

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
MATEUS DE SOUZA GEREMIA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E INFLUÊNCIA DE
TEMPO DE CURA EM UM SOLO LATERÍTICO COM ADIÇÃO DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ, NA CIDADE DE CASCAVEL – PR**

CASCAVEL – PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

MATEUS DE SOUZA GEREMIA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E INFLUÊNCIA DE
TEMPO DE CURA EM UM SOLO LATERÍTICO COM ADIÇÃO DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ, NA CIDADE DE CASCAVEL – PR**

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

**Professor Orientador: Me. Eng. Maycon
André Almeida**

CASCAVEL – PR

2017

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais Ademir Geremia e Cirene Maria de Souza Geremia, à minha irmã Mariana de Souza Geremia, pelo apoio, confiança e orações, durante toda a minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo da minha vida, me iluminando desde sempre, em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, que lutaram muito para que eu esteja nessa condição hoje, ao corretor do meu trabalho, que é o verdadeiro mestre dos magos, meu pai. Sem meus pais com certeza eu não estaria fazendo esse trabalho hoje, serei eternamente grato.

A esta universidade pelo curso. Agradeço o mestre Maycon André de Almeida, o professor que fez com que eu me interessasse pela geologia na construção civil, e me deu todo o suporte necessário para a realização desse trabalho. Agradeço imensamente pela paciência, dedicação e confiança.

Agradeço aos meus amigos que foram fundamentais na minha formação, sempre me ajudaram desde o começo da faculdade até este trabalho, um muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a adição de cinza de casca de arroz em amostras de solo laterítico, na região de Cascavel, oeste do Paraná. A adição desse resíduo tende a melhorar a resistência ao cisalhamento a partir da ampliação dos valores de coesão e ângulo de atrito entre as partículas. O objetivo deste trabalho é comparar os resultados obtidos com esse aditivo, pouco usado, com os resultados de outros trabalhos já feitos no mesmo solo os quais utilizaram aditivos mais comuns. Para tal, serão feitos ensaios triaxiais de corpos de prova compactados, com teor de umidade ótimo, e adição de cinzas de casca de arroz em diferentes proporções, em um tempo de cura de sete dias. Espera-se que, com esses ensaios, a resistência ao cisalhamento do solo aumente cerca de 90% e a cinza de casca de arroz seja um novo aditivo na construção civil, um aditivo de baixo custo, servindo ainda como material reciclável altamente lucrativo.

Palavras chave: Aumento da resistência ao cisalhamento; estabilização de solos; cinza de casca de arroz.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação dos critérios de ruptura: (a) de Coulomb, e (b) de Mohr.....	17
Figura 2: Deslizamento de um corpo em um plano.....	18
Figura 3: Capilaridade gerando atração entre as partículas.....	19
Figura 4: Esquema de aplicação de forças do ensaio de cisalhamento.....	20
Figura 5: Esquema do ensaio de compressão axial.	22
Figura 6: Cinza de casca de arroz	28
Figura 7 – Centro Experimental de Engenharia - FAG.....	30
Figura 8 – Curvas granulométricas médias sem a utilização de defloculante do 1º ao 3º metro.....	31
Figura 9 – Pisoteador usado para a compactação	33
Figura 10: Macaco hidráulico fazendo a elevação do corpo de prova.....	34
Figura 11 – Corpo de prova preparado para entrar na câmara	36
Figura 12 - Curva de compactação para Proctor Normal.....	39
Figura 13 - Envoltória de Mohr-Coulomb (solo in natura).....	40
Figura 14: Parâmetros com 05% de cinza de casca de arroz.....	41
Figura 15: Parâmetros com 10% de cinza de casca de arroz.....	42
Figura 16: Parâmetros com 15% de cinza de casca de arroz.	43
Figura 17: Parâmetros com 20% de cinza de casca de arroz.	44
Figura 18: Ângulo de atrito em relação a diferentes dosagens de cinza de casca de arroz	45
Figura 19: Coesão em relação a diferentes dosagens de cinza de casca de arroz	46
Figura 20: Ângulo de atrito em relação a diferentes amostras de cinza de casca de arroz	47
Figura 21: Coesão em relação a diferentes amostras de cinza de casca de arroz.....	48
Figura 22: Ângulo de atrito entre amostras de areia e cinza de casca de arroz.....	49
Figura 23: Ângulo de atrito entre amostras de cal e cinza de casca de arroz.....	50
Figura 24: Ângulo de atrito entre amostras de cimento e cinza de casca de arroz.....	51
Figura 25: Ângulo de atrito entre amostras de cimento, cinzas de casca de arroz, areias e cal.....	53
Figura 26: Coesão entre amostras de cimento, cinzas de casca de arroz, areias e cal.....	54

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

τ – Resistência ao cisalhamento

c – Coesão

σ – Tensão normal

ϕ – Ângulo de atrito

w – Teor de umidade.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Energias de compactação ensaio de Proctor.....	14
Tabela 2: Dosagem das amostras	38
Tabela 3: Tabela 3: Dosagem dos CP's.	56

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	13
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	13
CAPITULO 2	14
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.2 SOLO	14
2.2.1 Classificações do solo	14
2.2.2 Solos lateríticos	15
2.2.3 Solos colapsíveis	16
2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	16
2.3.1 Atrito	17
2.3.2 Coesão	18
2.4 ENSAIOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	19
2.4.1 Ensaio de cisalhamento direto	20
2.4.2 Ensaio de compressão triaxial	21
2.4.2.1 Tipos de ensaio de compressão triaxial	22
2.5 ADENSAMENTO	23
2.6 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR	24
2.7 MELHORAMENTO DE SOLOS	26
2.8 CINZA DE CASCA DE ARROZ	26
2.8.1 Breve histórico do uso da cinza de casca de arroz na engenharia civil	26
2.8.2 A casca de arroz	27
2.8.3 Cinza de casca de arroz (CCA)	28
2.8.4 Impactos da cinza de casca de arroz no meio ambiente	28

CAPÍTULO 3	30
3.1 METODOLOGIA.....	30
3.1.1 Localização e caracterização do solo.....	30
3.1.2 Cinza de casca de arroz (CCA).....	31
3.1.3 Dosagem e preparação dos corpos de prova.....	32
3.1.4 Ensaio de compressão triaxial	34
CAPÍTULO 4	38
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.2 COESÃO, ÂNGULO DE ATRITO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	40
4.2.1 Parâmetros de coesão e ângulo de atrito das misturas solo-cinza de casca de arroz	41
4.2.1.1 Dosagem de 5%	41
4.2.1.2 Dosagem de 10%	42
4.2.1.3 Dosagem de 15%	43
4.2.1.4 Dosagem de 20%	44
4.3 COMPARAÇÕES	45
4.3.1 Comparação entre as diferentes dosagens de cinza de casca de arroz.....	45
4.3.2 Comparação entre amostras de cinzas com diferentes tempos de cura	46
4.3.3 Comparação entre amostras de cinza de casca de arroz e areias (fina e média).....	48
4.3.4 Comparação entre amostras de cinza de casca de arroz e cal.....	49
4.3.5 Comparação entre amostras de cinza de casca de arroz e cimento	49
4.3.6 Análise entre todas as amostras	50
CAPÍTULO 5	53
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
CAPÍTULO 6	54
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
REFERÊNCIAS	55
ANEXOS	58

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Os solos são vistos, aos olhos da engenharia civil, como materiais de construção e de sustentação das obras. Para tanto, os mesmos devem conter certas propriedades, para que sejam capazes de apresentar estabilidade e resistência mecânica aos esforços e cargas a que serão submetidos (AZEREDO, 1988).

Quando o solo não apresenta as propriedades exigidas, a opção mais comum a ser usada, na engenharia civil, é a estabilização química ou mecânica desse solo. A estabilização dos solos que usam técnicas que empregam meios mecânicos, como a correção da granulometria e plasticidade, é realizada com adição e subtração de quantidades definidas de suas frações constituintes, até que se obtenham os parâmetros estabelecidos por norma (VARGAS, 1977). Para este fim, usa-se, normalmente, a adição de frações de areia e material britado.

Para técnicas que empregam meios químicos, utilizam-se aditivos como, por exemplo, materiais betuminosos e resinas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, cal, cimento Portland, cinza de casca de arroz, entre outros.

É importante que se leve em consideração, a questão da sustentabilidade, reutilizando os resíduos descartados em grande escala no meio ambiente. A reutilização de resíduos é feita como melhoramento de outros materiais e, além de reduzir custos, reduz impactos ao meio ambiente.

Sabe-se que grandes indústrias geram enormes quantidades de resíduos os quais serão descartados, mas podem passar por um processo de reciclagem. Isso se enquadra em indústrias de beneficiamento de arroz, as quais descartam toneladas de cascas que serão queimadas em altas temperaturas, transformando-as em cinzas.

Nesse sentido, a cinza de casca de arroz é um resíduo natural que possui, em sua estrutura, o pó de sílica que é muito prejudicial à saúde. Portanto, não deve ser descartado incorretamente, pois pode ser adicionado a concretos, cimentos e argamassas. Vale lembrar que o mesmo não é largamente utilizado por ter coloração muito escura, o que dificulta a utilização em estruturas de concreto aparente (POUEY, 2006).

Sendo assim, utilizar esse recurso para reforçar o solo, seria uma opção para o descarte correto do resíduo, 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 o comportamento da resistência ao cisalhamento de uma amostra de solo laterítico da região de Cascavel – PR – com a adição da cinza de casca de arroz às amostras, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%, em um tempo de cura de 7 dias.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar as análises e amostras de solo, com diferentes dosagens da cinza de casca de arroz, nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20%, em um tempo de cura de 7 dias, determinando a influência do tempo de cura;
- comparar os resultados obtidos com o ensaio triaxial com os resultados obtidos em outras pesquisas realizadas no mesmo solo por meio de diferentes aditivos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os solos são vistos, na engenharia, como materiais de construção e de sustentação das obras. Cada vez mais, são estudadas formas de aperfeiçoar o solo para obter melhores características e propriedades, maior resistência ao cisalhamento. Tudo isso, da forma mais econômica possível (CAPUTO, 1987).

Normalmente, para o melhoramento do solo em locais onde ele não suporta grandes cargas, usam-se a cal hidratada e o cimento, aditivos que podem aumentar, significativamente, a resistência.

O uso da cinza de casca de arroz, além de ser uma opção para a sustentabilidade, pode agregar-se às obras de construção civil. Assim, com o intuito de utilizar recursos naturais

abundantes e que tenham características apropriadas para a sua utilização, a cinza da casca de arroz, com seus componentes pozolânicos, pode proporcionar bons resultados.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Que mudanças são encontradas, em amostras de solo argiloso e laterítico, em relação à resistência ao cisalhamento, quando se adiciona cinza de casca de arroz às mesmas?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Quando a cinza de casca de arroz é adicionada às amostras, tem-se a expectativa de que a mesma interfira na resistência ao cisalhamento de forma positiva, aumentando-a consideravelmente.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será delimitada pela determinação da resistência ao cisalhamento de cerca de 20 amostras de solo, que serão moldadas a partir de amostras deformadas coletadas do primeiro metro de solo, no Campo Experimental de Engenharia da FAG, localizada na Avenida das Torres, 500, na cidade de Cascavel, Paraná.

O levantamento contará com testes laboratoriais, porém a pesquisa restringir-se-á a amostras de solo do primeiro metro, pois, grande parte das fundações se faz presente unicamente nessa região do solo.

CAPITULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2 SOLO

A palavra solo origina-se do latim: “*solum*”, e pode ter muitas definições, de acordo com a área em que é aplicada. A engenharia estabelece que solo seja todo material da crosta terrestre escavável por meio de pá, picareta, escavadeira, etc., sem a utilização de explosivos (VARGAS, 1977).

Os solos são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. Normalmente, esses processos atuam simultaneamente, em determinados locais e condições climáticas, podendo um deles predominar sobre o outro (CAPUTO, 1987).

