua trajetória de vida.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DA CCA SEGUNDO AS LEGISLAÇÕES

A prática de reutilização de resíduos do beneficiamento de arroz ainda não é muito utilizada no Brasil, principalmente em se tratando das cinzas resultantes da queima da casca. O fato deve-se talvez por não haver uma legislação específica que regule em quais atividades essa cinza pode ser reutilizada. Apenas existem regulamentações para o reuso na fabricação de pneus, geomembranas e agregado de concreto não estrutural. O ideal seria a

elaboração de um estudo para saber o real risco que essa atividade poderia causar ao meio ambiente, regulamentando, ou não, sua utilização para determinadas áreas, fazendo com que o mercado fique livre para se estabelecer.

No Brasil, as legislações em relação aos resíduos do beneficiamento de arroz (casca e cinzas destas) estão baseadas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), implementada pela Lei nº 12305/2010. (BRASIL, 2010). Também podemos citar como legislações importantes:

- Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente nº 307 a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil; (BRASIL, 2002)
- NBR 10.004 que é responsável pela classificação dos resíduos sólidos; (ABNT, 2004);
- NBR 10.005 relativa à lixiviação dos resíduos; (ABNT, 2004)
- NBR 10.006 que estabelece métodos de solubilização de Resíduos Sólidos; (ABNT, 2004).

Em geral, a casca de arroz e suas cinzas são enquadradas como resíduos não perigosos CLASSE II A – NÃO INERTE.

2.3 CULTURA DO ARROZ

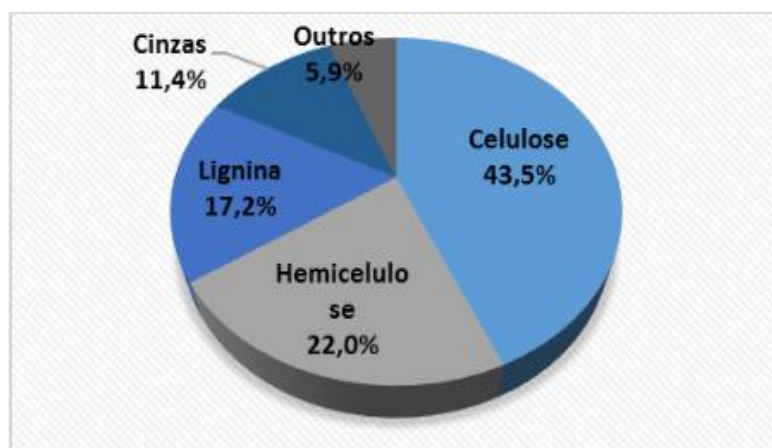
De acordo com estatísticas da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), o Brasil é o nono maior produtor de arroz (*Oryza sativa L.*) do mundo. A produção está localizada, principalmente, no estado do Rio Grande do Sul, com 66,5% da produção. (FAO, 2012; IBGE, 2015). Conforme Tamanini e Haully (2004) a América Latina produz aproximadamente 500 milhões de toneladas/ano de subprodutos agroindustriais, sendo que o Brasil produz quase metade deste montante. Na maioria das vezes, esses rejeitos oriundos dessa produção são dispensados no meio ambiente, provocando um acúmulo excessivo de matéria orgânica. Esses resíduos podem ser convertidos em energia, ou então usados na criação de produtos com finalidades diversas.

A casca do arroz é o subproduto mais expressivo gerado no beneficiamento do arroz, e seu volume representa cerca de 20% da massa do arroz em casca (PANDEY; SOCCOL; MITCHELL, 2000). Esta casca é uma matéria-prima de baixo custo, de difícil reaproveitamento, baixas propriedades nutritivas e elevado teor de sílica. Segundo KIELING (2009) trata-se de uma dura capa lenhosa, formada por celulose, lignina e materiais inorgânicos.

Segundo Ferreira (2005), a composição da casca de arroz apresenta um teor de cinzas de 11,4% e, essas cinzas geralmente contêm 80-90% de SiO₂, 5% de K₂O, 4% de P₂O₅ e 1-2% de CaO e pequenas quantidades de Mg, Fe e Na. Contudo, os principais componentes orgânicos

são a celulose, a hemicelulose e a lignina, nas proporções que podem ser vistas na Figura 5.

Figura 5– Composição da casca de arroz, porcentagem em massa.



Fonte: Adaptado de Ferreira, (2005).

Devido à intensa produção deste cereal em todo o mundo, o volume de casca resultante é extremamente elevado (MALHOTRA,1996; MEHTA, 1992). A queima da casca de arroz produz uma quantidade significativa de cinzas é representada na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de cinza gerada por resíduo agrícola

| Cereal | Parte da planta | Cinza (% em peso) |
|----------------|-----------------|-------------------|
| Milho | Folha | 12 |
| Arroz | Casca | 20 |
| Arroz | Palha | 14 |
| Cana-de-açúcar | Bagaço | 15 |
| Girassol | Folhas e talo | 11 |
| Trigo | Folhas | 10 |

Fonte: Mehta,1992.

Grande parte dessas cinzas apresenta características pozolânicas, ou seja, isoladamente, as cinzas não têm valor aglomerante, mas, quando finamente moídas e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e formam compostos cimentantes.

Em muitos dos países produtores de arroz, o volume de cinza produzido é bastante grande e apenas a indústria cimenteira poderia consumir tal quantidade de resíduo. Como a cinza representa aproximadamente 4% em peso do arroz em casca, resultam os valores da Tabela 2 para a disponibilidade anual de cinza de casca de arroz.

Tabela 2 – Disponibilidade de cinza

| | |
|-------------------|----------------------------|
| Mundial | 23,42 milhões de toneladas |
| Brasil | 4,2 milhões de toneladas |
| Rio Grande do Sul | 2,17 milhões de toneladas |
| Santa Catarina | 338 mil toneladas |

Fonte: IBGE,2002; Worl Rice Produstion,2002.

Pesquisas científicas envolvendo a casca de arroz e seu subproduto CCA (cinza de casca de arroz), vem sendo realizadas há muitos anos. Assim a Tabela 3 apresenta uma revisão histórica dos principais trabalhos, através de uma estrutura cronológica, a respeito dos estudos e aplicações do resíduo.

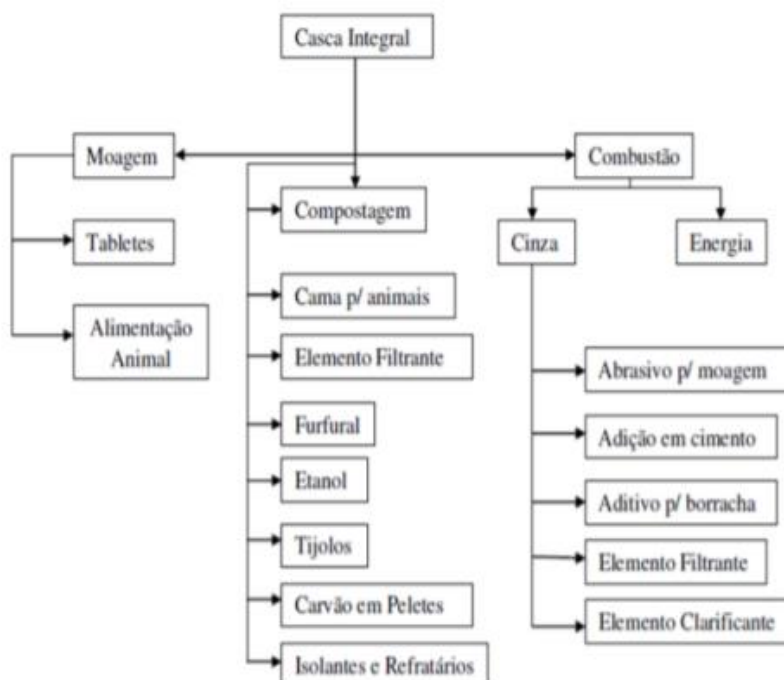
Tabela 3- Análise cronológica do conhecimento do resíduo da CCA

| Local | Autor/Ano | Trabalho |
|-----------|-----------------------------------|---|
| Alemanha | Beagle (1924) | Utilização de CCA no concreto |
| | 1940 a 1950 | Blocos confeccionados com cimento e cinza de CCA |
| Bélgica | Metha (1973) (2012) | Primeira patente no assunto |
| | Pitz (1976) | Controle de combustão em leito fluidizado |
| Índia | Metha & Pirtz (1978) | Substituição de cimento Portland por CCA em concreto massa |
| | Prakash (1979) | Utilização de CCA em trabalhos de alvenaria e fundações |
| Paquistão | 1979 | Primeiro Workshop sobre o assunto |
| Ásia | Cook (1981) | Estuda da fluência e retração de concretos de cimento Portland com CCA |
| Japão | 1982 | Produção e emprego de CCA como material cimenticio |
| Israel | Hana Yousif (1984) | Efeito da queima e moagem nas propriedades da argamassa |
| Índia | James & Rao (1986) | Morfologia e características químicas e físicas da CCA |
| Tailândia | Hwang & Wu (1989) | Hidratação e microestrutura de pastas de cimento produzidas com diferentes CCAs |
| EUA | Metha (1994) | Patente relativa a produtos altamente duráveis com cinzas, com o emprego de 5 a 30% de CCA substituindo o cimento |
| Brasil | Isaia (1995) | Efeito de misturas binárias e terciárias de pozolanas em concreto de alto desempenho |
| | Gava (1999) | Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica |
| Espanha | Paya (2001) | Determinação da sílica amorfa na CCA por um rápido método analítico |
| Brasil | Prudêncio, Santos & Dafico (2003) | Revisão sobre CCA por um rápido método analítico |
| | Isaia (2005) | Cinza de casca de arroz in: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações |
| | Poucy (2006) | Benefiamento da CCA residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico |
| | Metha & Monteiro (2008) | CCA in: Concreto, microestrutura, propriedades e materiais. |

Fonte: Adaptado de Tibone, (2007).

Silva (2009) aborda em seu trabalho as principais aplicações para a casca de arroz, conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6- Aplicações para a casca de arroz



Fonte: Silva, (2009).

Atualmente, são ainda as empresas beneficiadoras de arroz as principais consumidoras da casca como combustível para a secagem e parboilização do cereal. Como se trata, geralmente, de empresas de pequeno porte, não possuem processos para aproveitamento e descarte adequados das cinzas produzidas, que são geralmente depositadas em terrenos baldios ou lançadas em cursos d'água, ocasionando poluição e contaminação de mananciais (MALHOTRA,1996).

Diante disso, o não-aproveitamento desse material não pode mais ser aceito pela sociedade. Assim, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de utilizar esse produto em diversos setores industriais e, de maneira especial, na indústria da Construção Civil.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA E DAS CINZAS DE CASCA DE ARROZ

A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento dos grãos de arroz. É composta por quatro camadas estruturais: epiderme externa, coberta com uma espessa cutícula de células silificadas; esclerênquima ou fibra hipoderme, com parede lignificada; célula parênquima esponjosa e epiderme interna (SOUZA; MAGALHÃES;

PERSEGIL, 2002). Os principais componentes da casca são celulose e hemicelulose (50%), além de lignina (26%) e componentes orgânicos (4%), como óleos e proteínas. A massa restante inclui os materiais inorgânicos (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO , CaO , Fe_2O_3 , MnO , P_2O_5) (ANGEL et al., 2009).

Removidas durante o processo de beneficiamento do arroz, resultam como o subproduto mais volumoso, correspondendo a aproximadamente 23% da massa do arroz (DELLA; KÜHN; HOZTA, 2001) e contribuindo para um dos maiores problemas relacionados aos resíduos da atualidade, por ser gerado em grande quantidade pela indústria e agricultura (DELLA; KÜHN; HOZTA, 2005; UMAMAHESWARAN; BATRA, 2008). Estas cascas possuem baixo valor comercial, pois o alto percentual de sílica (SiO_2) e as fibras contidas não possuem valor nutritivo e por isso não são usadas na alimentação humana ou animal (FERRO; SILVA; WIEBECK, 2007).

Como produto sólido, resultante da transformação termoquímica da casca de arroz, é obtida a cinza de casca de arroz (CCA). As condições dos diferentes processos de conversão (pirólise, gaseificação e/ou combustão) determinam as características físico-químicas do produto final. A CCA corresponde de 14 a 25% da massa da casca do arroz, dependendo da variedade do arroz, do clima e do solo da região produtora (CHANDRASEKHAR et al., 2003).

Em geral, os principais elementos inorgânicos presentes nas cinzas dos combustíveis de biomassa são o Ca, K, Na, Si e P, sendo alguns destes importantes nutrientes para o solo (UMAMAHESWARAN; BATRA, 2008). O principal componente da CCA gerada com moderadas temperaturas de combustão é a sílica amorfa (SiO_2), em concentrações compreendidas entre 80 e 97% (ANGEL et al., 2009). A cristalinidade e a estrutura mineral dependem das características dos processos de combustão empregados, que resulta numa estrutura mineral das CCA normalmente constituída, por cristobalita, quartzo e tridimita (UMAMAHESWARAN; BATRA, 2008).

Do processo de queima podem resultar dois tipos distintos de cinza, a clara e a escura, que dependem do tempo de queima e da temperatura (RODRIGUES; BERALDO, 2010). A cinza clara é obtida com condições de temperatura de queima da ordem de 700 a 1000 °C e com um tempo de patamar de queima de duas horas. Esta cinza apresenta menor quantidade de carbono residual e a sílica constituinte cristaliza-se na forma de quartzo. Para temperaturas na ordem de 450 a 700 °C, com um patamar de queima de 3 a 4 horas, é obtida a cinza escura, que apresenta maior quantidade de carbono residual quando comparada a cinza clara e não é cristalizada, permanecendo a sílica no estado amorfo (FERRO; SILVA; WIEBECK, 2007).

2.5 ATIVIDADE FÍSICO-QUÍMICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

A CCA – Cinza de Casca de Arroz, como material pozolânico, pode ser classificado segundo normas. A NBR 12653 (ABNT, 1992) classifica os materiais pozolânicos segundo três classes: N, C e E. Os materiais pozolânicos da Classe N são as pozolanas naturais e artificiais obedecendo aos requisitos aplicáveis na NBR 12653 (ABNT, 1992). Os da Classe C são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, obedecendo também aos requisitos nesta Norma. Por último o material da Classe E é qualquer pozolana, cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na mesma norma.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992), os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas respectivamente nas Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 – Exigências químicas para as pozolanas

| Propriedades | Classes de material pozolânico | | |
|--|--------------------------------|-----|-----|
| | N | C | E |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ % mín. | 70 | 70 | 50 |
| SO ₃ % máx. | 4 | 5 | 5 |
| Teor de umidade, % máx. | 3 | 3 | 3 |
| Perda ao fogo, % máx. | 10 | 6 | 6 |
| Alcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx. | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Fonte: NBR 12653, ABNT (1992).

Tabela 5 – Exigências físicas para as pozolanas

| Propriedades | Classes de material pozolânico | | |
|---|--------------------------------|-----|-----|
| | N | C | E |
| Material retido na peneira 45µm, % máx. | 34 | 34 | 34 |
| Índice de atividade pozolânica: | | | |
| - com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % min. | 75 | 75 | 75 |
| - com a cal aos 7 dias, em MPa | 6 | 6 | 6 |
| Água requerida, % máx. | 115 | 110 | 110 |

Fonte: NBR 12653, ABNT (1992).

Assume-se que, adicionando ao cimento um material pozolânico, cujos óxidos dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (III)(Fe₂O₃) estão presentes em estado amorfo ou com sua estrutura cristalina fraca, em presença de água e à temperatura ambiente, estes óxidos reagem com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland, formando assim, compostos que possuem propriedades

aglomerantes. A atividade pozolânica é definida pela finura da cinza usada, pela fração amorfa dos óxidos presentes e por um alto teor de sílica. Segundo Horpibulsuk, Rachan e Raksachon (2009), o papel da CCA como estabilizante é de dispersar os grandes grupos de solo-cimento em grupos menores, gerando assim um crescimento das superfícies em reação com a água e, conseqüentemente, dos produtos cimentantes.

O desempenho de materiais de construção alternativos e de baixo impacto ambiental se tornou uma linha de pesquisa considerável na Engenharia Civil. A interação entre os produtos cimentantes e os materiais mineralógicos naturais está na base de um novo tema de pesquisa. Assim, solos argilosos podem ser usados em meio cimentício pelos seus efeitos pozolânicos, ou ainda como carga inerte para preencher, em parte, a porosidade aberta (BOUALLA; BENAOUA, 2011).

