

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ**

**MILENI GONÇALVES BELETINI**

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO  
ARGILOSO E LATERÍTICO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

**CASCATEL - PR**

**201**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ**

**MILENI GONÇALVES BELETINI**

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO  
ARGILOSO E LATERÍTICO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador: Prof. Me. Eng. Civil Maycon  
André de Almeida**

**CASCADEL - PR  
2016**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Wilson Paganini Beletini e Sirlene Gonçalves dos Santos, à minha irmã Marcella Gonçalves Beletini, por todo apoio e suporte durante minha graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo de minha vida, não somente nestes anos como universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A esta universidade, pela oportunidade de fazer o curso. Ao meu professor orientador Maycon André de Almeida pela orientação, apoio, confiança e dedicação à elaboração deste trabalho.

À professora e amiga Bruna Pereira, pela ideia do tema e pelo incentivo para continuar firme mesmo com todos os obstáculos, te agradeço imensamente.

A todos os professores, por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional; e por terem me feito aprender. A esses, os meus eternos agradecimentos.

Meu imenso agradecimento aos laboratoristas que me apoiaram, incentivaram e dedicaram tempo, conversas e risadas ao longo dos dias que passei no laboratório.

Aos meus pais, minha irmã e toda a minha família que nos momentos de minha ausência - dedicados ao ensino superior - sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação ao presente.

Agradeço imensamente ao Leandro Gomes, que se tornou um grande amigo e que sem ele este sonho de projeto não seria realizado.

Aos meus amigos de graduação, Amanda, Douglas e Gabriel, que me deram todo o suporte e me aguentaram ao longo do curso e da elaboração deste trabalho, meu grande obrigado.

Agradeço do fundo do meu coração aos meus amigos da vida, que me ajudaram de maneira direta ou indireta na elaboração deste projeto e ao longo da vida acadêmica. Eu amo vocês.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a adição de cinza de casca de arroz em amostras de solo da região de Cascavel-PR, a fim de melhorar a resistência ao cisalhamento a partir da ampliação dos valores de coesão e ângulo de atrito entre as partículas. Também, realizar comparação entre resultados com solo-cal e solo-cimento. Para alcançar os objetivos propostos, ensaios de compressão triaxial foram realizados em corpos de prova compactados com o teor de umidade ótimo, com adição de cinza de casca de arroz em dosagens distintas. Este trabalho, através dos ensaios que foram realizados, comprovou que a cinza de casca de arroz agiu como material de preenchimento granulométrico fortalecendo o solo analisado, dado que a dosagem de 20% de cinza de casca de arroz e 80% de solo natural foi a que apresentou 100% de melhoria na resistência ao cisalhamento do solo. O trabalho mostra, ainda, que a mistura solo-CCA pode ser um eficiente material para utilização na construção civil, aumentando a resistência ao cisalhamento, tais como sua utilização em obras de terra.

**Palavras-chave:** Resistência ao cisalhamento; Cinza de casca de arroz; Ensaio Triaxial.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CEEF – Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário FAG  
CD – Consolidated drained (Tipo de ensaio triaxial, consolidado drenado)  
CU – Consolidated undrained (Tipo de ensaio triaxial, consolidado não drenado)  
UU - Unconsolidated undrained (Tipo de ensaio triaxial, não consolidado não drenado)  
CCA - Cinza de casca de arroz  
 $\tau$  – Resistência ao cisalhamento  
c - Coesão  
 $\sigma$  – Tensão normal  
 $\phi$  – Ângulo de atrito  
w – Teor de umidade.

## Sumário

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. CAPÍTULO 1 .....</b>                                           | <b>9</b>  |
| 1.1 INTRODUÇÃO .....                                                 | 9         |
| 1.2 OBJETIVOS .....                                                  | 10        |
| 1.2.1 Objetivo Geral .....                                           | 10        |
| 1.2.2 Objetivos Específicos .....                                    | 10        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA.....                                               | 10        |
| 1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....                                  | 11        |
| 1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....                                    | 11        |
| <b>2. CAPÍTULO 2.....</b>                                            | <b>12</b> |
| 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                      | 12        |
| 2.2 SOLOS .....                                                      | 12        |
| 2.2.1 Solos Lateríticos.....                                         | 14        |
| 2.2.2 Solos Colapsíveis .....                                        | 14        |
| 2.3 SOLO DE CASCAVEL-PR.....                                         | 14        |
| 2.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR.....                               | 15        |
| 2.5 ADENSAMENTO .....                                                | 15        |
| 2.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....                                 | 16        |
| 2.6.1 Atrito entre as partículas .....                               | 17        |
| 2.6.2 Coesão (c).....                                                | 19        |
| 2.7 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....                               | 19        |
| 2.8 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL .....                              | 21        |
| 2.8.1 Tipos de ensaios de compressão triaxial .....                  | 22        |
| 2.9 MELHORAMENTO DE SOLO .....                                       | 23        |
| 2.10 CASCAS DE ARROZ .....                                           | 24        |
| 2.11 CINZA DA CASCA DE ARROZ .....                                   | 27        |
| 2.12 UTILIZAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NA CONSTRUÇÃO CIVIL ..... | 28        |
| <b>3. CAPÍTULO 3.....</b>                                            | <b>30</b> |
| 3.1 METODOLOGIA .....                                                | 30        |
| 3.1.1 Localização e caracterização da amostra.....                   | 30        |
| 3.1.2 O Solo.....                                                    | 30        |
| <b>4. CAPÍTULO 4.....</b>                                            | <b>36</b> |
| 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                    | 36        |

|           |                                                                                         |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2       | COESÃO, ÂNGULO DE ATRITO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....                            | 37        |
| 4.2.1     | Parâmetros de coesão e ângulo de atrito das misturas solo-cinza de casca de arroz ..... | 37        |
| 4.2.2     | Resistência ao cisalhamento das misturas solo-cinza de casca de arroz.....              | 43        |
| <b>5.</b> | <b>CAPÍTULO 5.....</b>                                                                  | <b>45</b> |
| 5.1       | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                                                               | 45        |
| <b>6.</b> | <b>CAPÍTULO 6 .....</b>                                                                 | <b>46</b> |
| 6.1       | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                                  | 46        |
|           | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                | <b>47</b> |
|           | <b>ANEXOS .....</b>                                                                     | <b>50</b> |

## **1. CAPÍTULO 1**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

Problemas em fundações e em obras de terra estão presentes desde os primórdios, ou seja, desde a antiguidade já se existia uma necessidade de se trabalhar com o solo, bem como arquitetar pequenas e grandes construções. Partindo desse pressuposto, pode-se dizer que, assim, iniciava-se os estudos sobre o comportamento do solo, com o desenvolvimento baseado em dados fornecidos por experiência e observação dos fenômenos ocorrentes, como recalque e desmoronamento (H. P. CAPUTO, 1988).

A quantidade de projetos de engenharia construídos sobre camadas de solo mole está sendo cada vez maior, com isso se faz necessária a utilização de métodos capazes de melhorar o solo, aumentando a sua capacidade de carga para minimizar efeitos que são prejudiciais à construção, como recalques absolutos.

Quando se fala em sustentabilidade, há uma necessidade de se levar em consideração a reutilização de resíduos descartados em grande escala no meio ambiente. No que tange a isso, a consciência ambiental é de extrema importância, pois a reutilização de resíduos é feita como melhoramento de outros materiais, com redução de custos dos processos construtivos e a redução da poluição e impacto ambiental.

Tem-se que grandes indústrias geram enormes quantidades de resíduos, sendo esses provenientes dos restos considerados descartáveis na produção, que podem passar pelo processo da reciclagem. Pode-se, de fato, perceber essa utilização em indústrias de beneficiamento de arroz, as quais são descartadas toneladas de cascas, que são queimadas em altas temperaturas, transformando-se em cinza.

Nesse sentido, a cinza de casca de arroz é um resíduo natural que possui em sua estrutura o pó de sílica; sendo esse muito prejudicial à saúde - portanto, não deve ser descartado incorretamente. Sobre isso, tal resíduo pode ser adicionado à concretos, cimentos e argamassas, mas não é largamente utilizado por ter coloração muito escura, o que dificulta a utilização em estruturas de concreto aparente. (POUEY, 2006).

Assim, tem-se que usar resíduos para reforçar os solos é uma das opções para o não descarte incorreto. Como salienta Gaspar (2003), formando um compósito com propriedades físico-mecânicas pode-se melhorar os solos, contribuindo ,também, para a sustentabilidade ambiental.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a resistência ao cisalhamento de um solo laterítico e colapsível coletado superficialmente do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário FAG (CEEF), em Cascavel- PR, com a adição de cinza de casca de arroz.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Moldar os corpos de prova com adição de cinza de casca de arroz nas proporções em massa de 5%, 10%, 15% e 20%.
- Realizar ensaios triaxiais adensados rápidos e comparar com resultados do solo na condição natural;
- Comparar com resultados de ensaios triaxiais de mesmo solo com a adição de cal e cimento;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Conhecer a estrutura do solo tem grande importância para se dar início as construções civis, mas, nem sempre os resultados dos ensaios que são feitos para ter acesso a tais informações são satisfatórios, levando a estudos de materiais e métodos que se ajustem e ajudem no melhoramento deste.

Para aproveitamento dos locais onde o solo não suporta grandes cargas são utilizados materiais para a técnica de melhoramento de solo com adições que podem interferir no aumento de sua resistência; entre eles, os mais empregados são o cimento e a cal hidratada, que aumentam consideravelmente a resistência do solo.

Nesse sentido, a sustentabilidade é um tema frequente, que leva ao reaproveitamento dos recursos disponíveis para a redução dos impactos ambiental. De tal modo, analisando alguns materiais tem-se a percepção de que os mesmos podem vir a agregar em obras de construção civil. Assim, com o intuito de utilizar recursos naturais abundantes e que tenham características apropriadas para a sua utilização, a cinza de casca de arroz com seus componentes pozolânicos pode proporcionar bons resultados.

Por fim, a utilização desse resíduo para aumento de resistência do solo é uma maneira de se retirar do meio ambiente um material prejudicial, reduzindo o impacto ambiental e aumentando as opções de materiais para o mesmo fim.

#### 1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Na engenharia civil o solo tem diversas utilidades; entretanto, esse apresentar desempenho físico-mecânico que atenda às necessidades de sua utilização para fundações e obras de terra. Quando o solo não tem suas propriedades corretas de utilização deve passar por melhoramento para que seu uso seja adequado.

Então, para o melhoramento do solo é necessário a utilização de materiais que tenham em sua composição agentes que proporcionam à mistura solo-material aumento na sua resistência ao cisalhamento.

Assim, para o presente trabalho, foi analisada a adição de Cinza de Casca de Arroz ao solo, verificando se há melhoria similar aos materiais já utilizados. Sendo assim, qual será a porcentagem necessária de Cinza de Casca de Arroz para que o solo tenha aumento de resistência ao cisalhamento?

#### 1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi limitada ao estudo da resistência ao cisalhamento de um solo argiloso laterítico retirado superficialmente do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário FAG, característico da região de Cascavel - PR, com a adição de dosagens de cinza de casca de arroz em diferentes corpos de prova.