2.2.1 Classificações do solo

Os solos podem ser classificados de duas maneiras: conforme a sua granulometria ou a sua origem. Segundo Caputo (1988), de acordo com sua origem, os solos podem ser classificados em residuais, sedimentares e de formação orgânica.

- Solos residuais (ou autóctones): são os que permanecem no local da rocha de origem, observando-se uma gradual transição do solo até a rocha. Destacam-se os solos lateríticos, os expansivos e os porosos.
- Solos sedimentares (ou alotóctones): são os que sofrem a ação de agentes transportadores, podendo ser aluvionares (transporte pela água), eólicos (transporte pelo vento), coluvionares (pela ação da gravidade) e glaciares (pelas geleiras).
- Solos de formação orgânica: são os de origem essencialmente orgânica, seja de natureza vegetal (plantas, raízes), seja animal (conchas).

De acordo com a classificação granulométrica (BUENO; VILAR, 1979), tem-se quatro grupos de solo. São eles:

- 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: apresentam diâmetros variantes entre 4 mm e 0,05 mm. A classe das areias pode ser subdivida em três categorias: finas, médias ou grossas. Têm origem semelhante aos pedregulhos.
- Siltes: são solos com granulometria fina, com diâmetros que variam de 0,05mm e 0,005mm.
- Argilas: são classificadas como um solo muito fino, pois suas partículas possuem diâmetros inferiores a 0,002mm.

2.2.2 Solos lateríticos

O solo laterítico está presente na maior parte do território brasileiro, somando cerca de 65% de abrangência. Está muito presente no Paraná. Esse tipo de solo é característico de regiões tropicais úmidas que sofreram intemperismo (principalmente chuvas abundantes), processo este denominado de laterização (NOGAMI, VILLIBOR, 1995).

Os solos lateríticos apresentam a caulinita como argilo-mineral predominante e, também, grande quantidade de alumínio e óxido de ferro, que é responsável por dar a esse tipo de solo a sua coloração característica, marrom-avermelhada (NOGAMI, VILLIBOR, 1995).

Os solos lateríticos têm, como características físicas, a elevada porosidade, baixa resistência e baixa capacidade de suporte em seu estado natural. Porém, quando devidamente compactados, apresentam elevada resistência, grande capacidade de suporte, baixa permeabilidade e pequena perda na capacidade de suporte, quando saturados (NOGAMI, VILLIBOR, 1995).

2.2.3 Solos colapsíveis

Os solos colapsíveis podem ser definidos como solos que apresentam uma elevada e repentina mudança de comportamento quando saturados. Quando o teor de umidade aumenta, os agentes cimentantes do solo são enfraquecidos, reduzindo a resistência ao cisalhamento e causando a redução do volume do solo, quando sob tensão (LOBO, FERREIRA, RENOFIO, 2003).

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 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 vista que é este o fator que limita a carga máxima a ser aplicada no solo.

O valor de resistência ao cisalhamento de um solo é dado pela máxima tensão cisalhante que pode ser aplicada à estrutura do solo (SIMONS; MENZIES, 1981).

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

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

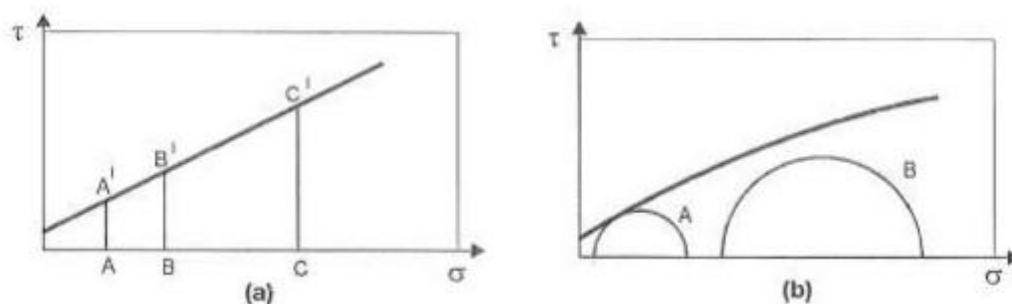
Em que:

τ = resistência de cisalhamento c = coesão σ = tensão normal ϕ = 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 1.

Figura 1: Representação dos critérios de ruptura: (a) de Coulomb, e (b) de Mohr.



(Fonte: PINTO, 2006).

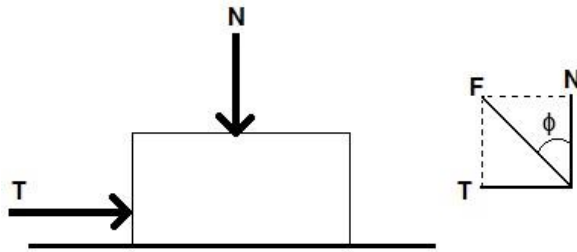
Se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão $c + t \cdot \sigma$, sendo c e t constantes do material e σ a tensão normal existente no plano de cisalhamento, não haverá a ruptura do elemento, explica Coulomb. Os parâmetros c e ϕ são denominados, respectivamente, coesão e coeficiente 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).

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).

2.3.1 Atrito

A resistência por atrito das partículas de um solo pode ser analisada de forma análoga ao deslizamento de um corpo sobre uma superfície plana horizontal, como mostrado na Figura 2, em que N é a força vertical aplicada (força normal) e T (força tangencial), a força aplicada para que haja o deslocamento do corpo, que deve ser superior à força $N \times f$, sendo f o coeficiente de atrito entre os materiais. Essa relação pode ser escrita de acordo com a Equação 2 (PINTO, 2006).

Figura 2: Deslizamento de um corpo em um plano



(Fonte: PINTO, 2006).

$$T = N \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (2)$$

Sendo ϕ o ângulo de atrito, que é formado pela resultante das duas forças com a força normal. O ângulo de atrito interno é formado pela resultante das forças sigma (σ) e cisalhante (τ), e é também o ângulo máximo (ϕ) que pode ser formado entre a força cisalhante e a força normal sem que ocorra o deslizamento (PINTO, 2006).

Já no caso dos solos, Terzaghi constatou que o contato real entre partículas se dá apenas por uma superfície aparente de contato. Logo, o atrito ocorre somente nas protuberâncias mais salientes, gerando nelas um alto valor de tensão que tende a plastificar o material nessas áreas. Assim, quando o solo é carregado, a área plastificada aumenta proporcionalmente ao carregamento, gerando maior resistência por atrito (MACHADO; MACHADO, 1997).

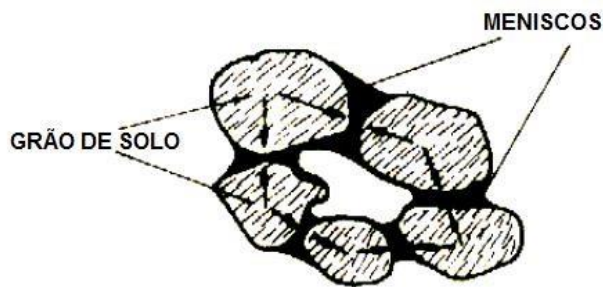
2.3.2 Coesão

Quanto maior o atrito entre as partículas, maior a resistência ao cisalhamento dos solos; 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).

A coesão de um solo pode ser real ou aparente, como detalhadas a seguir.

- Coesão real: provém dos efeitos cimentantes (óxidos e argilas silicatadas) e, também, da atração eletrostática entre as partículas (SILVA; CARVALHO, 2007).
- Coesão aparente: provém da tensão superficial da água que se encontra em tubos capilares dentro do solo (zonas saturadas acima do lençol freático), formando meniscos, que geram uma aproximação das partículas (Figura 3), elevando a resistência do solo. Porém, essa coesão desaparece quando o solo é completamente saturado (SILVA; CARVALHO, 2007). A coesão aparente é facilmente observada na estabilização de taludes de areia úmida e na construção de castelos com areia úmida nas praias (BUENO; VILAR, 1979).

Figura 3: Capilaridade gerando atração entre as partículas



(Fonte: BUENO; VILAR, 1979).

Vários agentes, como carbonatos, sílica e óxidos de ferro podem aumentar a coesão de um solo, gerando uma cimentação entre as partículas (MACHADO; MACHADO, 1997).

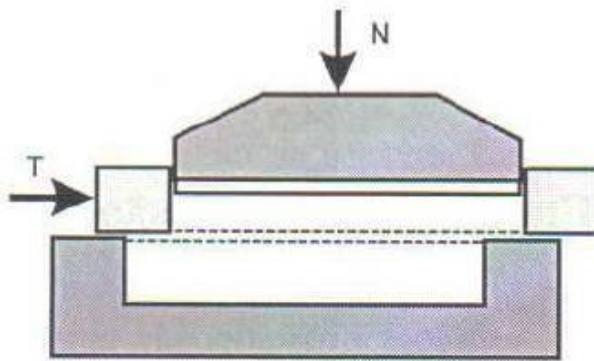
2.4 ENSAIOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Para se determinar a resistência ao cisalhamento de um solo, é necessário conhecer os fatores de coesão e o ângulo de atrito entre as partículas. Os ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial são os que geram resultados mais próximos parâmetros reais.

2.4.1 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é o mais rudimentar processo para a determinação da resistência ao cisalhamento dos solos. Consiste em duas placas que formam uma caixa de cisalhamento, onde será depositada a amostra. Inicialmente, é aplicada uma força vertical (N) e, em seguida, uma tangencial (T) no anel superior da caixa, que contém metade do corpo de prova, gerando seu deslocamento, como mostrado na Figura 4 (CAPUTO, 1998).

Figura 4: Esquema de aplicação de forças do ensaio de cisalhamento direto



(Fonte: PINTO, 2006).

As forças N e T – divididas pela área da seção transversal do corpo de prova – indicam as tensões que nele estão atuando.

O ensaio de cisalhamento direto pode ser realizado em três modalidades (PINTO, 2006):

- Ensaio rápido (Q ou UU): nessa modalidade, a força tangencial (T) é aplicada imediatamente após a força vertical (N).
- Ensaio adensado rápido (R ou CU): nesse caso, a força tangencial (T) só é aplicada após todas as deformações do corpo de prova, provenientes da força vertical (N), estarem estabilizadas.
- Ensaio lento (S ou CD): para o ensaio lento, é necessário que a força vertical (N) provoque o total adensamento da amostra, para, então, ser aplicada a força tangencial (T).

Devido à sua simplicidade, o ensaio de cisalhamento direto é muito útil para determinação da resistência do solo, porém ele não permite determinar parâmetros de

deformabilidade do solo e, devido à dificuldade no controle de drenagem, ele também não disponibiliza os valores de tensão neutra, deixando-o em desvantagem em relação ao ensaio de compressão triaxial (PINTO, 2006).

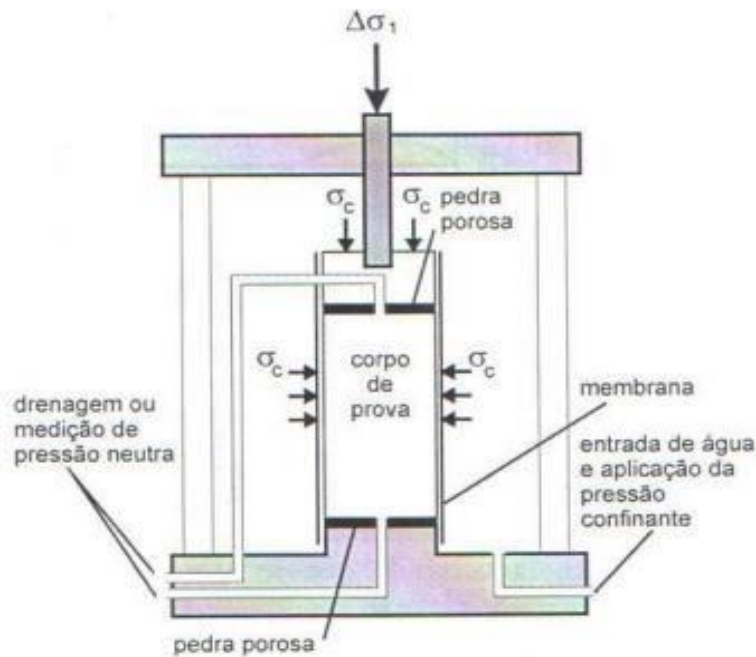
2.4.2 Ensaio de compressão triaxial

O ensaio de compressão triaxial é o mais utilizado atualmente. Devido à sua aparelhagem mais refinada, ele permite a impermeabilidade total da amostra, o controle absoluto de drenagem e, também, a coleta dos valores de pressão neutra (PINTO, 2006; SIMONS e MENZIES, 1981).