Muitas pesquisas com o solo-cimento já foram feitas, porém, ainda não se chegou a um traço ideal e ainda está longe de se alcançar o traço perfeito deste material. Isto se deve, principalmente, ao fato do solo ser um material muito diverso, pois cada solo possui suas características e particularidades, o que difere de outros materiais como o concreto, por exemplo, que, confeccionados com controle tecnológico, garantem as propriedades desejadas para cada fim (BERTE, 2012).

2.6 SOLOS

A ABNT NBR 6502/1995 define solo como “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”, ou simplesmente, produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos.

O conceito de solo adquire outros significados de acordo com a finalidade de uso. Na Agricultura é a camada de terra tratável, geralmente de poucos metros de espessura, que suporta as raízes das plantas. Já para a Geologia o solo é um produto do intemperismo físico e químico das rochas, situado na parte superficial do manto de intemperismo. Constitui-se de material rochoso decomposto. E por fim na Engenharia Civil, o solo é todo o material da crosta terrestre que não oferece resistência intransponível à escavação mecânica e que perde totalmente toda resistência, quando em contato prolongado com a água.

O solo possui várias propriedades e uma das primeiras que deve ser observada é a sua granulometria. Os ensaios de granulometria podem ser realizados de acordo com

procedimentos descritos na norma NBR 7181/1984 e classificados de acordo com a NBR 6502/1995, como podemos verificar a seguir:

- Argila: Solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.
- Silte: Solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco o ar. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração silte. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm.
- Areia fina: Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 0,20 mm.
- Areia média: Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,20 mm e 0,60 mm.
- Areia grossa: Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,60 mm e 2,0 mm.
- Pedregulho fino: Pedregulho com grãos compreendidos entre 2,0 mm e 6,0 mm.
- Pedregulho médio: Pedregulho com grãos compreendidos entre 6,0 mm e 20,0 mm.
- Pedregulho grosso: Pedregulho com grãos compreendidos entre 20,0 mm e 60,0 mm.

Para a realização do ensaio granulométrico são utilizadas peneiras com específicos diâmetros de abertura, como podemos observar na Tabela 6.

Tabela 6 – Abertura das peneiras utilizadas na análise granulométrica de acordo com a NBR 7181/1984

| Peneira (nº) | Diâmetro de abertura (mm) |
|--------------|---------------------------|
| 1" | 25,4 |
| 3/4" | 19,1 |
| 1/2" | 12,7 |
| 3/8" | 9,5 |
| 4 | 4,76 |
| 8 | 2,38 |
| 10 | 2,00 |
| 30 | 0,59 |
| 40 | 0,42 |
| 50 | 0,30 |
| 100 | 0,15 |
| 200 | 0,07 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.7 TIPOS DE SOLO

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (2006), os solos são divididos em treze classes consideradas de 1ª ordem, que estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Classes de solo

| Classe | Elemento Formativo | Termos de conotação e de memorização |
|-------------|--------------------|--|
| ARGISSOLO | ARGI | "Argilla". Acumulação de argila Tb ou Ta (baixa ou alta atividade da fração argila), dessaturado de bases. |
| CAMBISSOLO | CAMBI | "Cambiare", trocar ou mudar. Horizonte B incipiente. |
| CHERNOSSOLO | CHERNO | Preto, rico em matéria orgânica. |
| ESPODOSSOLO | ESPODO | "Spodos", cinza vegetal. Horizonte B espódico. |
| GLEISSOLO | GLEI | Glei. Horizonte glei. |
| LATOSSOLO | LATO | "Lat", material muito alterado. Horizonte B latossólico. |
| LUVISSOLO | LUVI | "Luere", iluvial. Acumulação de argila com alta saturação por bases e Ta. |
| NEOSSOLO | NEO | Novo. Pouco desenvolvimento genético. |
| NITOSSOLO | NITO | "Nitidus", brilhante. Horizonte B nítico. |
| ORGANOSSOLO | ORGANO | Orgânico. Horizonte H ou O hístico. |
| PLANOSSOLO | PLANO | "Planus". Horizonte B plânico. |
| PLINTOSSOLO | PLINTO | "Plinthus". Horizonte plíntico. |
| VERTISSOLO | VERTI | "Vertere", inverter. Horizonte vértico. |

Fonte: EMBRAPA: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2006).

Como o solo utilizado no trabalho é enquadrado na classe Latossolo, apenas este será conceituado, como segue no item a seguir.

2.7.1 Latossolos

Segundo a Embrapa, os Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura. Os horizontes do solo são camadas presentes em cada tipo de piso térreo, que têm características diferentes. Como essas características fazem com que cada uma tenha uma cor específica, é criada uma divisão clara entre as duas camadas, gerando uma divisão visual uma da outra. Essas divisões no terreno podem ser vistas de duas maneiras diferentes. A primeira é visualmente: é fácil ver a diferença a olho nu. O segundo diz respeito à sua estrutura, uma vez que cada tipo de horizonte possui composição e textura diferentes de acordo com o material que o forma.

O conceito inicial de Latossolo, segundo KELLOG (1949) *apud* KER (1997), contemplava solos cujas características encontravam-se fortemente relacionadas à

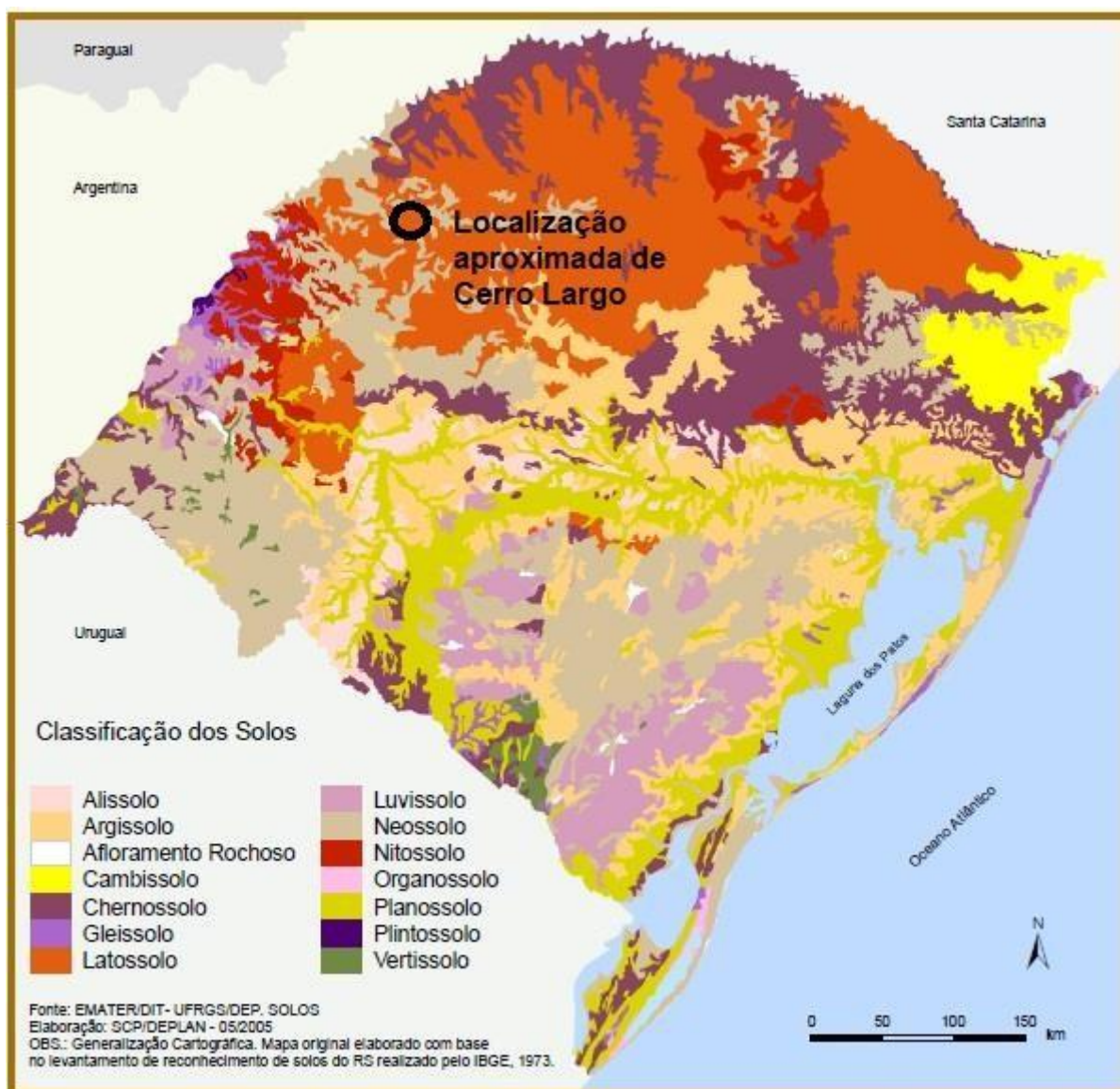
intemperização e lixiviação intensas e responsáveis pelas baixas atividade das argilas; capacidade de troca de cátions; relações moleculares sílica/ alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Ki}$) e sílica/óxidos de ferro e alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Kr}$). Além disso, os solos designados por Latossolos, além de profundos, de coloração relativamente homogênea com matizes avermelhadas e/ou amareladas, apresentariam distribuição mais ou menos uniforme de argila ao longo do perfil, elevada estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte em relação à argila. O termo deveria ser empregado independente da presença ou não de laterita, na sua concepção original.

O solo mais comum na Região das Missões no Rio Grande do Sul, onde se enquadra Cerro Largo, município de onde foi retirado o solo para o presente trabalho, é o Latossolo Roxo que se refere a solos minerais, profundos, bem a acentuadamente drenados de coloração vermelho arroxeadas cuja distribuição geográfica encontra-se associada à presença de rochas efusivas básicas, metabasitos e tufitos em expressivas áreas do Rio Grande do Sul. Os Latossolos Roxos são, em sua grande maioria, de textura argilosa ou muito argilosa, condição esta ditada pela própria pobreza em quartzo do material de origem. (KER, 1997)

A seguir, na Figura 7, está representado o mapa de solos do estado do Rio Grande do Sul elaborado com base no levantamento de reconhecimento de solos do estado realizado pelo IBGE em 1973 e reeditado pela EMATER (2005).

DE OLIVEIRA (2008) realizou um estudo para determinar a favorabilidade de áreas para implantação de aterros controlados. Os Latossolos foram escolhidos como de máxima adequabilidade para a construção de aterros por serem solos minerais, logo, mais estáveis do ponto de vista da diminuição do volume, não hidromórficos, com horizonte Bw que possui zona de aeração e textura média, além de ter elevada permeabilidade, sendo, assim, bem a acentuadamente drenados.

Figura 7 – Mapa de solos do Rio Grande do Sul.



Fonte: EMATER, 2005.

2.7.2 Solos compactados

A compactação consiste em um processo mecânico que, através de uma aplicação repetida e rápida de cargas aplicadas no solo, conduz a uma diminuição do seu volume e, portanto, a uma diminuição do índice de vazios e a um aumento do peso seco. Esta redução de volume é resultado, sobretudo, da expulsão de ar dos vazios do solo, não ocorrendo significativa alteração do teor de umidade nem alteração do volume das partículas sólidas durante a compactação. A prática de compactar o solo é muito comum em construção de vias de tráfego, fundamentos de prédios e residências para aumentar a resistência do solo que deverá suportar altas cargas, como podemos observar nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Compactação de solo em vias públicas.



Fonte: <https://ftlempreendimentos.com.br/terraplenagem/2021>

Figura 9 – Compactação de solo em área de aterro.



Fonte: <https://ftlempreendimentos.com.br/terraplenagem/2021>

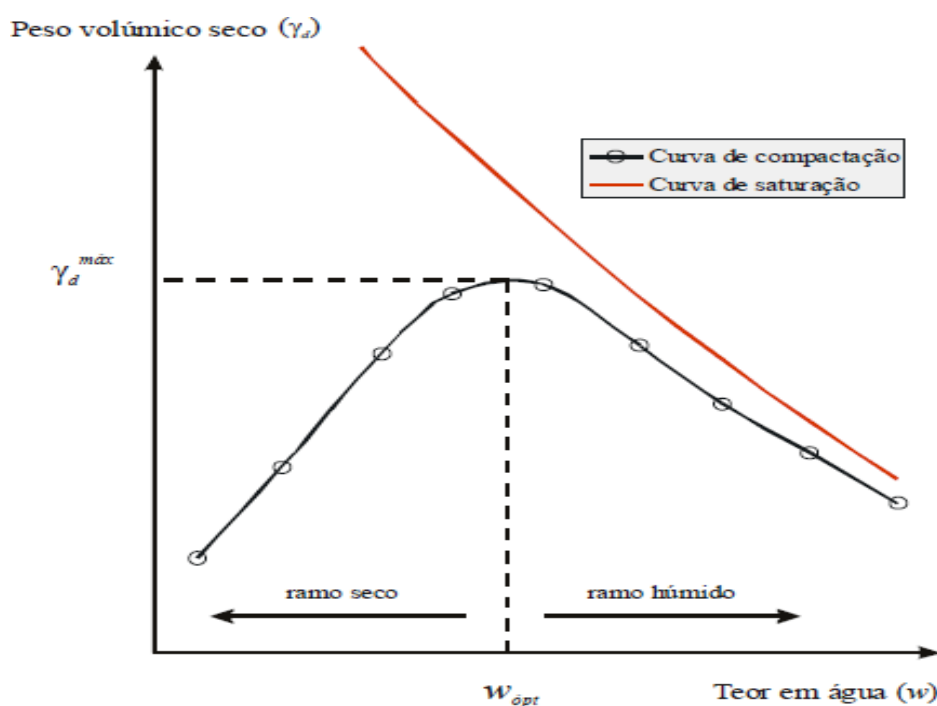
Por outro lado, a compactação provoca um aumento do grau de saturação, visto que o volume de vazios sofre uma diminuição devido a expulsão de grande parte do ar que está entre as partículas de solo. Com este processo a área de contato das partículas sólidas aumenta, aumentando assim a resistência do solo e diminuindo a sua deformação. Além disso, o solo ficando num estado mais denso dificultará a passagem da água, ou seja, torna-se menos permeável.

O processo de compactação do solo depende principalmente de dois fatores: a energia aplicada e o teor de umidade do material. Toma-se como exemplo então um procedimento de compactação com uma determinada energia em que o solo é compactado misturando-lhe

diferentes quantidades de água (obtendo-se, portanto, diferentes teores em água) e medindo-se o resultado da compactação através da determinação do peso específico do material. O resultado pode assim ser descrito por pares de valores (ω, γ_d) onde ω é a umidade do material e γ_d é o peso específico, que quando representados num gráfico, dão origem à curva de compactação como se ilustra na Figura 10.

Descobre-se assim o ponto ótimo de umidade e de peso específico. O ponto máximo divide a curva, sendo que a parte da esquerda é considerada como ramo seco e a parte da direita como ramo úmido.

Figura 10 – Exemplo de curva de compactação.



Fonte: Santos (2008).

De uma forma bastante simplificada, para explicar este comportamento, pode-se afirmar que uma massa de solo que possua pouca água apresenta-se aglomerada em torrões de solo. A ação de compactação irá desfazer esses torrões, permitindo a expulsão do ar, no entanto, os torrões são duros e se o solo possuísse um pouco mais de água, a ação de compactação seria facilitada e, por conseguinte, mais eficaz. Por esta razão, do lado seco, o aumento do teor em água conduz ao aumento do peso específico seco.

Porém, se a quantidade de água ultrapassar o ponto ótimo, verifica-se que deixa de haver contato de determinadas zonas do ar do solo com a atmosfera, ficando aprisionado entre o solo e a água intersticial, não podendo ser expulso. A partir deste ponto, o aumento do teor em água não irá permitir que a compactação se realize de forma tão eficaz. Por este motivo,

do lado úmido, o aumento do teor de água conduz à diminuição do peso específico seco. (SANTOS, 2008).

Desta forma podemos afirmar que a escolha do ponto ideal deve ser sempre próxima ao ponto de umidade e peso específico ótimos, diferenciando o lado seco e o lado úmido de acordo com o tipo de obra de aterro a ser realizada.

2.8 A ESTABILIZAÇÃO DE SOLO/CIMENTO

O material solo-cimento é definido pela NBR 12253/92, Solo-cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento, como sendo “o produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, conforme este projeto, e executada conforme a NBR 12254/90”.

