



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA
CENTRO DE TECNOLOGIA DE ALEGRETE - CTA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RICARDO EGUILHOR RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO NA CIDADE
DE ALEGRETE/RS COM CIMENTO PORTLAND E CINZA DE CASCA
DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso

**ALEGRETE/RS
2012**

RICARDO EGUILHOR RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO NA CIDADE DE
ALEGRETE/RS COM CIMENTO PORTLAND E CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M.Sc. Magnos Baroni

**ALEGRETE-RS
2012**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Prof. MS.c. Magnos Baroni - Orientador
Engenharia Civil – UNIPAMPA

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Mario Doleys Soares
Engenharia Civil – UFSM

Prof. MS.c. Roberlaine Ribeiro Jorge
Engenharia Agrícola – UNIPAMPA

Teus, ó Senhor, são a grandeza, o poder, a glória, a majestade e o esplendor, pois tudo o que há nos céus e na terra é teu. Teu, ó Senhor, é o reino; tu estás acima de tudo.

1 Crônicas 29:11

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Carlos e Sonia, irmãos Fernanda e Henrique.*

AGRADECIMENTO

Acima de tudo, agradeço a Deus, por ter me dado a vida, com saúde, inteligência e disposição, e me ajudado em todos os momentos difíceis desta caminhada para hoje realizar este sonho.

Agradeço aos meus pais, meus irmãos e meus avós paternos e maternos pelo apoio e incentivo.

Agradeço de uma forma muito especial ao meu orientador e sobre tudo amigo Prof. Magno Baroni, pelo tamanho interesse e dedicação. Pela disponibilidade, pelo otimismo e entusiasmo sempre presente nas conversas a cada resultado obtido, pela força e apoio nas horas difíceis. E também pela seriedade, competência e profissionalismo em todos os momentos dessa orientação.

Ao colega Rodrigo Klamt pela ajuda e companheirismo durante toda a pesquisa.

Aos funcionários da Unipampa, Engº Marcelo Dias contribuindo com seu conhecimento e experiência de laboratório de matérias de construção civil e Andriel que sempre mostrou simpatia e boa vontade quando lhe pedia algo.

Aos colegas Ghaith Suleiman, Cristian Shendel e Marcelo Netto que de uma forma ou de outra, ajudaram sempre que necessitei para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores que passaram ao longo desses anos, seus conhecimentos técnicos e lições de vida.

A Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda. (CAAL), que forneceu a cinza de casca de arroz (CCA) empregada neste trabalho.

A Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, da qual tenho orgulho de fazer parte.

A todos que, mesmo não sendo citados, ofereceram-me apoio para a realização deste projeto, deixo meu humilde agradecimento.....

.....**muito obrigado**

RESUMO

No Brasil existem sérios problemas ambientais no que se refere à constante geração de resíduos agroindustriais que acarretam danos para o meio ambiente. O processo de beneficiamento do arroz gera grande quantidade de casca e estes resíduos são geralmente depositados em terrenos ocasionando degradação ambiental devido à lenta biodegradação, portanto o seu aproveitamento em obras de engenharia pode contribuir para a conservação e preservação do meio ambiente e proporcionar uma destinação final adequada para a cinza de casca de arroz (CCA). No presente trabalho foram pesquisadas diferentes misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz. O solo utilizado é proveniente de jazida localizada no interior do município de Alegrete, RS. O principal objetivo da pesquisa foi estudar as características de diferentes misturas de solo-cimento-cinza a fim de determinar uma resistência média a compressão simples igual ou superior a 2,1 MPa aos 7 dias, critérios exigidos pelo DNIT e pela norma de dosagem solo-cimento NBR 12253/92. Foram realizados experimentos como: dosagem das misturas, moldagem dos corpos-de-prova, ensaios de caracterização, compactação na energia intermediária de Proctor e ensaios de resistência à compressão simples. Estes ensaios permitiram avaliar o desempenho do solo local e do solo melhorado com a inclusão de teores de 6%, 10% e 13% de cimento (em massa) ao solo e adições de teores de 5%, 10% e 15% de cinza (em massa) nas mistura solo + 10% cimento. Concluindo-se que teores de 6% de cimento Portland incorporado ao solo foram suficientes para promover uma estabilização mínima, resultando em valores de resistência. E a utilização conjunta da cinza da casca de arroz com o cimento apresentou potencial técnico para a estabilização do solo apresentando vantagens técnicas e econômicas na sua utilização como material de base e sub-base de rodovias.

Palavras-chave: estabilização de solos; solo-cimento; cinza de casca de arroz; pavimentos.

ABSTRACT

In Brazil there are serious environmental problems about the constant generation of agroindustrial wastes which cause harm to the environment. The rice beneficiation process generates large amounts of rice husk and these residues are generally deposited on land causing environmental degradation due the slow biodegradation, so its use in engineering works can contribute to the conservation and preservation of the environment and provide a final destination suitable for the rice husk ash (RHA). In this study were investigated different mixtures of soil-cement-rice husk ash. The soil is from a field located within the county of Alegrete, RS. The main objective of the research was to study the characteristics of different mixtures of soil-cement-ash in order to determine an average compressive resistance equal or larger than 2,1 MPa in 7 days, as a criteria required by the DNIT and the dosage soil cement norm - NBR 12253/92. Starting from the study of similar cases already developed, experiments were performed as: dosage of mixtures, molding the specimens, characterization tests, the intermediate compaction of Proctor energy and simple compression tests. These tests allowed to assess the performance of local soil and soil improved with the inclusion contents of 6%, 10% and 13% of cement (in weight) to the soil and additions contents of 5%, 10% and 15% of ash (in weight) in the mixture soil + 10% cement. It was concluded that concentrations of 6% cement incorporated in the soil were sufficient to promote a minimal stabilization, resulting in resistance values. And the joint use of rice husk ash with cement presented technical potential for soil stabilization and may have economic advantages in their use as base material and road sub-base.

Keywords: soil stabilization, soil cement, rice husk ash; pavements.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Esquema representativo das fases do solo (ORTIGÃO, 2007).....	20
FIGURA 2 - Esquema de determinação do volume do peso específico dos grãos	23
FIGURA 3 - Curva granulométrica de um solo	24
FIGURA 4 - Ensaio de limite de plasticidade	25
FIGURA 5 - Aparelho de Casagrande.....	25
FIGURA 6 - Índice de plasticidade	26
FIGURA 7 - Curvas granulométricas de solos com diferentes graduações	30
FIGURA 8 - Soquete e cilindro para ensaio de compactação Proctor	32
FIGURA 9 - Curva típica de compactação.....	32
FIGURA 10 - Curva de compactação de diferentes tipos de solos (PINTO, 2000).....	33
FIGURA 11 - Esquema da estrutura de solos argilosos compactados (PINTO, 2002).....	34
FIGURA 12 - (a) coloração clara da CCA, (b) coloração escura da CCA.....	36
FIGURA 13 - Localização da jazida de solo.....	46
FIGURA 14 - Localização da jazida de solo.....	47
FIGURA 15 - Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul	48
FIGURA 16 - Usina Termoelétrica CAAL	49
FIGURA 17 - Fluxograma do programa experimental.	51
FIGURA 18 - (a) Coleta do solo, (b) Solo acondicionado em sacos, (c) Solo para secagem, (d) solo quarteado.....	52
FIGURA 19 - Cilindro de Abrasão Los Angeles.....	53
FIGURA 20 - (a) Cinza antes de ser moída e (b) após a moagem	54
FIGURA 21 - Preparação das misturas solo-cimento-cinza.....	55
FIGURA 22 - Peneiras no agitador	56
FIGURA 23 - Picnômetros com amostras.....	57
FIGURA 24 - Aparelho de Casagrande.....	58
FIGURA 25 - Cápsulas com as amostras	58
FIGURA 26 - Ensaio de limite de plasticidade	59
FIGURA 27 - Cápsulas com amostras	59
FIGURA 28 - Realização do Ensaio de Proctor	60
FIGURA 29 - Moldagem dos corpos-de-prova.....	61
FIGURA 30 - Corpo-de-prova danificado	61
FIGURA 31 - Cura úmida dos CPs dentro de um reservatório.....	62
FIGURA 32 - Derretimento do enxofre e caulim.....	63
FIGURA 33 - Topos dos CP's aderidos ao capeamento	63
FIGURA 34 - Serragem dos topos dos corpos-de-prova.....	64
FIGURA 35 - Topos serrados.....	64
FIGURA 36 - Corpos-de-prova para serem rompidos	65
FIGURA 37 - Execução do ECS	65
FIGURA 38 - Modo de ruptura dos corpos-de-prova submetidos a RCS.....	66
FIGURA 39 - Curva Granulometrica do Solo e Mistura com Cimento.....	68
FIGURA 40 - Curva Granulometrica do Solo e misturas solo-cimento-CCA.....	68
FIGURA 41 - Curva Granulometrica do Solo e misturas Solo-Cimento-CCA	69
FIGURA 42 - Massa específica do solo e misturas solo-cimento-cinza	71
FIGURA 43 - Grau de Saturação do solo e misturas solo-cimento-cinza.....	71
FIGURA 44 - Índice de vazios do solo e misturas solo-cimento-cinza	72
FIGURA 45 - Limites de Atterberg.....	73

FIGURA 46 - Curvas de Compactação	75
FIGURA 47 - Curvas de Compactação	75
FIGURA 48 - Curvas de Compactação	76
FIGURA 49 - Resistência à compressão simples aos 7 dias	78
FIGURA 50 - Resistência à compressão simples aos 14 dias	78
FIGURA 51 - Resistência à compressão simples aos 28 dias	79
FIGURA 52 - Resistência à compressão simples aos 56 dias	80
FIGURA 53 - Resistência à compressão simples aos 7, 14, 28 e 56 dias	81
FIGURA 54 - Resistência à compressão simples aos 7, 14, 28 e 56 dias	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Índices Físicos, Ortigão, 2007.....	22
TABELA 2 - Classificação do índice de plasticidade	26
TABELA 3 - Classificação TRB	28
TABELA 4 - Terminologia do Sistema Unificado.....	28
TABELA 5 - Esquema para classificação pelo Sistema Unificado, PINTO, 2002.....	29
TABELA 6 - Intervalos de CNU e CC.....	31
TABELA 7 - Coordenadas geográficas da jazida de solo	47
TABELA 8 - Dosagem Solo-cimento-CCA.....	55
TABELA 9 - Granulometria do Solo e misturas Solo-Cimento-CCA	67
TABELA 10 - Índices Físicos do solo e misturas	70
TABELA 11 - Classificação TRB e SUCS	72
TABELA 12 - Ensaio de Compactação.....	74
TABELA 13 - Ensaio de resistência à compressão Simples (RCS).....	77

LISTA DE SIGLAS, E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
IP – Índice de Plasticidade
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
CC – Coeficiente de Curvatura
CNU – Coeficiente de não uniformidade
CCA – Cinza de Casca de Arroz
HRB – Highway Research Board
ASTM - American Society for Testing Materials
PCA – Portland Cement Association
RCS – Resistência à Compressão Simples
CAAL – Cooperativa Agroindustrial - Alegrete
IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz
LMC – Laboratório de Materiais e Construção
UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

V = volume total;

V_v = volume de vazios;

V_a = volume de ar;

V_w = volume de água;

V_s = volume de sólidos;

P = peso total;

P_w = peso da água;

P_s = peso de sólidos;

γ_w = peso específico da água.