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 determinado solo. O ensaio mede o desvio das tensões principais, proporcionando a medida da resistência ao cisalhamento do solo e determinando a resistência não drenada, obtendo um círculo de Mohr, que relaciona valores de tensões axiais e confinantes, gerando círculos. Ao se colocarem os círculos, um sobrepondo o outro, se tem uma curva tangente, (PINTO, 2006; SIMONS e MENZIES, 1981).

O corpo de prova é colocado dentro de uma câmara de ensaio, como apresentado na Figura 5, e envolto por uma membrana de látex. A câmara é preenchida com água, à 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 5: 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.

2.4.2.1 Tipos de ensaio de compressão triaxial

O ensaio de compressão triaxial pode ser realizado em três modalidades que se diferenciam em relação às condições de drenagem e adensamento (consolidação) (PINTO, 2006).

- Ensaio lento, CD (com consolidação e com drenagem): nesse ensaio, é necessário que o corpo de prova fique completamente adensado, realizando dissipação total da tensão neutra, para, então, ser aplicado o carregamento axial. No ensaio CD, as tensões totais aplicadas indicam valores de tensão efetiva, já que a pressão neutra é praticamente nula. O ensaio é denominado de lento, devido ao tempo necessário para a dissipação da pressão neutra, que, em argilas, pode demorar mais de 20 dias.

- Ensaio adensado rápido, CU (com consolidação e sem drenagem): nesse ensaio, o corpo de prova é parcialmente adensado pelas tensões hidrostáticas; em seguida, as válvulas que permitem a saída de água são fechadas, para que não se perca a condição pré-estabelecida; posteriormente, é feita a aplicação do carregamento axial, rompendo a amostra. No ensaio CU, é possível fazer a medição da tensão neutra durante o processo. Logo, esse tipo de ensaio pode determinar tanto os parâmetros de tensão total quanto os de tensão efetiva.
- Ensaio rápido, UU (sem consolidação e sem drenagem): no ensaio rápido, não ocorre o adensamento da amostra. O carregamento axial é aplicado imediatamente após a aplicação das tensões hidrostáticas, rompendo o corpo de prova. No ensaio UU, a tensão neutra não é determinada; portanto, os resultados se dão em termos de tensões totais.

2.5 ADENSAMENTO

Entende-se por adensamento a redução do volume de vazios presentes em uma parcela de solo, devido às forças confinantes laterais que, por consequência, levam a uma redução do seu volume total. Essas forças confinantes pressionam o solo, de forma que as partículas sólidas que o compõem fiquem mais próximas uma das outras, expulsando, assim, as partículas líquidas e gasosas. Portanto, em um solo completamente saturado, o adensamento se dá pela expulsão da água.

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.

De acordo com Pinto (2006), o desenvolvimento da teoria do Adensamento baseia-se e algumas hipóteses, quais sejam:

- a) Que o solo esteja completamente saturado ($S_r = 100\%$);
- b) a compressão e o fluxo de água é unidimensional;
- c) o solo deverá ser homogêneo;
- d) as partículas sólidas e a água são incompressíveis perante a compressibilidade do solo;
- e) as propriedades do solo não variam no processo de adensamento;

f) os índices de vazios variam linearmente com o aumento de tensão efetiva durante o processo de adensamento;

2.6 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Para determinação do teor de umidade ótimo ($\omega_{\text{ótimo}}$) e peso específico aparentemente seco (γ_d) do solo, é necessária a realização do ensaio de compactação Proctor.

O tamanho do cilindro e a energia de compactação devem ser escolhidos pelo executor do ensaio (Tabela 1), sendo que o cilindro pequeno só pode ser utilizado se todo o solo da amostra passar integralmente pela peneira de 4,8mm.

Tabela 1: Energias de compactação ensaio de Proctor.

TABELA – Energias de Compactação				
Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	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).

O procedimento do ensaio está descrito a seguir, conforme a NBR 7182/86, e se resume em:

- Fixar o molde cilíndrico à sua base, acoplar o cilindro complementar e apoiar o conjunto em uma base rígida.
- Tomar a amostra preparada para ensaios com reúso de material, de acordo com a NBR 6457.

- Na bandeja metálica, com auxílio da proveta de vidro, adicionar água destilada gradativamente, revolvendo continuamente o material, de forma a se obter o teor de umidade em torno de 5% abaixo da umidade ótima presumível.
- Após completa homogeneização do material, proceder à sua compactação, atendo-se ao soquete, número de camadas e número de golpes por camada correspondentes à energia desejada. As alturas das camadas compactadas devem resultar aproximadamente iguais. A compactação de cada camada deve ser precedida de uma ligeira escarificação da camada subjacente.
- Após a compactação da última camada, retirar o cilindro complementar, depois de escarificar o material em contato com a parede do mesmo, com auxílio de uma espátula. Deve haver um excesso de, no máximo, 10mm de solo compactado acima do molde que deve ser removido e rasado com auxílio régua biselada. Feito isso, remover o molde cilíndrico de sua base e, no caso de cilindro pequeno, rasar também a outra face.
- Pesar o conjunto, com resolução de 1g e, por subtração de peso do molde cilíndrico, obter o peso úmido do solo compactado, Ph.
- Com auxílio do extrator, retirar o corpo-de-prova do molde do centro do mesmo, tomar uma amostra para determinação da umidade, h, de acordo com a NBR 6457.
- Destorroar o material, com auxílio da desempenadeira e da espátula, até que passe integralmente na peneira 4,8mm ou na 19mm, respectivamente, conforme a amostra, após preparada, tenha ou não passado integralmente na peneira de 4,8mm.
- Juntar o material assim obtido com o remanescente na bandeja e adicionar água destilada, revolvendo o material, de forma a incrementar o teor de umidade de aproximadamente 2%.
- Repetir as operações descritas em 1 e de 4 em diante, até se obter cinco pontos, sendo dois no ramo seco, um próximo à umidade ótima, preferencialmente do ramo seco e dois no ramo úmido da curva de compactação.

2.7 MELHORAMENTO DE SOLOS

As técnicas de melhoramento de solo são cada vez mais usadas na mecânica dos solos. A respeito dessas técnicas, tem-se os seguintes grupos distintos: melhoramento temporário (sendo limitado ao período de construção), melhoramento permanente sem adição de qualquer material e melhoramento permanente com adição de materiais ao solo natural (CRISTELO, 2001).

O melhoramento pode ser feito de duas formas, físico ou químico. O melhoramento químico está relacionado com o uso de aditivos que interagem nas partículas do solo, desejando melhoria das propriedades mecânicas e hidráulicas. 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, 2013).

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 melhoramento de solo também pode ser feito pela estabilização mecânica, e pode existir 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).

2.8 CINZA DE CASCA DE ARROZ

2.8.1 Breve histórico do uso da cinza de casca de arroz na engenharia civil

O uso da cinza de casca de arroz, como método de estabilização de solo, é pouco divulgado. Rahman (1986) relatou a utilização de misturas de cimento e CCA, na Índia, para a fabricação de tijolos isoladores que resistiram a temperaturas muito altas, sendo apropriado para uso em fornos.

Lazaro e Moh (1970) pesquisaram misturas de CCA e cal como estabilizadores de solos sedimentares, concluindo que podem ser obtidas consideráveis melhorias na resistência ao cisalhamento em solos argilosos.

A partir dos anos 80 e 90, mais pesquisas foram desenvolvidas com relação à estabilização de solo com o uso da CCA. Rahman (1986) estabilizou solos lateríticos na Nigéria, recomendando um teor de 18% de CCA para materiais a serem utilizados como camadas de sub-base.

Pesquisas mais recentes, desenvolvidas por Muntohar e Hantoro (2000) e por Basha (2005), avaliaram o comportamento de solos silto-argilosos da Indonésia quando estabilizados com CCA. Concluíram que a CCA pode estabilizar solos residuais, tanto isolada quanto misturada com o cimento.

2.8.2 A casca de arroz

O arroz é um alimento fundamental na mesa dos brasileiros. É fato que o país é um dos maiores produtores de arroz do mundo. Segundo dados do IBGE, para a safra de 2016, a produção esperada era de mais de 11 milhões de toneladas de arroz em casca.

Muitas plantas, durante seu crescimento, absorvem sílica do solo e a acumulam dentro de suas estruturas. Uma dessas plantas é a planta do arroz (Boateng e Skeete, 1990). Boa parte da sílica encontra-se na casca do arroz, conformando uma estrutura muito resistente às condições do meio ambiente, capaz de proteger ao próprio grão de arroz.

A casca de arroz é tipicamente composta de celulose (40-45%), lignina (25-30%), cinza (15-20%) e água (8-15%). A cinza é derivada principalmente da opalina, da qual cerca de 90% é sílica.

Devido ao seu caráter abrasivo e à presença desprezível de proteínas digestíveis, a casca de arroz não é apta para alimento animal (Boateng e Skeete, 1990). A casca de arroz é, portanto, um subproduto da produção do arroz. Estima-se que, a cada 4 toneladas de arroz coletadas, 1 tonelada é casca de arroz.

O teor de sílica da casca de arroz pode ser aumentado, convertendo-se em cinza, através da incineração. A CCA resultante contém 90-96% de sílica.

Por tudo isso, a cinza de casca de arroz foi escolhida como aditivo para as amostras de solo e, também, por suas características, por ser um material acessível e pouco estudado.

2.8.3 Cinza de casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz tem um alto teor de sílica amorfa que, quando queimado a temperaturas controladas, está sujeito a uso em várias aplicações na construção civil, sendo utilizado como polozana agregada aos cimentos, concretos e argamassas, além de ser utilizado na indústria cerâmica e em melhoramento de solos (FOLETTTO, et al 2005).

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).

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).

2.8.4 Impactos da cinza de casca de arroz no meio ambiente

Assim como qualquer outra cinza existente, a cinza da casca de arroz é depositada no meio ambiente (Figura 6), 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, 2006).

Figura 6: Cinza de casca de arroz



Fonte: Google, 2016.