De maneira semelhante, o *American Concrete Institute*, citado pelo *U. S. Army Corps of Engineers* (Corpo de Engenheiros do Estados Unidos), define solo-cimento como uma mistura adequadamente proporcionada de solo, cimento e água, compactada em uma alta densidade (USACE, 2000).

O solo-cimento difere do concreto em muitos aspectos. Uma diferença essencial é que no concreto existe uma quantidade de pasta (cimento + água) suficiente para recobrir a superfície dos agregados e preencher os vazios existentes entre os mesmos, já nas misturas de solo-cimento a quantidade de pasta é insuficiente para recobrir a superfície de todas as partículas de solo e preencher os vazios existentes, resultando em uma matriz cimentícia que une nódulos de agregados não-cimentados (PCA, 2004).

Ingles e Metcalf (1972) definem a estabilização de solos como sendo a aplicação de processos técnicos através dos quais se busca a melhoria das propriedades mecânicas de um determinado solo, especialmente daquelas relacionadas com resistência, deformabilidade, condutividade hidráulica e durabilidade.

Existem muitos trabalhos na bibliografia brasileira e internacional dentre os quais estão Consoli et. al. (2003, 2007, 2008), Heineck (1998), Prietto (1996 e 2004), Rotta et. al. (2001) Schnaid et. al. (2001); Thomé (1999) e Thomé et al. (2003); Vendruscolo (2003); Cruz (2008); Lopes Junior (2007, 2011); Rojas (2007) Saxena e Lastrico (1978); Clough et al. (1981), Huang; Airey, (1993); Coop; Atkinson (1992, 1993 e 2003), que abordaram o comportamento de solos cimentados onde são analisados aspectos característicos dos materiais tais como granulometria, propriedades físicas, tensões atuantes, resistência e

comportamento tensão/deformação.

Vendruscolo (2003) relata que o mecanismo de combinar solo com cimento é muito similar ao concreto. A distinção está no agregado, considerando que no concreto este possui uma granulometria grossa, com as partículas de cimento envolvendo o agregado granular e ligando suas partículas, dando considerável resistência ao concreto. Por sua vez, no solo/cimento, as partículas de cimento são envolvidas pelos grãos de solo finos resultando em ligações menos resistentes, onde o cimento entra em uma quantidade que varia sobre o peso do solo, o suficiente para estabilizá-lo e conferir as propriedades de resistência desejada para o composto.

A presença de agentes cimentantes no solo irá provocar mudanças substanciais nas propriedades geotécnicas do material. Estas modificações dependerão das características específicas do solo, do teor de aditivos, da quantidade de água, do tipo e grau de compactação e do tipo e tempo de cura. De maneira geral, a adição de cimento aumentará a resistência e a rigidez, diminuirá a compressibilidade e alterará os limites de consistência; a condutividade hidráulica será reduzida nos solos granulares, mas aumentará nos solos argilosos, assim como a durabilidade medida em ciclos de molhagem e secagem aumentará (PRIETTO, 1996).

Segundo Montardo (1999), a técnica da estabilização por processos físico-químicos é eficiente no aumento da resistência mecânica, permitindo a obtenção de materiais com capacidade de suporte adequada. Heineck (1998) relata que a melhoria das características mecânicas dos solos pela adição de cimento Portland constitui em um processo utilizado de forma cada vez mais intensa nas diversas áreas da engenharia geotécnica, como por exemplo, na contenção de maciços, execução de fundações sobre solos moles, prevenção de liquefação em areias e execução de pavimentos.

O solo/cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, baixa condutividade hidráulica, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade. Porém, Montardo (1999) ressalta que a utilização do solo/cimento na prática da engenharia geotécnica só não é mais difundida porque muitas vezes esbarra nos problemas relacionados ao surgimento das trincas de tração e/ou retração.

Conforme Nuñez (1991), as reações que ocorrem na mistura solo/cimento dividem-se em reações primárias e reações secundárias. Em solos muito granulares e sem argila, a ação cimentante se dá através dos produtos das reações primárias (alta resistência e baixo teor de cálcio), já em solos predominantemente argilosos, a ação cimentante se dá através das reações secundárias (aumento da ligação entre partículas que dão estabilidade

ao conjunto).

Segundo Noble (1967 *apud* Vendruscolo, 2003), o ganho de resistência de corpos de prova de argilominerais estabilizados com cimento Portland curados por sete dias atribui-se à:

- Floculação inicial das partículas de argila, que facilita a cimentação;
- Hidratação do cimento, com geração de partículas cimentantes com grande superfície específica e possível combinação química de sílica e alumina com hidróxido de cálcio para produção adicional de partículas cimentantes.
- Cristalização do hidróxido de cálcio, que cimenta as partículas discretas e as flocula.

Segundo Freire (1976, *apud* Dallacort, 2002), solos com altas concentrações de argila necessitam de teores de cimento elevados devido à grande área superficial dos grãos. A Associação Brasileira de Cimento Portland (1989) sugere que, para um consumo mínimo de cimento, o solo deve apresentar teores de 35% de argila e 65% de silte e areia, além de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade inferior a 45%, 18% e 10%, respectivamente.

A Tabela 8, retirada de Ingles e Metcalf (1972), apresenta um indicativo da quantidade de cimento a ser adicionada para a estabilização de acordo com o tipo de solo. De acordo com Rotta et al. (2001) a contribuição da cimentação na resistência é tanto mais significativa quanto maior a densidade da amostra durante a formação de sua estrutura cimentante.

Tabela 8 - Previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo

| Tipo de solo | Porcentagem de cimento |
|--|------------------------|
| Pedra finamente britada | 0,5 a 2 |
| Pedregulho areno-argiloso bem graduado | 2 a 4 |
| Areia bem graduada | 2 a 4 |
| Areia mal graduada | 4 a 6 |
| Argila-arenosa | 4 a 6 |
| Argila-siltosa | 6 a 8 |
| Argilas | 8 a 15 |

Fonte: (adaptada de INGLES; METCALF, 1972).

Conforme Prietto (1996), em sua pesquisa a respeito do modo de ruptura de corpos de

prova de solo/cimento, cabe definir dois tipos básicos: (1) a ruptura frágil, característica de materiais muito rígidos como solos cimentados, areias densas e argilas fortemente adensadas, é acompanhada de uma queda brusca de resistência após a ruptura e a formação de planos bem definidos de ruptura; (2) a ruptura dúctil, característica das areias fofas e argilas moles, que não apresentam a formação de planos definidos de ruptura e nem queda significativa de resistência após a tensão desvio máxima ser atingida.

Para Núñez (1991), as propriedades mecânicas das misturas compactadas de solo/cimento dependem em primeiro lugar do cimento e em segundo lugar da compactação. A importância da compactação reside não apenas no grau, mas também no tempo, visto que, se realizada após a hidratação do cimento será ineficiente. O autor destaca também que as propriedades naturais mudam com o aumento no teor de cimento, por outro lado, a resistência, a capacidade de suporte e a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem aumentam.

Conforme Feuerharmel (2003), a adição de cimento ao solo provoca modificações substanciais em suas propriedades. O maior ou menor grau com que estas modificações se processam depende de características específicas do solo e da adição, teor de adição, quantidade de água, tipo e grau de compactação, tempo de compactação, temperatura, entre outros.

2.8.1 Características do comportamento solo-cimento

Vários são os fatores que influenciam a resistência de solos artificialmente cimentados. Porbaha et al. (2000) citam os seguintes:

- Propriedades físico-químicas do solo: mineralogia, granulometria, teor de umidade, teor de matéria orgânica e pH;
- Tipo e quantidade do agente cimentante, presença de adições e relação água/cimento;
- Condições de compactação, mistura e cura;
- Métodos de amostragem e ensaios.

Foppa (2004) relata diversos fatores que influenciam a resistência do solo/cimento, entre estas, o tipo de solo. No caso desta pesquisa, trata-se de solos argilosos, além de destacar a compactação, a umidade de compactação, o tempo de cura, entre outros.

Para Felt (1955), o tipo e composição química do solo, quantidade de cimento e água adicionados, a densidade na qual a mistura é compactada, o tempo pelo qual o solo, o cimento e a água são misturados antes da compactação e o grau de pulverização do solo, se este for argiloso, são os fatores que mais influenciam o comportamento das misturas de solo-cimento. Entretanto, algumas pesquisas têm sido realizadas no intuito de identificar as variáveis que desempenham papel preponderante no comportamento de misturas de solo-cimento.

De acordo com Croft (1967), alguns argilominerais interferem nas reações do cimento. Solos que contém argilas muito expansivas são difíceis de estabilizar pela adição de cimento. Segundo o autor, as argilas caulínicas ou ilíticas são as mais apropriadas para a estabilização com cimento.

Segundo Catton (1962), o comportamento de pavimentos de solo-cimento compactados é governado principalmente por três fatores básicos: o teor de umidade, a densidade da mistura e a quantidade de cimento. Para Ingles; Metcalf (1972), as propriedades gerais de solos estabilizados com cimento dependem primeiramente do cimento e, em segundo lugar, da compactação.

2.8.2 Efeito do cimento

A adição de pequenas quantidades de cimento (até 2%) modificará as propriedades do solo, enquanto que maiores quantidades irão alterar radicalmente suas propriedades (INGLES; METCALF, 1972). De acordo com os mesmos autores, as propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento: a capacidade de carga e a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem aumenta, em geral a permeabilidade diminui, porém, aumenta em solos argilosos, a tendência à retração aumenta em solos granulares e a tendência à expansão de solos argilosos se verá reduzida.

Quando da adição de pequenas quantidades de cimento, observa-se aumento do tamanho das partículas, redução da capacidade de retenção de água e redução no índice de plasticidade (CATTON, 1962).

De acordo com Foppa (2005), a adição de cimento, mesmo em pequenas quantidades, promoveu ganhos substanciais de resistência em solos arenosos. Na faixa de teores estudados (1% até 7%), a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento do teor de cimento. Segundo o autor, a taxa de ganho de resistência aumentou

com o aumento da massa específica aparente seca do solo-cimento compactado, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas. A existência de um número maior de contatos e, conseqüentemente, a maior possibilidade do cimento promover a união das partículas nesses contatos parece ser a causa desse fenômeno.

2.8.3 Efeito da densidade e compactação

Com o aumento da densidade, a resistência aumenta e a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (INGLES; METCALF, 1972).

Felt (1955) observou, a partir de ensaios em areias, siltes e argilas, que com o aumento da densidade da mistura compactada, as perdas de massa em amostras submetidas a ensaios de durabilidade sofrem grande redução, especialmente nos solos siltosos e argilosos. Em relação à resistência, o mesmo autor observou um aumento exponencial da resistência à compressão simples com o aumento da densidade da mistura, mantendo-se constante o teor de umidade. Verificou-se também que as misturas testadas apresentam características satisfatórias quando compactadas no teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação.

Segundo Moura et al. (2007), a partir de um determinado teor de cimento (5%) sobre um solo arenoso, a resistência à compressão não confinada aumenta significativamente com o aumento da proporção de cimento e aumento do peso específico seco. O efeito da cimentação é mais pronunciado, em termos de ganho de resistência devido ao aumento do teor de cimento, para valores mais baixos de índice de vazios.

2.8.4 Efeito do teor de umidade e do fator água/cimento

Solos estabilizados com cimento normalmente são compactados em campo na umidade ótima para obtenção da massa específica aparente seca máxima, como determinado no ensaio de compactação de Próctor. Entretanto, estudos demonstram que em alguns casos o teor de umidade que proporciona máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera a maior massa específica aparente seca (LIGHTSEY et al., 1970).

Felt (1955) estudou o efeito da variação do teor de umidade sobre a resistência de solos arenosos, siltosos e argilosos através de ensaios de durabilidade e de compressão simples. O autor verificou que as amostras de argila e silte, compactadas com teores de umidade abaixo do ótimo de compactação, apresentaram grandes perdas de massa. Já para umidades acima do teor ótimo de compactação, a perda de massa foi baixa e praticamente constante com o aumento do teor de umidade. Para os solos arenosos testados, um teor de umidade levemente inferior ao ótimo foi o que proporcionou menores perdas de massa nos testes de durabilidade. Em relação aos ensaios de compressão simples, verificou-se que, de forma geral, o teor de umidade que proporciona o máximo de resistência é levemente inferior ao teor ótimo de compactação, exceto para o solo mais argiloso testado.

Entretanto, Lightsey et al. (1970) recomendam que, se atrasos de 2 a 6 horas na compactação são esperados, a umidade de compactação de areias, siltes e siltes argilosos deve ser 2 a 4% acima do teor ótimo de compactação determinado em laboratório. O teor de umidade na compactação de siltes argilosos deve ser 3 a 4% maior que o teor ótimo, mesmo quando nenhum atraso é esperado.

Por outro lado, Endo (1976, *apud* Porbaha et al., 2000), mostra que a resistência à compressão simples de amostras de argila marinha com teores de umidade variando de 60% a 120% e quantidades de cimento variando de 5% a 20%, diminui significativamente com o aumento do teor de umidade.

Horpibulsuk et al. (2003) ao estudarem argilas moles com altos teores de umidade (106% a 185%) através de ensaios de compressão simples, verificaram que a relação água/cimento é um parâmetro apropriado para a análise do desenvolvimento da resistência deste material, devido a que considera as interações físico-químicas entre a água, a argila e o cimento. Enquanto a quantidade de água reflete a microestrutura da argila mole, a quantidade de cimento reflete o nível de cimentação de tal microestrutura.

Segundo Foppa (2005), a variação do teor de umidade de moldagem, mantendo-se constante a massa específica aparente seca, afetou significativamente a resistência à compressão simples do solo-cimento. De maneira geral, ocorreu um aumento da resistência com o teor de umidade até um valor ótimo, a partir do qual a resistência passa a diminuir. Verificou-se que esse teor ótimo de umidade é de aproximadamente 10% para um solo arenoso, independentemente do teor de cimento adicionado. Foppa (2005) destaca ainda que o efeito do teor de umidade sobre a resistência foi mais pronunciado para os teores de 9% e 12% de cimento. Esse fato pode estar associado ao aumento do teor de finos, já que o cimento utilizado apresenta uma granulometria fina, com partículas de

diâmetro menor que 0,0075 mm. O autor verificou também que não existe relação entre a resistência à compressão simples e a relação água/cimento para o solo arenoso estudado. Cabe destacar que esse resultado difere do obtido por Horpibulsuk et al. (2003) e Azambuja (2004), onde a relação água/cimento mostrou-se adequada na avaliação da resistência à compressão simples.

2.8.5 Efeito da relação vazios/cimento

Na literatura encontram-se três trabalhos que utilizam um fator correlacionando a quantidade de vazios com a quantidade de agentes cimentantes para a estimativa da resistência de solos estabilizados. Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa (2011) estudaram a relação vazios/cal e Larnach (1960), Foppa (2006) e Cruz (2008), entre outros, estudaram a relação vazios/cimento.

Segundo Larnach (1960), como a compactação em solos ou no solo-cimento nunca consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, a resistência não pode ser correlacionada com a relação água/cimento, pois essa só se aplica à materiais onde o ar foi totalmente expulso e os vazios existentes estão preenchidos por água.

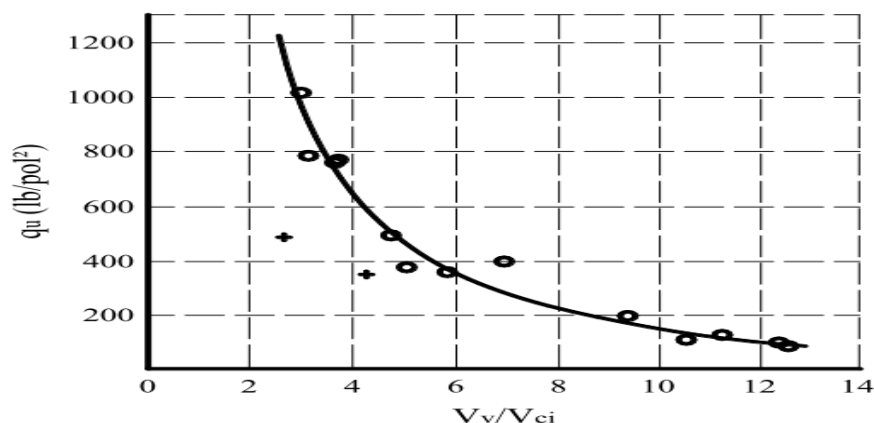
A relação vazios/cimento utilizada por Larnach (1960) é definida pela Equação (1):

$$\frac{Vv}{Vci} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios}(ar + \text{água})}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (1)$$

A Figura 11 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Observa-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

Para Larnach (1960), o uso deste tipo de relação, similarmente ao que ocorre em concreto, pode ser de extrema utilidade para dosagem e controle de execução de misturas de solo-cimento em campo.