γ_d = Peso específico seco máximo

wot = umidade ótima

w = Umidade

e = Índice de vazios

Gr = Grau de Saturação

η = porosidade

γ_g = Peso Específico dos Sólidos (grãos)

γ_w = Peso Específico da Água

γ_{nat} = Peso Específico Natural

γ_{sat} = Peso Específico Aparente Saturado

γ_{sub} = Peso Específico Submerso

SUMÁRIO

1.0	Introdução	17
1.1	Tema da pesquisa.....	18
1.2	Delimitação do tema.....	18
1.3	Formulação da questão de estudo.....	18
1.4	Definição dos objetivos de estudo.....	18
1.4.1	Objetivo geral	19
1.4.2	Objetivos específicos.....	19
2.0	Revisão bibliográfica	20
2.1	Caracterização do solo.....	20
2.1.1	Índices Físicos	20
2.1.2	Massa Específica dos sólidos (ou dos Grãos).....	22
2.1.3	Granulometria.....	23
2.1.4	Curva de Distribuição Granulométrica.....	24
2.1.5	Limites de Atterberg.....	24
2.1.6	Classificação dos Solos	27
2.1.7	Classificação TRB – Transportation Research Board.....	27
2.1.8	Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS	28
2.1.9	Solos Granulares.....	29
2.2	Compactação do solo.....	31
2.2.1	Curva de compactação.....	32
2.3	Cimento portland	34
2.4	Cinza de casca de arroz	35
2.5	Estabilização do solo	37
2.5.1	Métodos de Estabilização de Solos	38
2.5.2	Estabilização de Solos com Cimento Portland.....	39
2.5.3	Mecanismos de Reação da mistura Solo Cimento.....	41
2.5.4	Principais Fatores que influenciam na estabilização do Solo Cimento.....	42
2.5.5	Estabilização de Solos com Cinza de Casca de Arroz e Cimento Portland	43
2.5.6	Solos apropriados para estabilização com cinza de casca de arroz e cimento Portland	44
2.5.7	Dosagem do solo cimento	44

3.0	Materiais e métodos.....	46
3.1	Introdução.....	46
3.2	Materiais.....	46
3.2.1	Solo.....	46
3.2.2	Cimento.....	48
3.2.3	Água.....	48
3.2.4	Cinza de casca de arroz.....	48
3.3	Métodos.....	49
3.3.1	Programa experimental.....	49
3.3.2	Preparação da amostra de solo.....	52
3.3.3	Preparação da amostra de cinza de casca de arroz.....	53
3.3.4	Preparação e dosagem das misturas solo-cimento e solo-cimento - CCA.....	54
3.3.5	Análise granulométrica por peneiramento.....	55
3.3.6	Peso específico dos grãos.....	56
3.3.7	Limites de Atterberg.....	57
3.3.8	Ensaio de compactação.....	60
3.3.9	Moldagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de RCS.....	61
3.3.10	Cura dos corpos-de-prova.....	62
3.3.11	Preparação dos topos dos Corpos-de-prova para o ensaio RCS.....	62
3.3.12	Ensaio de Resistência à Compressão Simples - RCS.....	64
3.3.13	Modo de ruptura dos corpos-de-prova.....	66
4.0	Resultados e discussão.....	67
4.1	Resultados dos ensaios de caracterização.....	67
4.1.1	Análise granulométrica.....	67
4.1.2	Índices Físicos.....	70
4.1.3	Classificação do solo e misturas.....	72
4.1.4	Limites de Atterberg.....	73
4.2	Resultados dos ensaios de compactação.....	74
4.3	Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples - RCS.....	76
5.0	Considerações finais e sugestões.....	83
5.1	Conclusões.....	83
5.2	Sugestões para pesquisas futuras.....	86
	Referências.....	87

Apêndice A 95
Apêndice B 109
Apêndice C 116
Apêndice D 120

1.0 Introdução

Diante da busca cada vez maior por soluções de custo reduzido, que visem à preservação dos recursos naturais, várias tentativas de valorização e reciclagem de resíduos têm sido levadas a cabo, contribuindo assim para a prática importante da sustentabilidade, atenuando a degradação ambiental e procurando reduzir a utilização de recursos naturais. Assim têm sido investigados novos materiais e processos que podem ser vantajosos como, por exemplo, a estabilização de solos com cimento e cinza de casca de arroz (CCA) que, surge como uma boa alternativa para construção de bases e sub-base de rodovias em implantação ou até mesmo como camada final de rodagem em rodovias rurais de baixo tráfego.

Sabe-se que o solo natural é um material complexo e muito variável e, devido a sua abundância, tem grande emprego na engenharia. Porém nem sempre o solo local satisfaz as especificações para sua utilização. No caso de base e sub-base de pavimentos deve-se optar por alternativas como: dimensionar os pavimentos considerando as limitações do solo; substituir o material existente por outro de melhor qualidade; ou corrigi-lo, alterando suas propriedades e criando um novo material que atenda as necessidades do projeto (NÚÑEZ, 1991).

Segundo Vendruscolo (2003) os métodos de estabilização de solos são freqüentemente classificados em três grupos: estabilização mecânica, cujo objetivo é melhorar as características do solo através de uma melhor “arrumação” das suas partículas constituintes e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica; a física, onde as propriedades do solo são alteradas através da ação do calor, da eletricidade, etc.; e a química que, modifica permanentemente as propriedades do solo através de aditivos, onde a cal e o cimento Portland que são dois agentes estabilizadores de solos mais amplamente empregados.

No Brasil, as misturas solo cimento, têm sido empregadas em trabalhos de pavimentação rodoviária desde fins da década de 30 (TRINDADE, 2006). Sendo que a partir de 1941, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) iniciou suas pesquisas nesta área.

No Estado do Rio Grande do Sul a construção de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento remonta a década de 50, quando foi executado um trecho de 29 km na BR-116, entre Porto Alegre e São Leopoldo. No início dos anos 90, os pavimentos com base de solo-cimento totalizavam 800 km, aos quais se acrescentavam outros 25 km com sub-base de solo modificado com acréscimo de cimento (PINHEIRO, 2009).

Nesse contexto, objetivou-se analisar a eficiência do cimento e da CCA na melhoria de um solo tipicamente arenoso, coletado em jazida localizada no interior na cidade de Alegrete/RS, mais especificamente no 6º sub distrito, estrada Alegrete/Catimbau, próximo ao balneário Caverá. São utilizadas diferentes combinações de teores de cimento e de CCA e verificando através de ensaios de caracterização, compactação e de resistência a compressão simples as melhorias das propriedades geotécnicas desse solo.

1.1 Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa é:

Analisar a potencialidade de utilização de um solo extraído de jazida localizada município de Alegrete, RS, a partir de ensaios de caracterização, compactação e resistência a compressão simples e posteriormente aplicar técnicas para melhoramento das propriedades desse solo com a inclusão de porcentagens de cimento Portland e cinza da casca de arroz, objetivando a utilização do solo em camadas de base e sub-base de pavimentos.

1.2 Delimitação do Tema

Estabilização e melhoria de um solo com aditivo químico cimento Portland e cinza da casca de arroz - CCA aplicado ao dimensionamento de estruturas de base e sub-base de pavimentos.

1.3 Formulação da Questão de Estudo

Quais são as propriedades Geotécnicas do solo extraído de uma jazida localizada na cidade de Alegrete/RS? Quais as melhorias obtidas com a estabilização desse solo com porcentagens de cimento e cinza de casca de arroz? Existe viabilidade técnica para utilização desse material na execução de camadas de base e sub-base de pavimentos?

1.4 Definição dos Objetivos de Estudo

Os objetivos do estudo estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos, apresentados a seguir:

1.4.1 Objetivo geral

Verificar o efeito da estabilização com cimento e cinza de casca de arroz, através de ensaios de caracterização, compactação e resistência a compressão simples de um solo coletado no município de Alegrete, RS, visando à utilização desse material em camadas de base e sub-base de rodovias.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar os parâmetros de compactação (densidade máxima aparente seca e umidade ótima) do solo local e do solo melhorado;
- ✓ Determinar algumas propriedades desse solo através de ensaios de caracterização, (Umidade Higroscópica, Limite de Plasticidade, Limite de Liquidez, Granulometria, índices de vazios e peso específico);
- ✓ Avaliar a influência do acréscimo de teores de cimento e cinza da casca de arroz na resistência mecânica do solo local.
- ✓ Verificar a influência do tempo de cura nos corpos de prova com porcentagens de cimento e nos com porcentagens de cimento e cinza da casca de arroz;
- ✓ Comparar os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova moldados com: solo natural, solo+cimento Portland e solo+cimento Portland + cinza da casca do arroz e propor o melhor traço para o solo estudado.
- ✓ Iniciar a formulação de um banco de dados, com as características dos solos existentes na região Oeste do Estado do Rio Grande do Sul.