A geração de energia, através da queima da casca de 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 que todo CO₂ produzido na queima, volta para o ciclo de carbono da biosfera terrestre (FOLETTTO, et al 2005).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Localização e caracterização do solo

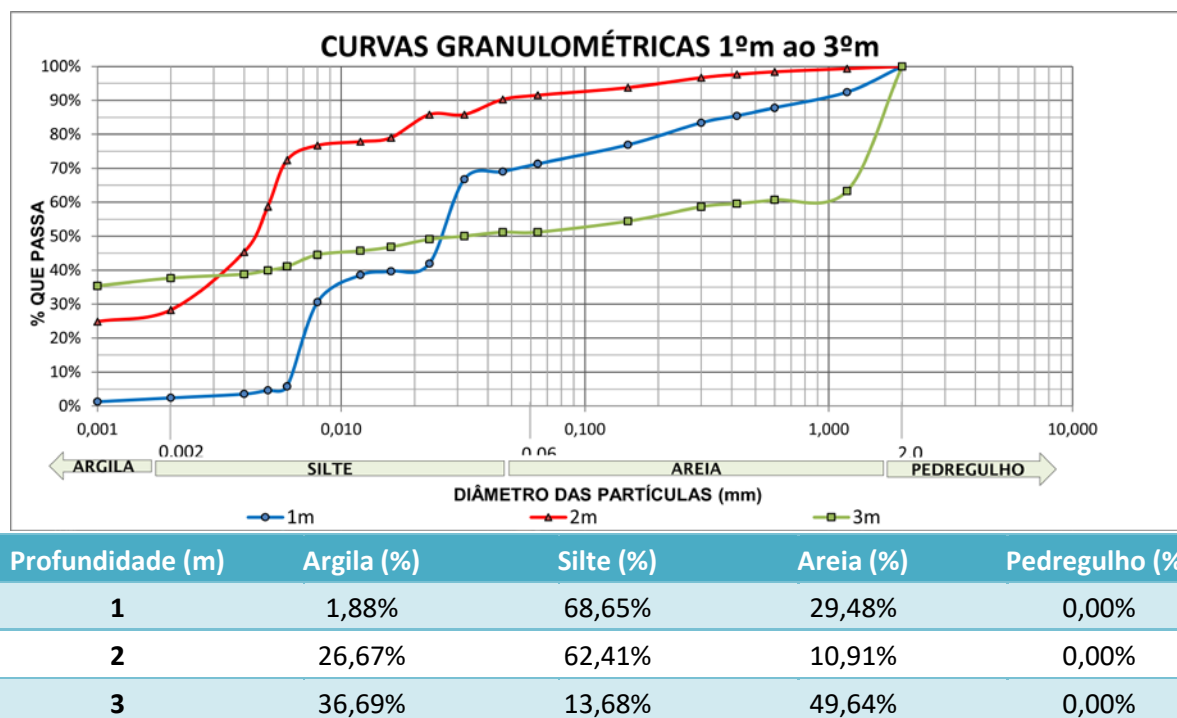
A amostra será retirada do primeiro metro de solo do Campo Experimental de Engenharia da FAG (CEEF). A Figura 7 mostra a localização, via satélite. A parte destacada em vermelho mostra o local de onde o solo foi retirado.

Figura 7 – Campo Experimental de Engenharia da FAG



Fonte: Google Maps, 2017.

A classificação do solo, de acordo com a curva granulométrica, é de argila silto arenosa (ZEN, 2016), mostrada na figura abaixo. Caracteriza-se, também, por ser um solo residual que provém da decomposição de rochas eruptivas que, na região, são originadas do basalto. Possuem comportamento laterítico e sua condição é de solo pré-adensamento leve, por ter um baixo valor de peso específico, aparentemente seco (DAMIN, 2012).

Figura 08 – Curvas granulométricas médias sem a utilização de defloculante do 1º ao 3º metro

Fonte: Zen, 2016

O subsolo do Campo Experimental é composto por duas camadas com pequenas variações entre os índices físicos ao longo da profundidade. É composto, basicamente, por argila siltosa e característica laterítica e colapsível. Conforme sua profundidade aumenta, a resistência do solo aumenta também, característica típica de solo residual (ZEN, 2016). O nível de água do subsolo, encontrado por sondagem SPT, foi de 12 metros; porém, em outras análises, os valores encontrados chegam a 15 metros. Tal variação é típica de solos muito finos.

Quanto à classificação da graduação do solo, é considerado um solo mal graduado, devido à alta quantidade de finos presentes no solo e à ausência de material granular, o que prejudica o contato entre os grãos e, conseqüentemente, sua resistência.

3.1.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz utilizada foi comprada de uma empresa chamada Diprotec, da cidade de Curitiba, capital do Paraná. Foram adquiridos 20kgs do aditivo, com o intuito de

que o restante da cinza que sobrar será doada para a faculdade, a fim de incentivar novos trabalhos com o aditivo.

É interessante a utilização da cinza, pois, segundo Bezerra (2010), deve apresentar resultados satisfatórios, uma vez que possui alto teor de sílica, deixando-a com características pozolânicas.

3.1.3 Dosagem e preparação dos corpos de prova

O solo, coletado em campo, foi levado à estufa, por cerca de 24 horas, com o propósito de realizar uma secagem preliminar da amostra e possibilitar a posterior adição de água, para que o solo chegue no teor de umidade ótimo.

A umidade ótima foi determinada através do ensaio de compactação Proctor, com cilindro pequeno, com energia de compactação normal, foi usada esse percentual de umidade com o intuito de obter a maior compactação possível para as amostras, o resultado do mesmo se encontra no capítulo 4, com referência a Volpatto (2015).

Após retirar o solo da estufa, houve a necessidade de destorroá-lo, para facilitar a mistura solo-cinza e a moldagem dos corpos de prova. O solo destorroado foi passado na peneira de 2mm para garantir a todos a uniformidade dos grãos. As porcentagens utilizadas foram de 5%, 10%, 15% e 20%. Estas porcentagens foram escolhidas, devido ao fato de que os demais trabalhos, que serviram como parâmetro para a comparação de resultados, usam tais porcentagens.

A mistura solo-cinza foi feita em formas. O primeiro passo foi pesar em uma balança 1400g de solo; em seguida, foi feita a adição da quantidade respectiva de cinza em relação à massa do solo seco; e, por último, foi feita a adição de água, também em relação à massa do solo seco. Feito isso, tudo foi misturado, esmagando pequenas bolas que se formavam devido à mistura da cinza.

Para as moldagens dos corpos de prova de compressão triaxial, foi utilizado o método de compactação dinâmica por pisoteamento, realizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) – Campus Cascavel.

Os corpos de prova apresentaram uma pequena diferença em relação aos corpos de prova moldados no laboratório de Mecânica dos Solos II, no Centro Universitário Assis Gurgacz. Os corpos de prova, moldados na FAG, eram feitos com um pisoteador com o aparelho Harvard Miniatura, moldando corpos de prova com 11cm de altura e 2” de diâmetro.

Já os corpos de prova que foram moldados na UNIOESTE apresentaram 9,8cm de altura e 2” de diâmetro. Uma redução de, aproximadamente, 10%, a mesma redução se apresentou na massa do corpo de prova.

A compactação foi dividida em 3 camadas, cada uma com 25 golpes, com um pisoteador improvisado pela universidade. Cada camada foi composta por 125,7g de mistura solo-cinza, medida que foi determinada por uma tabela desenvolvida pelo professor Guilherme Venson, que relaciona parâmetros do solo, parâmetros da mistura e o volume do corpo de prova, esta tabela consta nos anexos. Os golpes tiveram, aproximadamente, a mesma energia, pois, após cada golpe, foi feita uma medição, utilizando um paquímetro, para se ter certeza da compactação de cada camada.

Figura 9 – Pisoteador usado para a compactação



Fonte: Autor, 2017

Após a compactação de cada camada, deve ser escarificada a camada subjacente, para que se tenha o grau de compactação Proctor normal. (CONTENCO, 2015). Para a retirada do corpo de prova, foi utilizado um macaco hidráulico. Vale ressaltar que, no começo do ensaio, foi necessário o pincelamento de uma fina camada de óleo, para auxiliar na futura retirada do corpo de prova.

Figura 10: Macaco hidráulico fazendo a elevação do corpo de prova



Fonte: Autor, 2017

Para uma maior eficiência nos ensaios, foram realizados 3 corpos de prova para cada porcentagem. Após a homogeneização do solo, os corpos de prova serão moldados e armazenados em sacos plásticos, com o propósito de controlar o teor de umidade e evitar o contato com o oxigênio, mantendo, assim, a sua validade estatística.

3.1.4 Ensaio de compressão triaxial

Foi realizado o ensaio de compressão triaxial do tipo consolidado não drenado, que permite a determinação da resistência ao cisalhamento das amostras. Desse modo, pode-se determinar a envoltória de resistência em um prazo menor (PINTO, 2006). Esse método foi escolhido, porque outras pesquisas foram realizadas com a sua utilização, possibilitando assim uma comparação.

O método utilizado para o rompimento do corpo de prova foi o adensado não drenado, e a primeira parte do ensaio é o adensamento. Para o adensamento, a aplicação da pressão confinante inicial será de 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 percorra pelo corpo de prova. Depois disso, a pressão será aumentada simultaneamente.

A velocidade de ruptura determinada para os ensaios foi de $0,16 \text{ mm/min}$. A mesma foi escolhida, a partir do fato de que carregamentos aplicados rapidamente podem gerar excesso de poropressões, que geram redução da resistência ao cisalhamento.

Sendo assim, todos os ensaios duraram, aproximadamente, seis horas. O ensaio termina quando o corpo de prova deformar 20% da sua altura, sendo que o mesmo tem uma dimensão de 9,5cm de altura e 2” de diâmetro.

O ensaio foi realizado no laboratório de Mecânica dos Solos II do Bloco de Engenharias, no Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz.

Equipamentos:

- Equipamento para ensaio de compressão triaxial;
- Laptop com software compatível com a máquina de compressão triaxial;
- Membrana de látex e expansor de membrana;
- Pedras porosas;
- Papel filtro;
- “O” *rings*;
- Mangueira plástica com $\Phi 1/8$ ”;
- Cabeçote;
- Câmara de compressão.

Preparação do corpo de prova:

- Colocar sobre a base da câmara de compressão uma pedra porosa e um pedaço de papel filtro;
- Assentar o corpo de prova sobre a pedra com papel filtro e, em seguida, colocar uma segunda pedra porosa com papel filtro em cima do corpo de prova;
- Posicionar o cabeçote sobre a pedra porosa;
- Com auxílio do expansor, envolver o corpo de prova com a membrana de látex e fixá-la com os “O” *rings*;
- Encaixar a mangueira plástica na base da câmara e no cabeçote;
- Fechar e travar a câmara de compressão e enchê-la com água, retirando todo o ar através do extravasor superior.

Figura 11 – Corpo de prova preparado para entrar na câmara



Fonte: Autor, 2017

Ensaio de compressão triaxial:

- Ligar a máquina de controle de pressão e a prensa do equipamento;
- Conectar o laptop ao equipamento, inicializar o software e verificar se todos os transdutores estão corretos;
- Cadastrar o corpo de prova para ensaio, inserindo os valores de altura, diâmetro e massa do mesmo;
- Determinar os parâmetros para ensaio, valores de contrapressão e pressão confinante;
- Saturar todas as mangueiras a serem utilizadas durante o ensaio;
- Conectar as mangueiras da máquina às entradas da câmara de compressão, mantendo todos os registros da câmara fechados;
- Aplicar uma pressão confinante inicial de 20kPa e contrapressão de 10kPa;
- Abrir os registros de pressão neutra e de variação de volume, a fim de fazer a água percolar no corpo de prova;
- Aumentar as pressões de confinamento e contrapressão simultaneamente, sempre mantendo uma diferença $+0,1\text{kgf/cm}^2$ da pressão confinante em relação à contrapressão, até atingir o valor pré-estabelecido para a contrapressão;
- No software, abrir a aba de adensamento, verificar as pressões e, então, na câmara de compressão, fechar o registro da contrapressão;

- Para realizar o adensamento, deve-se, ao mesmo tempo, abrir o registro de variação de volume e clicar no botão “Iniciar” do software;
- O adensamento será finalizado quando as leituras da variação de volume se estabilizarem;
- Após o adensamento, fechar o registro de variação de volume e salvar os dados coletados;
- No software, abrir a aba para ruptura do corpo de prova, inserir a velocidade de ruptura e verificar se o leitor de deslocamento e carga axial estão zerados;
- Para iniciar a ruptura, deve-se abrir o registro da pressão neutra e zerar o valor correspondente no software e, em seguida, clicar em “Iniciar”;
- O ensaio é finalizado quando o corpo de prova deformar 20% da sua altura inicial
- Com a ruptura realizada, analisar os dados coletados.