Figura 11 - Relação vazios/cimento versus resistência à compressão simples.



Fonte: adaptado de Larnach,(1960).

2.9 Comportamento físico do solo/cimento

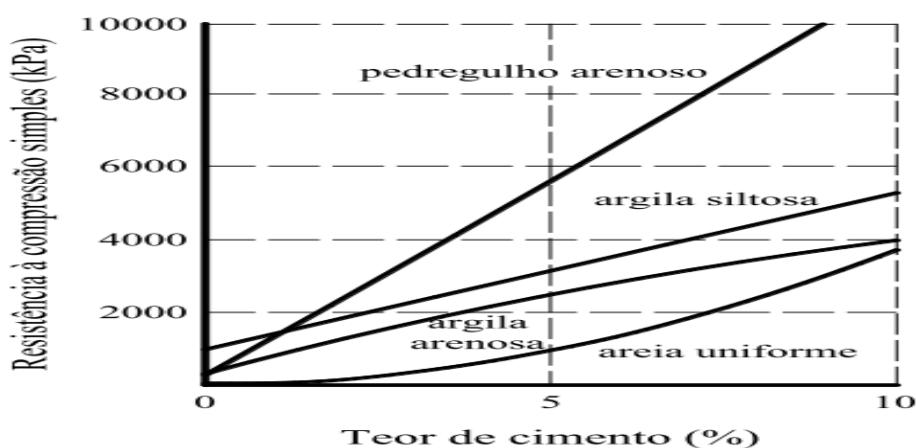
2.9.1 Resistência à compressão simples

Prietto (1996) verificou que, para solos arenosos cimentados, a resistência à compressão simples é uma medida direta do grau de cimentação. De acordo com o autor, na grande maioria dos trabalhos relatados na literatura sobre solos artificialmente cimentados, o grau de cimentação é representado pela quantidade relativa de material cimentante, normalmente pela porcentagem de cimento em relação à massa de solo seco.

No entanto, o grau de cimentação não é função somente da quantidade de agente cimentante. Outros fatores como a densidade, a forma e a natureza superficial das partículas desempenham papel importante neste processo. Por exemplo, a mesma quantidade de cimento Portland produzirá resistências distintas ao ser adicionada em solos de mesma natureza, porém com densidades diferentes. Isto ocorre porque no solo mais denso existe um maior número de pontos de contato entre as partículas e, portanto, a cimentação se desenvolve de maneira mais efetiva (CHANG; WOODS, 1992).

Em geral, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cimento, porém, a diferentes taxas para diferentes tipos de solo, como mostra a Figura 12.

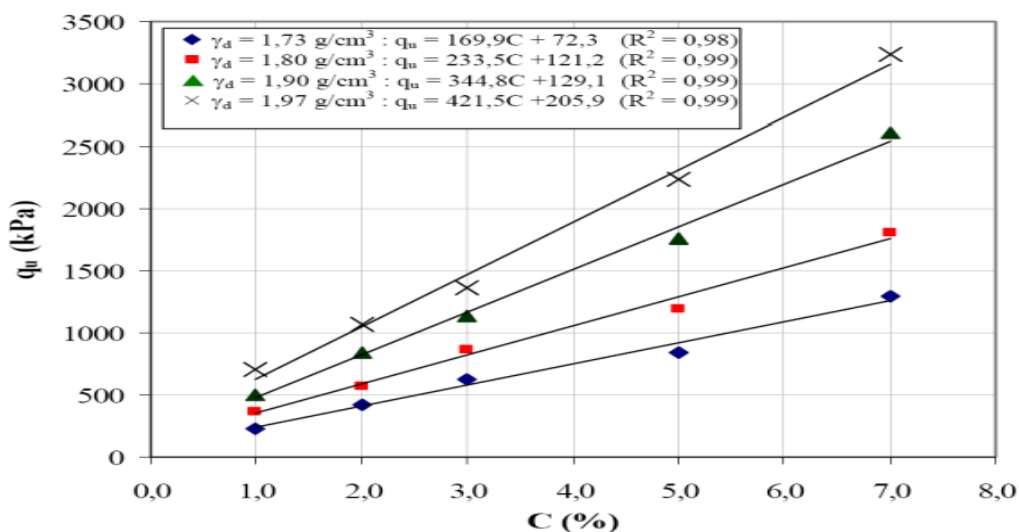
Figura 12 - Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento e curados por 7 dias.



Fonte: adaptado de Inglês; Metcalf ,(1972).

Segundo Foppa (2005), a quantidade de cimento tem um grande efeito sobre a resistência à compressão simples de um solo arenoso. Mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para gerar enormes ganhos de resistência. Ao se aumentar a quantidade de cimento de 1% para 7%, a resistência à compressão simples, em média, quintuplicou, conforme a Figura 13. O autor destaca que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cimento. Além disso, a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, aumenta com o aumento da massa específica aparente seca.

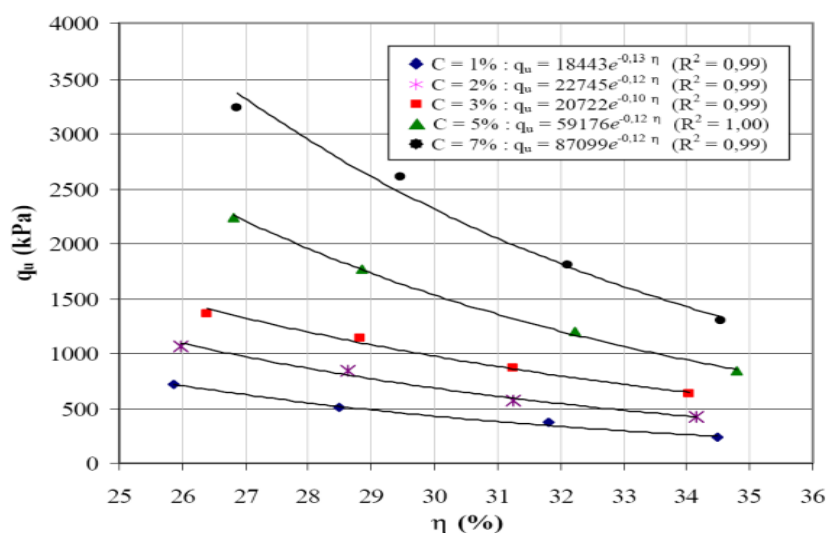
Figura 13 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento.



Fonte: adaptado de Foppa,(2005).

Foppa (2005) destaca que, de maneira similar a quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência a compressão simples do solo cimento. O autor destaca que independentemente da quantidade de cimento utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência, conforme Figura 14.

Figura 14 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cimento.

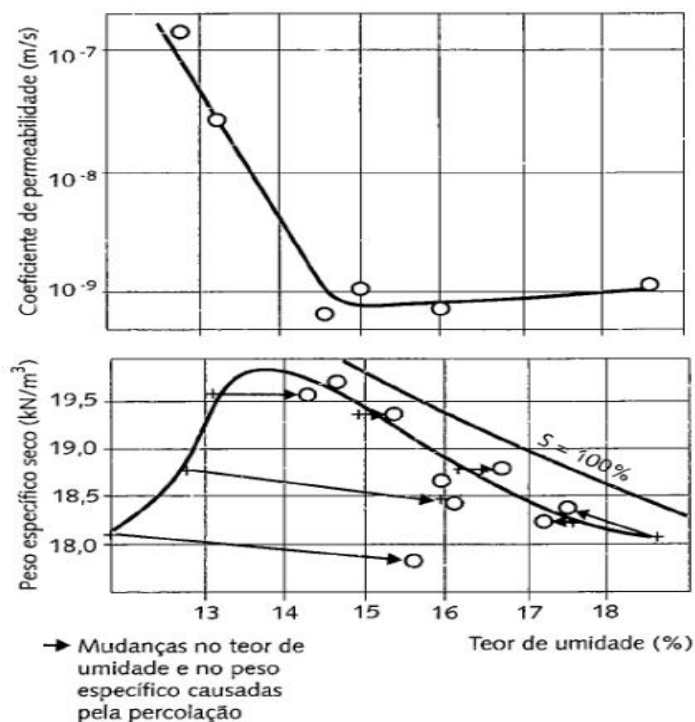


Fonte: adaptado de Foppa (2005)

2.9.2 Condutividade Hidráulica

A Condutividade Hidráulica ou a permeabilidade do solo compactado, para uma dada energia de compactação, varia em função do teor de umidade, conforme apresenta a Figura 15, no ramo seco, a permeabilidade diminui significativamente com o aumento do teor de umidade até o teor de umidade ótimo, praticamente não varia para teores de umidade acima deste valor. De acordo com Boscov (2008) a permeabilidade no ramo seco é uma das três ordens de magnitude maior do que a permeabilidade no teor de umidade ótima ou no ramo úmido. Observa-se que dois pontos, um no ramo seco e outro no ramo úmido, com mesmo peso específico seco, portanto com o mesmo índice de vazios, podem apresentar coeficientes de permeabilidade muito diferentes. Essa diferença se dá em razão da estrutura do solo compactado.

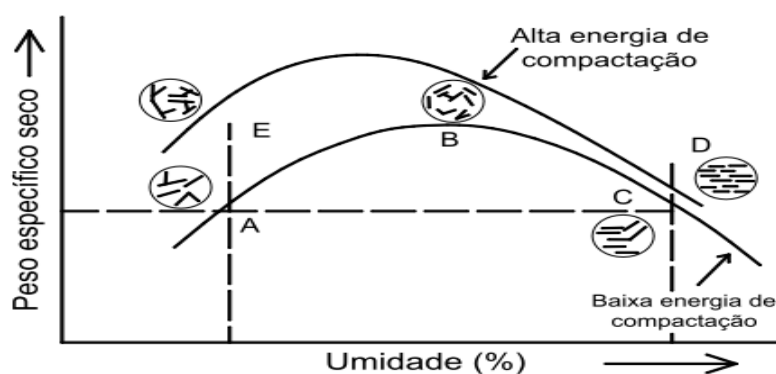
Figura 15 - Permeabilidade ao longo da curva de compactação.



Fonte: adaptado de Lambe, (1958).

Lambe (1958) procurou explicar a estrutura do solo compactado com base nas partículas de argila individualizadas. No ramo seco a estrutura é floculada, a orientação das partículas de argilas é aleatória, os vazios são maiores, o caminho de percolação na direção vertical é menor e a permeabilidade é maior. No ramo úmido a estrutura dispersa, as partículas de argila encontram-se em uma arranjo paralelo, os vazios são menores, o caminho de percolação é mais tortuoso e a permeabilidade é menor. A Figura 16 indica esquematicamente as estruturas em função destes parâmetros, conforme sugerido por Lambe (1970 *apud* Pinto, 2002).

Figura 16 - Estruturas de solos compactados.



Fonte: Lambe (2007 *apud* Pinto, 2002).

De maneira geral, em solos predominantemente argilosos, pode se observar estruturas denominadas dispersas (D) e estruturas floculadas (E). Já em solos arenosos e siltosos pode-se observar um arranjo granular com maior ou menor grau de compactação. De acordo com Lambe; Whitman (1996), o comportamento de um solo é enormemente influenciado pelo tipo de estrutura existente. Em geral, quando o solo está no estado floculado, ele apresenta maior resistência, menor compressibilidade e maior permeabilidade do que o mesmo solo, no mesmo índice de vazios, porém no estado disperso. Esse comportamento deve-se à maior dificuldade de se impor deslocamentos entre partículas que se encontram em um estado desordenado e à existência de forças de atração entre as partículas. O aumento do teor de umidade tende a reduzir essas forças de atração, permitindo um arranjo mais ordenado.

Bellezza; Pasqualini (1997) estudaram a influência da adição de cimento e do tempo de cura na permeabilidade de solos. Os autores mostraram que a adição de cimento pode diminuir a permeabilidade do material original após algum tempo de cura. Segundo os autores, os resultados experimentais demonstraram que os valores de permeabilidade obtidos com a adição de cimento dependem do tipo de solo e da umidade em que é feita a mistura e a compactação. Os autores destacam ainda que a adição de cimento pode provocar valores de condutividade hidráulica maiores ou menores em relação ao solo não tratado.

Verificaram que o tempo de cura diminui o valor de condutividade hidráulica, podendo este chegar a valores muito menores que os do solo não tratado. Outra constatação importante é que misturas solo/cimento percoladas imediatamente após a compactação apresentam condutividades menores que as mesmas misturas percoladas após certo tempo.

Para Pinto (2002) a condutividade hidráulica depende não só da quantidade de vazios do solo, mas também da disposição relativa dos grãos. Geralmente, quando o solo é compactado mais seco, a disposição das partículas (estrutura chamada floculada) permite maior passagem de água do que quando compactado mais úmido (estrutura dispersa), ainda que com o mesmo índice de vazios. O autor ainda destaca a influência do grau de saturação, do estado físico do solo e da temperatura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia utilizada para a realização dos ensaios, afim de verificar o comportamento mecânico quanto aos parâmetros de resistência à compactação e tensão de cisalhamento da mistura solo-cimento-CCA e a utilização desta mistura como material para aterros compactados. A metodologia adotada, é fundamentada por procedimentos e normas técnicas, visando caracterizar fisicamente a cinza de casca de arroz e o solo, bem como a mistura dos dois materiais. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFFS.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

Foi utilizado um solo argiloso do tipo Latossolo extraído no município de Cerro Largo – RS, como pode ser observado na Figura 17. O solo foi destorroado com auxílio de um almofariz com pistilo (Fig.18), para facilitar a homogeneização com a cinza de casca de arroz e o cimento.

Figura 17 - Solo utilizado nos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Almofariz e pistilo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ponto de coleta do solo utilizado para a realização dos ensaios está indicado na Figura 19. Foi escolhido este ponto porque neste local há um talude, o que facilita a retirada de amostras deformadas do solo do horizonte B, a uma profundidade de 1,0 m aproximadamente. As coordenadas geográficas do ponto são $28^{\circ} 08' 27,74''$ S $54^{\circ} 44' 56,96''$ W.

Figura 19– Ponto de coleta do solo



Fonte: Google Earth (2020).

3.1.2 Cinza de Casca de Arroz

O resíduo cinza de casca de arroz (CCA) utilizado era de pronto uso industrial denominada Sílica Verde. É um produto derivado da calcinação controlada e constante da casca de arroz em termoelétricas, com posterior industrialização. Seu composto com até 95% de Dióxido de Silício (SiO_2) com baixa quantidade de carbono e traços de metais e foi fornecida de forma gratuita pela empresa Ekosil, situada no município de Itaqui-RS, empresa que atua no ramo da produção de CCA com diversas aplicações industriais. Esse material estava pronto para os ensaios pois possuía baixa umidade e granulometria adequada para ser homogeneizada junto ao solo. Pode-se verificar a imagem da CCA durante a avaliação de granulometria, conforme Figura 20.

Figura 20 – CCA utilizada nos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Água

Para o preparo das amostras e realização dos ensaios, utilizou-se água destilada. A água destilada propicia uma maior segurança devido ao seu grau de pureza mais elevado em relação a água comum de abastecimento público.

3.1.4 Cimento

O cimento utilizado no estudo foi o Cimento CP-V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) adquirido em empresa especializada na venda deste tipo de cimento, conforme pode ser visto na Figura 21, já aplicado sob a fração de solo pronta para os ensaios.

Figura 21- Cimento aplicado sob amostra de solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, foram definidas três (3) porcentagens diferentes de mistura dos materiais como está descrito na Tabela 9. O teor de cinza foi determinado partir do teor de solo e o teor de cimento foi determinado a partir da soma dos dois (solo +cinza).