Tem-se que teor de umidade que foi utilizado para todas as dosagens será o mesmo da amostra natural, obtido através de ensaios de compactação Proctor realizado por Volpato (2015). Então, foram realizados ensaios triaxiais do tipo adensado não drenado (CU), com corpos de prova compactados a partir de amostras deformadas de solo superficial com adição de cinza de casca de arroz para análise da dosagem que proporcionou aumento considerável na resistência ao cisalhamento do solo utilizado.

## 2. CAPÍTULO 2

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.2 SOLOS

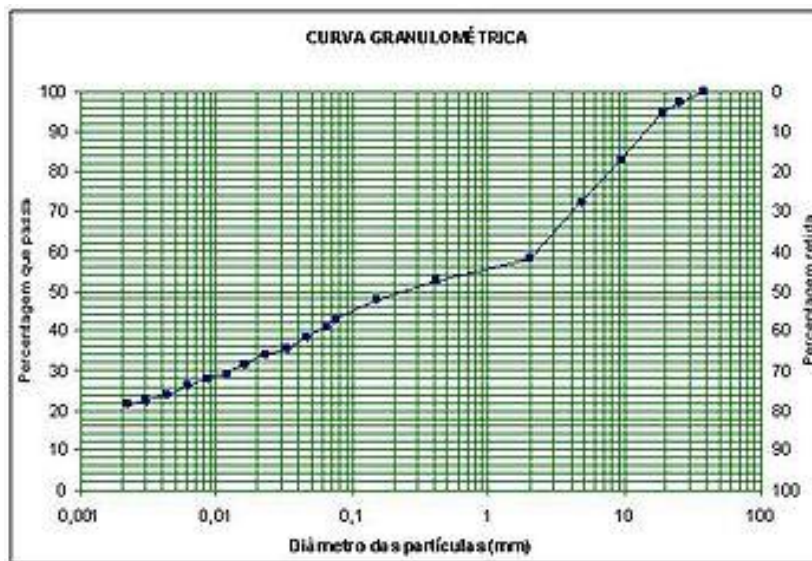
Os solos são resultantes de ações do intemperismo ou meteorização nas rochas e as argilas são provenientes do último produto do processo de decomposição química, que se dá por modificação química ou mineralógica das rochas originais por ataques de oxidação, hidratação e carbonatação (CAPUTO, 1988). E, ainda, os solos são provenientes da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica (NBR 6502/85).

Os solos podem ser classificados de duas maneiras, de acordo com a sua granulometria ou de acordo com a sua origem, seguindo a baixo sua classificação granulométrica. (BUENO; VILAR, 1979).

- Pedregulhos: São fragmentos de rocha que possuem diâmetro superior a 4 mm. São comumente encontrados em margens de rios e em depressões preenchidas de rios.
- Areias: Possuem origem semelhante à dos pedregulhos, porém, apresentam diâmetros variantes entre 4 mm e 0,05 mm. A classe das areias pode ser subdivida em três categorias, sendo elas finas, médias ou grossas.
- Siltes: São solos com granulometria fina, com diâmetros que variam de 0,05mm e 0,005mm. Esses solos apresentam pouca ou nenhuma plasticidade.
- Argilas: São classificadas como solo muito fino, pois suas partículas possuem diâmetros inferiores a 0,002mm. Esses solos possuem como característica uma boa plasticidade e alta resistência mecânica quando seco.

A distribuição em porcentagem dos diversos tamanhos de grãos é dada pela granulometria, a distribuição granulométrica do agregado é representada através de uma curva granulométrica (Figura 1), que possibilita a determinação das características físicas do solo.

Figura 1: Curva Granulométrica.



(Fonte: Varela, S.D).

De acordo com Pinto (2006), a classificação do solo feita pela sua origem é um complemento importante para maior conhecimento sobre, além de ser importante quanto à classificação sobre sua constituição física.

De acordo com Caputo (1988), o solo pode ser definido em residuais, sedimentares e de formação orgânica devido suas origens:

- Solos Residuais: São os que permanecem na mesma região onde está situada a rocha de origem, podendo ser observada uma gradual transição do solo até a rocha. Entre os residuais, os mais notáveis são os solos lateríticos, os expansivos e os porosos.
- Solos Sedimentares: São solos que sofreram alguma forma de transporte. Entre os agentes transformadores temos: os aluvionares, que são transportados pela água; os eólicos, que são transportados pelo vento; os coluvionares, que são transportados pela ação da gravidade; e os glaciares, que são transportados pelas geleiras.
- Solos de Formação Orgânica: São solos de origem essencialmente orgânica, seja de natureza vegetal ou animal. Podem ser facilmente identificados pela coloração escura e marcante odor. São problemáticos para a construção civil devido a sua alta compressibilidade.

### 2.2.1 Solos Lateríticos

De acordo com Melfi (1997), os solos lateríticos são os solos típicos da evolução em climas quentes e úmidos, além de invernos secos; os quais são encontrados principalmente nas regiões tropicais. Na natureza, esses solos se apresentam geralmente não saturados e com elevados índices de vazios, proporcionando uma pequena capacidade de suporte; entretanto, quando compactados, têm essa capacidade elevada e por isso são muito empregados no uso de aterros e pavimentação (PINTO, 2006).

### 2.2.2 Solos Colapsíveis

Segundo Pinto (2006), é um solo não saturado, que apresenta uma compressão consideravelmente rápida sem que varie a sua tensão total, quando estão submetidos a um aumento de umidade.

O aumento do raio dos meniscos capilares é o causador do colapso, o que também é responsável pela tensão de sucção, podendo ou não reduzir o grau de cimentação. Esse fenômeno é fisicamente explicado pela perda de resistência de solos não saturados. No carregamento axial, a inundação do solo diminui a pressão de sucção ou amolece o cimento natural, causando a ruptura (PINTO, 2006).

## 2.3 SOLO DE CASCAVEL-PR

A região de Cascavel é constituída por solos lateríticos, um solo muito poroso e permeável, sendo a principal classe de solo encontrada no Paraná, com cerca de 30% do território estadual. Tais solos apresentam alta estabilidade, baixo risco de erosão e grande capacidade para suporte de estradas, construções, além de ser favorável para instalação de aterros sanitários (EMBRAPA, 2015).

Constitui de um solo do tipo tropical argiloso residual proveniente do basalto, com característica laterítico e colapsível que em seu estado natural apresenta comportamento de areia. Nesse tipo de solo, edificações ficam suscetíveis a ocorrências de recalque devido ao adensamento das camadas de solo (CARDOSO, *et al.*, 2003 *apud* CORREA, 2015).

## 2.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

O ensaio de Proctor é normalizado pelo método de ensaio da NBR 7182/86 – Ensaio de Compactação que prescreve o método a ser utilizado para a determinação do teor de umidade e a massa específica aparente seca dos solos.

De acordo com a norma, utiliza-se o cilindro pequeno ou grande de acordo com a modalidade e/ou energia que se queira saber os resultados, dependendo do dimensionamento previsto, conforme se vê na Tabela 1:

Tabela 1: Energias de compactação ensaio de Proctor.

| TABELA – Energias de Compactação |                                                         |         |               |            |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------|---------|---------------|------------|
| Cilindro                         | Características inerentes a cada energia de compactação | Energia |               |            |
|                                  |                                                         | Normal  | Intermediária | Modificada |
|                                  | Soquete                                                 | Pequeno | Grande        | Grande     |
| Pequeno                          | Número de camadas                                       | 3       | 3             | 5          |
|                                  | Número de golpes por camada                             | 26      | 21            | 27         |
| Grande                           | Soquete                                                 | Grande  | Grande        | Grande     |
|                                  | Número de camadas                                       | 5       | 5             | 5          |
|                                  | Número de golpes por camada                             | 12      | 26            | 55         |
|                                  | Altura do disco espaçador (mm)                          | 63,5    | 63,5          | 63,5       |

Fonte: NBR 7182/86.

## 2.5 ADENSAMENTO

Adensamento é entendido como sendo a redução do volume de vazios de uma parcela do solo devido às forças confinantes laterais e, por consequência, a redução do seu volume total. Essas forças confinantes pressionam o solo de maneira que as partículas sólidas que o compõe fiquem mais próximas umas das outras, expulsando as partículas gasosas e líquidas. Em um solo saturado, o adensamento se dá pela expulsão da água.

Uma das principais causas de recalques é a compressibilidade do solo, ou seja, a diminuição do seu volume sob ação das cargas aplicadas; em particular, um caso de grande importância prática é aquele que se refere à compressibilidade de uma camada de solo, saturada e confinada lateralmente. Tal situação condiciona os chamados recalques por adensamento, que alguns autores preferem denominar recalque por consolidação (CAPUTO, 1988, p. 78).

Segundo Pinto (2006), o processo de redução de volume em argilas saturadas ocorre lentamente em virtude do tempo que a água necessita para sair dos vazios do solo devido à baixa permeabilidade das argilas.

## 2.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A determinação da resistência ao cisalhamento de um solo é fundamental para o desenvolvimento de um projeto de fundações, taludes ou aterros; haja visto que é esse fator que limita qual será a carga máxima a ser aplicada no solo pela estrutura (SIMONS; MENZIES, 1981).

Assim, pode-se definir a resistência ao cisalhamento de um solo como a máxima tensão de cisalhamento que o solo suporta sem romper, ou também a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura acontecer (PINTO, 2006).

Segundo Caputo (1988), a resistência ao cisalhamento de um solo se compõe, basicamente, de duas propriedades, a coesão e o atrito entre as partículas. Abaixo elas são relacionadas de acordo com a Equação 1.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

Em que:

$\tau$  = resistência de cisalhamento;

$c$  = coesão;

$\sigma$  = tensão normal;

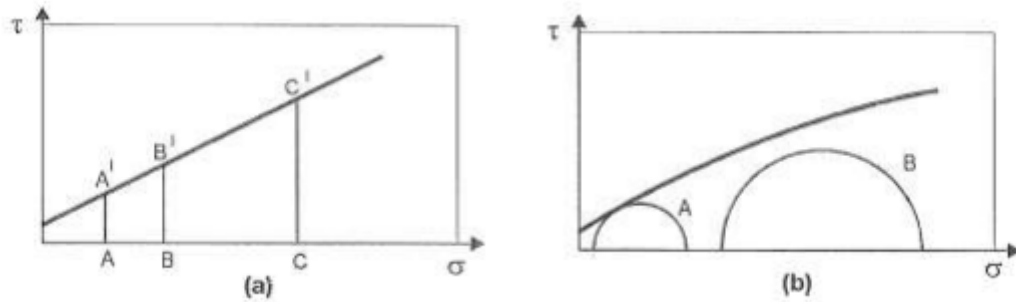
$\phi$  = ângulo de atrito.

Bueno e Vilar (2004) ressaltam que a resistência ao cisalhamento de um solo normalmente é caracterizada pelo critério da envoltória de Mohr-Coulomb, que é definido por uma reta em que o ângulo de inclinação representa o ângulo de atrito interno do solo e o intercepto a coesão, como na Figura 3.