CAPÍTULO 4

Esse capítulo apresenta os resultados finais obtidos em todos os ensaios realizados e também os demais ensaios que foram utilizados como parâmetro para a comparação de dados, os resultados serão divididos em 4 subcapítulos de forma em que, cada capítulo apresenta os dados obtidos para uma porcentagem estudada.

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro dado a ser apresentado é uma tabela que apresenta as dosagens utilizadas para a moldagem dos corpos de prova (Tabela 2). Essas dosagens foram suficientes para a moldagem de aproximadamente 4 corpos de prova, com uma pequena sobra.

Tabela 02: Dosagem das amostras

Amostras	% Cinza	Peso solo seco	Peso Cinza	Qtde água
1	5%	1400g	70g	441g
2	10%	1400g	140g	441g
3	15%	1400g	210g	441g
4	20%	1400g	280g	441g

Fonte: Autor, 2017

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/cm³.

Figura 12 - Curva de compactação para Proctor Normal

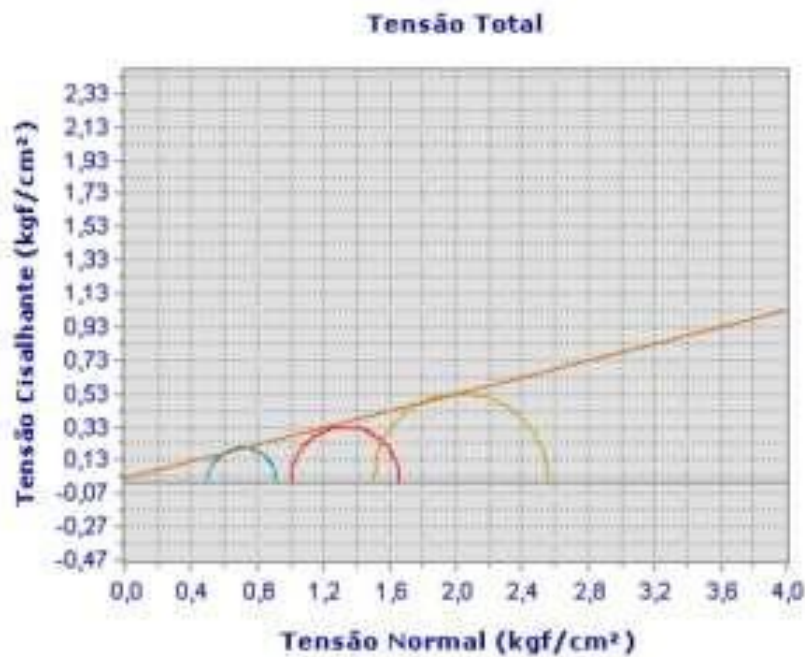


(Fonte: VOLPATO, 2015).

No ensaio realizado por Robledo e Gandin (2015) com solo *in natura*, a envoltória foi determinada com 3 ensaios, obtendo-se os resultados apenas para tensões totais (Figura 13).

As tensões confinantes utilizadas nesse ensaio foram de 0,5kgf/cm², 1,00kgf/cm² e 1,5kgf/cm². O valor da coesão obtido foi de 0,02kgf/cm² e o ângulo de atrito foi de 14,19°.

Figura 13 - Envoltória de Mohr-Coulomb (solo in natura)



(Fonte: ROBLED E GANDIN, 2015).

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 quatro ensaios para cada dosagem em média.

Metade dos corpos de prova ensaiados foram descartados, muitos gráficos plotados alcançaram uma configuração distinta do que é apresentada na bibliografia utilizada, alguns ensaios foram interrompidos no meio do ensaio devido a quedas de energia, com o farto período de chuva.

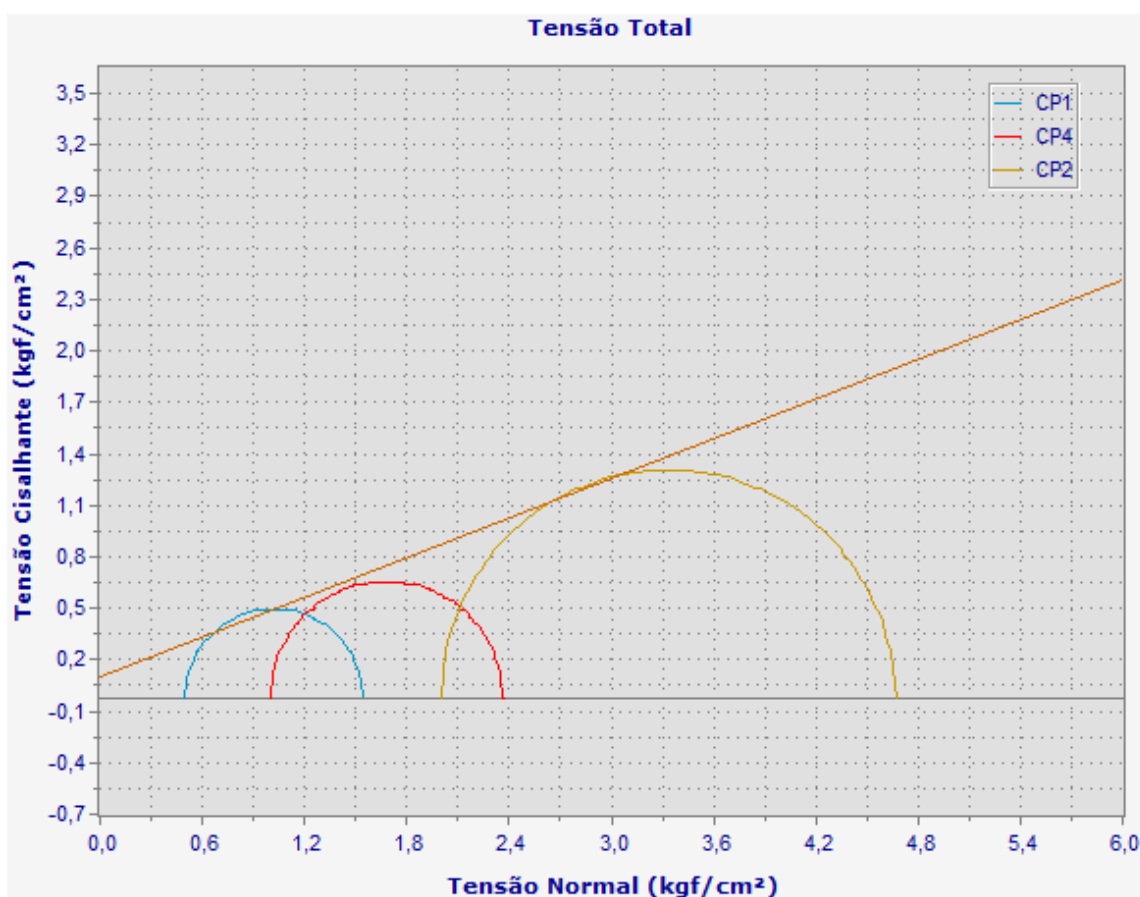
Para uma melhor visualização dos resultados, todos os ensaios foram realizados partindo das mesmas tensões confinantes e nas distintas dosagens. De tal modo, as tensões estão retratadas somente em tensões totais, tendo em vista que no tempo da realização dos ensaios os valores de pressão neutra não foram 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

4.2.1.1 Dosagem de 5%

Para o solo compactado com a dosagem de 5%, foram utilizados os dados de 3 corpos de prova com tensões confinantes de 0,5kgf/cm² (círculo azul), 1,0 kgf/cm² (círculo vermelho) e 2,0 kgf/cm² (círculo laranja). O valor de coesão encontrado foi de 0,13kgf/cm² e o ângulo de atrito foi de 21,07°, esses valores referem as tensões totais, visto que os valores de pressão neutra não foram estabilizados corretamente.

Figura 14: Parâmetros com 5% de cinza de casca de arroz.

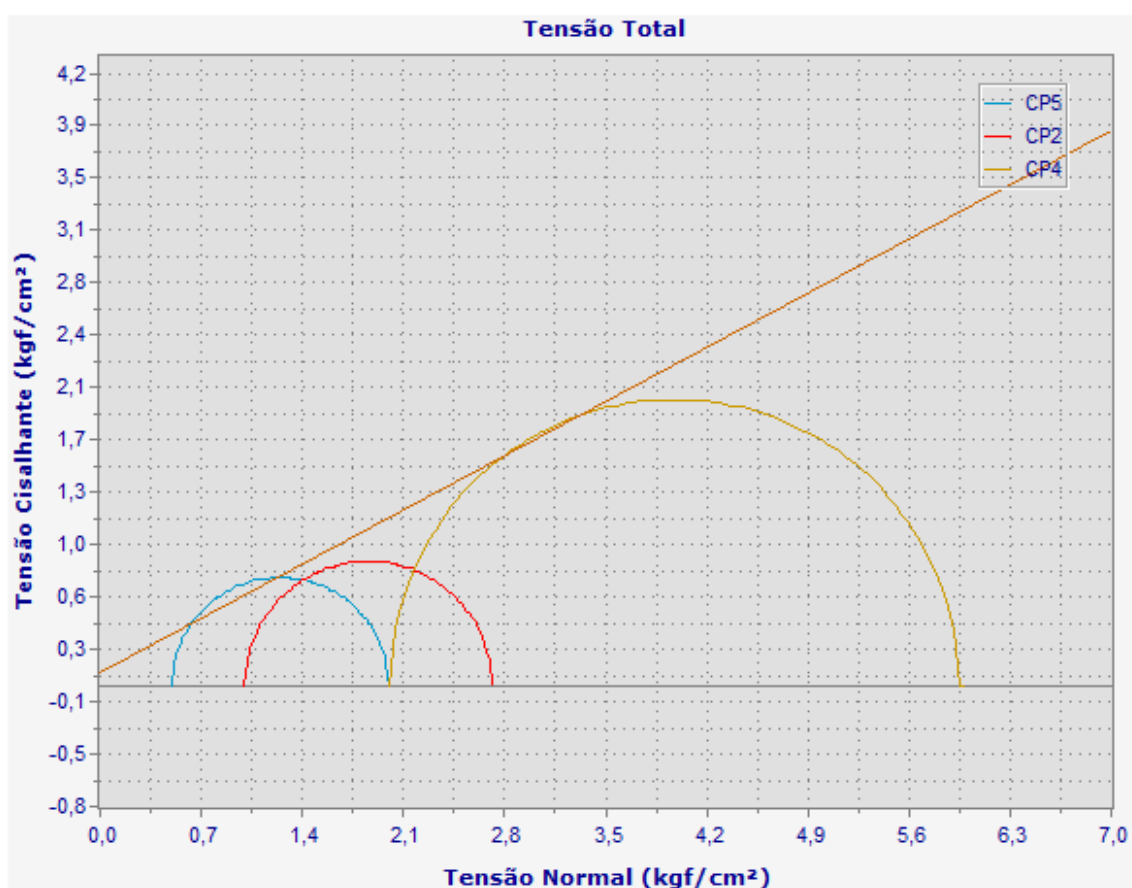


Fonte: Autor, 2017

4.2.1.2 Dosagem de 10%

Para o solo compactado com a dosagem de 10%, foram utilizados os dados de 3 corpos de prova com tensões confinantes de 0,5kgf/cm² (círculo azul), 1,0 kgf/cm² (círculo vermelho) e 2,0 kgf/cm² (círculo laranja). O valor de coesão encontrado foi de 0,10kgf/cm² e o ângulo de atrito foi de 28,03°, para as tensões totais.

Figura 15: Parâmetros com 10% de cinza de casca de arroz.