2.0 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados assuntos que darão embasamento à pesquisa, abordando algumas considerações sobre definição e estabilização de solos, e as modificações nas propriedades físicas e mecânicas desse material com a adição de cimento e cinza de casca de arroz.

2.1 Caracterização do Solo

Segundo Vargas (1977) o solo pode ser definido como sendo um conjunto de partículas sólidas que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas por desintegração mecânica ou decomposição química. Estas partículas sólidas apresentam diferentes tamanhos, formas e composições químicas, fatos esses importantes na determinação das propriedades do solo.

2.1.1 Índices Físicos

Num solo, só parte do volume total é ocupado pelas partículas sólidas, que se acomodam formando uma estrutura. O volume restante costuma ser chamado de vazios, embora esteja preenchido por água ou ar (PINTO, 2002).

O comportamento de um solo depende da quantidade relativa de cada uma das três fases: sólida (grãos); líquida (água); gasosa (ar). A Figura 1 representa uma amostra de solo em um esquema com suas três fases separadas, com seus índices definidos e representadas pela simbologia usual.

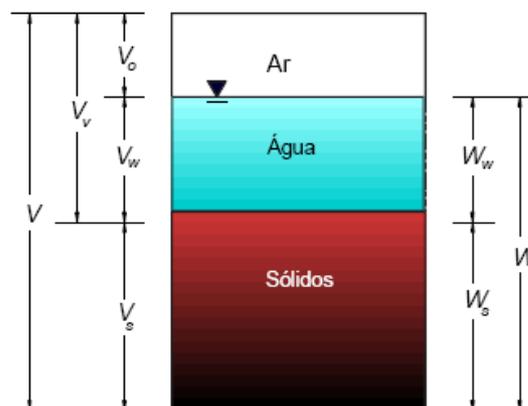


FIGURA 1 - Esquema representativo das fases do solo (ORTIGÃO, 2007).

Onde:

V = volume total;

V_v = volume de vazios;

V_a = volume de ar;

V_w = volume de água;

V_s = volume de sólidos;

P = peso total;

P_w = peso da água;

P_s = peso de sólidos;

γ_w = peso específico da água.

Para a identificação do estado do solo, empregam-se índices que correlacionam os pesos e os volumes das três fases (PINTO 2002):

- **Umidade (w, h):** relação entre o peso da água e o peso dos sólidos. Para a sua determinação, pesa-se o solo no seu estado natural, seca-se em estufa até a constância de peso e pesa-se novamente;
- **Índices de Vazios (e):** relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas. Não pode ser calculado diretamente, mas é obtido a partir de outros índices;
- **Porosidade (η):** relação entre o volume de vazios e o volume total;
- **Grau de Saturação (S, S_r):** relação entre o volume da água e o volume de vazios;
- **Peso Específico dos Sólidos (grãos) (γ_s):** relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume;
- **Peso Específico da Água (γ_w):** embora a temperatura varie um pouco, costuma-se adotar sempre igual a 10 kN/m³;
- **Peso Específico Natural (γ_{nat}):** relação entre o peso total do solo e o seu volume total. Tratando-se de compactação do solo o peso específico natural é denominado peso específico úmido;
- **Peso Específico Aparente Seco (γ_a):** relação entre o peso dos sólidos e o volume total. “Corresponde ao peso específico que o solo teria se viesse a ficar seco sem que houvesse variação de volume”. É calculado a partir do peso específico natural e da umidade;
- **Peso Específico Aparente Saturado (γ_{sat}):** corresponde ao peso específico do solo se viesse a ficar saturado sem que ocorresse variação de volume;

- **Peso Específico Submerso (γ_{sub}):** é o peso específico efetivo do solo quando submerso. Serve para cálculos de tensões efetivas. Corresponde ao peso específico natural menos o peso específico da água.

2.1.1.1 Determinação dos Índices Físicos

A Tabela 1 apresenta as equações para obtenção dos índices físicos, assim como sua simbologia.

TABELA 1 - Índices Físicos, Ortigão, 2007.

Nome	Símbolo	Equação
Índice de vazios	e	$e = V_v / V_s$
Porosidade	n	$n = V_v / V$
Grau de saturação	s	$s = V_w / V_v$
Umidade	w	$w = P_s / P_s$
Peso específico aparente úmido	γ	$\gamma = P / V$
Peso específico aparente saturado	γ_{sat}	Idem, para $S = 100\%$
Peso específico aparente submerso	γ_{sub} OU γ'	$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w$
Peso específico aparente seco	γ_d	$\gamma_d = P_s / V$
Densidade dos grãos	G_s	$G_s = \gamma_s / \gamma_w$

Dentre os índices descritos, a umidade, o peso específico dos grãos e o peso específico natural são determinados em laboratório, os demais são calculados através das fórmulas de correlação.

2.1.2 Massa Específica dos sólidos (ou dos Grãos)

O ensaio de massa específica dos sólidos é normatizado pela ABNT: NBR-6508/84.

A Norma prescreve o uso de picnômetros e a realização de pelo menos dois ensaios, ver Figura 2.

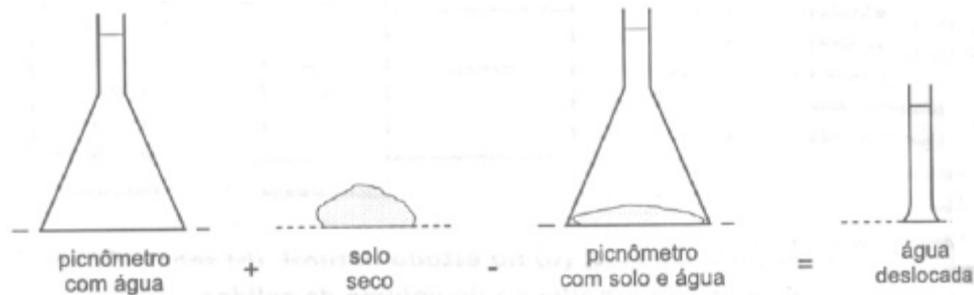


FIGURA 2 - Esquema de determinação do volume do peso específico dos grãos

Coloca-se um peso seco conhecido do solo num picnômetro e, completando-se com água é determinado o peso total. O peso do picnômetro preenchido só com água, mais o peso do solo, menos o peso do picnômetro com solo e água, é o peso da água que foi substituída pelo solo. Deste peso, calcula-se o volume de água que foi substituído pelo solo e que é o volume de solo. Com o peso e o volume têm-se o peso específico dos grãos.

O peso específico dos grãos dos solos varia pouco de solo pra solo e por si, não permite identificar o solo em questão, mas é necessário para cálculo de outros índices. Os valores situam-se em torno de 27 kN/m^3 , sendo este valor adotado quando não se dispões do valor específico para o solo em estudo. Grãos de quartzo (areia) costumam apresentar pesos específicos de $26,5 \text{ kN/m}^3$ e argilas lateríticas, em virtude da deposição de sais de ferro, valores até 30 kN/m^3 , (PINTO 2002).

2.1.3 Granulometria

Vários pesquisadores, tais como (ABIKO, 1980; BARBOSA; TOLÊDO FILHO, 1997; CAPUTO, 1980; HOUBEN; GUILLAUD, 1994; TERZAGHI; PECK, 1962; VARGAS, 1977) descreveram as propriedades do solo, sendo a composição mineralógica, a composição granulométrica e a estrutura morfológica, características essenciais para o estudo e aplicação do solo como material de construção. Com base nestes autores, as partículas do solo são assim classificadas:

- Pedregulho (\varnothing 4,80 mm a 50 mm) e areia (\varnothing 0,05 mm a 4,80 mm): são sólidos de quartzo (SiO_2 cristalina) de formas arredondadas ou angulares e com rugosidade superficial, que mobilizam o atrito interno entre os grãos e, conseqüentemente, propiciam maiores resistências aos esforços mecânicos.
- Silte (\varnothing 0,005 mm a 0,05 mm): são sólidos de forma achatada ou poliédrica que apresentam pouca ou nenhuma plasticidade e propiciam a diminuição do atrito interno devido ao rearranjo das partículas ao sofrer compactação.

- Argila (\emptyset inferior a 0,005 mm): são partículas lamelares ou alongadas, quimicamente ativas e denominadas de argilominerais. Apresenta grande superfície específica, alto grau de plasticidade e pode ser constituída por três tipos: caulinita, ilita e montmorilonita. Estes componentes são os que podem reagir bem ou não com os estabilizantes químicos incorporados ao solo, devido à sua capacidade de troca catiônica.

2.1.4 Curva de Distribuição Granulométrica

Os resultados do ensaio de análise granulométrica são apresentados através de uma curva de distribuição granulométrica, traçada por pontos em um diagrama semi-logarítmico. No Brasil este ensaio é padronizado pela NBR 7181/84, ver Figura 3.

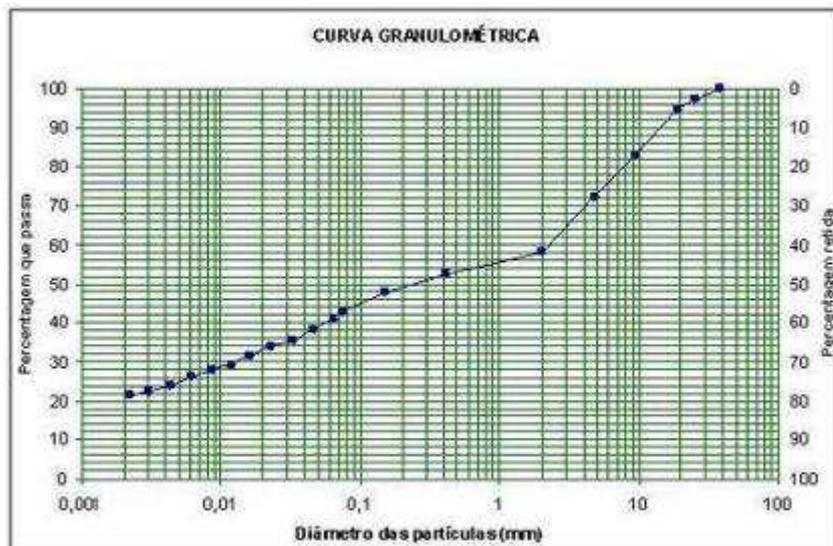


FIGURA 3 - Curva granulométrica de um solo

Segundo (Das, 2007), a curva de distribuição granulométrica mostra não somente os tamanhos das partículas presentes em solo, mas também o tipo de distribuição de partículas de vários tamanhos.