O critério de Coulomb pode ser expresso como: “não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão  $c + f \cdot \sigma$ , sendo  $c$  e  $f$  constantes do material e  $\sigma$  a tensão normal existente no plano de cisalhamento”. Os parâmetros  $c$  e  $f$  são denominados, respectivamente, coesão e coeficiente de atrito interno, podendo este ser expresso como a tangente de um ângulo, denominado ângulo de atrito interno. O critério de Mohr pode ser expresso como: “não há ruptura

enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura, observadas experimentalmente para o material” (PINTO, 2006, p. 251).

**Figura 3:** Representação dos critérios de ruptura: (a) de Coulomb, e (b) de Mohr.



(Fonte: PINTO, 2006).

Assim, antes de entender o que se passa pelo interior do solo durante o processo de cisalhamento, deve-se compreender algumas ideias sobre o mecanismo de deslizamento entre corpos sólidos e, por extensão, entre as partículas do solo; em especial, os fenômenos de atrito e coesão. (PINTO, 2006).

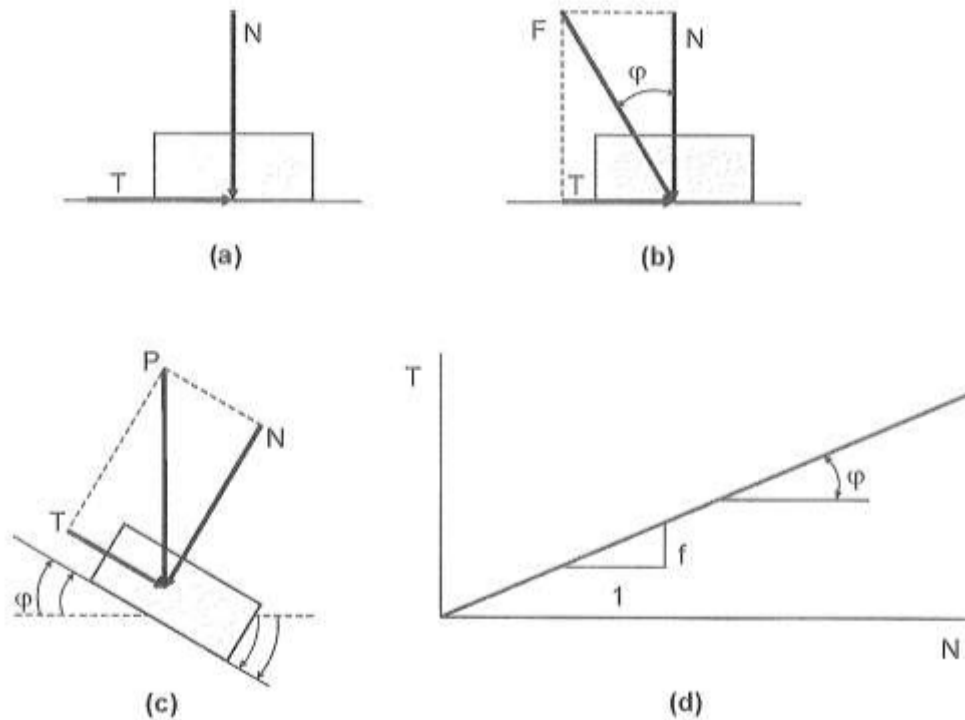
#### 2.6.1 Atrito entre as partículas

A resistência por atrito entre as partículas pode ser analogicamente comparada ao deslizamento de um corpo horizontal em plano inclinado como na Figura 4. Sendo  $N$  a força vertical transmitida pelo corpo, a força horizontal  $T$  necessária para fazer o corpo deslizar deve ser superior ao produto de  $f$  por  $N$ , sendo  $f$  o coeficiente de atrito entre os dois materiais, existindo assim proporcionalidade entre a força tangencial e a força normal. Essa relação pode ser escrita de acordo com a Equação 2:

$$T = N \cdot \tan \phi \quad (2)$$

Sendo  $\phi$  o ângulo de atrito, que é formado pela resultante das duas forças com a força normal.

**Figura 4:** Esquemas referentes ao atrito entre dois corpos.

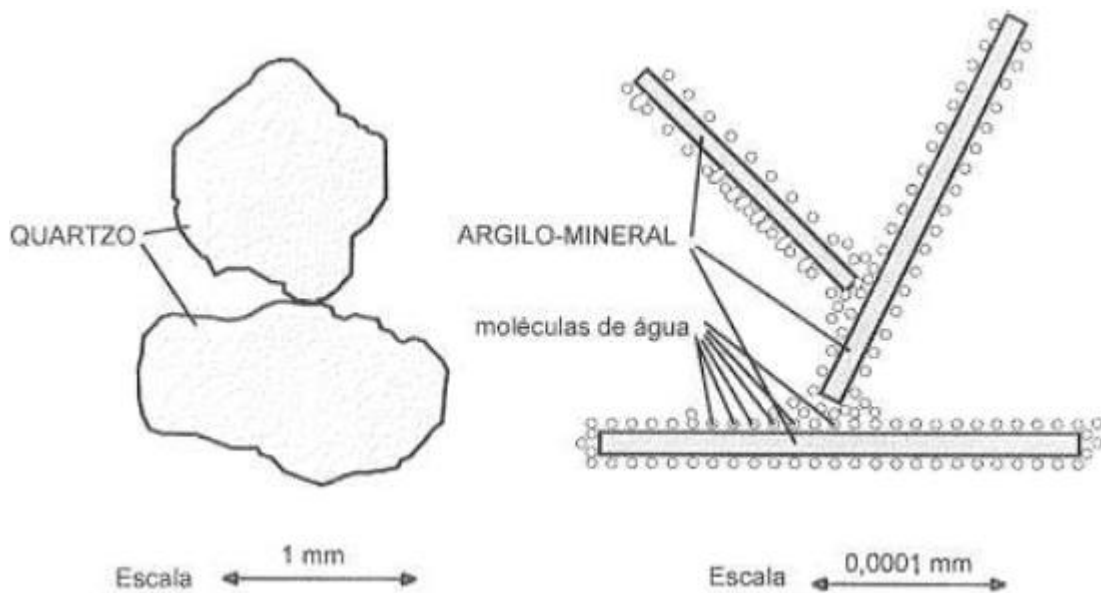


(Fonte: PINTO, 2006).

O fenômeno de atrito nos solos tem um deslocamento envolvendo um grande número de grãos, podendo eles deslizar entre si ou rolarem uns sobre os outros, acomodando-se em vazios encontrados no percurso.

Existe uma diferença entre as forças transmitidas pelo contato entre grãos de argila e grãos de areia. Nos grãos de areia geralmente as forças transmitidas são grandes o suficiente para expulsar a água da superfície, de forma que os contatos ocorrem realmente entre os dois minerais. No caso das argilas, as partículas estão em maior número, havendo redução na força transmitida em cada contato, conforme Figura 5, essas partículas de argila são envolvidas por moléculas de água quimicamente absorvidas a elas, sendo assim as forças de contato não são suficientes para fazer a remoção dessas moléculas de água, sendo elas as responsáveis pela transmissão das forças.

**Figura 5:** Transmissão de forças entre partículas de areia e argila.



(Fonte: PINTO 2006).

### 2.6.2 Coesão (c)

A resistência ao cisalhamento dos solos se dá essencialmente pelo atrito entre as partículas; e a atração química entre essas partículas pode provocar uma resistência independente da tensão normal que atua no plano e constitui uma coesão real, como se tivesse sido aplicado uma cola entre os dois corpos (PINTO, 2006).

Existem duas formas de coesão as quais devem ser diferenciadas: a coesão aparente e a coesão real. A coesão aparente ocorre em solos saturados e é comumente notada em esculturas de areia feitas na praia; porém, assume valores mais expressivos em argilas. A coesão verdadeira é devida as cimentações ocorridas entre as partículas do solo, principalmente devido a presença de agentes cimentantes na composição do solo devido a sua formação, como solos de regiões tropicais que são muito intemperizados. (CAPUTO, 1988; PINTO, 2006).

## 2.7 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

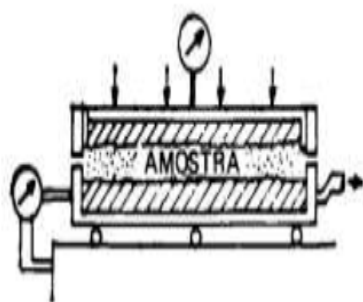
O ensaio de cisalhamento direto é o método mais obsoleto para se obter a resistência ao cisalhamento de um solo e se baseia diretamente no critério de Coulomb. Onde se é

aplicada uma tensão normal num plano e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura.

Determina-se a tensão de cisalhamento sob uma tensão normal, que é capaz de provocar a ruptura de uma amostra de solo colocada em uma caixa composta de duas partes deslocáveis entre si (CAPUTO, 1988), conforme Figura 6.

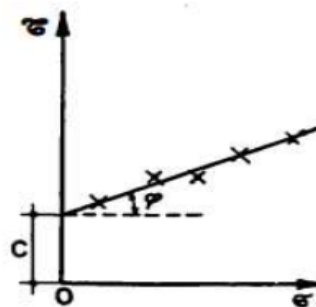
O ensaio pode ser realizado controlando a tensão como também controlando a deformação aplicada, resultando sempre em pares de valores de tensão e deformação. Com esses pares ordenados, se define uma reta em um sistema cartesiano e, se determina o ângulo de atrito ( $\phi$ ) e a coesão ( $c$ ), Conforme Figura 7.

Figura 6: Equipamento para ensaio de cisalhamento direto.



(Fonte: CAPUTO, 1988).

Figura 7: Diagrama Tensão x Deformação.



(Fonte: CAPUTO, 1988).

O ensaio de cisalhamento direto não permite a determinação de parâmetros de deformabilidade do solo, nem mesmo do módulo de cisalhamento, pois não se conhece a distorção, para isso seria necessária a realização de ensaios de cisalhamento simples, que são de difícil execução. O controle das condições de drenagem é trabalhoso, pois não há como impedi-la. No caso das argilas, pode-se realizar ensaios drenados, que são lentos, ou não drenados. Nesse caso, os carregamentos devem ser muito rápidos, para impossibilitar a saída da água (PINTO, 2006).

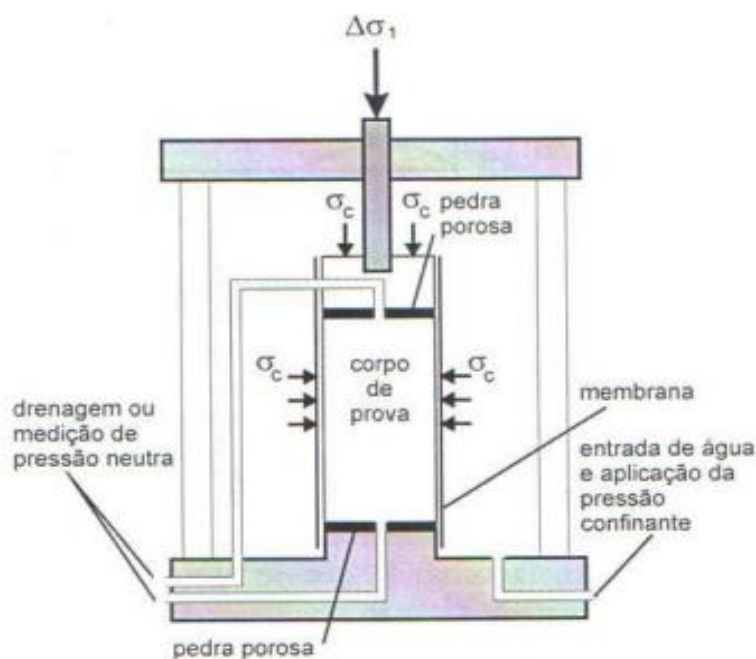
## 2.8 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

O ensaio de compressão triaxial convencional se dá pela aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico de um determinado solo. O ensaio mede o desvio das tensões principais, proporcionando a medida

da resistência ao cisalhamento do solo, fornecendo a resistência não drenada obtida de um círculo de Mohr (PINTO, 2006; SIMONS e MENZIES, 1981).