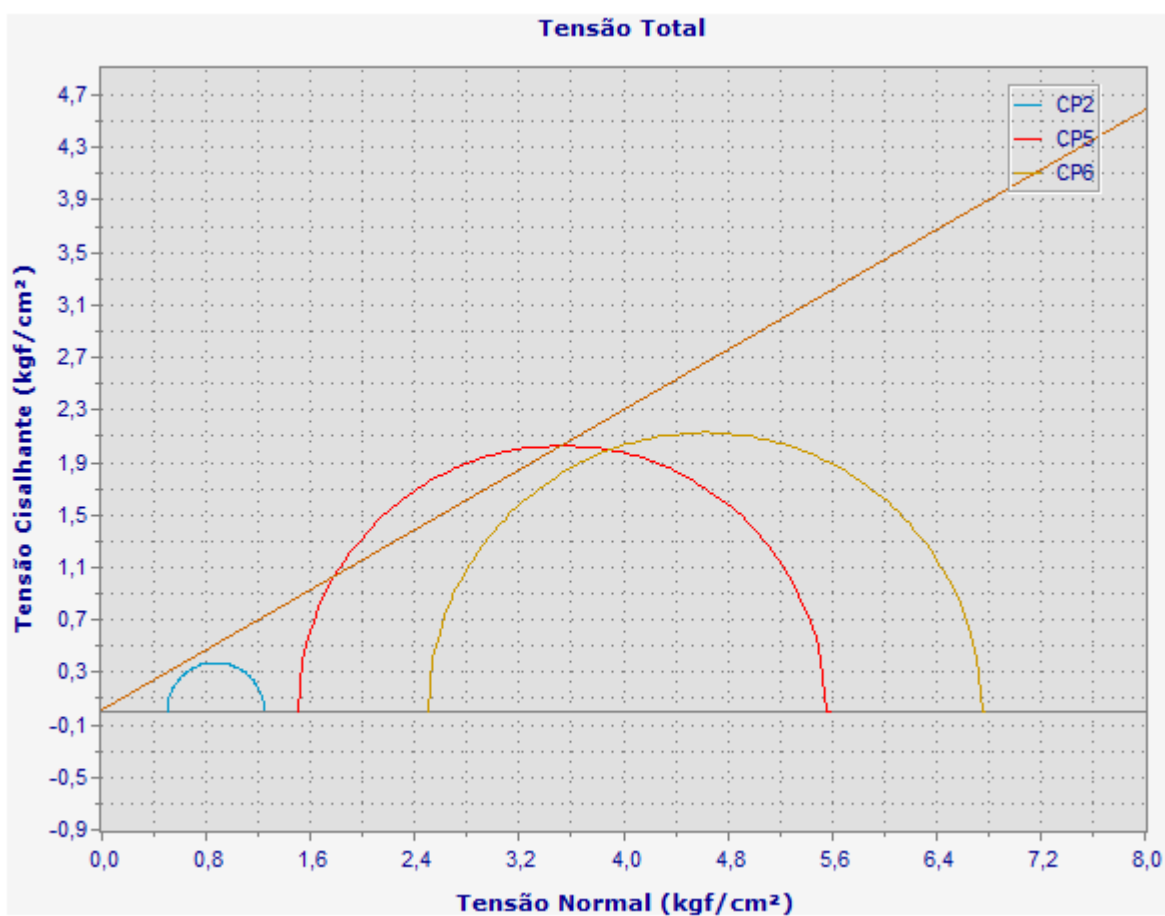


Fonte: Autor, 2017

4.2.1.3 Dosagem de 15%

Para o solo compactado com a dosagem de 15%, foram utilizados os dados de 3 corpos de prova com tensões confinantes de $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ (círculo azul), $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ (círculo vermelho) e $2,5 \text{ kgf/cm}^2$ (círculo laranja). O valor de coesão encontrado foi de $0,02 \text{ kgf/cm}^2$ e o ângulo de atrito foi de $29,72^\circ$, para as tensões totais.

Figura 16: Parâmetros com 15% de cinza de casca de arroz.

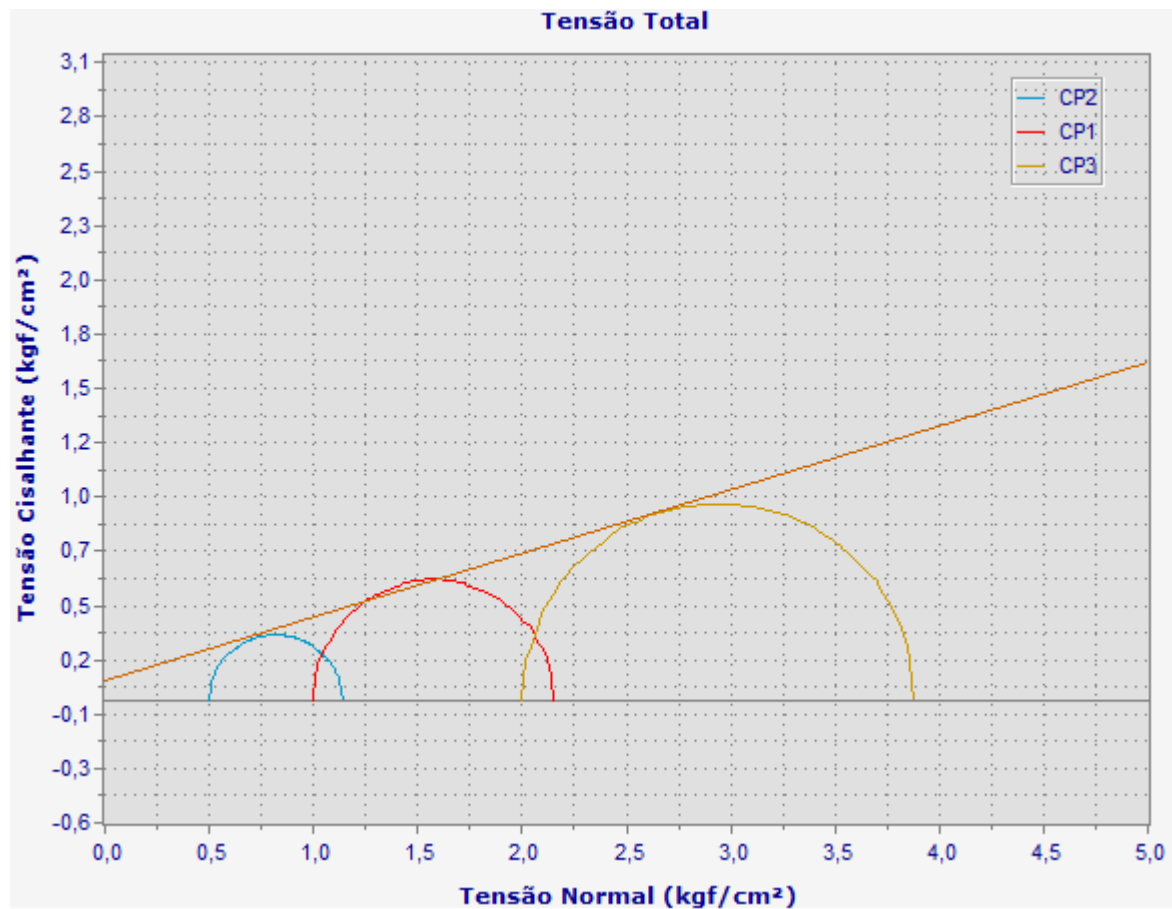


Fonte: Autor, 2017

4.2.1.4 Dosagem de 20%

Para o solo compactado com a dosagem de 20%, foram utilizados os dados de 3 corpos de prova com tensões confinantes de $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ (círculo azul), $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ (círculo vermelho) e $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ (círculo laranja). O valor de coesão encontrado foi de $0,10 \text{ kgf/cm}^2$ e o ângulo de atrito foi de $16,90^\circ$, para as tensões totais.

Figura 17: Parâmetros com 20% de cinza de casca de arroz.



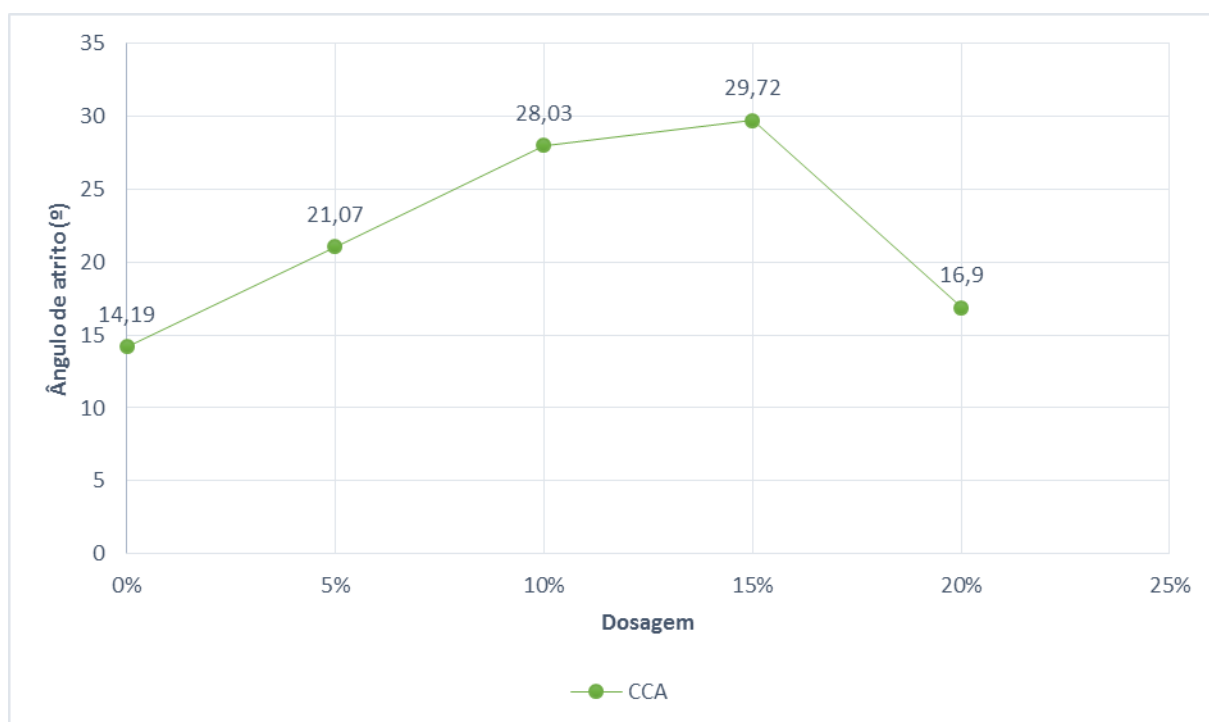
Fonte: Autor, 2017

4.3 COMPARAÇÕES

4.3.1 Comparação entre as diferentes dosagens de cinza de casca de arroz

Para os valores do ângulo de atrito entre as partículas pode-se observar que a amostra com 15% de cinza de casca de arroz obteve o maior valor entre todos os teores ensaiados, 47% maior em relação ao solo sem a cinza (Figura 18). Houve uma inversão do comportamento quando a dosagem subiu para 20%, reduzindo o ângulo de atrito entre os grãos, reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo.