2.1.5 Limites de Atterberg

Outro ponto importante para caracterizar o solo é quanto à sua plasticidade, ou seja, a propriedade do solo que consiste na sua maior ou menor capacidade de ser moldado sob certas condições de umidade. Para tanto, existem os limites de consistência do solo, também chamados de Limites de Atterberg:

- **Limite de plasticidade (LP):** segundo Caputo, (1983) é determinado pelo cálculo da porcentagem de umidade para a qual o solo começa se fraturar quando se tenta moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e de 100 mm de comprimento. É realizado manualmente por repetidos rolamentos da massa de solo sobre a placa de vidro despolido, (Figura 4). No Brasil este ensaio é padronizado pela NBR 7180/84.



FIGURA 4 - Ensaio de limite de plasticidade

- **Limite de Liquidez (LL):** De acordo com Das, (2007) o limite de liquidez é definido como o teor de umidade no ponto e transição do estado plástico para o estado líquido. A determinação pode ser feita pelo aparelho de Casagrande (Figura 5), que consiste em um prato de latão em forma de concha, sobre um suporte de ebonite. O solo é preparado segundo a NBR 6457/86, sendo realizada uma ranhura no centro da amostra com auxílio de cinzéis e efetuadas quedas sucessivas ao prato repetidamente, com altura de 1 cm e intensidade constante (CAPUTO, 1983).

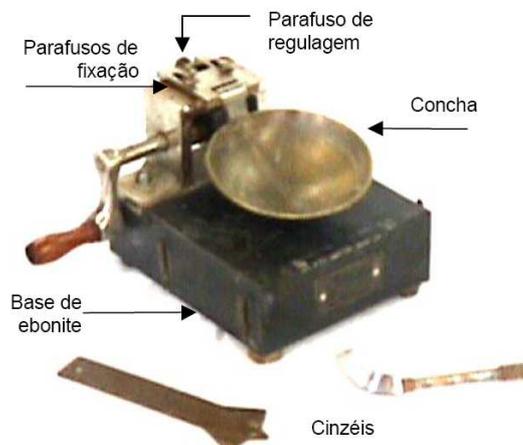


FIGURA 5 - Aparelho de Casagrande

- **Índice de Plasticidade (IP):** é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade de um solo (Figura 6). Para Caputo, (1983), a zona em que o terreno se encontra no estado plástico, máximo para as argilas e nulo para areias, fornece um critério para se ajuizar do caráter argiloso de um solo. Assim quanto maior o IP, mais plástico será o solo.

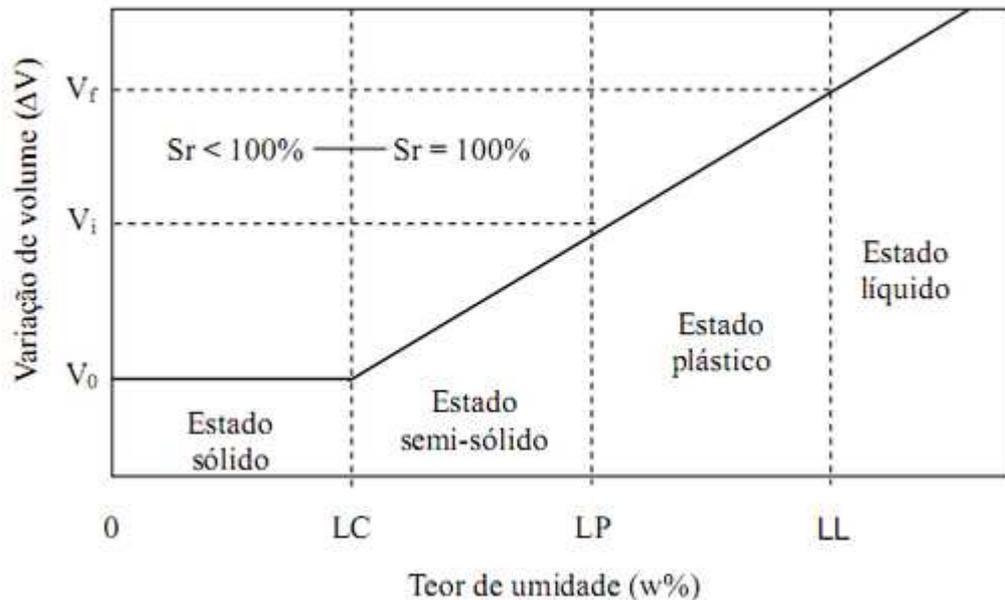


FIGURA 6 - Índice de plasticidade

O índice de plasticidade é classificado de forma qualitativa (DAS, 2007 apud BURMISTER, 1949) conforme mostra a Tabela 2:

TABELA 2 - Classificação do índice de plasticidade

IP	Descrição
0	Não-plástico
1 - 5	Ligeiramente plástico
5 - 10	Plasticidade baixa
10 - 20	Plasticidade média
20 - 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

2.1.6 Classificação dos Solos

O objetivo da classificação, sob o ponto de vista da engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo, ou pelo menos orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema. Segundo Pinto (2002) existem diversas formas de classificar um solo, seja pela sua origem, estrutura, pelo preenchimento de vazios, etc. Os sistemas de classificação mais conhecidos na engenharia de solos são aqueles que se baseiam no tipo e no comportamento das partículas que o constituem. Os sistemas de classificação que se baseiam nas características dos grãos que constituem os solos têm como objetivo a definição de grupos que apresentam comportamentos semelhantes sob o aspecto de interesse da engenharia civil. Nestes sistemas, os índices geralmente empregados são a composição granulométrica e os índices de Atterberg (PINTO, 2002).

Os dois sistemas mais empregados universalmente são o Sistema de Classificação do TRB antigo Highway Research Board (HRB) e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (Unified Soil Classification System – USCS).

2.1.7 Classificação TRB – Transportation Research Board

A classificação TRB, tem origem no sistema empregado pela Administração de Estradas Públicas dos Estados Unidos. Tem como critério de classificação a granulometria, limite de liquidez e o índice de plasticidade.

Neste sistema, a classificação dos solos se divide em dois grupos: solos grossos (quando a % passante na peneira nº 200 (0,075mm) é inferior a 35%), compreendem os grupos A-1, A-2 e A-3, e solos finos (quando a % passante na peneira nº 200 é superior a 35%), compreendem os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 (PINTO, 2002).

A Tabela 3 apresenta o quadro de classificação dos solos. Determina-se o grupo que o solo pertence por processo de eliminação, da esquerda para à direita no quadro de classificação. Partindo da esquerda, o primeiro grupo com o qual os valores do solo ensaiado coincidir indicará a classificação (ALMEIDA, 2005).

TABELA 3 - Classificação TRB

Tabela TRB											
Classificação Geral	SOLOS GRANULARES (P200 < 35 %)							SOLOS SILTO-ARGILOSOS (P200 > 35%)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
P10	< 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P40	< 30	< 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-
P200	< 15	< 25	< 10	< 35	<35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35
LL	-	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
IP	< 6	< 6	NP	< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10
Índice de grupo (IG)	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Tipos de material	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		areia fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Classificação como subleito	Excelente a bom					Regular a mau					
Podemos acrescentar à estes o tipo A-8:solos orgânicos/turfas, imprestáveis como bases de pavimentos											

2.1.8 Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS

O Sistema Unificado de Classificação foi idealizado por Casagrande. Esta classificação foi preparada inicialmente para aplicações no dimensionamento de pavimentos de pistas de aeroportos (PINTO, 2002).

Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras como representado na Tabela 4.

TABELA 4 - Terminologia do Sistema Unificado

Símbolos	Português	Inglês
G	Pedregulho	gravel
S	Areia	sand
M	Silte	mo
C	argila	clay
O	solo orgânico	organic
W	bem graduado	well graded
P	mal graduado	poor graded
H	alta compressibilidade	high liquid limit
L	baixa compressibilidade	low liquid limit
Pt	Turfas	peat

As cinco letras superiores indicam o tipo principal do solo e as quatro seguintes correspondem a dados complementares dos solos.

Para a classificação, por este sistema, o primeiro aspecto a considerar é a porcentagem de finos presente no solo, considerando-se finos o material que passa na peneira nº 200 (0,075 mm). Se esta porcentagem for inferior a 50%, o solo será considerado como solo de granulação grosseira, G ou S. Se for superior a 50%, o solo será considerado de granulação fina, M, C ou O, ver Tabela 5.

TABELA 5 - Esquema para classificação pelo Sistema Unificado, PINTO, 2002

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
		% P #200 > 12	GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
		% P #200 > 12	SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.
% P #200 < 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

2.1.9 Solos Granulares

Sendo de granulação grosseira, o solo será classificado como pedregulho ou areia, dependendo de qual destas duas frações granulométricas predominarem. Os solos granulares podem ser denominados de “bem graduados” ou “mal graduados” (PINTO, 2002).

O solo bem graduado é caracterizado por uma distribuição contínua de diâmetros equivalentes em uma ampla faixa de tamanho de partículas como pode ser visto na Figura 7, (curva a). As partículas menores ocupam os vazios deixados pelas maiores criando um bom entrosamento resultando em melhores condições de compactação e de resistência.

No caso do solo ser mal graduado, sua curva granulométrica será uniforme (curva c). Existe ainda casos onde pode haver ausência de uma faixa de tamanhos de grãos, sendo a granulometria considerada aberta (curva b) (MACHADO, 2002).