O corpo de prova é colocado dentro de uma câmara de ensaio, apresentado na Figura 8, e envolto por uma membrana de látex. A câmara é preenchida com água, a qual se aplica uma pressão chamada pressão confinante ou pressão de confinamento. A pressão confinante atua em todas as direções, até mesmo na linha vertical, envolvendo o solo sob uma pressão hidrostática. (PINTO, 2006).

**Figura 8:** Esquema do ensaio de compressão axial.



(Fonte: PINTO, 2006).

De acordo com Pinto (2006), as cargas axiais são aplicadas por forças no pistão que penetra na câmara, ou colocando a câmara numa prensa que a desloca para cima e pressiona o pistão. A carga é medida por meio de um anel dinamométrico externo ou por uma célula de carga intercalada no pistão.

### 2.8.1 Tipos de ensaios de compressão triaxial

Segundo Pinto (2006), referindo-se às condições de drenagem, tem-se três tipos de ensaios descritos abaixo:

- Ensaio adensado drenado (CD): Nesse ensaio a drenagem do corpo de prova é permanente. É aplicada a pressão confinante e se espera que o corpo de prova

sofra adensamento, fazendo com que a pressão neutra se dissipe e aumente lentamente a tensão axial, deixando sair a água sob pressão. Assim, a pressão neutra durante todo o carregamento é praticamente nula e as tensões totais aplicadas indicam as tensões efetivas que estavam ocorrendo. Tal ensaio é conhecido como ensaio lento, pois, para argilas o carregamento axial requer 20 dias ou mais.

- Ensaio adensado não drenado (CU): Assim como o CD, é aplicado à tensão confinante e deixa-se dissipar a pressão neutra; porém, é aplicada a carga axial sem drenar a amostra. Se as pressões neutras forem medidas é possível determinar as pressões efetivas e determinar a envoltória de resistência em um prazo muito menor que no CD. Por isso, também, é chamado de ensaio rápido pré-adensado.
- Ensaio não adensado não drenado (UU): O corpo de prova é submetido à tensão de confinamento e a carga axial, sem drenagem. O teor de umidade permanece constante tendo a amostra saturada e não há alteração no volume, ou seja, o adensamento. É chamado de ensaio rápido, pois não requer tempo para a drenagem.

Ao se aplicar as pressões confinantes nos corpos de prova de ensaios do tipo CD ou CU, a pressão neutra se estabiliza e aumenta o valor aplicado, já em ensaios do tipo UU, a pressão neutra apresentada tem um valor igual a pressão de confinamento que foi aplicada. (PINTO, 2006).

## 2.9 MELHORAMENTO DE SOLO

Segundo Cristelo (2001), as técnicas de melhoramento de solo são fundamentais à solução de problemas cada vez mais complicados. A respeito dessas técnicas, têm-se os seguintes grupos distintos: melhoramento temporário (sendo limitado ao período de construção); melhoramento permanente sem adição de qualquer material; melhoramento permanente com adição de materiais ao solo natural.

As estabilizações de solo podem ser feitas de duas formas, física ou química, que está relacionada com o uso de aditivos que interagem nas partículas do solo desejando a melhoria das propriedades mecânicas e hidráulicas. Ou, também, pela estabilização mecânica, que pode

ser feita por meio da estabilização granulométrica, que se dá pela melhoria das propriedades de um solo através da mistura com outros materiais, sendo eles solos ou agregados, a fim de obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade. A estabilização mecânica também pode ser feita a partir da compactação do solo com a intenção de aumentar a sua resistência (GASPAR, 2013).

Segundo Cruz (2004), o interesse de um processo de estabilização é aumentar a resistência dos solos. Assim, os agentes estabilizadores podem ser classificados de acordo com os efeitos que produzem. Por isso, são existentes estabilizantes de aglutinação que agem cimentando as partículas de solo. Independente de sua ação, o estabilizante deve possuir as seguintes propriedades para garantir sua viabilidade: ser adequado para uma larga variedade de solos; ter efeito estabilizador permanente; estar disponível em menor valor e em grandes quantidades; não apresentar problemas quanto ao transporte e ao armazenamento; não ser tóxico ou corrosivo.

O cimento, a cal, o betume e o lodo de esgoto calcinado atendem à maior parte dos requerimentos, por isso são os agentes mais utilizados para este processo; o que não exclui outros produtos que estão sendo pesquisados (GASPAR, M. 2013).

## 2.10 CASCAS DE ARROZ

É fato que o arroz é um dos alimentos mais consumidos no Brasil, o país é um dos principais produtores do cereal no mundo. Segundo dados do IBGE, para a safra de 2016 a produção esperada é de mais de 11 milhões de toneladas de arroz em casca. As cascas do arroz que são provenientes da primeira etapa de beneficiamento do mesmo e são cerca de 23% de seu peso, essa casca gera como resíduo uma cinza que tem alto poder de resistência e é útil para a estabilização de solos (DELLA; KUHN; HOTZA, 2001).

A casca do arroz (Figura 9), é uma capa protetora formada durante o crescimento do grão, que tem baixa densidade e elevado volume. É um material que possui muitas fibras e tem como maiores constituintes a celulose, lignina e resíduos inorgânicos. A grande porcentagem de sílica presente no material está nos resíduos inorgânicos, que é encontrada na forma amorfa hidratada (Silva, 2009).

Figura 9: Casca de Arroz.



---

(Fonte: *Arroz Kika*, 2016).

De acordo com o mesmo autor, já existem pesquisas sobre a cinza da casca de arroz há muitos anos. Sobre isso, na Tabela 03 apresentam-se as revisões históricas dos principais trabalhos a respeito deste material.

Tabela 03 – Estrutura Cronológica do Conhecimento sobre CCA

| Ano (s)     | Local     | Autor (es)                 | Trabalho (s)                                                                                                          |
|-------------|-----------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1924        | Alemanha  | BEAGLE                     | Utilização de Casca de Arroz no concreto                                                                              |
| 1940 e 1950 | -         | DIVERSOS                   | Blocos confeccionadas com cimento Portland e cinza e casca de arroz                                                   |
| 1973        | Bélgica   | METHA                      | Primeira Patente no Assunto                                                                                           |
| 1976        | -         | PITT                       | Controle de combustão em leito fluidizado                                                                             |
| 1978        | Índia     | METHA E PIRTZ              | Substituição de Cimento Portland por CCA em concreto massa                                                            |
| 1979        | Índia     | PRAKASH                    | Utilização de CCA em trabalhos de alvenaria e fundações                                                               |
| 1979        | Paquistão | -                          | Primeiro Workshop sobre o assunto                                                                                     |
| 1981        | Ásia      | COOK                       | Estudo da fluência e retração de concretos de cimento Portland com a adição de CCA                                    |
| 1982        | Japão     | -                          | Produção e Emprego de CCA como material cimentício                                                                    |
| 1984        | Israel    | HANA YOUSIF                | Efeito da queima e moagem nas propriedades de argamassa                                                               |
| 1986        | Índia     | JAMES E RAO                | Morfologia e características químicas e físicas da CCA                                                                |
| 1989        | Tailândia | HWANG E WU                 | Hidratação e microestrutura de pastas de cimento produzidas com diferentes CCAs                                       |
| 1994        | EUA       | METHA                      | Patente relativa a produtos altamente duráveis com cinzas, com o emprego de 5 a 30% de CCA substituindo o cimento     |
| 1995        | Brasil    | ISAIA                      | Efeito de misturas binárias e ternárias de Pozolanas em Concreto de Alto desempenho                                   |
| 1999        | Brasil    | GAVA                       | Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da Atividade Pozolânica                                  |
| 2001        | Espanha   | PAYA                       | Determinação da sílica amorfa na CCA por um rápido método analítico                                                   |
| 2003        | Brasil    | PRUDÊNCIO, SANTOS E DAFICO | Revisão sobre CCA, incluindo processos de queima e tratamentos realizados para a obtenção de sílica da casca de arroz |
| 2005        | Brasil    | ISAIA                      | Cinza de casca de Arroz in: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações                                                  |
| 2006        | Brasil    | POUEY                      | Beneficiamento da Cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.         |
| 2008        | Brasil    | METHA E MONTEIRO           | Cinza de casca de arroz in: Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais                                        |

Segundo Pouey (2006), a utilização da casca de arroz possui um amplo alcance e vem sendo estudada por vários autores por ter baixo valor comercial, já que a sílica e as fibras presentes na sua estrutura não possuem valor nutricional, não são utilizadas como alimentação humana ou animal. Por isso, ela é empregada em vários outros setores, como na agropecuária, sendo utilizada como tratamento de solos e como fertilizante e corretivo; na construção civil, sendo associada à argila, podendo ser utilizada na fabricação de tijolos, painéis e telhas com bom isolamento térmico, como, também, em concretos de baixa densidade; na obtenção de sílica com alto grau de pureza; na geração de energia devido ao seu alto poder calorífico.

## 2.11 CINZA DA CASCA DE ARROZ

A geração de energia feita através da queima da casca do arroz é uma alternativa executável do ponto de vista tecnológico, viável do ponto de vista econômico e ético do ponto de vista ecológico. A matéria-prima é abundante na região Sul do país, sendo todo CO<sub>2</sub> produzido na queima volta para o ciclo de carbono da biosfera terrestre. (FOLETTTO, et al., 2005).

O alto teor de sílica amorfa que está presente na cinza da casca de arroz proporciona a este resíduo, quando queimado em temperaturas controladas, várias aplicações na construção civil, sendo utilizada como pozolana agregada aos cimentos, concretos e argamassas, além de ser usado, também, na indústria cerâmica. Assim como qualquer outra cinza existente, a cinza da casca de arroz é depositada ao meio ambiente (Figura 10), causando impacto ambiental e, por conter pó de sílica, a CCA acaba sendo prejudicial à saúde, causando irritação na pele e também doenças respiratórias. (DELLA; HOTZA; JUNKES e OLIVEIRA, 2006).