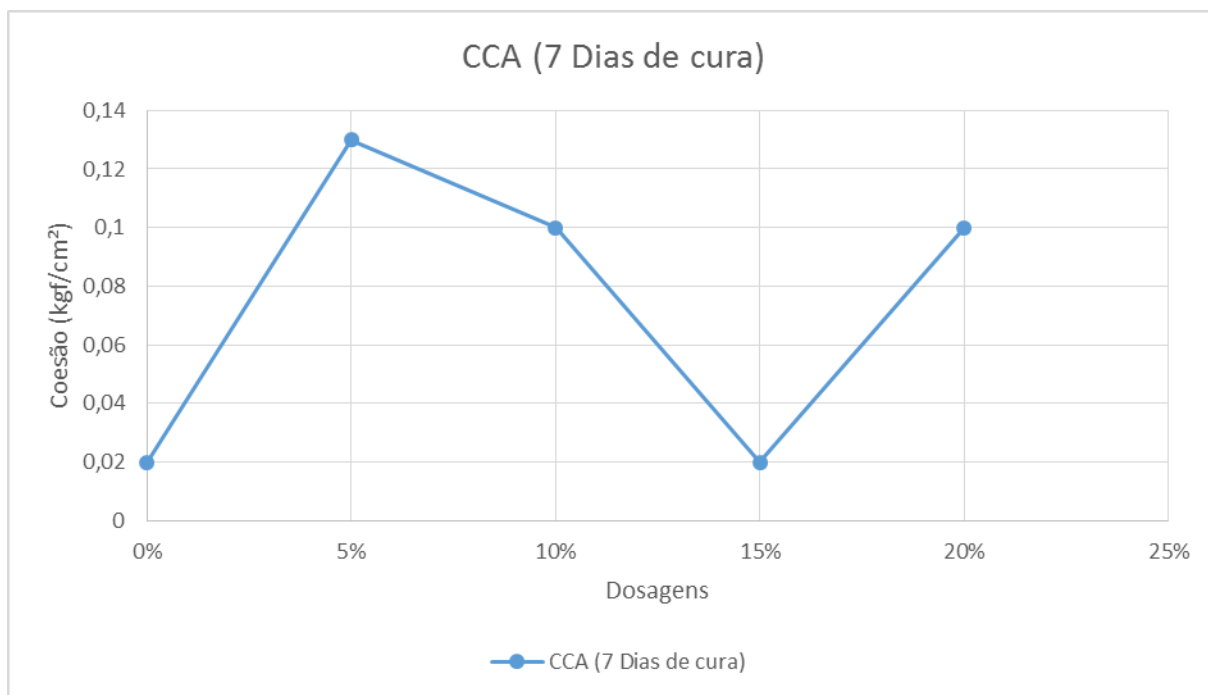
Figura 18: Ângulo de atrito em relação a diferentes dosagens de cinza de casca de arroz



Fonte: Autor, 2017

O gráfico que mostra o comportamento da coesão no solo, não apresenta um comportamento padrão, mostra seu valor mais baixo nas dosagens de 15% e 5%, que mostra 0,02kgf/cm², o valor mais alto é apresentado na dosagem de 5%, que exibe 0,13kgf/cm².

Figura 19: Coesão em relação a diferentes dosagens de cinza de casca de arroz

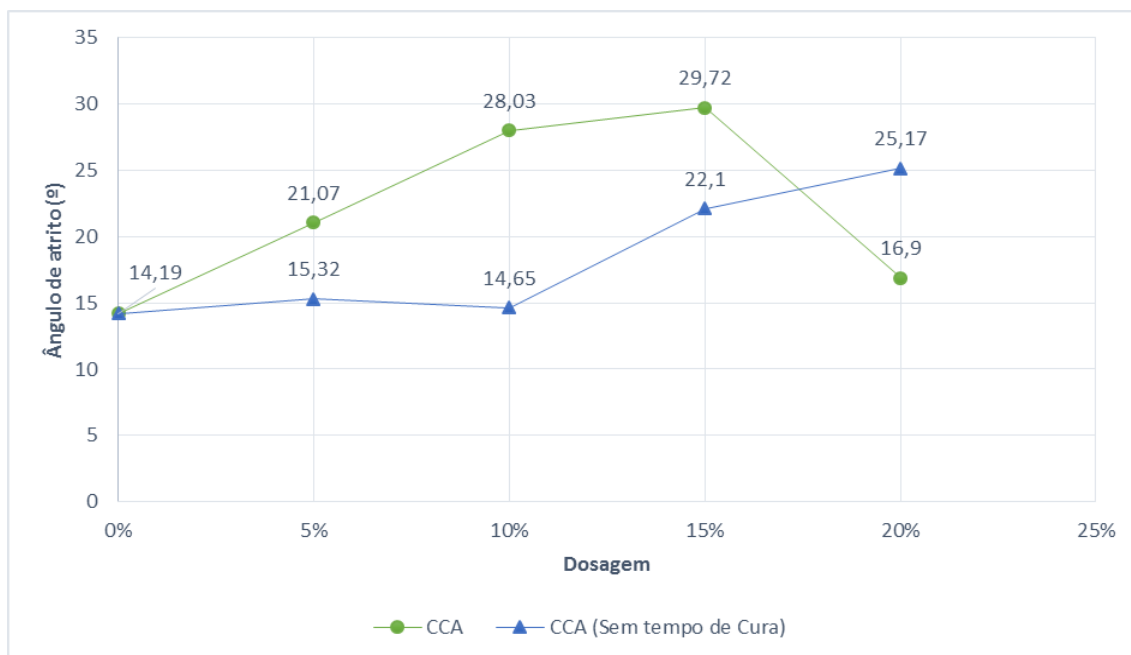


Fonte: Autor, 2017

4.3.2 Comparação entre amostras de cinzas com diferentes tempos de cura

As amostras variam entre 7 dias e tempo de cura, e sem tempo de cura, fornecidos por Beletini em 2016. A Figura 20, representa a variação do ângulo de atrito entre as dosagens de CCA com e sem tempo de cura, pode-se observar que elas se comportam de forma diferente, inicialmente a amostra com tempo de cura mostra um acréscimo, mas logo depois a situação se inverte. A amostra com 7 dias de tempo de cura, apresentou o maior o maior valor de ângulo de atrito com a dosagem de 15% (29,72°), enquanto o maior valor apresentado pela cinza de casca de arroz foi de 25,17%, na amostra de 20%.

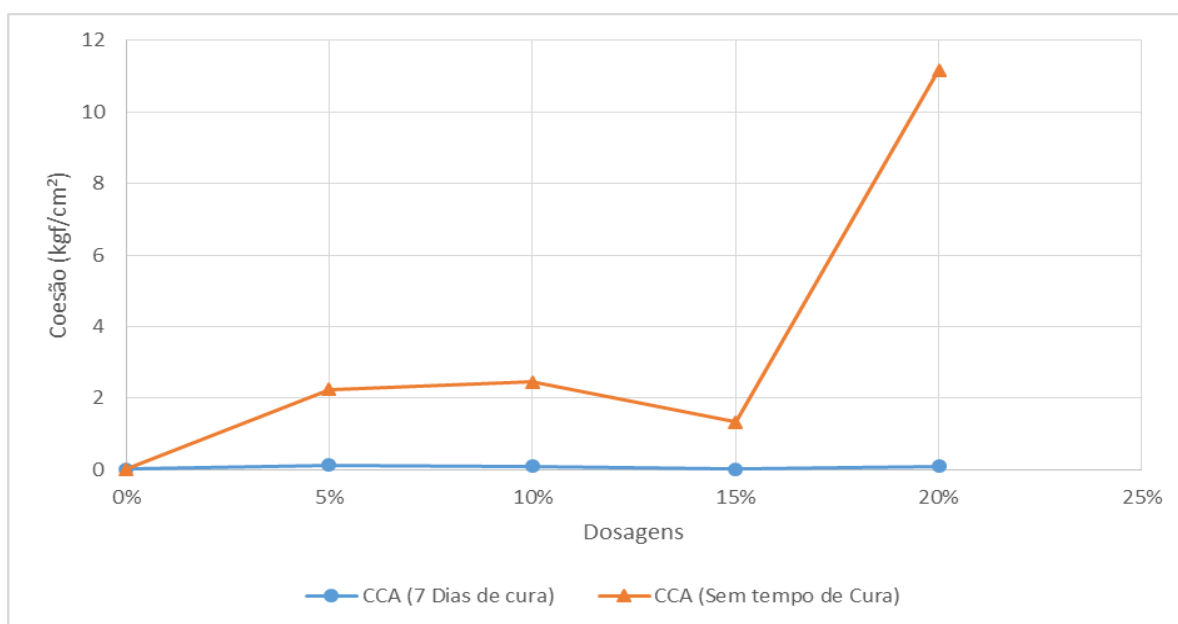
Figura 20: Ângulo de atrito em relação a diferentes amostras de cinza de casca de arroz



Fonte: Autor, 2017

Já a coesão se comportou de forma distinta, desde os primeiros ensaios, as amostras de solo que tiveram um tempo de cura, sofreram um decréscimo em sua coesão, enquanto as amostras sem tempo de cura tiveram um acréscimo em quase todas as dosagens, chegando em 11,17 na dosagem de 20% contra 0,02 na amostra do solo *in natura*, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21: Coesão em relação a diferentes amostras de cinza de casca de arroz



Fonte: Autor, 2017

4.3.3 Comparação entre amostras de cinza de casca de arroz e areias (fina e média)

A cinza de casca de arroz com o tempo de cura de 7 dias, representada na cor azul claro na Figura 22, mostra um comportamento equivalente as amostras de areia. Infelizmente as amostras de areia só foram ensaiadas nas porcentagens comuns de 0%, 5% e 10%, limitando a comparação. A CCA apresentou um acréscimo semelhante ao da areia fina na porcentagem de 10%, porém, a areia média se sobrepõe na porcentagem de 5%. A comparação foi feita com base no trabalho do Fazoni e Ferandin (2017).

Optou-se por comparar apenas o ângulo de atrito entre as amostras, que foi a característica que apresentou mudanças mais significativas entre as diferentes dosagens.

Figura 22: Ângulo de atrito entre amostras de areia e cinza de casca de arroz



Fonte: Autor, 2017

4.3.4 Comparação entre amostras de cinza de casca de arroz e cal

A cinza de casca de arroz com o tempo de cura de 7 dias, representada na cor azul claro na Figura 23, e a cal representada na cor cinza. A cal exibe resultados superiores de ângulo de atrito, o maior ocorre em 10%, mas logo em seguida decresce, a cal não apresenta resultados de 20%. Os dados foram retirados do trabalho de Volpato (2015).

As amostras com cinza de casca de arroz apresentam uma coesão quase nula no solo, enquanto a cal apresenta um aumento de 0,02 kgf/cm² (solo *in natura*) para 3,04kgf/cm².

Figura 23: Ângulo de atrito entre amostras de cal e cinza de casca de arroz



Fonte: Autor, 2017

4.3.5 Comparação entre amostras de cinza de casca de arroz e cimento

A cinza de casca de arroz com o tempo de cura de 7 dias, e cimento, representados na Figura 24. As amostras com cimento apresentam um aumento constante no ângulo de atrito interno dos grãos chegando a 56,45° na dosagem de 20%, um resultado 2 vezes superior ao

ângulo de atrito máximo da cinza, que ocorre na porcentagem de 15%. Os resultados foram retirados do trabalho de Gomes (2016).

As amostras com cinza de casca de arroz apresentam uma coesão quase nula no solo, enquanto o cimento apresenta um aumento de $0,02 \text{ kgf/cm}^2$ (solo *in natura*) para $2,33 \text{ kgf/cm}^2$ (dosagem de 20%).