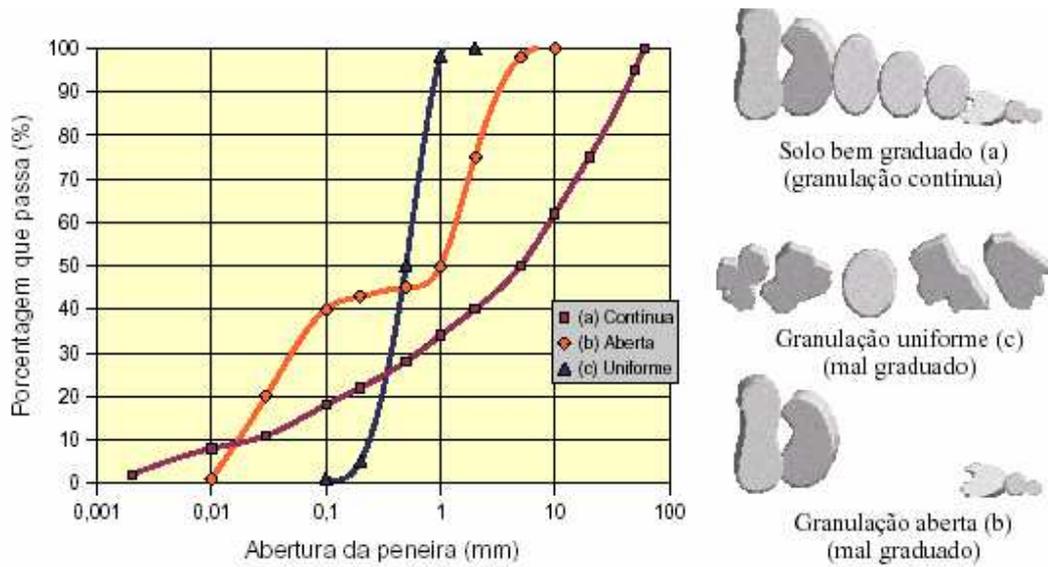


FIGURA 7 - Curvas granulométricas de solos com diferentes graduações

Esta característica dos solos granulares é expressa pelo “coeficiente de não uniformidade” (CNU) definido pela relação:

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

O “D sessenta” é o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas e, analogamente “D dez” é o diâmetro que na curva granulométrica, corresponde à percentagem que passa igual a 10%.

Outro coeficiente também utilizado é o coeficiente de curvatura (CC) da curva granulométrica.

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2)$$

O coeficiente de não uniformidade (CNU) indica a amplitude dos grãos enquanto que o coeficiente de curvatura (CC) fornece a idéia do formato da curva permitindo detectar descontinuidades no conjunto (MACHADO, 2002).

Quanto maior é o valor de CNU mais bem graduado é o solo. Solos que apresentam $CNU = 1$ possuem uma curva granulométrica verticalizada (solo mal graduado – curva granulométrica c – Figura 7c). Solos bem graduados apresentarão CC entre 1 e 3. Se o valor de CC for menor que 1, a curva será descontínua com ausência de grãos (curva granulométrica b – Figura 7b). Difícilmente ocorrem areias com valores de CC fora do

intervalo de 1 a 3. Daí, a pouca importância que se dá a esse coeficiente quando se trabalha com solos arenosos.

A classificação da curva granulométrica pode ser feita acordo com os seguintes intervalos para CNU e CC, ver Tabela 6:

TABELA 6 - Intervalos de CNU e CC

CNU < 5	muito uniforme
5 < CNU < 15	uniformidade média
CNU > 15	não uniforme
1 < CC < 3	solo bem graduado
CC < 1 ou CC > 3	solo mal graduado

2.2 Compactação do Solo

A compactação do solo define-se como processo de aplicação sobre este de cargas com a finalidade de reduzir seu volume de vazios, a fim de se conseguir um maior peso específico seco e conseqüentemente uma maior resistência (VARGAS, 1977).

Proctor (1933) publicou em seus estudos que a relação entre o peso específico seco e a umidade do solo, relação esta conseguida através da aplicação de uma energia de compactação (certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou certo número de golpes de um soquete sobre o solo contido num molde cilíndrico) mostrado na Figura 8, obtendo-se como resposta final uma curva de compactação do solo, relacionando a umidade *versus* peso específico aparente seco. Dos trabalhos de Proctor surgiu o mundialmente utilizado e padronizado ensaio de compactação, mais conhecido como ensaio de Proctor (PINTO, 2002).

Segundo Grande, (2003) Proctor percebeu que para uma energia de compactação constante, ao se adicionar água no solo, sua densidade aparente aumentava até certo ponto, chamado de umidade ótima. Ao acrescentar teores de umidade acima do ótimo a densidade torna a reduzir, pois o excesso de água absorve parte da energia de compactação e redistribui ao sistema, afastando assim as partículas sólidas.

Conforme Balbo (2007) relata ser de extrema importância à determinação da umidade natural do solo, lembrando que há uma variação nesta ao longo do ano, de fundamental

conhecimento, pois a umidade presente pode alterar expressivamente a massa específica desejável para o solo depois de compactado.



FIGURA 8 - Soquete e cilindro para ensaio de compactação Proctor

2.2.1 Curva de compactação

A curva de compactação é traçada com base nos dados obtidos no ensaio de compactação para os diferentes teores de umidade, a umidade ótima ($w_{ót}$) e o peso específico seco máximo ($\gamma_{d,máx}$) são obtidos através desta curva. Para o traçado da curva de compactação é conveniente a determinação de pelo menos cinco pontos, um próximo à umidade ótima e os outros dois no ramo úmido à direita da curva (CAPUTO, 1983), (Figura 9).

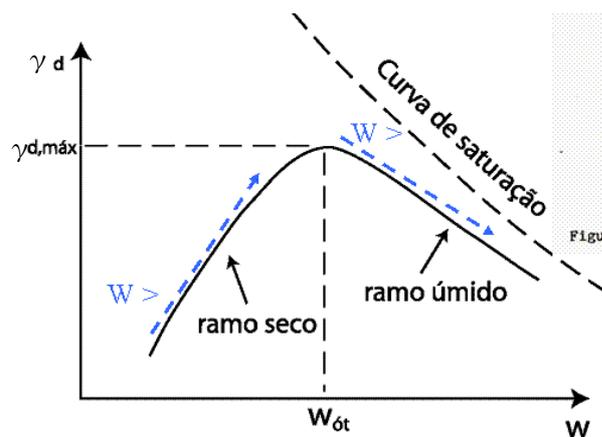


FIGURA 9 - Curva típica de compactação

As diferentes curvas de compactação dos solos com granulometrias variando das argilas aos pedregulhos compactados na energia normal do ensaio de compactação segundo Pinto (2002) pode ser visto um maior percentual de umidade ótima para as argilas e massa

específica aparente seco menor com relação a solos siltosos e arenoso, conforme expressa a Figura 10.

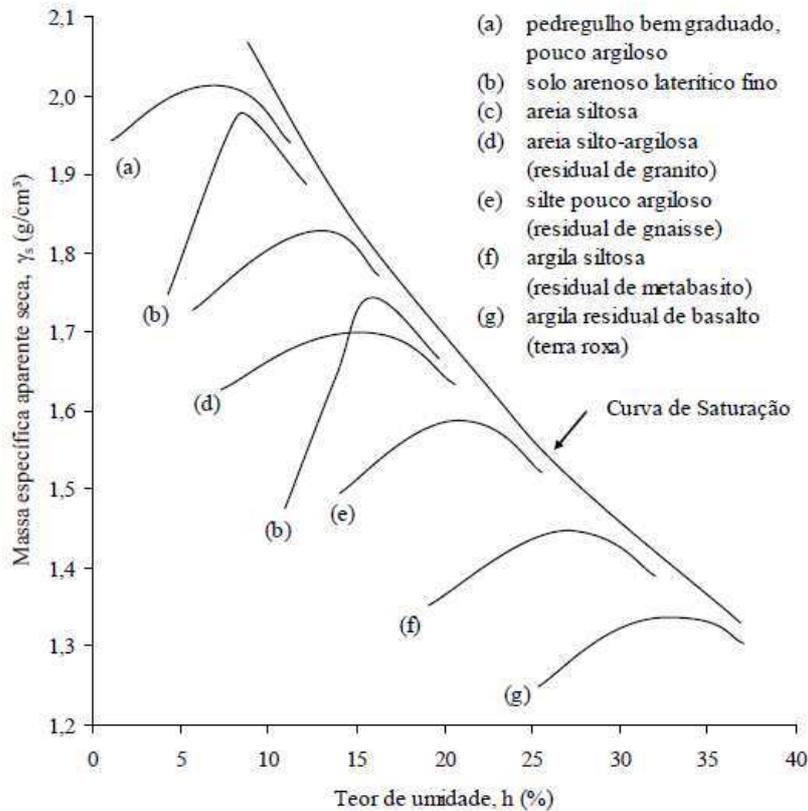


FIGURA 10 - Curva de compactação de diferentes tipos de solos (PINTO, 2000)

Segundo Lambe (1958) o grau de variação estrutural com a umidade é função de cada solo. Alguns apresentam variações substancialmente expressivas com relação à distribuição das partículas até o paralelismo entre elas, o que em outros esta variação pode ser muito sensível.

A Figura 11 apresenta curvas de um mesmo solo compactado com diferentes energias.

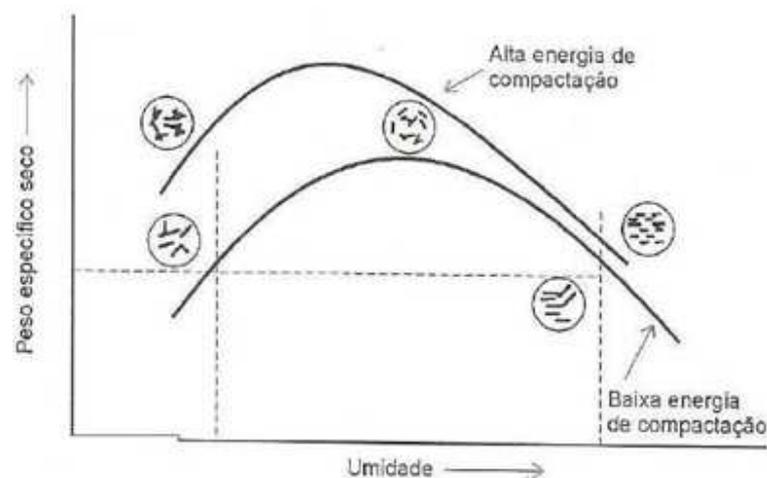


FIGURA 11 - Esquema da estrutura de solos argilosos compactados (PINTO, 2002).