Depois da queima da casca, sendo ou não controlada a temperatura, a quantidade de cinza gerada é em torno de 20% em massa, tendo teor elevado de sílica no resíduo (GASPAR, 2013). Estudos de Houston (1972) demonstram análises com cinza de casca de arroz em que os teores de sílica variam entre 87% e 97%. Nesse sentido, a cinza da casca do arroz - Figura 11- , é um resíduo agroindustrial decorrente do processo de sua queima, encontrada em grande escala em regiões onde tal cereal é beneficiado. Assim, cerca de 20% da casca de arroz são convertidas em cinzas. O problema é que ainda é um resíduo sem destinação certa, sendo descartado em aterros, gerando graves problemas ambientais (Pouey, 2006).

Figura 10: Aterro de CCA



Fonte: Google, 2016.

Figura 11: Cinza de casca de arroz



Fonte: Google, 2016.

Ainda, dependendo do método utilizado para a obtenção da cinza da casca do arroz, pode-se obter, também, uma sílica altamente reativa, que pode ser obtida no processo de combustão simples e através de tratamentos físico-químicos da casca, seguido de queima e do processo microbiológico (POUEY, 2006).

Desse modo, a utilização da cinza da casca do arroz como adição influencia beneficemente a resistência mecânica e a durabilidade. Alguns destes aspectos são favorecidos pelos efeitos físicos associados com o tamanho das partículas, geralmente mais finas, como as de Cimento Portland e outras pelas reações pozolânicas e cimentíceas (SILVEIRA, 1996).

## 2.12 UTILIZAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Devido às cinzas da casca de arroz, em condições adequadas, deterem características que formam ou auxiliam na formação de compostos que possuem propriedades cimentícias, é possível observar grande interesse acadêmico e econômico no recurso (HABEEB e FAYAADH, 2009).

Sobre isso, Al-Khalaf e Yousif (1984) analisaram que, em geral, quanto maior a porcentagem utilizada de cinza de casca de arroz no cimento, menor é a força compressiva nos estágios iniciais. Contudo, autores alegam que com uma mistura de 1:2 de cimento e areia, com a substituição de 30% do cimento por cinza de casca de arroz, é possível atingir a mesma força quando utilizado somente cimento. Ainda, para substituições acima de 50% de cimento, houve impacto muito grande na força compressiva em estágios iniciais, assim como em 60 dias.

Os autores, ainda, afirmam que quanto maior a adição da cinza, maior inchaço e retração do material. Porém, ressaltam que, apesar do resultado, avaliou-se grande aprimoramento quando comparado o uso de argamassa com mistura cinza-cimento à pasta com mistura cinza-cimento. Segundo eles, o impacto com a adição de cinza de casca de arroz no inchaço e no encolhimento é menor na argamassa.

Habeeb e Fayaad (2009) testaram o efeito de diferentes tempos de moagem das cinzas da casca de arroz (180, 270 e 360 minutos) e, conseqüentemente, de diferentes tamanhos de partículas. Em relação a isso, os autores observaram que inicialmente, em até 28 dias, os valores da força compressiva apresentam aproximadamente o mesmo resultado para partículas de cinza de tamanhos diferentes.

Contudo, cinzas com partículas mais finas conferem ao concreto uma força compressiva significativamente maior após 28 dias se comparadas às cinzas de partículas mais grosseiras. Isso acontece pois as partículas mais finas permitem um aumento na reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , dando mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando em alta força compressiva (ISMAIL e WALIUDDIN, 1996; HABEEB e FAYAAD, 2009).

Os estudos conduzidos por Habeeb e Fayaad (2009) também mostram que a adição da cinza da casca de arroz acarretou em uma elevação da força de flexão, que foi ainda mais evidente na mistura de partículas mais finas. Isso ocorre devido ao aumento das reações pozolânicas e à capacidade de empacotamento das partículas mais finas das cinzas da casca de arroz (ZHANG e MALHOTRA, 1996; HABEEB e FAYAAD, 2009).

Ademais, a adição das cinzas ocasionou em um melhoramento nas propriedades de tensão e poucas alterações em propriedades elásticas. Contudo, o estudo mostrou que as cinzas de partículas menores podem causar uma maior retração no material devido à secagem. Os autores destacam que diferentes estudos mostram resultados divergentes.

Ainda, alguns pesquisadores afirmam que a adição de partículas menores causa uma maior retração (MEHTA e MONTEIRO, 2006; CHANDRA, 1997). Por outro lado, outros autores concluem que os usos de materiais pozolânicos acarretam em uma diminuição da retração (ZHANG e MALHOTRA, 1996; CHINDAPRASIRTA e SIRIVIVATNANON, 2004). Esses resultados contraditórios se devem, provavelmente, ao uso de diferentes interpretações baseadas em conceitos, definições e medidas distintas. Deve-se, também, considerar que tais diferenças podem ser pelas diferentes características e graus de reatividade do material pozolânico utilizado (HABEEB e FAYAAD, 2009).

### 3. CAPÍTULO 3

#### 3.1 METODOLOGIA

##### 3.1.1 Localização e caracterização da amostra

##### 3.1.2 O Solo

O solo utilizado para os ensaios foi retirado do 1º metro do Centro Experimental de Engenharia e Geotecnia – FAG (CEEF), representado na Figura 12. Sendo classificado como uma argila siltosa de cor marrom avermelhada, devido à elevada quantidade de óxido de ferro em sua composição (DAMIN, 2012).

Caracteriza-se, também, por ser um solo residual que provem da decomposição de rochas eruptivas, que, na região é originada do basalto, possui comportamento laterítico. O solo é predominantemente argiloso, mas ainda assim contém porcentagens menores de silte e areia em sua composição. Sua condição é de solo pré-adensamento leve, por ter um baixo valor de peso específico aparente seco (DAMIN, 2012).

Outros ensaios já foram realizados com o mesmo solo para este mesmo objetivo, com a utilização de diferentes resíduos que influenciam na resistência ao cisalhamento.

Figura 12: Centro Experimental de Engenharia e Geotecnia – FAG.



(Fonte: Google Maps, 2016).

#### 3.1.1.1 A Cinza de Casca de Arroz

A cinza da casca de arroz utilizada foi adquirida como doação de uma empresa do estado de Santa Catarina. Para o transporte do material, foi acionada uma agência de fretes que realizou a entrega.

O material doado não foi submetido à queima com temperatura controlada, necessária para se obter um material de melhor qualidade. Isso não foi feito, pois a comercialização das cinzas não é de interesse da empresa que efetuou a doação. Pela falta de controle da queima, a cinza de casca de arroz tem coloração escura; sendo, então, que Santos (2006) sugere que o material possui maior quantidade de carbono e menor quantidade de matéria orgânica carbonizada.

A utilização das cinzas podem ter resultados satisfatórios, pois possuem alto teor de sílica, deixando-a com características pozolânicas quando em reação com o solo em tempo de cura, sem isso se torna apenas uma estabilização mecânica, e, quando reduzidas a pó fino e com presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos cimentantes (BEZERRA, 2010).

Como no caso deste trabalho não houve a espera de um tempo de cura, o material não reagiu com o solo por melhoramento por cimentação, sendo assim, foi feita apenas uma estabilização mecânica da cinza de casca de arroz com o solo estudado.

#### 3.1.1.2 Dosagem e preparação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios foram coletadas amostras deformadas do solo do primeiro metro do Centro experimental. O solo coletado foi separado e colocado em estufa por 24 horas a fim de que sua umidade fique no valor próximo de zero, pois para a moldagem dos corpos de prova o solo terá uma umidade ótima de 31,5%, que foi descoberta através do ensaio de compactação Proctor com cilindro pequeno com energia de compactação normal.

Após retirar o solo da estufa, foi verificada a necessidade de se destorroá-lo, pois a existência de torrões grandes dificultariam a mistura solo-cinza de casca de arroz e também a moldagem dos corpos de prova. Assim, o solo foi destorroadado apenas para a retirada dos torrões maiores, a fim de simular o solo encontrado em obras e facilitar o procedimento prático da pesquisa. As porcentagens de cinza de casca de arroz de 5, 10, 15 e 20% foram feitas em massa, para ser compatibilizada com umidade ótima necessária para a realização do ensaio.

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão triaxial foram feitas a partir do método de compactação dinâmica por pistoeamento, utilizando o equipamento “Harvard miniatura” (Figura 13), como está definido no manual do equipamento para o ensaio.

De acordo com o manual do equipamento, utiliza-se corpos de prova com diâmetro de 2” e altura de 11cm, a compactação deve ser feita em 7 camadas, aplicando 50 golpes com o pisoteador com sapata, sendo feita a compactação de cada camada, deve ser escarificada a camada subjacente para que se tenha o grau de compactação Proctor normal. (CONTENCO, 2015).

Os corpos de prova foram moldados e já ensaiados, sem ocorrer à estabilização do material e cimentação com o solo. Sendo assim, houve apenas uma estabilização mecânica onde, os grãos finos ocupam os espaços vazios da argila estudada, melhorando o contato grão-grão.

Figura 13: Equipamento “Harvard miniatura” + sapata  $\frac{3}{4}$ ” e conjunto molde cilíndrico + cilindro espaçador + base.



(Fonte: Autor, 2016).

Para se obter uma envoltória de resistência satisfatória para cada porcentagem de cinza, se fez necessário a realização de no mínimo três ensaios para cada porcentagem de resíduo; com isso, foram moldados aproximadamente cinco amostras idênticas de cada concentração.

Para moldar os corpos de prova, foram separadas amostras de 1000g de solo seco e retirada a quantidade referente à porcentagem de cinza de casca de arroz, a fim de atingir a

quantidade de 1000g de mistura solo-cinza de casca de arroz (Figura 14), a umidade ótima necessária para a realização dos ensaios é de 31,5% (Volpato, 2015).

Após a homogeneização do solo, os corpos de prova eram moldados, (Figuras 15 e 16) e armazenados em sacos plásticos (Figura 17), a fim de controlar o teor de umidade e evitar o contato com oxigênio que, nas amostras com cinza de casca de arroz, acaba interferindo negativamente na mistura solo-cinza de casca de arroz.

Figura 14: Amostra de solo seco com adição de cinza de casca de arroz.



(Fonte: Autor, 2016).

Figura 16: Extração do corpo de prova.



(Fonte: Autor, 2016).

Figura 17: Corpos de prova armazenado em sacos plásticos.



(Fonte: Autor, 2016).

### 3.1.1.3 Procedimentos de ensaio de compressão triaxial

Foram realizados ensaios de compressão triaxial do tipo consolidado não drenado (CU) para a determinação da resistência ao cisalhamento das amostras, pois, assim, permite-se determinar a envoltória de resistência num prazo menor. (PINTO, 2006).

Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos II do Bloco de Engenharias no Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. Os equipamentos utilizados foram todos os descritos no manual do usuário. Na preparação do corpo de prova, a sequência e ordem da colocação dos materiais no equipamento seguiram o manual. Após o encaixe do corpo de prova na câmara, a mesma foi preenchida com água, a retirada de todo ar foi feita através do extravasor superior; e, em seguida, fez-se o posicionamento da câmara na prensa para ensaio de compressão triaxial (Figura 18).

Figura 18: Corpo de prova pronto para ensaio e câmara de compressão posicionada na prensa triaxial.



(Fonte: Autor, 2016).