Tabela 9 – Composição das amostras de solo-cimento-CCA.

| Material | Percentual de material utilizado | | |
|----------|----------------------------------|-----|-----|
| | Solo | 100 | 100 |
| CCA | 5 | 10 | 15 |
| Cimento | 4 | 7 | 10 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

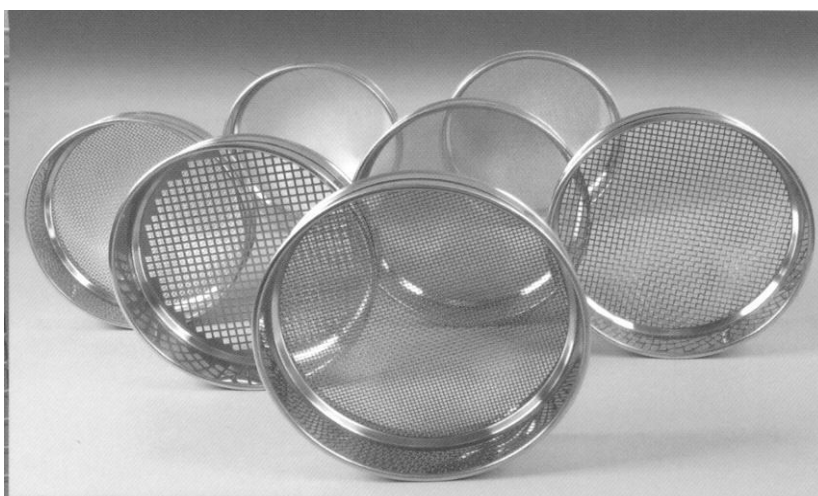
3.2.1 Umidades

Todas as umidades para cada percentual de mistura solo-cimento-CCA para a realização dos ensaios foram previamente calculados os percentuais em planilhas de cálculo, e posteriormente realizadas de acordo com a NBR 6457/1986 que dispõe sobre a preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. A determinação das umidades dos corpos de prova foi determinada através da secagem de pequenas amostras de cada triplicata, acondicionadas em cápsulas metálicas e secadas em estufa. O valor da umidade foi obtido através da pesagem das amostras, em balança de precisão, antes e depois de secagem em estufa. Dessa forma, os valores foram calculados pela diferença de massa antes e depois da secagem, onde a perda de massa corresponde à umidade perdida durante a secagem. Cada cápsula metálica era numerada e previamente pesada em balança de precisão.

3.2.2 Granulometria

Os ensaios de granulometria da CCA foram realizados de acordo com procedimentos descritos na norma NBR 7181/1984 e classificados de acordo com a NBR 6502/1995. O equipamento utilizado foram as peneiras (Fig. 22) de diversos diâmetros de abertura conforme apresentado na Tabela 10.

Figura 22 – Peneiras usadas nos ensaios de granulometria



Fonte: Elaborado pelo autor.

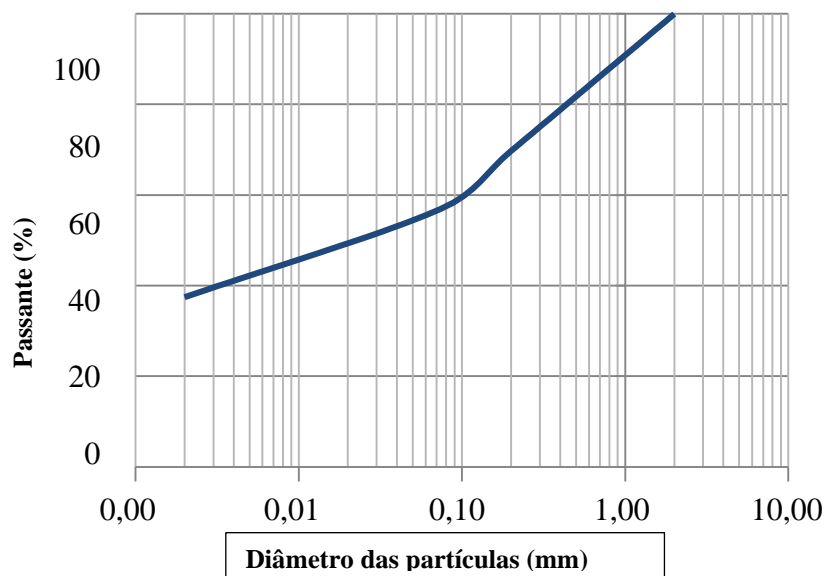
Tabela 10– Abertura das peneiras utilizadas na análise granulométrica

| Peneira (nº) | Diâmetro de abertura (mm) |
|--------------|---------------------------|
| 1” | 25,4 |
| 3/4” | 19,1 |
| 1/2” | 12,7 |
| 3/8” | 9,5 |
| 4 | 4,76 |
| 8 | 2,38 |
| 10 | 2,00 |
| 30 | 0,59 |
| 40 | 0,42 |
| 50 | 0,30 |
| 100 | 0,15 |
| 200 | 0,07 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a granulometria do solo foram utilizados os resultados obtidos por PIVETTA (2017) que pelo ensaio granulométrico determinou um percentual de 25% de silte, 34% de argila e o restante sendo composto de areia, como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Granulometria do solo coletado em Cerro Largo –RS



Fonte: PIVETTA, (2017).

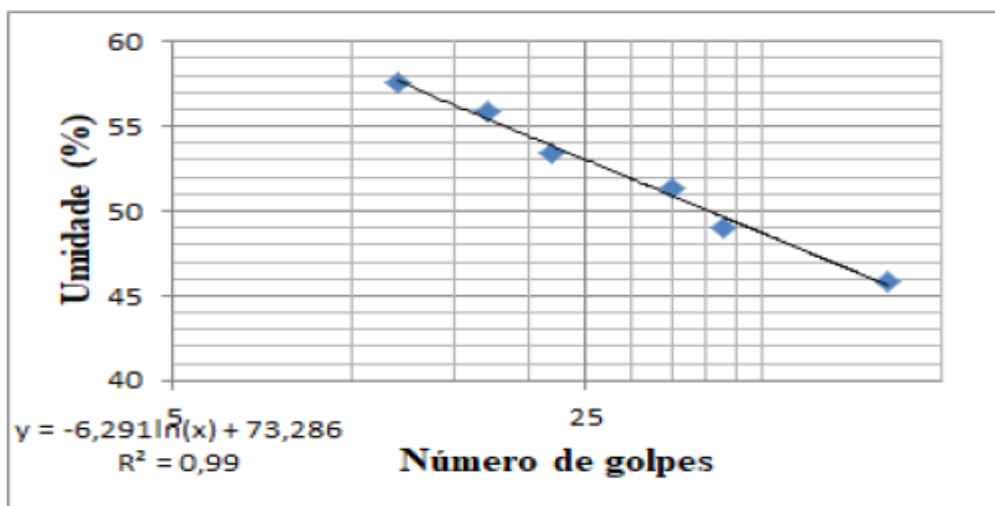
3.2.3 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg são divididos em:

- Limite de Liquidez: Os ensaios de limites de liquidez podem ser realizados de acordo com a NBR 6459/1984.. Essa Norma estabelece que os valores de LL são aqueles encontrados na umidade do solo para 25 golpes, de acordo com a equação da reta de cada ponto.

Ensaio realizado por Castro (2017) determinaram um limite de liquidez de 53,03 com uma umidade próxima de 50% em um ponto muito próximo de coleta ao deste estudo. O ajuste pode ser observado na Figura 24.

Figura 24– Limite de liquidez



Fonte: Castro, (2017).

- Limite de Plasticidade: Os ensaios de limite de plasticidade são realizados com os procedimentos especificados na norma NBR 7180/1984. O limite de plasticidade é obtido através da umidade encontrada em cada ensaio realizado. O índice de plasticidade depende do limite de liquidez e é calculado de acordo com a equação:

$$IP = LL - LP \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

IP = Índice de Plasticidade (%);

LL = Limite de Liquidez (%);

LP = Limite de Plasticidade (%).

No estudo de Castro (2017) este solo onde foi coletada a amostra não apresentou plasticidade devido à quantidade elevada de areia presente na amostra.

3.2.4 Densidade real dos grãos

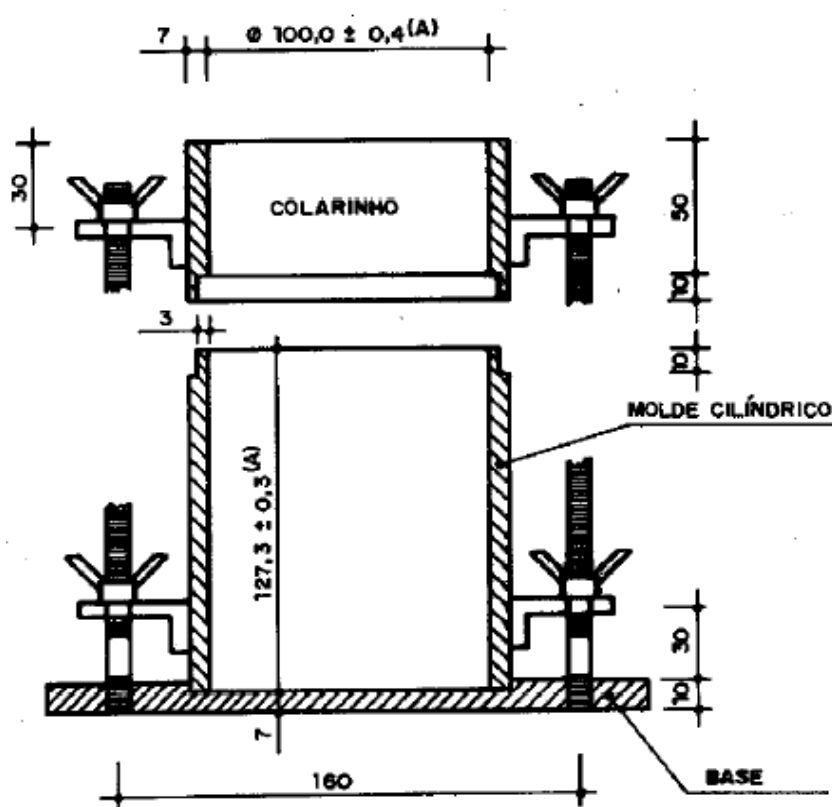
Para o trabalho foram usados os dados obtidos nos ensaios de densidade do solo realizados por Castro (2017), que concluiu no seu estudo que a densidade real média dos grãos de solo é de 2,63 g.cm⁻³. Já para a CCA, foram considerados os dados do fabricante, o qual informa que a densidade da CCA é de 2,16 g.cm⁻³.

3.2.5 Ensaios de compactação (Próctor normal)

Os ensaios de compactação foram realizados com as porcentagens de solo, CCA e cimento indicadas anteriormente na Tabela 10. Em cada ensaio, 5 pontos de compactação foram analisados de acordo com a NBR 7182/1986 para a verificação do peso específico do material em diferentes umidades. A cada ponto, a umidade foi aumentada em aproximadamente 2% para atingir os valores ótimos de umidade e densidade aparente seca.

O cilindro utilizado foi o cilindro pequeno (Próctor) que tem um peso de 2374,14 g e um volume de 997,46 cm³ e suas dimensões estão especificadas na Figura 25. O solo é compactado com auxílio de um soquete, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 25 – Cilindro utilizado nos ensaios de compactação



Fonte: Adaptado da NBR 7182/1986.

Figura 26 - Ensaio de Próctor Normal



Fonte: Adaptado de Loebens,2018.

3.2.6 Ensaio de resistência à compressão simples

Nos ensaios de resistência à compressão simples, foram seguidos os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 12770/1992. Primeiramente, para cada porcentagem de mistura solo + CCA + cimento foram moldadas três amostras cilíndricas com medidas aproximadas de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

Após a elaboração dos corpos de prova, foi feita a pesagem individual de cada corpo de prova em uma balança de precisão e a aferição das medidas de altura e diâmetro, sendo logo após acondicionados em uma estufa com água para manter a temperatura e umidade ambiente, para o processo de cura. Os corpos de prova estavam sob uma estrutura acima do nível da água, dessa forma sem ter contato com a água. Depois de armazenados na estufa, essa foi coberta com plástico filme, de modo a manter a umidade ambiente para a cura dos corpos de prova. O tempo de cura usado foi de 72 horas, pois foi utilizado o Cimento CP-V ARI (Alta Resistência Inicial), sendo que para este, o tempo de cura indicado mínimo indicado é de 72 horas.

Transcorrido o tempo de cura, as amostras foram levadas para uma prensa hidráulica como a da Figura 27, para a determinação da resistência à compressão até atingir a ruptura da amostra, ou seja, aplicando-se uma tensão até que ocorra o rompimento do corpo de prova. Posteriormente, ocorreu o tratamento dos dados obtidos para cada percentual de mistura.

Figura 27 - Prensa hidráulica



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o propósito de atingir os objetivos deste trabalho foram realizados ensaios que caracterizaram fisicamente o material utilizado, bem como, testes de compactação e compressão simples. Os resultados obtidos estão apresentados por meio de tabelas e gráficos.

4.1 GRANULOMETRIA

4.1.1 Cinza de Casca de Arroz (CCA)

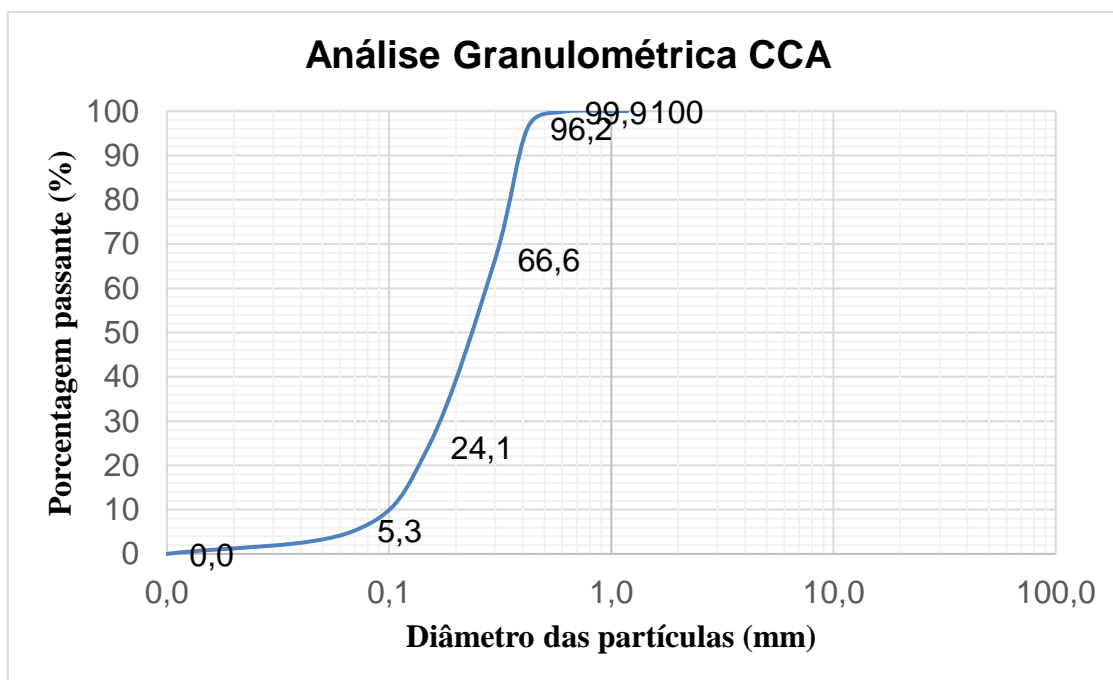
A avaliação da granulometria da CCA foi realizada em uma peneira agitadora gravimétrica, onde em cada peneira ficou retido as partículas conforme o tamanho da malha de cada peneira, sendo posteriormente feita a pesagem de cada percentual retido. Desta forma, foi possível elaborar a curva granulométrica da CCA. Observa-se que a maior parte das partículas de CCA têm o tamanho entre 0,3 e 0,6 mm. Durante a elaboração das misturas, devido à finura das partículas da CCA e do cimento, estas assimilava rapidamente a umidade da mistura devido à alta capacidade de absorção de água, formando pequenos grânulos, que dificultavam a homogeneização da mistura solo-cimento-CCA, endurecendo a mistura e exigindo o aumento do teor de água na mistura para os teores de 10 % e 15 % de CCA. Conforme as bibliografias consultadas, a CCA não apresenta coeficiente de uniformidade devido sua estrutura geralmente ser amorfa e não cristalina. A composição química e densidade da CCA conforme fabricante pode ser vista na Figura 28 e a curva granulométrica da CCA pode ser visualizada na Figura 29.

Figura 28- Composição química e densidade da CCA conforme fabricante

| COMPOSIÇÃO QUÍMICA | |
|---------------------------|---------------------------|
| Sílica Amorfa | Mínimo 90% SiO_2 |
| Resíduo 325 mesh | Máximo 5% |
| Cor | Cinza Escuro |
| Carbono Livre Combusto | Máximo 8% |
| Al_2O_3 | 0,15% |
| CaO | 0,50% |
| MgO | 0,80% |
| Densidade | 2,18 g/cm^3 |
| Material Volátil | Máximo 1% |
| PH | 8-10 |

Fonte: Ekosil,(2018).