2.3 Cimento Portland

A palavra cimento é originada do latim *Caementu*, que designava na velha Roma uma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água (ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland).

Segundo Taylor (1992) o cimento Portland é uma substância alcalina, composta, em sua maior parte, de silicatos e aluminatos de cálcio que, por hidrólise, dão origem a compostos cristalinos hidratados e gel. Os principais compostos, silicatos e aluminatos, liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais que se formam apresentam formas alongadas, prismáticas, ou formas de agulhas de monossilicatos de cálcio hidratados e de aluminatos hidratados; esses cristais aciculares acabam se entrelaçando à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos. O gel do cimento desenvolve-se espontaneamente sobre a superfície mineral, ligando-se aos oxigênios expostos, crescendo por polimerização dos grupos SiO_4 e incorporando íons de cálcio livre à superestrutura formada pelos grupamentos de SiO_4 .

Basicamente, o processo de fabricação do cimento Portland consiste, de maneira sucinta, em moer a matéria-prima, misturá-la em determinadas proporções e submetê-la à queima em forno rotativo a elevadas temperaturas. O produto obtido na queima é o clínquer que é finamente moído. Para controlar a pega e o endurecimento, é acrescentado o gesso. Este material pode receber outras adições posteriormente, como a escória de alto forno, as cinzas volantes, as sílicas ativas, etc. (NEVILLE, 1997).

No Brasil, são produzidos oito tipos de cimento Portland, que possuem a seguinte nomenclatura, (ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland).

- ❖ CP I – Cimento Portland Comum
- ❖ CP I-S - Cimento Portland Comum com adição
- ❖ CP II – E – Cimento Portland Composto com Escória

- ❖ CP II – Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
- ❖ CP II – F – Cimento Portland Composto com Filer
- ❖ CP III – Cimento Portland de Alto Forno
- ❖ CP IV - Cimento Portland Pozolânico
- ❖ CP V – ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

A compreensão dos tipos de cimento e de suas propriedades, aliada ao correto entendimento das variáveis que constituem os solos, significa ampliar as possibilidades de desenvolvimento do solo-cimento-cinza de casca de arroz na busca de um material de melhor desempenho mecânico frente às solicitações de serviço.

2.4 Cinza de Casca de Arroz

A utilização de resíduos de diferentes processos industriais vem apresentando um grande potencial de aproveitamento na área da construção civil e rural, requerendo uma avaliação não só nos aspectos econômicos como nos aspectos tecnológicos (resistência mecânica, módulo de elasticidade, estabilidade química e geométrica, durabilidade). Dentre os resíduos agroindustriais, as cinzas vegetais ocupam lugar de destaque, pois apresentam composição físico-química com potencial para produção de material aglomerante e quantidade disponível suficiente para justificar o desenvolvimento de sistema de manuseio, processamento e transporte deste resíduo (FERREIRA et al., 1997).

A casca de arroz pode ser definida como uma capa lenhosa oca, dura e altamente silicosa, composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra. Segundo os autores, a sílica amorfa apresenta estrutura alveolar e encontra-se concentrada na superfície externa da casca. Já a sílica cristalina na casca é provavelmente decorrente da contaminação do solo por areias.

Segundo Metha (1975) a casca de arroz quando queimada a céu aberto ou em fornos convencionais produz cinza silícia cristalina. Contudo quando incinerada em fornos a temperatura controlada, o resíduo é uma cinza branca altamente reagente que misturada com cal se transforma em um cimento estruturalmente tão bom quanto o cimento Portland.

No Brasil são produzidos em torno de 10 milhões de toneladas de arroz, o Estado do Rio Grande do Sul tem 49,5% de participação nessa produção. Segundo o Instituto Rio Grandense do Arroz IRGA - 2011 o município de Alegrete/RS produz em média aproximadamente 437.000 toneladas de arroz por ano. Segundo Ali et al (1992) a cada 4

toneladas de arroz produzido, 1 tonelada é de casca. Por isso, em Alegrete são geradas aproximadamente 110.000 toneladas de casca de arroz. O grande volume de resíduos gerados gera problemas de disposição final além de problemas relacionados com ambiente (DELLA et al., 2001; POUHEY, 2006; PRUDÊNCIO JR. et al., 2003) afirmaram que as empresas beneficiadoras de arroz são as principais consumidoras da casca de arroz.

Segundo Metha (1975) Nakata et al (1989) citado por Della et al (2001), cinzas oriundas de cascas queimadas entre 400 °C e 500 °C possuem área superficial entre 120 m²/g a 150 m²/g, quando queimadas a 600 °C possuem área superficial em torno de 80 m²/g, as temperaturas de queima oscilando em torno de 800 °C resultam em cinzas com área superficial entre 5 m²/g a 10 m²/g, e acima de 900 °C, o valor da área superficial encontra-se abaixo de 5 m²/g. A tendência ao decréscimo da área superficial com o aumento da temperatura está relacionada com o fato da superfície das partículas sofrerem fusão e agregarem-se umas às outras. Quanto à massa específica, esta propriedade varia entre 1,30 g/cm³ a 2,20 g/cm³.

Conforme Dafico e Prudêncio Jr. (2002) e Krishnarao et al. (2001) a cinza de casca de arroz, em geral, resulta em cor que varia do cinza Figura 12(a) ao preto Figura 12(b), devido à presença de impurezas inorgânicas junto ao carbono fixo não queimado, ou ainda branco e/ou rosado, o que indica combustão em elevadas temperaturas e longo tempo de exposição.

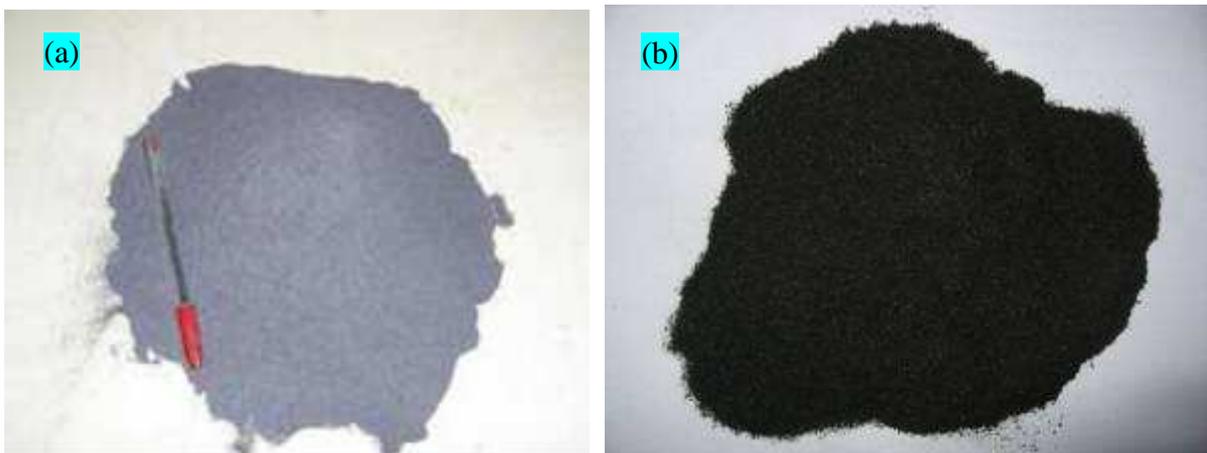


FIGURA 12 - (a) coloração clara da CCA, (b) coloração escura da CCA

De acordo com Freire (1991) quando a calcinação da casca de arroz é realizada a temperaturas controladas (400 °C a 850 °C), há a remoção da matéria orgânica e a preservação da sílica no estado amorfo, resultando em cinzas de maior solubilidade em meio aquoso e com capacidade aglomerante. Dessa forma, para a permanência da sílica altamente

reativa, é recomendada a queima da casca de arroz a temperaturas entre 450 °C a 700 °C, durante 3 a 4 horas

Foram observados através pesquisas de Isaias (1995) e Santos (1997) onde os concretos e argamassas elaborados com cimento pozolânico à base de cinza de casca de arroz (obtida sem controle de temperatura e com presença de cristais de sílica) mostraram bons resultados quando submetidos a ensaios de qualidade. Os referidos autores explicaram que este notável desempenho mecânico ocorreu devido ao efeito “filler” (preenchimento de vazios) gerado pela presença da sílica de elevada área específica e do carbono não combusto, que é um material extremamente fino; ambos constituintes das cinzas de casca de arroz estudadas.

De acordo com Freire (1991) a cinza de casca de arroz misturada com cal resulta em um cimento estruturalmente tão bom quanto o cimento Portland, salvo que esta mistura apresenta baixa resistência inicial, uma vez que qualquer ganho de resistência deverá ser obtido da reação pozolânica entre a cinza e a cal hidratada. Já quando misturadas com o cimento Portland, a cinza resulta num material cimentante que, por sua vez, permite a obtenção de argamassas e concretos de alta resistência.

Portanto, justifica-se o interesse do estudo dos efeitos da adição da cinza de casca de arroz no solo-cimento para dimensionamento de estruturas de base e sub-base de pavimentos; por outro lado, a substituição pelo menos parcial do solo por cinzas de casca de arroz pode resultar em um produto final ecologicamente correto e de boas propriedades físico-mecânicas.

2.5 Estabilização do Solo

A estabilização de solos consiste em modificar as características do sistema solo - água - ar com a finalidade de se obter propriedades necessárias para a aplicação desejada. As principais modificações mecânicas ocorridas no processo de estabilização do solo são: mudança na densidade, na resistência mecânica, na compressibilidade, na permeabilidade e na porosidade do solo (BARBOSA e TOLÊDO FILHO, 1997).