Para o ensaio de compressão triaxial a máquina de controle de pressão e a prensa do equipamento devem estar ligadas e conectadas ao laptop com o software, sendo feita a verificação da leitura correta em todos os transdutores, determinando os valores de contrapressão e pressão de confinamento é feita a saturação das mangueiras e a conexão destas nas entradas da câmara de compressão, deixando os registros fechados. A aplicação da pressão confinante inicial foi com um valor de  $0,20 \text{ Kgf/cm}^2$  e a contrapressão de  $0,1 \text{ Kgf/cm}^2$ , abrindo os registros para que a água percole pelo corpo de prova; o aumento das pressões

confinantes e contrapressão foi feito simultaneamente, mantendo uma diferença de  $+0,1\text{Kgf/cm}^2$  da primeira para a segunda, até que se atinja o valor pré-estabelecido para a contrapressão.

Para a realização do ensaio de adensamento, o registro de contrapressão, pressão neutra e de variação de volume devem estar fechados; mas, deve haver uma simultaneidade entre o registro de variação de volume e o início do ensaio. A finalização do ensaio se dá quando a leitura de variação e volume se estabilizar, com isso deve ser fechado o registro de variação de volume e salvar os dados coletados.

A velocidade de ruptura determinada para os ensaios foi de  $0,064\text{mm/min}$ , a qual foi escolhida a partir do fato que carregamentos aplicados rapidamente podem gerar excesso de poropressões, que geram redução da resistência ao cisalhamento (GERSGOVISCH, 2010); sendo assim, todos os ensaios duraram aproximadamente seis horas.

Para a ruptura, deve se verificar o leitor de deslocamento e carga axial, deixando-os zerados, o registro de pressão neutra deve estar aberto e inicia-se o ensaio de compressão triaxial, finalizando quando o corpo de prova deformar 20% da sua altura.

Figura 19: Corpo de prova após ruptura.



(Fonte: Autor, 2016).

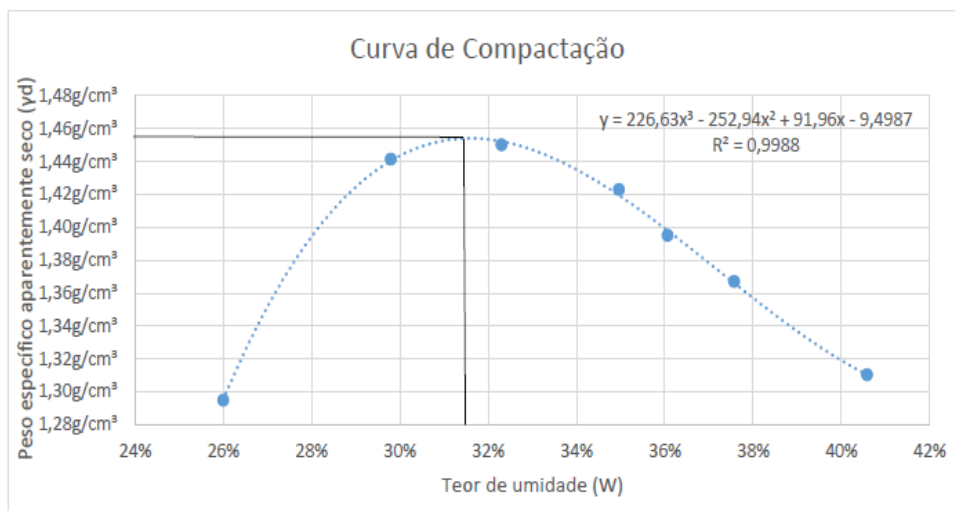
## 4. CAPÍTULO 4

### 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por intermédio das amostras de solo que foram coletadas da superfície do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz foi executado ensaios de compressão triaxial para examinar o comportamento do solo com diferentes dosagens do resíduo de cinza de casca de arroz.

Os dados referentes ao solo natural ensaiados por Volpato (2015), apresentam-se na curva de compactação (Figura 20), gerando os resultados de umidade ótima e de peso específico aparentemente seco, que são respectivamente 31,5% e 1,455g/cm<sup>3</sup>.

Figura 20: Umidade ótima (W).



(Fonte: VOLPATO, 2015).

Encontram-se neste capítulo, as envoltórias de resistência que definem a coesão e ângulo de atrito de cada dosagem escolhida, analisando quais dessas reagiram de maneira positiva com o solo para o aumento de sua resistência, bem como a comparação de resultados com outros materiais que são utilizados para o mesmo fim.

## 4.2 COESÃO, ÂNGULO DE ATRITO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os valores de coesão, ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento das dosagens de cinza de casca de arroz foram realizados, no total, mais de vinte ensaios, sendo três para cada dosagem em média.

Observa-se que houve a necessidade de descartar o restante dos ensaios, visto que os gráficos plotados alcançaram uma configuração distinta da que é apresentada na bibliografia utilizada, alguns ensaios se tornaram inutilizáveis pelo fato de a membrana que envolvia o corpo de prova ter furado.

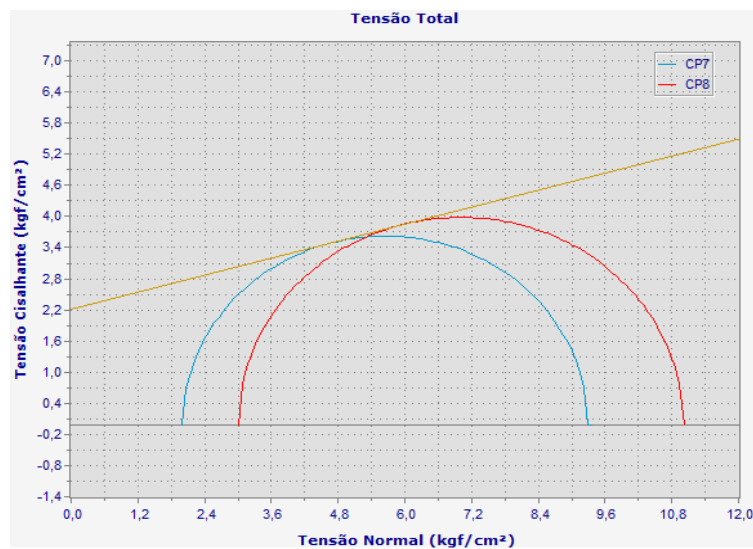
Assim, estão descritos os valores referentes à coesão e ao ângulo de atrito separadamente por dosagem ensaiada. Para a demonstração da resistência ao cisalhamento com melhor visualização dos resultados, todos os ensaios foram executados partindo das mesmas tensões confinantes nas distintas dosagens.

De tal modo, as tensões estão retratadas somente em tensões totais, tendo em vista que no tempo da realização dos ensaios os valores de pressão neutra não foram estabilizados corretamente, gerando incoerência nos valores da tensão efetiva.

### 4.2.1 Parâmetros de coesão e ângulo de atrito das misturas solo-cinza de casca de arroz

Para o solo compactado com a dosagem de 5%, foram utilizados os dados dos corpos de prova com tensões confinantes de 2kgf/cm<sup>2</sup> (círculo azul da Figura 21) e 3kgf/cm<sup>2</sup> (círculo vermelho da Figura 21). O valor da Coesão encontrado foi de 2,24kgf/cm<sup>2</sup> e o ângulo de atrito de 15,32°.

Figura 21: Parâmetros com 5% de cinza de casca de arroz.



(Fonte: Autor, 2016).

Para a dosagem de 10% foram utilizadas as tensões confinantes de 1kgf/cm² (círculo azul da Figura 22), 2kgf/cm² (círculo vermelho da Figura 22) e 3kgf/cm² (círculo amarelo da Figura 22). Os valores de coesão e ângulo de atrito foram, respectivamente, 2,46kgf/cm² e 14,65°.

Figura 22: Parâmetros com 10% de cinza de casca de arroz



(Fonte: Autor, 2016).

Com a mistura solo-cinza de casca de arroz na dosagem de 15%, foi encontrado uma coesão de  $1,33\text{kgf/cm}^2$  e um ângulo de atrito de  $22,10^\circ$ , com as tensões de  $1\text{kgf/cm}^2$  (círculo azul da Figura 23),  $2\text{kgf/cm}^2$  (círculo vermelho da Figura 23) e  $3\text{kgf/cm}^2$  (círculo amarelo da Figura 23).

Figura 23: Parâmetros com 15% de cinza de casca de arroz.



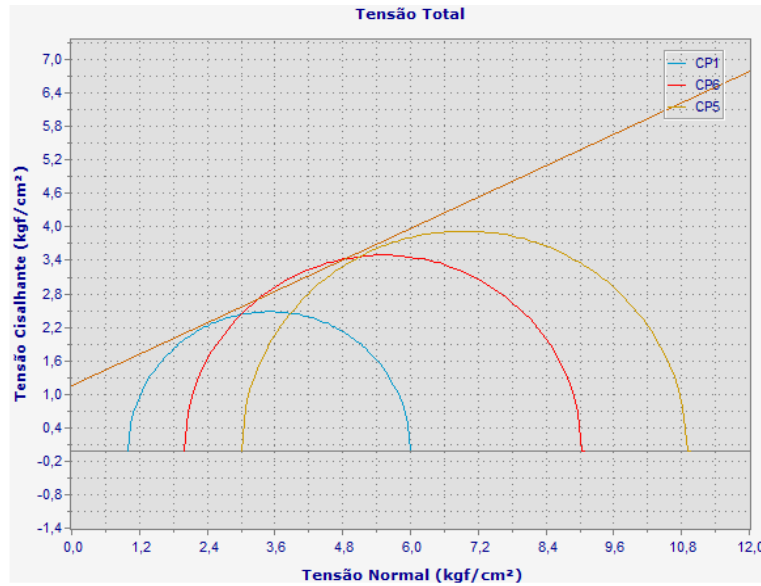
(Fonte: Autor, 2016).

Para a dosagem de 20% os valores de tensões confinantes foram os mesmos para os ensaios anteriores, com os círculos de cores respectivas, gerando um resultando de coesão e ângulo de atrito respectivamente de,  $11,17\text{kgf/cm}^2$  e  $25,17^\circ$  (Figura 24).

De acordo com Gaspar (2013), com o ensaio de floculação realizado para análise da porcentagem ótima necessária para que o solo tenha um aumento considerável na resistência ao cisalhamento, a dosagem que apresentou melhores parâmetros foi de 20%, acima disso percebeu-se que não haveria melhoramento (Anexo 1).

Sabendo disso, os ensaios triaxiais foram feitos em dosagens até 20% de cinza de casca de arroz, o qual, efetivamente, apresentou melhores parâmetros de coesão e ângulo de atrito, gerando um resultado benéfico para essa utilização.