Figura 29- Curva Granulométrica CCA



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO (PRÓCTOR NORMAL)

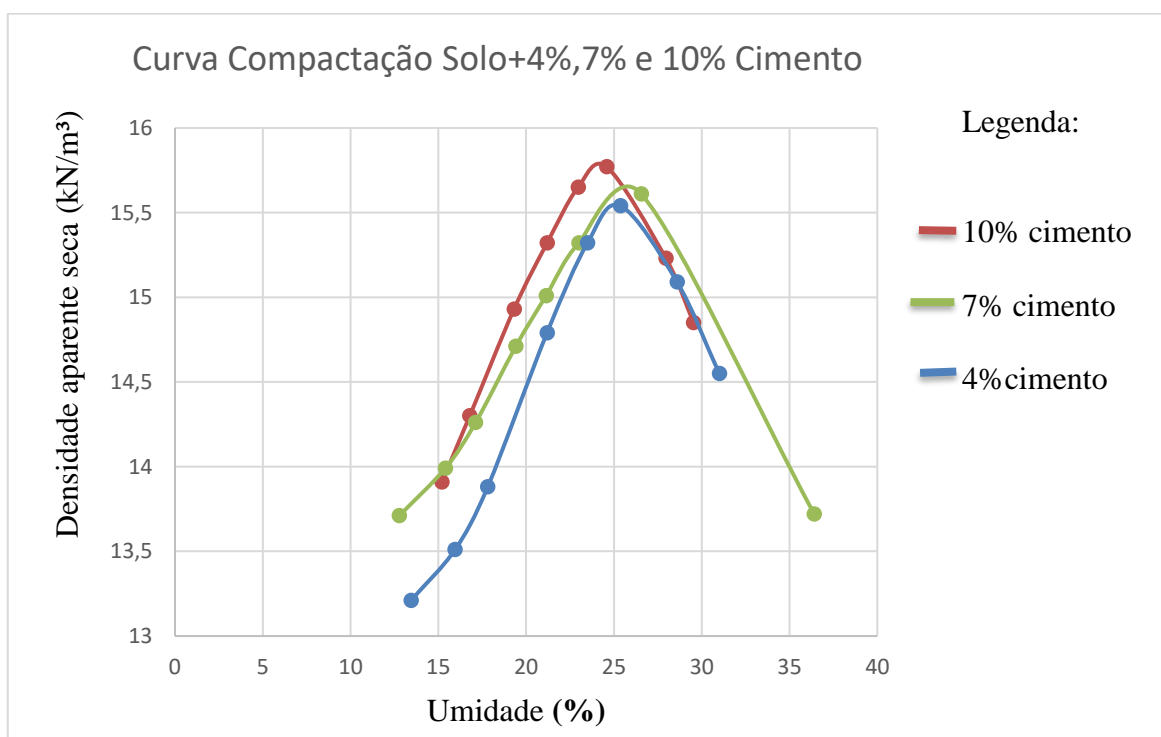
Após a realização dos ensaios, obteve-se os resultados da densidade do solo seco para umidades ótimas que estão apresentados na Tabela 11 e 12 e Figura 30, onde pode-se verificar que com o aumento da porcentagem de CCA e cimento adicionado junto ao solo, há uma redução da umidade ótima e um aumento na densidade aparente seca máxima. De maneira geral, pode-se afirmar que, quanto mais elevada for a densidade do solo, maior será sua compactação e menor sua porosidade total. A adição de cimento e CCA melhoram as interações das partículas do solo, tornando-o mais denso e resistente após a compactação, aumentando a resistência à compressão e diminuindo, conseqüentemente a permeabilidade do solo, pois o ar é expulso e o cimento e a CCA agregam as partículas ocupando o espaço do ar, melhorando as interações das partículas do solo, ocorrendo a hidratação do cimento e da CCA, que provoca o endurecimento do solo após ocorrer um determinado período de cura. Desse modo, é possível concluir que as adições de CCA e de cimento ao solo, visando sua estabilização, promove ganhos significativos de resistência à compressão simples, garantindo ao solo melhoria de suas características exigidas para que possa ocorrer a aplicação desse método em aterros de solos estabilizados. O aumento dos valores de densidade aparente pode ser observado na Tabela 11 e 12, conforme ocorre aumento dos teores de CCA e cimento adicionados ao solo.

Tabela 11 – Valores de densidade aparente seca máxima e umidade ótima para os diferentes teores de cimento

| Porcentagem de cimento | 0% | 4% | 7% | 10% |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Umidade ótima (%) | 28,82 | 25,00 | 25,80 | 24,0 |
| Densidade máxima (kN.m^{-3}) | 13,90 | 15,60 | 15,65 | 15,80 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Curvas de compactação solo+4%,7% e 10% cimento



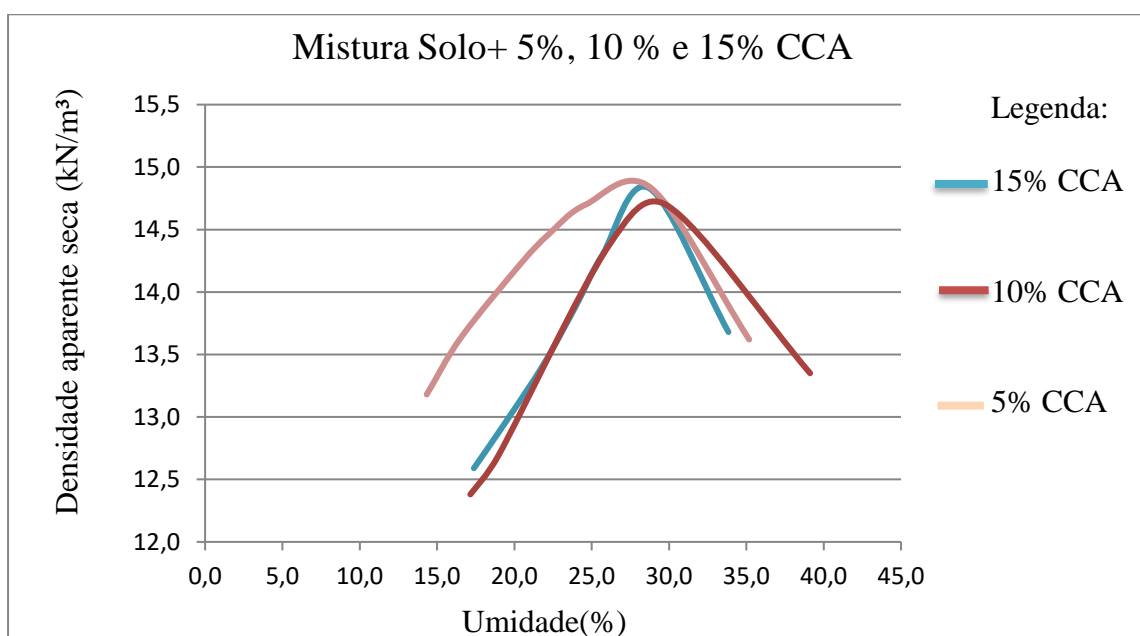
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Valores de densidade aparente seca máxima e umidade ótima para os diferentes teores de CCA

| Porcentagem de CCA | 0% | 5% | 10% | 15% |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Umidade ótima (%) | 28,82 | 28,80 | 28,00 | 28,8 |
| Densidade máxima (kN.m ⁻³) | 13,90 | 14,75 | 14,85 | 14,85 |

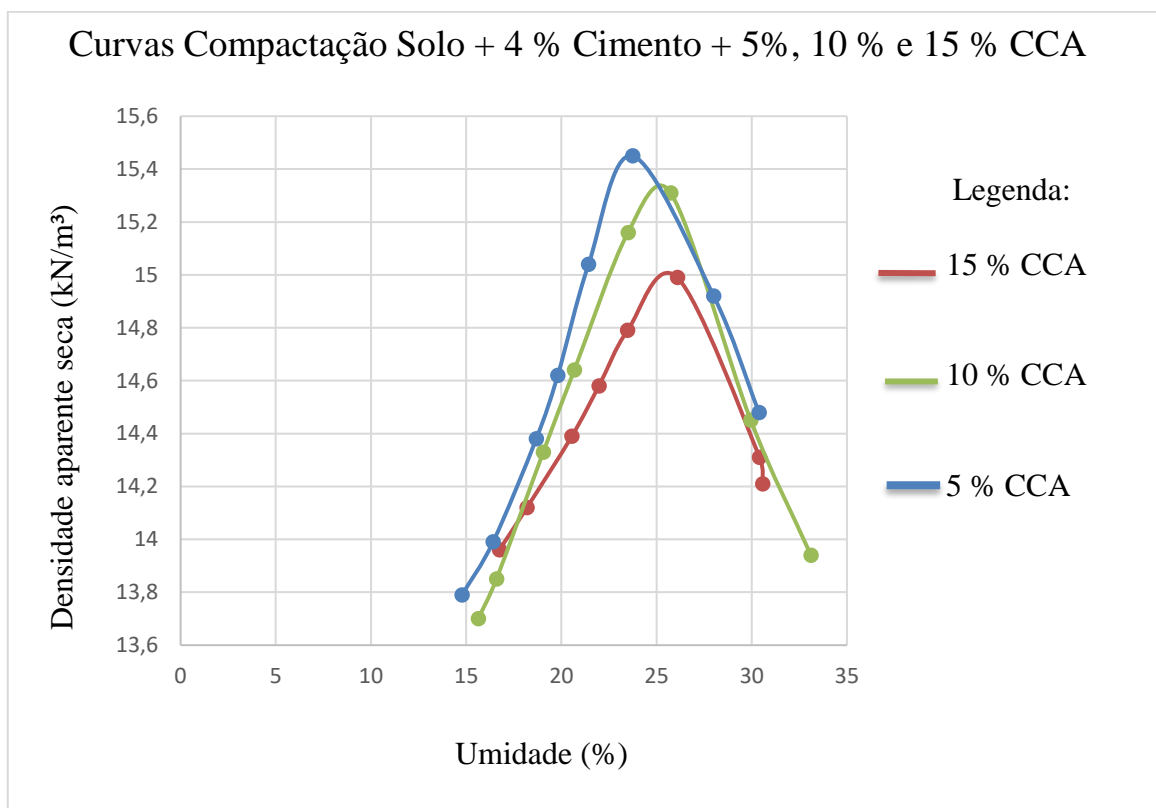
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31– Curvas de compactação solo + 5%, 10% e 15% CCA



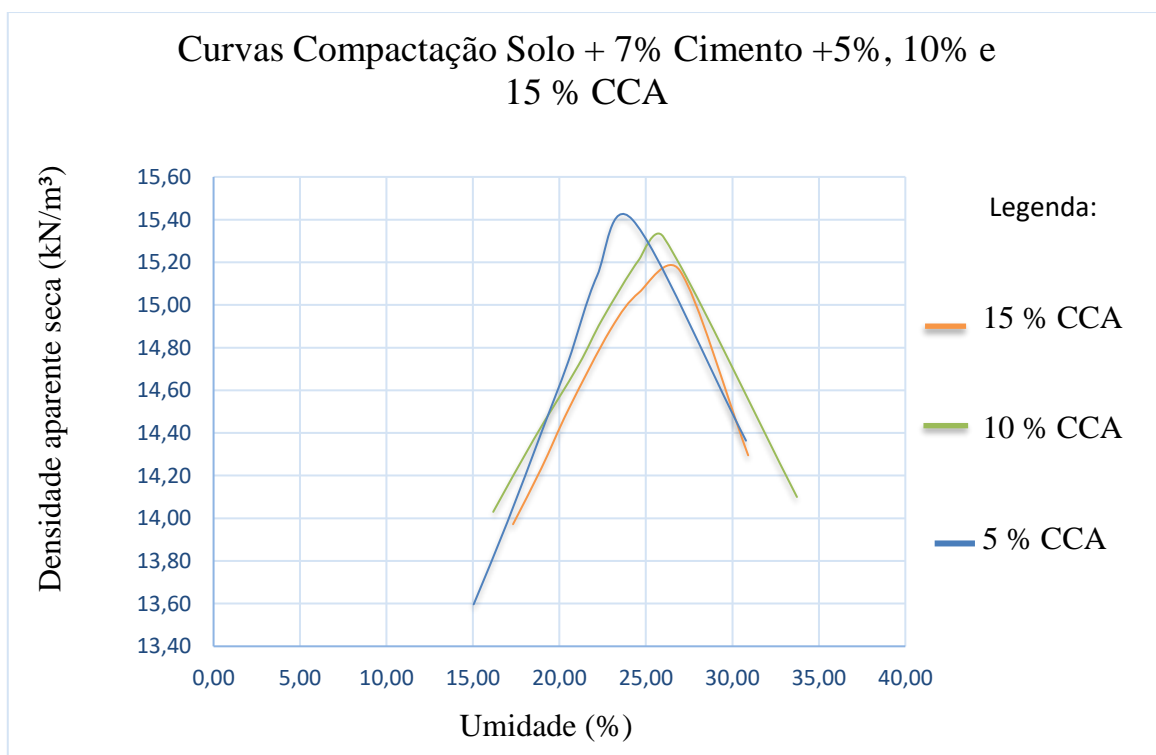
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Curvas de compactação solo + 4% cimento + 5%, 10% e 15% CCA



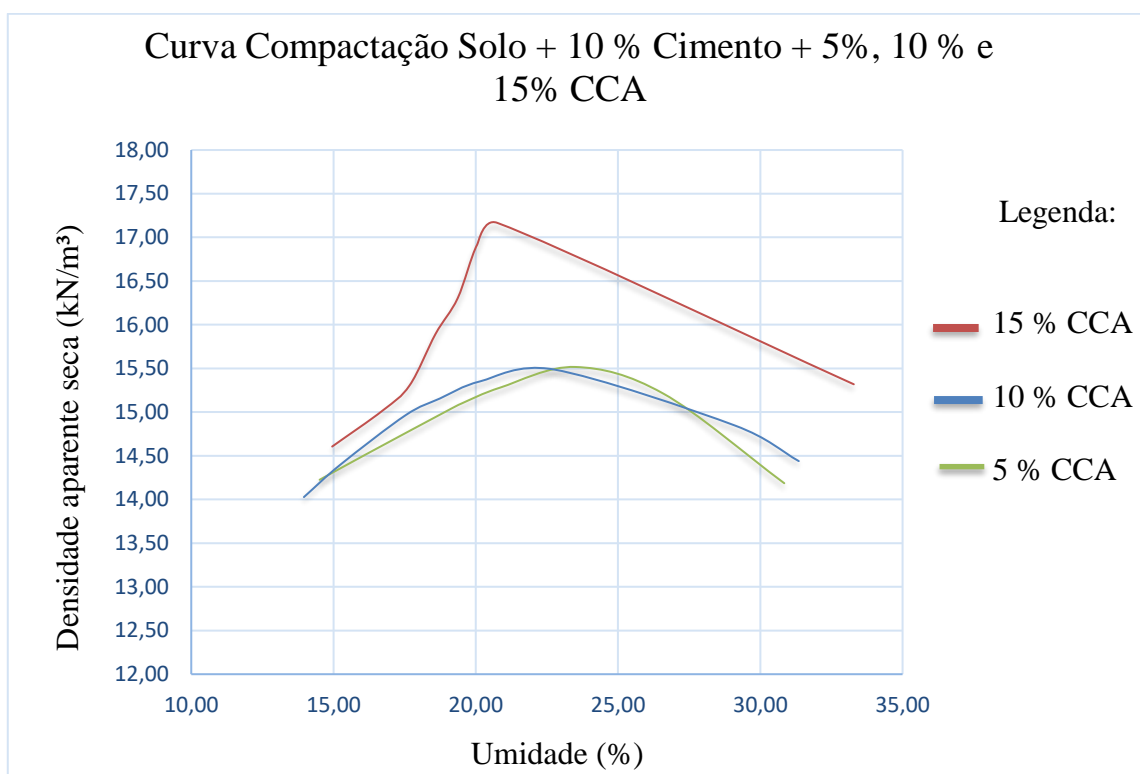
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – Curvas de compactação solo + 7% cimento + 5%, 10% e 15% CCA



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Curvas de compactação solo + 10% cimento+ 5%, 10% e 15% CCA



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Como especificado na metodologia, para os ensaios de compressão simples foram preparadas misturas de solo-cimento-CCA em determinadas porcentagens para a formação de moldes cilíndricos (Fig. 35) que posteriormente foram submetidos a compressão na prensa hidráulica.