Desde eras remotas, conforme relatou Abiko (1983) o homem utilizou diversas técnicas para conferir melhor comportamento ao solo, tornando-o mais resistente ao intemperismo. Citou o emprego de cal, asfalto, palha e outras fibras vegetais, urina, excremento de gado, melaço, gordura de baleia e resinas diversas.

Uma distinção é feita entre solo estabilizado e solo melhorado ou tratado (NÚÑEZ, 2003 apud VENDRUSCOLO, 2003). Ele designa o primeiro como sendo misturas de solo e

aditivo que possuem características de durabilidade e resistência que permitem o seu emprego como base de pavimentos rodoviários. Já o segundo devido ao seu baixo teor de aditivos, caracteriza solos que não possuem propriedades para serem utilizados como base de pavimentos.

Segundo Guimarães (1997) a escolha do processo de estabilização do solo depende de uma série de fatores como viabilidade econômica, finalidade do produto final, características dos materiais empregados e propriedades do solo que se deseja modificar.

2.5.1 Métodos de Estabilização de Solos

De acordo com Marques (2005) podem ser citados os seguintes tipos de estabilização: mecânica, granulométrica, química, elétrica e térmica.

- **Estabilização Mecânica**

Visa dar ao solo (ou mistura de solos) uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima. Também conhecida como estabilização por compactação. É um método que sempre é utilizado na execução das camadas do pavimento, sendo complementar a outros métodos de estabilização.

- **Estabilização Granulométrica**

Consiste da alteração das propriedades dos solos através da adição ou retirada de partículas de solo. Este método consiste, basicamente, no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada especificação.

- **Estabilização Química**

Quando utilizada para solos granulares visa principalmente melhorar sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas) por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados são o Cimento Portland, Cal, Pozolanas, materiais betuminosos, resinas, etc.

- **Estabilização Elétrica**

Consiste na passagem de uma corrente elétrica pelo solo a estabilizar. As descargas sucessivas de alta tensão são usadas no adensamento de solos arenosos saturados e as de baixa tensão contínua são usadas em solos argilosos empregando os fenômenos de eletromose, eletroforese e consolidação eletroquímica. Não é utilizada em pavimentos.

- **Estabilização Térmica**

É feita através do emprego da energia térmica por meio de congelamento, aquecimento ou termosose. A solução do congelamento normalmente é temporária, alterando-se a textura do solo. O aquecimento busca rearranjos na rede cristalina dos minerais constituintes do solo. A termosose é uma técnica de drenagem onde se promove a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura (MARQUES, 2005). Também não é utilizada em pavimentos.

Além destes, tem surgido nos últimos tempos, uma grande variedade de outros métodos e processos construtivos que visam oferecer ao solo, características de resistência e melhoria de suas qualidades naturais e que podem ser classificados como “métodos especiais de estabilização”. É possível citar como exemplo, os solos reforçados com geossintéticos, drenos verticais de areia; micro estacas; estabilização via fenômenos de condução em solos, entre outros (MARQUES, 2005).

2.5.2 Estabilização de Solos com Cimento Portland

Conforme afirma Bauer (2001) o descobrimento do solo-cimento foi mérito de um engenheiro inglês, H. E. Brook-Bradley, que aplicou o produto no tratamento de leitos de estradas para veículos de tração animal, ao sul da Inglaterra. Nos Estados Unidos da América o uso do solo-cimento acontece a partir de 1917, quando o engenheiro T. H. Amies o utilizava, e por consequência o material recebeu o nome de soloamies. Os primeiros estudos de solo-cimento em grande escala foram feitos por Moore-Fields e Mill, também nos Estados Unidos da América em 1932. Em 1944 a American Society for Testing Materials (ASTM) normalizava os ensaios para utilização do produto.

Comenta Casanova (2004) que, no Brasil, o solo-cimento começou a ser empregado em construções em 1948 para confecção de bases e sub-bases de pavimentos de estradas.

O solo-cimento é uma mistura íntima e bem proporcionada de solo com cimento Portland e água, promovendo uma cimentação das partículas de solo e assim melhorando as propriedades da mistura como resistência mecânica, durabilidade e a resistência à ação da água (BAUER, 2001).

Na estabilização do solo com cimento ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilo-minerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado (ABIKO, 1980).

As reações químicas no sistema solo cimento ocorrem com boa intensidade se a fração argila presente no solo contiver grandes percentagens de caulinita e illita, pois estas fixam menos cal, possibilitando melhor hidratação do cimento (BARBOSA, 1997; TOLÊDO FILHO, 1997). Já a argila do tipo montmorilonita enfraquece a resistência do cimento devido à alta absorção dos íons de cálcio pela ligação interfoliar frágil existente nesta argila. Portanto, de uma forma geral, a ação do cimento traz bons resultados em solos arenosos.

Segundo Marques (2003) os solos siltosos e argilosos foram descartados devido a dificuldades do processo de execução. Todo tipo de solo pode, a princípio, ser estabilizado com cimento, porém, os solos finos requerem teores elevados de cimento, ou seja, maiores que 10%, tornando-se assim muitas vezes inadequados para fins de estabilização devido ao fator econômico.

De acordo com Vargas (1977) qualquer solo inorgânico pode ser estabilizado com cimento, porém, para que seja economicamente bem sucedido o solo deve atender determinadas exigências, não contendo:

- Mais que 2% de matéria orgânica;
- Nem mais que 0,2% de sulfatos;
- Nem grãos de dimensões maiores que 75 mm.

É importante ter a presença de algum tipo de argilomineral presente no solo para a estabilização com cimento. Assim Lima (2001) estudando o comportamento de diversos minerais argilosos com cimento constatou que:

- Solos caulíníticos e ilíticos são mais susceptíveis à estabilização com cimento, quando comparados com os solos que contêm grandes quantidades de argilominerais expansivos;

- Solos muito argilosos são de difícil estabilização, pois exigem grandes quantidades de cimento. No entanto, em algumas situações, um tratamento preliminar com cal e posterior adição de cimento podem conduzir a resultados aceitáveis;
- Outros tipos de atuações do cimento nos minerais de argila estudados relatam a redução dos índices de plasticidade e os aumentos nos limites de contração.

Segundo Lima et al. (1993) uma das principais vantagens da utilização do solo-cimento é que a mistura possui resistência e traz economia quando aplicado como base de pavimentos.

Solos com grande quantidade de argila possuem dificuldade de mistura e requerem uma elevada quantidade de aditivos para que se consiga significativa alteração em suas propriedades (CASANOVA, 2004).

2.5.3 Mecanismos de Reação da mistura Solo Cimento

Segundo Marques (2003) através das reações químicas que são geradas na hidratação do cimento (mistura do cimento com água), onde se desenvolvem vínculos químicos entre as superfícies dos grãos do cimento e as partículas de solo que estão em contato com o mesmo.

Segundo Moh (1962) há liberação da cal (hidróxido de cal) que geralmente reage com os componentes químicos da parte do solo inerte, havendo inclusive alteração de pH e dos componentes químicos já anteriormente formados pela hidratação do cimento

Na mistura solo-cimento, as reações podem ser representadas pelas equações quantitativas, apresentadas nas equações (3) e (4), evidenciando apenas as reações que envolvem o silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), por ser este o constituinte de maior atuação do cimento (MOH, 1962).



O silicato de cálcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$) é assumido como sendo o produto final da hidratação tanto do $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ como do $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Segundo Pitta et al. (1988) o silicato originado do $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ é estável somente quando em contato com soluções pozolânicas, cujos produtos endurecem em uma velocidade bem mais lenta (FERRAZ, 1994).

Apesar de nos solos argilosos ocorrerem a formação de dois tipos de compostos cimentantes observa-se que os solos de características arenosas respondem melhor à

estabilização com cimento (CROFT, 1968). Este fato ocorre porque, com a adição de cimento ao solo, os minerais argilosos do mesmo, ao reagirem com cal formada na hidratação dos compostos do cimento, ocasionam uma queda do pH da mistura que afeta a hidratação e o endurecimento do cimento (FERRAZ, 1994).

2.5.4 Principais Fatores que influenciam na estabilização do Solo Cimento

Segundo Marques (2003) os principais fatores que influenciam na estabilização do solo cimento são:

- **Tipo de solo:** a estabilização com cimento pode ser feita em todo tipo de solo, entretanto por exigirem baixos teores de cimento os solos arenosos (granulares) são mais eficientes que os argilosos.
- **Teor de cimento:** o teor de cimento a ser adotado deve ser o menor dos teores capaz de atingir a resistência média à compressão simples, sendo que esta seja superior a 2,10 MPa após 7 dias de cura conforme a NBR 12253/92. Sendo que esta resistência aumenta linearmente quanto maior for a quantidade de cimento adicionada a mistura para um mesmo tipo de solo. Quanto maior a porcentagem de silte e argila presentes no solo, maior será o teor de cimento exigido.
- **Métodos de mistura e compactação:** é recomendado que a compactação inicie logo após a mistura e que seja completada dentro de duas horas para que não ocorram significantes decréscimos tanto na massa específica seca máxima quanto na resistência do produto final. Se o tempo mistura/compactação for grande, são produzidas grandes quantidades de argila floculada, que irá absorver a compactação.
- **Teor de umidade:** devido à ação floculante o acréscimo de cimento ao solo tende a produzir um aumento no teor de umidade e uma redução na massa específica seca máxima. O teor de umidade ótimo que conduz à máxima massa específica seca não é necessariamente o mesmo para a máxima resistência. Este último está localizado no ramo seco para os solos arenosos e no ramo úmido para os solos argilosos.
- **Condições de cura:** assim como no concreto, a mistura solo cimento ganha resistência por processo de cimentação das partículas durante vários meses ou anos, sendo maior até os 28 dias iniciais. Neste período deve ser garantido um teor de umidade adequado à mistura compactada. Diferente do concreto, a temperatura de cura deve ser elevada para propiciar elevadas resistências.

Independente da procedência das diretrizes técnicas, as mesmas recomendam à avaliação do solo sob os aspectos de distribuição granulométrica, índice de plasticidade e umidade ótima de compactação para obter um produto final com bom desempenho físico-mecânico e durabilidade (DELGADO, 2007 e GUERRERO, 2007).