Figura 24: Ângulo de atrito entre amostras de cimento e cinza de casca de arroz

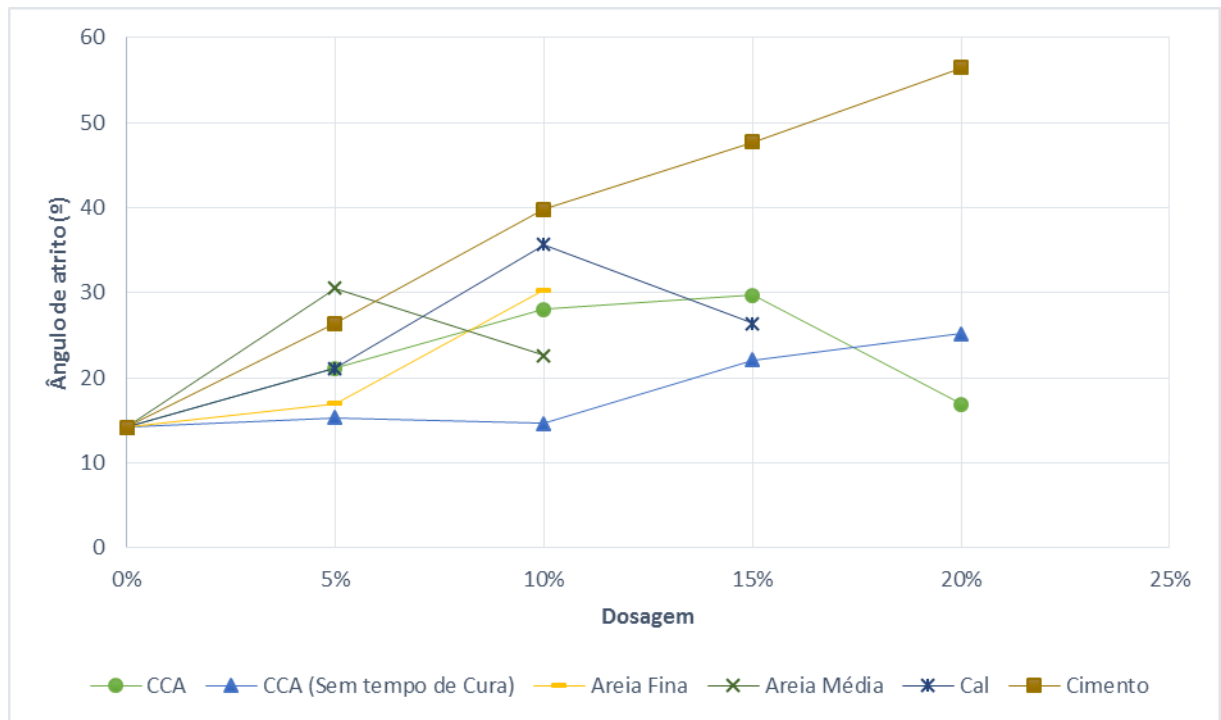


Fonte: Autor, 2017

4.3.6 Análise entre todas as amostras

Levando em consideração todos os 6 aditivos analisados nesse trabalho, elaborou-se um gráfico para ilustrar o ângulo de atrito das amostras. Nota-se que a cinza caracteriza um material interessante, devido a sua abundância e baixo custo, diferente dos outros aditivos.

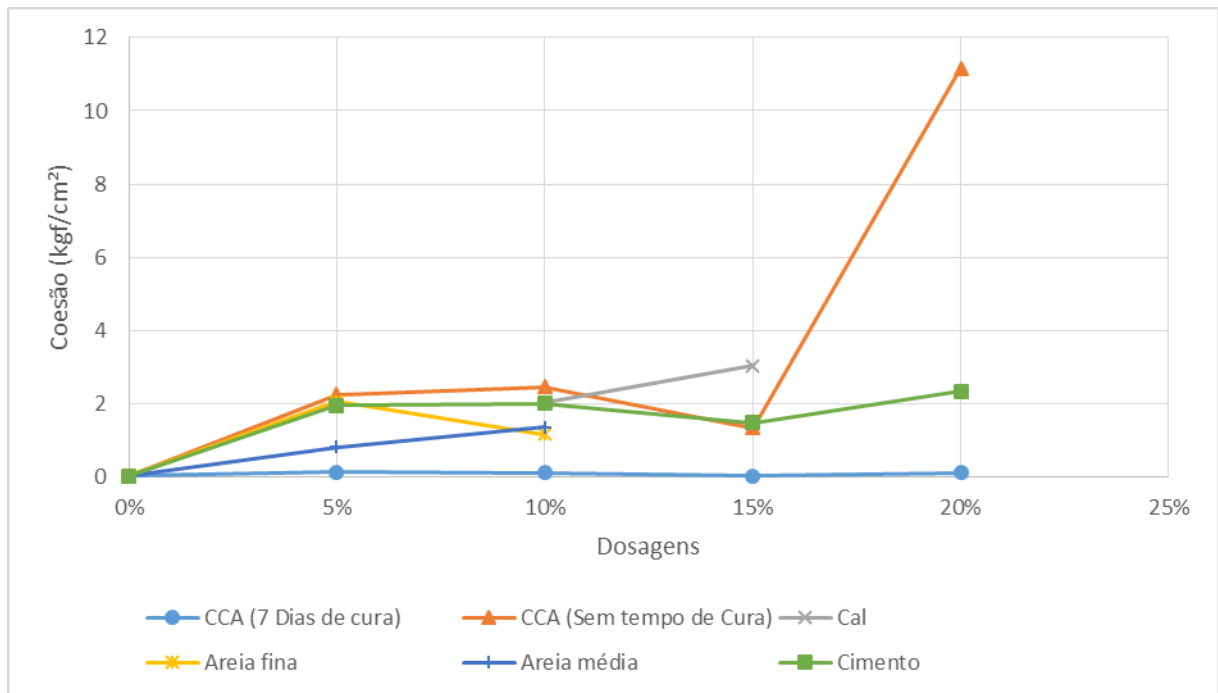
Figura 25: Ângulo de atrito entre amostras de cimento, cinzas de casca de arroz, areias e cal



Fonte: Autor, 2017

O gráfico da Figura 26, ilustra a coesão de todos os 6 diferentes aditivos, nele, percebe-se que a cinza teve o pior desempenho entre todas as amostras, levando a coesão a praticamente 0kgf/cm².

Figura 26: Coesão entre amostras de cimento, cinzas de casca de arroz, areias e cal



Fonte: Autor, 2017

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da cinza de casca de arroz com cura de 7 dias nos parâmetros que constituem a resistência ao cisalhamento de um solo argiloso e laterítico, na cidade de Cascavel – Paraná.

Em relação ao ângulo de atrito do solo, a dosagem que apresentou um maior acréscimo foram as amostras de 15%, um aumento de 209%, indo de 14,19° para 29,72°, a amostra menor impacto foi a de 20% que apresentou um valor de 16,9°, ainda superior que o valor do *solo in natura*.

. Quanto a coesão no solo, as amostras tiveram um decréscimo quase que constante, chegando praticamente a 0. *In natura*, o solo apresenta um valor de coesão de 0,02kgf/cm², e a amostra mais expressiva de cinza de casca de arroz foi a de 5% que chegou a 0,13kgf/cm², e a pior foi a de 15%, chegando a 0,02kgf/cm², igualando ao valor do *solo in natura*.

Através dos resultados obtidos, chegamos à conclusão que a cinza de casca de arroz interferiu positivamente na resistência ao cisalhamento do solo utilizado, porém, os resultados obtidos nos trabalhos utilizando o cimento e a cal como aditivos foram mais satisfatórios, levando em consideração que a cinza levou a coesão do solo a praticamente 0.

Em relação a outros trabalhos analisados, utilizando o solo da mesma região, a cinza de casca de arroz não mostrou resultados satisfatórios, porém, ela ainda pode ser usada como uma ferramenta de melhoramento de solo, devido sua abundância e necessidade de descarte, gerando um baixo custo, como por exemplo: execução de subleitos de rodovias, aterros compactados, muros de arrimo e estabilização de taludes, etc.

Vale ressaltar que esses dados são dados preliminares, seriam necessários mais ensaios para confirmar os dados e a utilização desse material com confiabilidade no meio prático como aditivo de melhoramento de solo

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios com dosagens intermediárias de cinza de casca de arroz para o mesmo solo analisando um maior 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 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986.
- AZEVEDO, A. L. C., OLIVEIRA, A. JR., PEDROSA, R. A. e RAMALHO, R. W., “**Estabilização de solos com adição de cal**”. Belo Horizonte, 1998. Dissertação de pós-graduação. IPC/PUC. 78p.
- BELETINI, Milene. **Determinação da resistência ao cisalhamento de um solo argiloso e laterítico com adição de cinza de casca de arroz**. 2016. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Assis Gurgacz, Cascavel, 2016.
- BEZERRA, T. M. I. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A. *Incineration of Rice Hull for Uses as a Cementitious Material. The Guyana Experience. Cement and Concrete Research*; v. 20, n. 5, pp. 795 – 802, USA, 1990.
- 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**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.3, 1987.
- CONTENCO. **Manual do usuário: Equipamento triaxial estático para ensaios em solos com medidor de volume digital**. Minas Gerais, 2015.
- CRISTELO, N.; **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2001.
- 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.
- 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.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **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>. Acesso em 15 de maio de 2016.

LAZARO, R. C.; MOH, Z. C. *Stabilization of Deltaic Clays with Lime -Rice Husk Ash Mixtures*. In: 2nd SOUTHEAST ASIAN CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, pp. 215-223, 1970.

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.

MACHADO S. L.; MACHADO M. F. C. **Mecânica dos solos II – conceitos introdutórios**. Salvador, 1997.

MARAGON, M. **Notas de aula – Mecânica dos solos II**. Universidade Federal de Juíz de Fora – UFJF – NuGeo/Núcleo de Geotecnia. Juíz de Fora, 2013.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 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 à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2006.

RAHMAN, M. A. *Effect of Cement Rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lateritic Soils*. *Journal Soil Foundation*, n. 27 (2), pp. 61-65, 1987.

RAHMAN, M. A. *The Potential of Some Stabilizers for the Use of Lateritic Soil in Construction*. *Building and Environment Journal*; v. 21, n. 1; pp. 57 – 61; England, 1986.

SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento realcionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro. **RBCS – Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n 31, p. 853-862, 2007.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à 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.

VARGAS, M. **“Introdução à Mecânica do Solos”**. São Paulo: MacGraw - Hill, Ed. USP, 1977. 509p.

ZEN, Beatriz. **Caracterização geotécnica do subsolo do campo experimental do centro acadêmico da FAG, em Cascavel, PR** 2016. 109 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Assis Gurgacz, Cascavel, 2016.

ANEXOS

Tabela 3: Dosagem dos CP's.

DOSAGEM	
<i>Massa seca do c.p. (g):</i>	286,67
<i>Massa úmida do c.p. (g):</i>	376,97
<i>Diâmetro do c.p. (cm):</i>	5,000
<i>Altura do c.p. (cm):</i>	10,00
<i>Área do c.p. (cm²):</i>	19,63
<i>Volume do c.p. (cm³):</i>	196,35
<i>Teor de solo (%):</i>	100,00
<i>Teor de cinza (%):</i>	10,00
<i>Teor de umidade (%):ALVO</i>	31,50
<i>Massa espec. aparente seca. (g/cm³): ALVO</i>	1,46
<i>Massa espec. aparente úmida. (g/cm³):</i>	1,92
<i>Msolo-cinza</i>	260,61
<i>Msolo (g)</i>	260,61
<i>Mcinza(g)</i>	26,06
<i>Mágua (g)</i>	90,30
<i>Ys solo (ENSAIO BALÃO)</i>	2,85
<i>Ys cinza</i>	2,31
<i>Volume solo (cm³)</i>	91,44
<i>Volume cinza (cm³)</i>	11,28
<i>Volume água (cm³)</i>	90,30
<i>Volume Vazios (cm³)</i>	93,63
<i>Índice de vazios</i>	0,9114
<i>Porosidade N (%)</i>	47,68
<i>Grau de Saturação (%)</i>	96,45
<i>Vv/Vag.cinza</i>	8,30
<i>Agv (%)</i>	5,75
<i>h/Agv</i>	8,30
<i>h/(Agv)0,28</i>	29,22

MOLDAGEM	PARA 1 CP
<i>Massa de solo úm. (g)</i>	359,84
<i>Massa de cinza (g)</i>	27,36
<i>Massa de água (g)</i>	8,62
<i>Massa por camada (g)</i>	125,66
<i>Massa úmida do c.p. (g):</i>	376,97
<i>Solo Seco</i>	273,64
<i>Masa de agua higroscopica</i>	86,20
<i>Agua total</i>	94,82
<i>Úmidade</i>	31,50%

LEGENDA	
	ENTRADA DE DADOS
	DADOS MOLDAGEM

Fonte: Venson, 2017