Figura 35 – Corpos de prova rompidos utilizados nos ensaios de compressão simples



Fonte: Elaborada pelo autor.

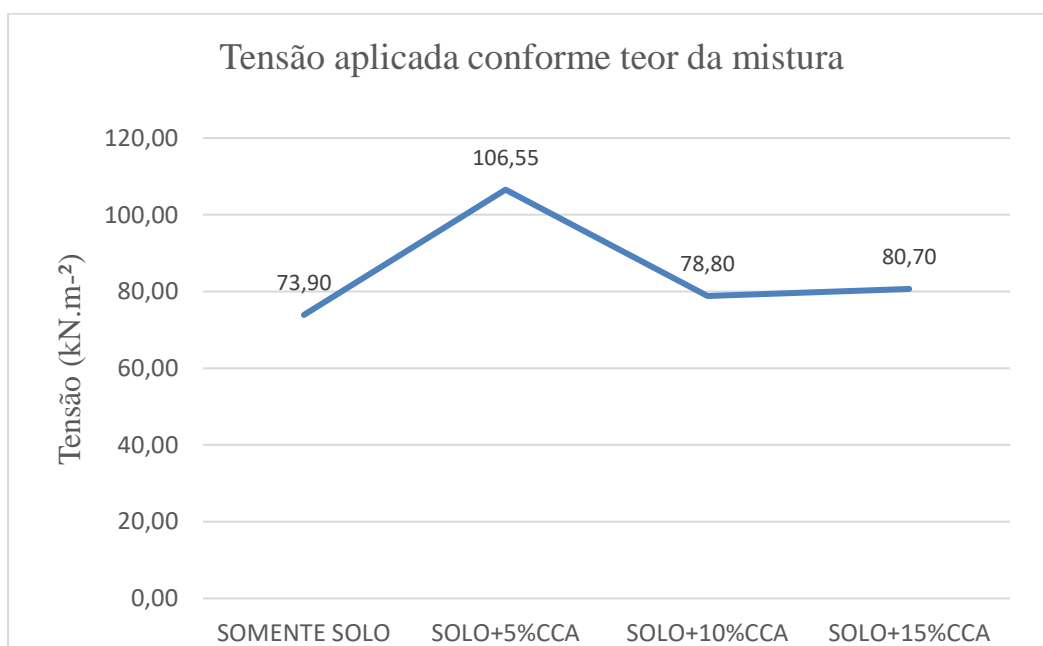
Os resultados dos ensaios de compressão simples mostram que o solo natural, resiste a uma tensão maior antes do rompimento em relação as misturas de solo de até 5% CCA, acima desse teor a resistência do solo diminui, devido baixa interação entre as partículas de solo e CCA. Conforme adiciona-se somente cimento, ocorre ganho gradativo de resistência conforme o aumento do teor de cimento. A quantidade de água utilizada para produção dos corpos de prova teve um aumento diretamente proporcional à quantidade de finos de cada mistura confeccionada, para manter a trabalhabilidade desejada. Para adição de 4% cimento, ocorre aumento de resistência até adição de 5% CCA. Teores acima disso dificultaram a homogeneização da mistura e conseqüentemente, ocorreu perda de resistência para os teores de 10% e 15% CCA respectivamente. Para adição de 7% cimento, os valores foram semelhantes aos de 4% adição de CCA. As tensões para todos os teores pode ser observada na tabela a seguir.

Tabela 13 – Tensões máximas necessárias para o rompimento dos moldes

| Porcentagem de mistura(solo-cimento-CCA) % | Tensão aplicada(kN.m ⁻²) | | | |
|--|--------------------------------------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | Média |
| SOMENTE SOLO | 74,30 | 74,30 | 73,30 | 73,90 |
| SOLO+5%CCA | 108,80 | 109,50 | 101,40 | 106,55 |
| SOLO+10%CCA | 78,30 | 80,00 | 78,00 | 78,80 |
| SOLO+15%CCA | 80,54 | 81,30 | 80,40 | 80,70 |
| SOLO+4%CIM | 760,80 | 746,90 | 748,60 | 752,10 |
| SOLO+7%CIM | 1163,90 | 963,20 | 963,10 | 1030,10 |
| SOLO+10%CIM | 2674,30 | 2632,20 | 2661,80 | 2656,10 |
| SOLO+4%CIM+5%CCA | 1494,30 | 1472,00 | 1490,50 | 1485,60 |
| SOLO+4%CIM+10%CCA | 785,60 | 779,40 | 792,50 | 785,80 |
| SOLO+4%CIM+15%CCA | 258,20 | 261,30 | 261,30 | 260,30 |
| SOLO+7%CIM+5%CCA | 1761,40 | 1747,40 | 1757,40 | 1755,40 |
| SOLO+7%CIM+10%CCA | 737,10 | 719,70 | 719,70 | 725,50 |
| SOLO+7%CIM+15%CCA | 829,40 | 829,40 | 829,40 | 829,40 |
| SOLO+10%CIM+5%CCA | 2071,60 | 2070,40 | 2050,90 | 2064,30 |
| SOLO+10%CIM+10%CCA | 840,30 | 838,00 | 833,60 | 837,30 |
| SOLO+10%CIM+15%CCA | 805,60 | 805,60 | 805,60 | 805,60 |

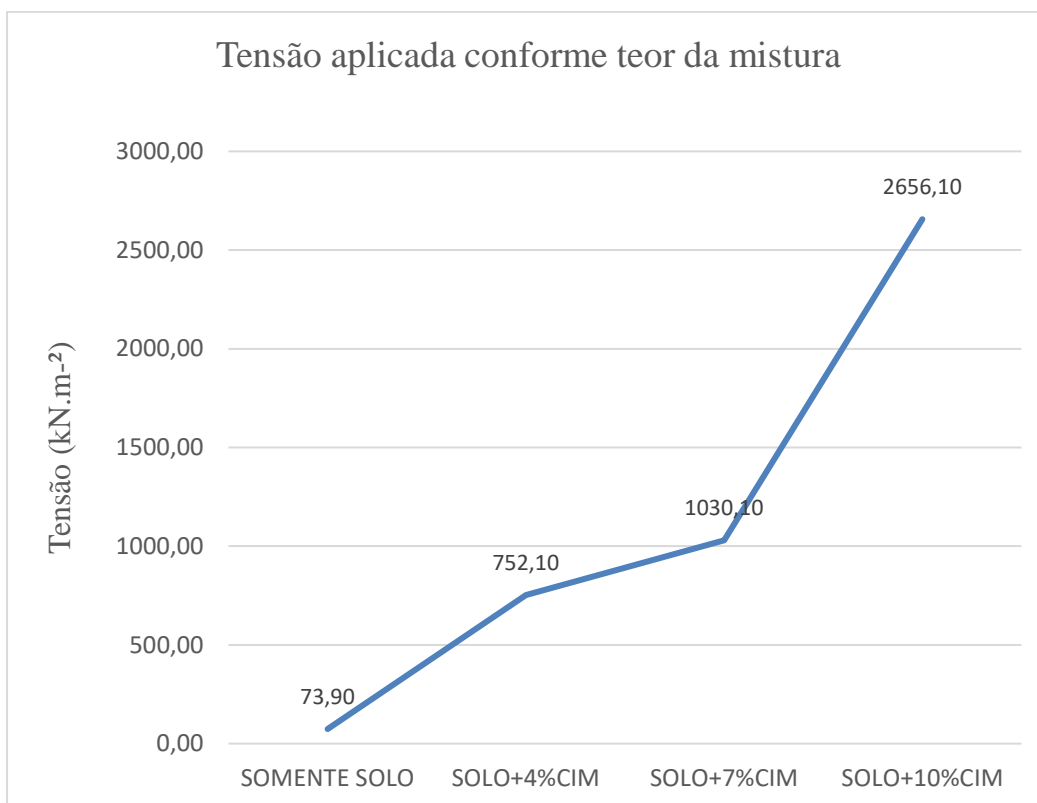
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Tensão máxima média para solo+ adição de 5%, 10% e 15% CCA



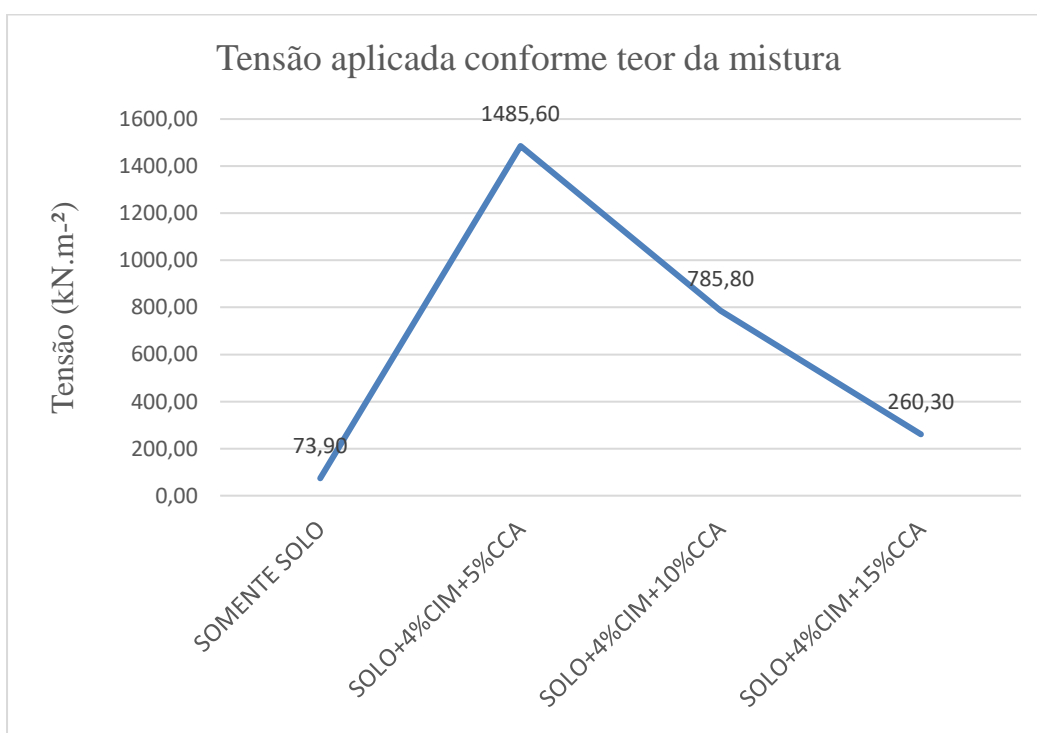
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Tensão máxima média para solo+ adição de 4%, 7% e 10% Cimento



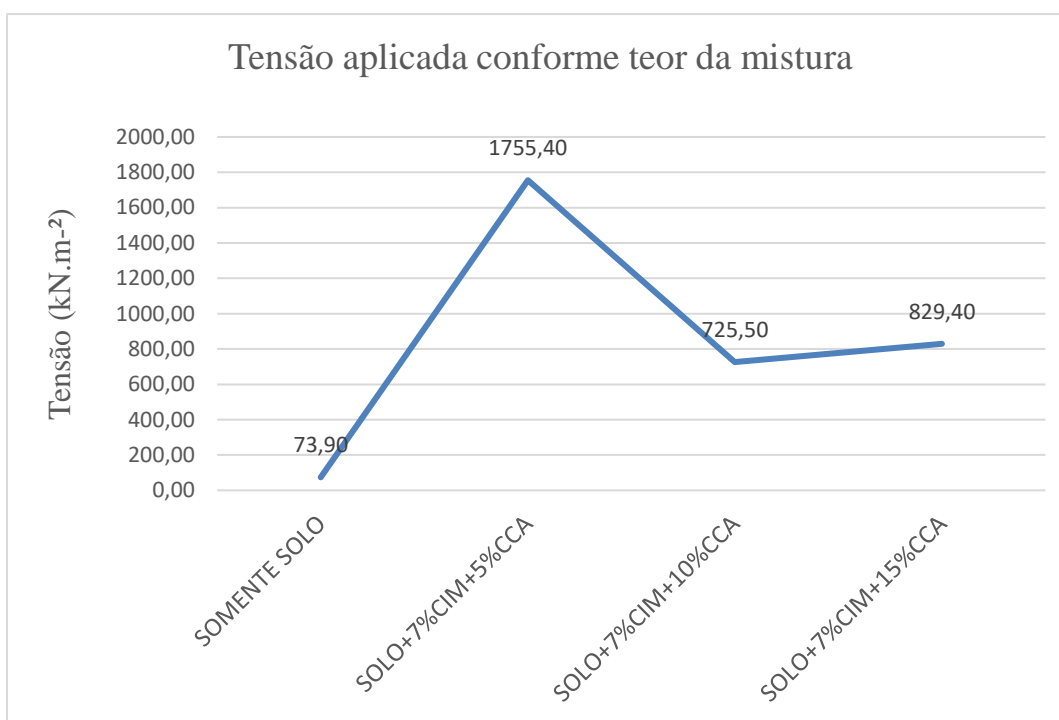
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Tensão máxima média para adição de 4% Cimento e 5%, 10% e 15% CCA



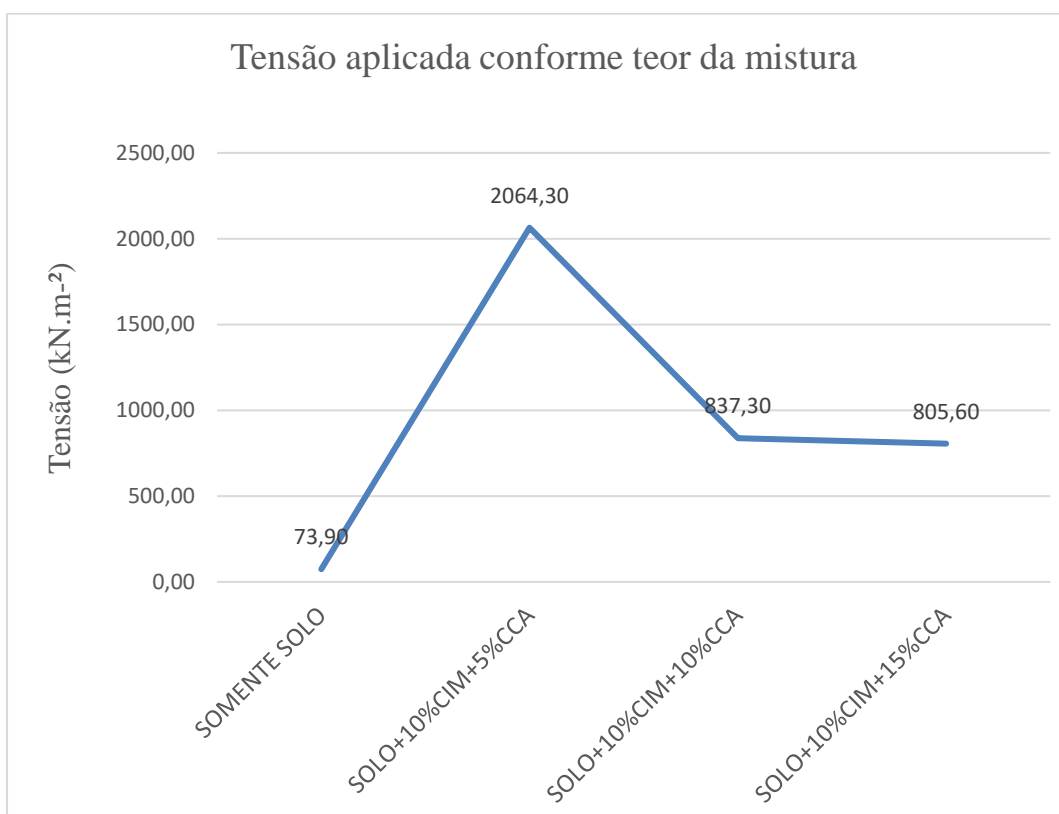
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Tensão máxima média para adição de 7% Cimento e 5%, 10% e 15% CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40: Tensão máxima média para adição de 10% Cimento e 5%, 10% e 15% CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Acima de 5% de adição de CCA havia dificuldade de homogeneização da mistura tanto com solo puro, tanto com cimento, formando pequenos grânulos devido a umidade assimilada pela CCA pelo seu pequeno diâmetro das partículas, possivelmente exigindo aumento de umidade para a homogeneização e moldagem dos corpos de prova. As bibliografias consultadas sugerem um aumento de 2% a 4% de teor de umidade acima do ponto ótimo de umidade, desse modo possivelmente ocorra maiores ganhos de resistência à compressão, além de avaliação de diferentes teores de cimento e tempos de cura, porém esses teores não chegaram a ser aplicados nem testados nesse trabalho. Trabalhos que futuramente venham a ser desenvolvidos nessa área, podem ter como sugestão a avaliação diferenciada nesse sentido.