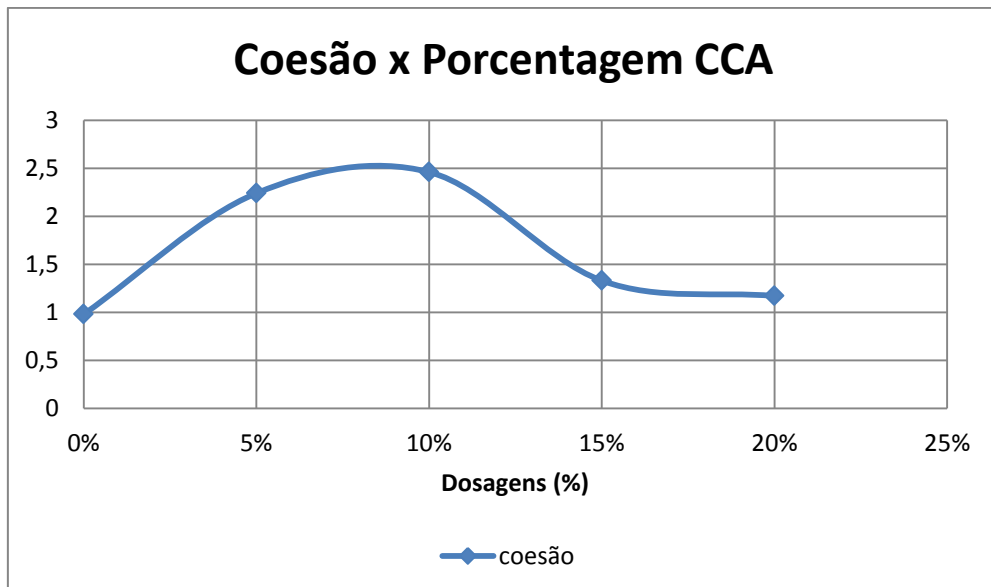
Figura 24: Parâmetros com 20% de cinza de casca de arroz.



(Fonte: Autor, 2016).

Pode-se perceber, pelos resultados apresentados, que a cinza de casca de arroz interferiu positivamente no solo analisado, gerando um acréscimo superior a 50% no valor da coesão da amostra natural para a amostra com 10% de cinza de casca de arroz (Figura 25).

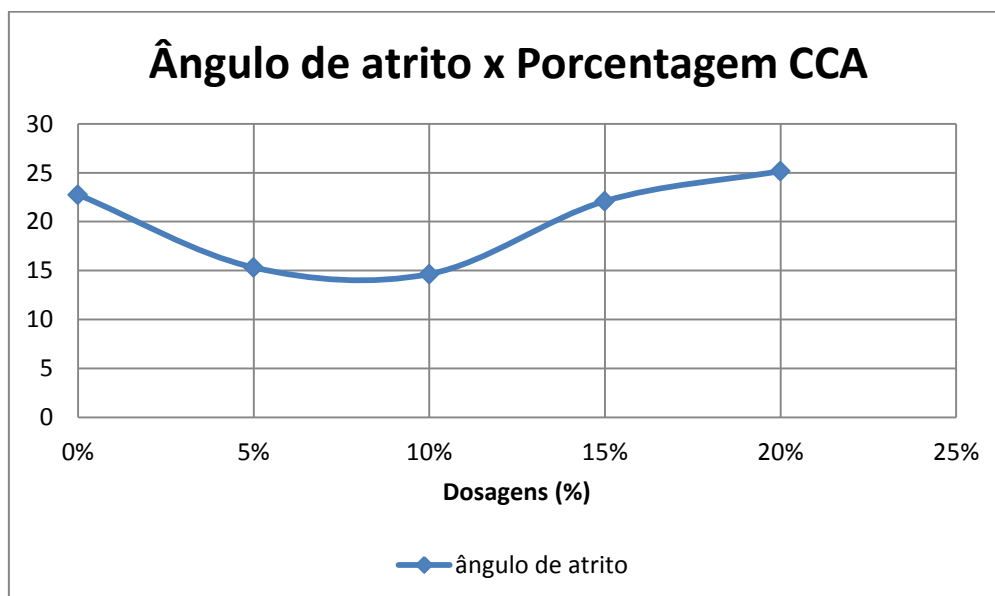
Figura 25: Parâmetros de coesão (Kgf/cm²) x porcentagem de cinza de casca de arroz.



(Fonte: Autor, 2016).

Para os valores de ângulo de atrito entre as partículas vê-se que a amostra de 20% de cinza de casca de arroz obteve o maior valor entre todos os teores ensaiados, aproximadamente 12% maior que a amostra de solo natural (Figura 26).

Figura 26: Atrito entre grãos (°) x porcentagem de cinza de casca de arroz.



(Fonte: Autor, 2016).

Assim, com os resultados de todas as dosagens utilizadas neste trabalho, foi possível obter um comparativo entre o resíduo aplicado no solo natural, e, outros resíduos que são utilizados para o procedimento de melhoramento de solo.

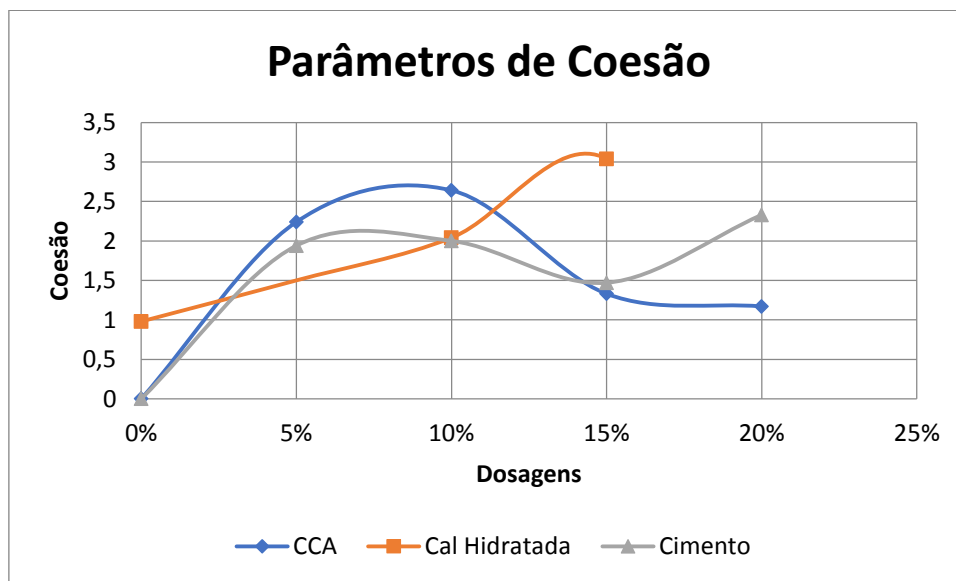
Analisando os resultados da porcentagem de 20% de cinza de casca de arroz com o solo natural, é possível perceber que com os valores de coesão cresceram em aproximadamente 20% (Figura 28) e os valores de ângulo de atrito em de 10% (Figura 29).

Comparando, ainda, os resultados com os parâmetros obtidos do mesmo solo com as mesmas características em seu estado natural, mais a dosagem de 15% de cal hidratada, que de acordo com Volpato (2015), foi à dosagem que apresentou melhores resultados para o mesmo solo, observou-se que houve um decréscimo de aproximadamente 61,5% no valor da coesão (Figura 28) e de 4,6% no valor do ângulo de atrito (Figura 29).

Os resultados de Gomes (2016) mostram que no solo *in natura* o cimento proporciona acréscimo em todos os dados de coesão, ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento, os quais geram um melhoramento evidente no solo de aproximadamente 950% no valor de sua resistência.

Relacionando os valores de coesão e ângulo de atrito da mistura solo-cinza de casca de arroz com a mistura solo-cimento, com o solo retirado do mesmo local com mesmas características, pode-se observar que o decréscimo dos dois valores é bem evidente, sendo que a coesão para o CCA diminui cerca de 50% (Figura 28) e o ângulo de atrito para o mesmo diminui aproximadamente 60% (Figura 29).

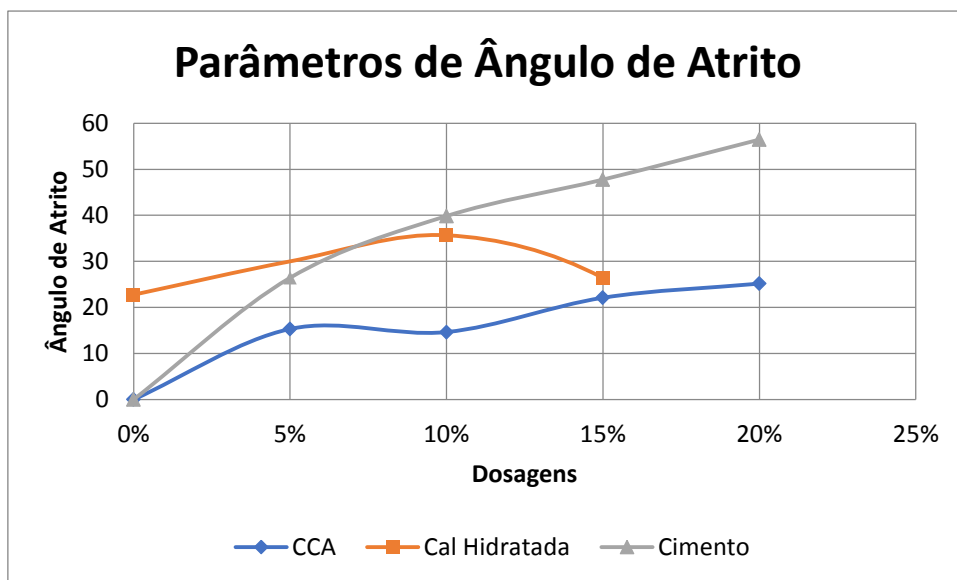
Figura 28: Comparação de parâmetros de Coesão (Kgf/cm<sup>2</sup>).



(Fonte: Autor, 2016).

A comparação entre cinza de casca de arroz e cimento na mistura com o solo é interessante, visto que nas mesmas dosagens o traçado das curvas são parecidos, demonstrando que a cinza de casca de arroz possui em suas estruturas propriedades cimentantes.

Figura 29: Comparação de parâmetros de ângulo de atrito (°).



(Fonte: Autor, 2016).

#### 4.2.2 Resistência ao cisalhamento das misturas solo-cinza de casca de arroz

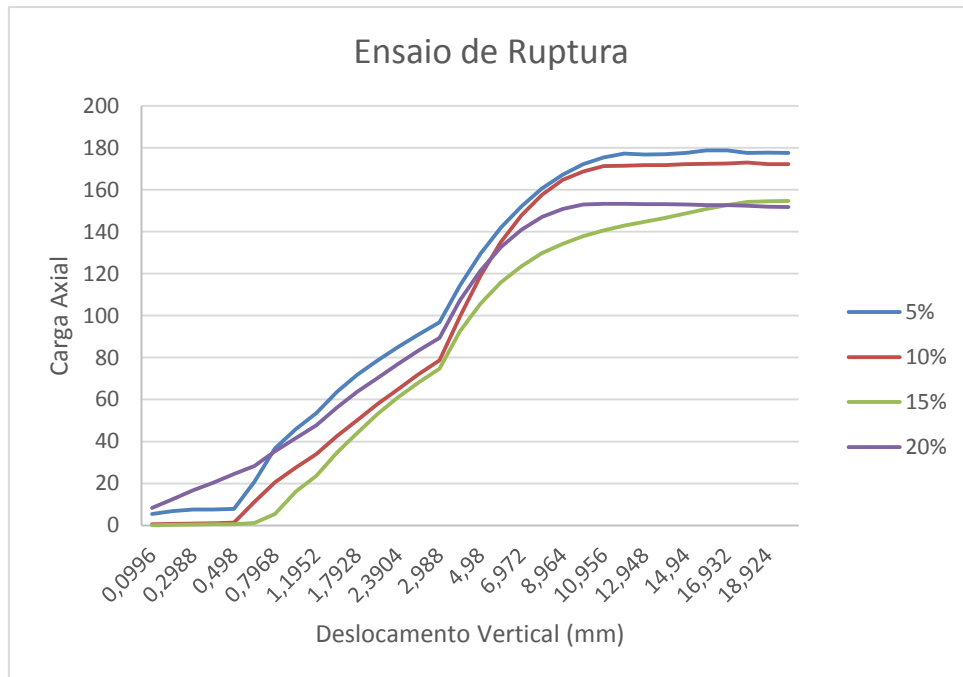
Para uma comparação mais eficiente da resistência ao cisalhamento, só foram utilizados os dados obtidos com os corpos de prova que foram rompidos com a mesma tensão de confinamento de 2kgf/cm<sup>2</sup>.