Podem ocorrer variações da resistência à compressão simples com a redução da altura do corpo de prova e sendo um ensaio não-drenado o volume se mantém constante, portanto há um aumento na área transversal do corpo de prova. Assim, isto introduz tensões de tração nas bordas do corpo de prova que não são resistidas, abrindo-se fissuras ao longo de geratrizes do corpo de prova, através das quais as tensões efetivas não se transmitem. Outros problemas podem influenciar neste ensaio tais como a impossibilidade de controle das condições como umidade e até mesmo ajuste da pressão, o efeito do atrito nas extremidades, efeito da amostragem e do molde, dentre outros.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível verificar que o reaproveitamento da cinza de casca de arroz (CCA) deve ser visto como uma forma sustentável de disposição final do resíduo, reduzindo o consumo de novo insumos e matérias-primas e conseqüentemente a extração destes da natureza além de proporcionar uma fonte alternativa de renda.

A cinza da casca do arroz foi caracterizada como material pozolânico, por apresentar comportamento amorfo, elevado teor de sílica e índice de atividade pozolânica superior ao estabelecido por norma, conferindo-lhe boa reatividade e, por isso mesmo, considerada adequada para uso em estabilização de solos-cimento. A quantidade de água utilizada para produção dos corpos de prova teve um aumento diretamente proporcional à quantidade de finos de cada mistura confeccionada, para manter a trabalhabilidade desejada. A densidade de massa no estado endurecido dos corpos de prova com cimento e cinza da casca do arroz apresentou melhor desempenho que os corpos de prova de referência (sem cinza da casca do arroz).

Foram realizados ensaios de caracterização do solo e da CCA para posteriormente realizar uma mistura do resíduo CCA com o solo natural nas porcentagens de 5%, 10% e 15% e cimento nas porcentagens de 4%, 7% e 10%, e realizar testes de compactação e de resistência à compressão simples, comparando os resultados com os testes realizados com nenhuma adição de resíduo de CCA.

O uso de CCA incorporado ao solo apresentou os melhores resultados no ensaio de compactação com um padrão bem definido de comportamento, com o aumento da massa específica com a adição do resíduo, tendo bons resultados com adição de 4% cimento até 5% CCA, e melhores ainda com 7% e 10% de cimento para até 5% CCA. Teores acima de 5% CCA perdem resistência mesmo para teores de 7% e 10% cimento. Possivelmente seja necessário incremento (2% a 4%) no teor de umidade conforme sugerem as bibliografias.

Em relação aos ensaios de compressão simples, os resultados obtidos apresentaram considerável aumento na tensão necessária para o rompimento dos moldes em relação a amostra de solo puro, em teores de até 5% CCA para 4%, 7% e 10% CCA mas decrescem se teor de CCA aumenta, desta forma o aumento da quantidade de CCA não manifesta a resistência necessária para uso em solo de aterro compactado.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se aprofundar mais os estudos sobre aumento do teor de CCA, relação de diferentes teores de água, além de análises de resistência de corpos de prova em função de diferentes tempos de cura, visando obter mais resultados comparativos entre diferentes teores de mistura solo-cimento-CCA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMICK, J. A. **Purification of rice hulls as a source of solar grade silicon for solar cells.** Journal Electrochemistry Society, v. 129, n. 4, p. 864-866, 1982.

ANGEL, J. D. M., VÁSQUEZ, T. G. P., JUNKES, J. A., Hotza, D. (2009). **Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado.** Química nova, 32(5), 1110-1114.

ARMESTO, L.; BAHILLO, A.; VEIJONEN, K.; CABANILLAS, A.; OTERO, J. **Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed.** Biomass and Bioenergy, v. 23, n. 3, p. 171-179, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland –índice de atividade pozolânica com cimento.** NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos.** 1 ed. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. -ABNT. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** 1 ed. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** 1 ed. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solos cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento NBR 12253.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12653: materiais pozolânicos – especificação.** Rio de Janeiro, 1992.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes.** 2004. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

BELLEZA, I.; PASQUALINI, E. **Hydraulic performance of soil-cement liners.** GeoEnvironmental 97 Rotterdam: A. A. Balkema. p.271-276, 1997.

BERALDO, Antônio L; RODRIGUES, Michelle S. **Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual.** Engenharia Agrícola. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola,193-204, vol.30,2010.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento.** 2010. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BERTE, S. D. D. **Otimização do solo-cimento auto-adensável.** 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

BOUALLA, N.; BENAOUA, E. H. **Comportement des argiles dans un milieu basique.** ScienceLib,v.3,n.110708,2011.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;** altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. (Acesso em 05/11/2019).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Brasil: projeções do agronegócio 2012/2013 a 2022/2023.** Brasília, DF, 2013.

BUDEMBERG, R. **Caracterização da sílica amorfa extraída da casca de arroz obtida por pré-hidrólise ácida e calcinação, e sua aplicação em borracha de estireno-butadieno (SBR).** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo, Lorena, SP, 2013.

CASTRO, Franciele Oliveira. **Caracterização e determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade do solo do campus da UFFS**. 2017. 76f. Trabalho de conclusão de curso (obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2017.

CATTON, M. D. **Soil-Cement Technology – A Résumé. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association**: Bulletin 136. Reprinted from the Journal of PCA Research and Development Laboratories, v. 4, n.1, p.13-21, 1962.

CHANDRASEKHAR,S.,SATYANARAYANA,K.G.,PRAMADA,P.N., RAGHAVAN, P. **Processing, proprieties and applications of reactive silica from rice husk – an overview**. Journal of Materials Science, 38(15), 3159-3168. (2003).

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. **Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus**. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York: ASCE, v.118, n.8, p.1216-1233, 1992.

CLOUGH, G. W., SIITAR, N., BACHUS, R. C., RAD N.S. **Cemented Sand Under Static Loading**. Journal of Geotechnical Engineering Division, New York: ASCE, v.107, n.GT6, p. 799-817, 1981.

CHAVES, T. F.; QUEIROZ, Z. F.; SOUZA, D. N. R.; GIRÃO, J. H. S.; RODRIGUES, E. A. **Uso da cinza da casca do arroz (CCA) obtida da geração de energia térmica como adsorvente de Zn(II) em soluções aquosas**. Química Nova, v. 32, n. 6, p. 1378- 1383, 2009.

COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. **The Mechanics of Cemented Carbonate Sands**. Géotechnique, London, v.43, n.1, p.53-67, 1993.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.133, n.2, p.197-205, 2007.

CROFT, J. B. **The Influence of Soil Mineralogical Composition on Cement Stabilization**. Géotechnique, London, v.17, p.119-135, 1967.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) –

PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

DALLACORT, R.; JÚNIOR, H. C. L.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. **Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p. 511-518, 2002.

DALLA ROSA, A. J. **Caracterização Mecânica nas Escalas Microscópica e Macroscópica de Solos Tratados com Cal.** 2011. Qualificação de Doutorado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DELLA, V. P., KUHN, I., HOTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica.** Química Nova, v. 24, n. 6, p. 778-782, 2001.

DELLA, Viviana Possamai, KÜHN Ingeborg, HOTZA, Dachamir. **Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica.** Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PGMAT . Publicado em Cerâmica Industrial, 10 (2) Março/Abril, 2005.

DELLA, V. P., Kühn, I., HOZTA, D. **Reciclagem de resíduos agroindustriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica.** Cerâmica Industrial, 10(2), 22-25. . (2005).

DE OLIVEIRA, F. B., da Glória Alves, M., & DE OLIVEIRA, C. H. R. (2012). **Favorabilidade de áreas para implantação de aterros controlados no município de Campos dos Goytacazes/RJ utilizando sistema de informação geográfica.** Revista Brasileira de Cartografia.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. – Rio de Janeiro. EMBRAPA-SPI, 2006.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. - Statistics – FAOSTAT. **Food and agricultural commodities production.** 2012. Disponível em: . Acesso em: 10 dezembro 2018.

FELT, E. J. **Factors Influencing Physical Properties of Soil-cement Mixtures.** Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association: Bulletin D5. Authorized

Reprint from Bulletin 108 of the Highway Research Board, 1955, 138p.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do Comportamento Não Saturado de Dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia – Brasil**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre. 128p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER (FEPAM). **Revista da FEPAM**, volume 2, nº 1 janeiro a dezembro de 2008.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER (FEPAM). **Relatório sobre a geração de resíduos sólidos industriais no estado do Rio Grande do Sul**, Rio Grande do Sul, 2003.

FERNANDES, I. J.; SANTOS, E. C. A. dos; Oliveira, R.; REIS, J. M.; CALHEIRO, D.; MORAES C. A.; MODOLO, R. C.E; **Caracterização do resíduo industrial casca de arroz com vistas a sua utilização como biomassa**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos –UNISINOS. Artigo apresentado no 6º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 10 a 13 de junho de 2015. São José dos Campos-SP-BRASIL.

FERNANDES, A. **Síntese de Zeólita e Wolastonita a partir de cinza de casca de arroz**. 2006. 98p. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Área de Tecnologia Nuclear-Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FERREIRA, C.S. **Desenvolvimento do processo de obtenção de filme polimérico a partir de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSC, 2005.

FERRO, W. P., SILVA, L. G. A., WIEBECK, H. **Uso de cinza da casca de arroz como carga em matrizes de poliamida 6 e poliamida 6.6**. *Polímeros*, 17(3), 240-243. (2007).

FOLETTTO, L. F.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R.S.; PORTUGAL JR, U.L.; JAHN, S.L. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**. *Química Nova*. V. 28, n. 6, p. 1055-1060. 2005.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 2005. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

HEINECK, K, S. **Estudo da Influência de Cimentações Introduzidas sob Tensão**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre. 118p.

HORPIBULSUK, S; MIURA, N; NAGARAJ, T. S. **Assessment of Strength Development in Cement-Admixed High Water Content Clays with Abram's Law as a Basis**. Geotéchnique, London, v.53, n.4, p.439-444, 2003.

HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; RAKSACHON, Y. **Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay**. Soils and Foundations, Tokyo, v. 49, n. 1, p. 85-98, 2009.

HUANG, J. T.; AIREY, D. W. **Effects of Cement and Density on a Artificially Cemented Sand**. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF 67 HARD SOILS– SOFT ROCKS, 1993, Athens. Proceedings. Rotterdam: A. A Balkema, 1993. 3v. v.1, p.553.560.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatística da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: . Acesso em: 11 out. 2018.

INGLES, O G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Australia: Butterworths Pty. Limited, 1972. 366p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Brasília: IPEA, 2012.

LAMBE, T. W., WITHMANN, R. V. **Soil Mechanics**, SI version. New York: John Wiley & Sons INC. 553p. 1958.

LARNACH, W. J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures**. **Civil Engineering and Public Works Reviews**. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LIGHTSEY, G. R.; ARMAN, A.; CALLIHAN, C. D. **Changes in the Characteristics of Cement-Stabilized Soils by Addition of Excess Compaction Moisture**. Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects, Washington, D. C: HRB, n.315, p.36-45,

1970.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KER, J. C. **Latossolos do Brasil: uma revisão**. Revista Geonomos, v. 5, n. 1, 1997.

KIELING, Amanda Gonçalves. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente**. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, RS, 2009.

KIELING, Amanda; CAETANO, Marcelo ;KULAKOSWKI, Marlova ;KAZMIERCZAK, Claudio. (2009). **Influência da adição de cinza de casca de arroz na aderência de argamassas de revestimento**. Estudos Tecnológicos em Engenharia.2009.

LOEBENS, Sandro Vanilson . **Análise da compacidade e da resistência da mistura de areia de fundição com solo argiloso** 2018. 57f. Trabalho de conclusão de curso (obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2018.

MEHTA, P. K. **Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material**. *Advances in Concrete Technology*, Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

MONTARDO, J. P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. 1999. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre.

MOURA, D. S. S.; SEVERO, R. N. F.; CARVALHO JUNIO, H. G.; MACEDO NETO, O. C. **Escoamento plástico e comportamento tensão-deformação de solos cimentados**. Revista

Holos, 2007, Ano 23, Vol. 3.

NUÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-química de um solo residual de Arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

OLIVEIRA C. M; TANNOUS K. **Fluidodinâmica de biomassa em leito fluidizado gasoso.** 5f. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2009. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R; MITCHELL, D. **New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products.** *Process Biochemistry.* v. 35, p. 1153–1169. 2000.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo. Oficina de Textos. 247p. 2002.

PIVETTA, Carlise Patrícia. **Utilização do resíduo de construção e demolição em solo compactado.** 2017. 53f. Trabalho de conclusão de curso (obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2017.

PORBAHA, A; SHIBUYA, S.; KISHIDA, T. **State of the art in deep mixing technology: part III – geomaterial characterization.** *Ground Improvement, Journal of ISSMGE,* v.4, n.3, p. 91-110, 2000.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - PCA. **Soil-Cement.** In: Disponível em: www.cement.org/pavements. Acesso em 02/fev/20.

PRIETTO, P. D. M. **Resistência e Dilatância de Solos Cimentados: Uma Abordagem Teórico-Experimental.** 2004. 250p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

PRIETTO, P. D. M. **Estudos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado.** 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

RAMBO, Magale Karine Diel. **Aproveitamento da casca de arroz para a produção de xilitol e sílica xerogel.** 2009. 117f. Dissertação (Mestrado em Química) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

RODRIGUES, M. S., BERALDO, A. L.. **Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz industrial.** Engenharia Agrícola Jaboticabal, 30(2), 193-204. 2010

ROJAS, J. W. J. **Estudo de Remediação de Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida Utilizando a Técnica de Encapsulamento.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ROSA, F. S. ; SCHERER, M. J. **Desempenho térmico de paredes de alvenaria protegidas com revestimento de compósitos de resíduos agrícolas.** R. Gest. Industr., Ponta Grossa, v. 14, n. 2, p. 96-113, abr./jun. 2018.

ROTTA, G. V.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C.; GEHLING, W. Y. Y. **Influência do índice de vazios de formação da matriz cimentante no comportamento mecânico de solos cimentados.** Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.245, n.1, p. 23-41, 2001.

SANTOS, J. **Compactação. Elementos Teóricos. Folhas de apoio à disciplina de Obras Geotécnicas,** Engenharia Civil, IST UTL, 2008.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** 1997. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SAXENA, S.K., LASTRICO, R.M., **Static Properties of Lightly Cemented Sand. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104 no GT12, 1978**

SILVA, Everton Jose da. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil.** 2009. 117f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2009.

SCHNAID, F., PRIETTO, P.D.M., CONSOLI, N.C. **Characterization of Cement Sand in Triaxial Compression.** ASCE. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.127, n.10, p 857-868, 2001.

SOUZA, M. F. de, MAGALHÃES, W. L. E., PERSEGIL, M. C. **Silica derived from burned**

rice hulls. *Materials Research*, 5(4), 467-474, 2002.

SOUZA PINTO, Carlos. **Curso Básico de mecânica dos Solos**. 3º Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

TAMANINI, C.; HAULY, M. C. D. O. **Resíduos agroindustriais para produção biotecnológica de xilitol**. *Ciências de Alimentos*, Londrina, PR, v. 25, n. 4, p. 315- 330, 2004.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. 1994. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THOMÉ, A. **Comportamento De Fundações Superficiais Apoiadas Em Aterros Estabilizados Com Resíduos Industriais**. 1999. 238p. Tese (Doutorado Em Engenharia) - Ppgec/Ufrgs, Porto Alegre.

THOMÉ, A., DONATO, M., PRIETTO, P.D.M., CONSOLI, N.C. **Análise e Proposta de Método de Dimensionamento de Fundações Superficiais Apoiadas em Sistema de Dupla Camada**. *Solos e Rochas*, v. 26, n.2, p 141-163, 2003.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. **Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil**. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005.

UMAMAHESWARAN, K., Batra,V. **S.Physico-chemical characterisation of Indian biomass ashes**. *Fuel*, 87(6), 628-638. (2008).

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Design and Construction of Levees. Engineer Manual N° 1110-2-1913, Appendix G: Use of Soil cement for Levee Protection**. Washington D. C., 2000. p.146-162.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

VIEIRA, A.C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 72p. 2012.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia.** 2012. 56f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.