A amostra que foi dosada com 20% de cinza de casca de arroz não teve a maior tensão de ruptura, que foi de 7,5kgf/cm<sup>2</sup>, mas teve o maior resultado de carga axial, 178,96kgf.

Relacionando as amostras de 20%, na amostra de 5% o acréscimo na tensão de ruptura, que foi quase nulo; para a dosagem de 10% de cinza de casca de arroz não houve aumento nenhum da resistência; já para a amostra de 15% o aumento é levemente perceptível, mas ainda pequeno, num valor de 15%. E como era de se esperar, se comparada com o solo *in natura* o incremento da resistência foi de 100% (Figura 28).

Os resultados com a cinza de casca de arroz, apesar de serem bastante significativos não foram muito expressivos como com a mistura solo-cal hidratada ou a mistura solo-cimento, pois, não ocorreu uma reação pozolânica da cinza de casca de arroz com o solo, já que não foi realizado o tempo de cura de sete dias para que esta acontecesse, sendo assim, teve-se apenas uma estabilização granulométrica, onde os finos da cinza de casca de arroz preencheram os vazios do solo.

Figura 28: Ensaio de Ruptura.



(Fonte: Autor, 2016).

## 5 CAPÍTULO 5

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da cinza de casca de arroz nos parâmetros que constituem a resistência ao cisalhamento do solo argiloso e laterítico proveniente de Cascavel/Pr.

Mesmo com os corpos de prova sendo moldados e já ensaiados sem a espera de um tempo de cura para que ocorresse uma reação cimentante com a mistura solo-cinza de casca de arroz, a estabilização mecânica que a cinza teve com o solo preenchendo seus vazios fez com que a interferência desta na resistência ao cisalhamento do solo estudado foi positiva, sendo que os valores de coesão e ângulo de atrito interno dos grãos aumentaram significativamente.

Praticamente todos os teores de cinza de casca de arroz aumentaram a resistência ao cisalhamento em relação ao solo natural, de 0% para 5% de cinza de casca de arroz no solo houve um acréscimo de 103% na resistência; de 0% para 10% de cinza de casca de arroz o aumento foi de 116%; de 0% para 15% cresceu 80% e de 0% para 20% o aumento na resistência ao cisalhamento foi de aproximadamente 110%.

Entre todas as dosagens ensaiadas a porcentagem de 20% de cinza de casca de arroz obteve um valor aceitável de tensão de ruptura, 7,50kgf/cm<sup>2</sup>, 110% maior que a amostra de solo natural.

Assim, de acordo com Volpato (2015), a dosagem de 15% de cal hidratada gera um aumento da resistência ao cisalhamento de 295% em relação ao solo natural, demonstrando estar aproximadamente 100% acima que a dosagem de 20% de cinza de casca de arroz.

Já, segundo Gomes (2016), com a mistura solo-cimento na dosagem de 20%, comparado ao solo normal, acarreta um aumento na resistência ao cisalhamento de aproximadamente 950%, apresentando ser 655% a mais do que a mistura solo-cal hidratada e também 850% acima da mistura solo-cinza de casca de arroz.

De tal modo, através da pesquisa realizada, pode-se perceber que a cinza de casca de arroz possa ser um material utilizado para acréscimo da resistência ao cisalhamento dos solos, pois comparado ao solo natural, sua resistência gera resultados benéficos. Mas, se comparado com a cal hidratada e com o cimento pode-se perceber que a utilização do CCA diminui os benefícios, a julgar que os materiais de comparação geram parâmetros mais significativos.

## **6 CAPÍTULO 6**

### **6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Realizar ensaios com dosagens intermediárias de cinza de casca de arroz para o mesmo solo analisando o efeito de tempo de cura;

Analisar a capacidade de suporte pelo método CBR com a utilização do resíduo cinza de casca de arroz;

Efetuar estudos de outros resíduos prejudiciais ao meio ambiente que possam ser utilizados para aumento na resistência ao cisalhamento do mesmo solo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: **Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1985.

\_\_\_\_\_. NBR 7182/86: **Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986.

AZEVÊDO, A. L. C.; **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP: Ouro Preto, 2010.

BEZERRA, T. M. I. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. Vol 1, EEC – USP: São Carlos, 1979.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Volume 1, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.: Rio de Janeiro, 1988.

CHANDRA, S. **Waste materials used in concrete manufacturing**. 1. ed. Noyes Publications: New Jersey, USA, , 1997.

CHINDAPRASIRTA, S. H.; SIRIVIVATNANON, V. **Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar**. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 1087-1092, 2004.

CRISTELO, N.; **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2001.

CRUZ, S. L. M.; **Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2004.

DAMIN, E. **Aplicação do modelo CAM-CLAY modificado ao solo de Cascavel-Pr**. Trabalho de Conclusão de Curso da Faculdade Assis Gurgacz, Cascavel, 2012.

DELLA, V. P.; HOTZA, D.; JUNKES, J. A.; OLIVEIRA, A. P. N. *Química Nova*, v.29, p. 1. **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz**. 175-1179, 2006.

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*, 24(6), 778-782. 2001.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Centro nacional de Pesquisa de solos: Rio de Janeiro, 1999.

FREITAS, O. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

FOLETTTO, E. L. *et al.* **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz.** Química Nova, vol. 28, 2005. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v28n6/26837.pdf>>. Acesso em 20 de maio de 2016.

GASPAR, M. D. **Efeito do tempo de cura na resistência ao cisalhamento do compósito solo mais cinza de casca de arroz.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

HABEEB, G. A.; FAYAADH, M. M. **Rice husk ash concrete: the effect of RHA average particle size on mechanical properties and crying shrinkage.** Australian Journal of Basic and Applied Sciences, v.3 (3), p. 1616-1622, 2009.

HOUSTON, D. F. **Rice: Cheminstry and Technology.** American association of Ceveral Cheminstry p. 301-352. 1972.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Estatística da produção agrícola produção de cereais, leguminosas e oleaginosas.** Março 2016. Disponível em <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Fasciculo\\_Indicadores\\_IBGE/estProdAgr\\_201603.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Fasciculo_Indicadores_IBGE/estProdAgr_201603.pdf)>. Acesso em 15 de maio de 2016.

ISMAIL, M. S.; WALIUDDIN, A. M. **Effect of rice husk ash on high strength concrete.** *Construction and Building Materials*, v.10(7), p. 521-526, 1996.

KHALAF, M. N.; YOUSIF, H. A. **Use of rice husk ash in concrete.** *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 6, n. 4, p. 241-248, 1984.

LOBO, A. S.; FERREIRA, C. V.; RENOFIO, A. Muros de arrimo em solos colapsáveis provenientes do arenito Bauro: problemas executivos e influência em edificações vizinhas em áreas urbanas. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, n.2 v.25, p. 169-177, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstucture, Properties, and materials.** 3. ed. McGraw-Hill, 2006.

MILANI, A. P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica.** Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola: Campinas, 2008. Disponível em <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br>>. Acesso em 07 de maio de 2016.

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

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. Oficina de Textos: São Paulo, 2006.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. 320f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2006.

SILVA, E. R. L.; **Compactação do solo**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade São Francisco, Itatiba – São Paulo, 2008. Disponível em <<http://lyceumononline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1191.pdf>>. Acesso em 09 de maio de 2016.

SILVA, J. E. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia UNESP – Campus de Ilha Solteira, 2009.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: Estudo do ataque por sulfatos**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

SIMONS, N. E.; MENZIES, B. K.; **Introdução à engenharia de fundações**. Interciência LTDA: Rio de Janeiro, 1981.

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material**. ACI Materials Journal, v. 93(6), p. 629-636, 1996.

## ANEXOS

### ANEXO 1: Volume de sedimentos normalizados obtidos na Série de Flocculação.

|      | VSN 1    | VSN 2    | VSN 3    | VSN 4    | VSN 5    | VSN 6    | VSN 7    | VSN 8    | VSN 9    | VSN 10   | VSN 11   | VSN 12   |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5    | 1,2372   | 1,2372   | 1,332369 | 1,379954 | 1,427538 | 1,475123 | 1,475123 | 1,522707 | 1,570292 | 1,570292 | 1,570292 | 1,45133  |
| 7,5  | 1,11524  | 1,16171  | 1,254647 | 1,301115 | 1,347584 | 1,347584 | 1,347584 | 1,301115 | 1,394052 | 1,394052 | 1,394052 | 1,301115 |
| 10   | 1,270994 | 1,270994 | 1,316387 | 1,316387 | 1,361779 | 1,407172 | 1,407172 | 1,452565 | 1,452565 | 1,497957 | 1,54335  | 1,452565 |
| 12,5 | 1,419698 | 1,419698 | 1,330967 | 1,375333 | 1,419698 | 1,508429 | 1,508429 | 1,508429 | 1,508429 | 1,552795 | 1,597161 | 1,508429 |
| 15   | 1,215278 | 1,215278 | 1,215278 | 1,215278 | 1,258681 | 1,258681 | 1,258681 | 1,302083 | 1,302083 | 1,302083 | 1,302083 | 1,302083 |
| 17,5 | 1,273885 | 1,273885 | 1,316348 | 1,316348 | 1,316348 | 1,358811 | 1,358811 | 1,4862   | 1,528662 | 1,528662 | 1,528662 | 1,464968 |
| 20   | 1,45469  | 1,45469  | 1,454697 | 1,454697 | 1,454697 | 1,537822 | 1,579385 | 1,579385 | 1,620948 | 1,620948 | 1,66251  | 1,579385 |
| 22,5 | 1,221001 | 1,221001 | 1,221001 | 1,302401 | 1,302401 | 1,383801 | 1,383801 | 1,465201 | 1,465201 | 1,465201 | 1,465201 | 1,383801 |
| 25   | 1,276121 | 1,276121 | 1,276121 | 1,395757 | 1,276121 | 1,276121 | 1,276121 | 1,435636 | 1,515393 | 1,515393 | 1,515393 | 1,515393 |
| 30   | 1,188195 | 1,188195 | 1,226524 | 1,34151  | 1,226524 | 1,264852 | 1,264852 | 1,456497 | 1,571483 | 1,571483 | 1,609812 | 1,456497 |

(Fonte: GASPAR, 2013).