Os solos com índices de plasticidade e limites de liquidez elevados são mais difíceis de serem estabilizados. Segundo relatos de Pitta (1980) solos muito plásticos podem requerer teores tão altos quanto 15% ou 20% de cimento, em massa. Este fato também foi observado por Milani (2005) durante pesquisas sobre a estabilização de um solo argiloso, sendo necessária a adição de 18% de cimento, em massa, para que a mistura de solo-cimento atingisse resistência mínima para fins de utilização como tijolos prensados.

O teor ótimo de cimento a ser adicionado ao solo depende dos critérios técnicos (resistência, durabilidade) e econômicos que se pretende alcançar. Em geral, a resistência do solo-cimento cresce com o aumento do teor de cimento, dependendo do tipo de solo empregado; porém há uma tendência deste crescimento ser pequeno além de certo teor do aditivo. Este fenômeno pode ser explicado, segundo Grande (2003) a partir das variações decorrentes das alterações físico-químicas produzidas pela interação entre as partículas de argila e as do cimento em hidratação.

As propriedades físico-mecânico (resistência à compressão, absorção d'água e durabilidade) do sistema solo-cimento estão intimamente relacionadas com as condições de cura (umidade e temperatura) e compactação, ou seja, deve-se trabalhar com umidades de moldagem em torno do teor ótimo, pois umidades ótimas acarretam a máxima densidade do sistema e, conseqüentemente, maior resistência. Quanto maior for o efeito da estabilização do solo, menor deve ser a perda de massa, indicando que o componente construtivo possui durabilidade e resistência (PICCHI et al., 1990).

2.5.5 Estabilização de Solos com Cinza de Casca de Arroz e Cimento Portland

A partir dos anos 80 e 90, foi desenvolvido um maior número de pesquisas relacionadas com estabilização de solos com CCA e cimento ou cal. Na Nigéria, Rahman (1986) estabilizou solos, recomendando um teor de 18% de CCA para materiais a serem utilizados como camadas de sub-base. Onde foi misturado solos lateríticos só com CCA sem nenhum outro aditivo.

Na Malásia Ali et al. (1992) pesquisaram os efeitos da estabilização por adição de CCA combinada com cimento ou cal, onde foi concluído que nos países tropicais a casca de arroz é abundante e considerada como resíduo.

O uso de CCA em obras de pavimentações é muito atrativo, e ajuda a reduzir custos construtivos e de deposição, bem como danos ambientais. Basha et al., (2005) estabilizaram com cimento e CCA e concluíram que a CCA pode estabilizar solos residual tanto quanto incorporada de forma isolada, como quando misturada com cimento

2.5.6 Solos apropriados para estabilização com cinza de casca de arroz e cimento

Portland

Foi estudado por Basha et al (2005) estabilização do solo com cimento e cinza de casca de arroz através dos ensaios de compactação e de compressão, e análises químicas pela difração de raios-X. O material solo foi caracterizado como areno-siltoso e o material cinza de casca de arroz apresentou 93,1% de sílica e 12,5% de partículas retidas na peneira de 0,045 mm.

Os autores observaram que as adições gradativas dos teores de cimento ou de cinza no solo refletiram significativamente no aumento da umidade ótima e no decréscimo da massa específica aparente seca máxima dos tratamentos. Já o ensaio de compressão aos 7 dias de idade revelou que cinza de casca de arroz, quando utilizada individualmente para estabilizar o solo, não possui propriedades cimentantes e necessita de adição de cimento para ocorrência de estabilização.

Quanto aos resultados da difração de raio-X, os autores confirmaram a ocorrência de estabilização do solo, pois quando comparados os tratamentos solo + 4% de cimento+ 20% de cinza observaram a presença de picos de carbonato e redução dos picos de quartzo e feldspato no tratamento solo + aditivos (BASHA et al., 2005). Ainda concluíram que a adição de 6% a 8% de cimento e 15 % a 20% de cinza de casca de arroz foram ótimos teores para melhorar as propriedades mecânicas do solo e que a cinza mostrou-se um potencial material para reduzir os custos das construções.

2.5.7 Dosagem do solo cimento

É definido como objetivo principal para a dosagem do solo cimento, a quantidade de água a ser adicionada na mistura e a massa específica aparente seca da mistura compactada,

que passaram a ser tomadas exclusivamente como elemento de controle do serviço, sendo que o objetivo da dosagem passa a ser somente a fixação da quantidade de cimento (ABCP 2004, apud FELTRIN, 2008).

A quantidade de cimento a ser incorporada ao solo depende das características que se pretende do material resultante (PINTO, 1980). O autor ainda afirma que dois grãos de solo fortemente unidos pelo cimento, uma vez separados, não voltam mais a apresentar a mesma coesão.

Os métodos de dosagem da ABCP, de acordo com Ferraz et al (2001) são baseadas na experiência da PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – (PCA, 1946) e consiste em dois métodos:

- **Norma Geral**, que se aplica a qualquer tipo de solo, excetuando-se os orgânicos. O seu critério de dosagem é baseado na perda da massa de corpos-de-prova submetidos a 12 ciclos de ensaios de durabilidade por molhagem e secagem;
- **Norma simplificada**, que é aplicável a solos de texturas predominantemente granular, ou seja, solos com no máximo 50% de material com diâmetro inferior a 0,05 mm (fração silte e argila) e no máximo 20% de material com diâmetro inferior a 0,005 mm (fração argila). O seu critério de dosagem baseia-se na resistência à compressão simples da mistura, após um período de sete dias de cura.

Em 1990 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresentou uma norma para as misturas de solo cimento, em sua quase totalidade semelhante à Norma Simplificada da ABCP, sob o título “NB 1336 Solo - Cimento – Dosagem para Emprego como camada de Pavimento”.

No Brasil a dosagem hoje é normatizada pela NBR 12253/1992 uma reimpressão da NB 1336/1990, esta norma fixa as condições exigidas para determinação da quantidade de cimento Portland capaz de estabilizar solos que atendam aos requisitos de granulometria, quando empregados como camada, sob a forma de solo-cimento, através da resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. A resistência mínima admitida pela norma é de 2,1 MPa, aos sete dias de idade.

3.0 Materiais e Métodos

3.1 Introdução

A realização desta pesquisa tem por interesse a estabilização de um solo com cimento e cinza de casca de arroz, coletado em uma jazida no município de Alegrete/RS, visando a sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. Desta maneira, neste item são apresentados os materiais e métodos utilizados durante o desenvolvimento dos estudos.

3.2 Materiais

3.2.1 Solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado no município de Alegrete no estado do Rio Grande do Sul. A jazida onde foram coletadas as amostras de solo localiza-se no 6º Sub-distrito, estrada Alegrete/Catimbau, próximo ao Balneário Caverá, ver Figuras 13 e 14. A Tabela 7 apresenta as coordenadas geográficas do local.



Fonte: Google Earth.

FIGURA 13 - Localização da jazida de solo.



Fonte: Google Earth

FIGURA 14 - Localização da jazida de solo.

TABELA 7 - Coordenadas geográficas da jazida de solo

Ponto	Coordenadas
884	S29°50'15,5" WO55°46'28,4"
893	S29°50'11,7'' WO55°46'27,8''
892	S29°50'13,4'' WO55°46'30,9''
889	S29°50'16,2'' WO55°46'26,8''
895	S29°50'12,8'' WO55°46'22,5''
894	S29°50'10,2'' WO55°46'24,4''

A região onde está localizado o município caracteriza-se como uma morfologia plana e que foi esculpida em rochas da Formação Serra Geral e, secundariamente, em arenitos da Formação Botucatu (BRASIL, 1986).

O mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul está apresentado a seguir na Figura 15 onde podemos localizar o município de Alegrete e a formação geológica da região do solo coletado para o estudo.

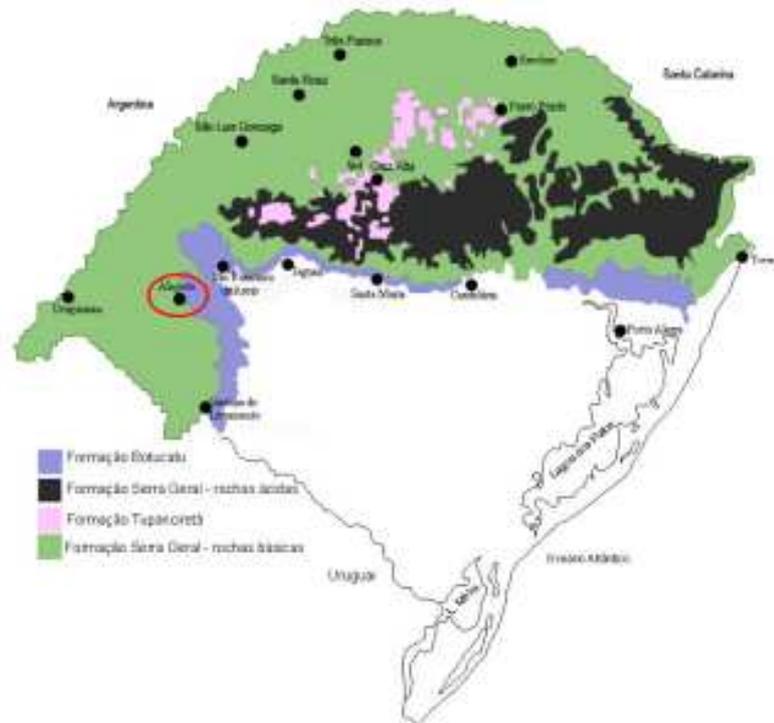


FIGURA 15 - Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul
Fonte: IBGE (2008)

3.2.2 Cimento

Na moldagem dos CP's foi utilizado o Cimento Portland (CP IV - Cimento Portland Pozolânico). Esse cimento foi escolhido por ser o mais amplamente utilizado na construção civil.

3.2.3 Água

A água utilizada nos ensaios foi a mesma fornecida para o consumo na cidade de Alegrete pela Corsan (Companhia Riograndense de Saneamento).

3.2.4 Cinza de casca de arroz

A Cinza de Casca de Arroz utilizada é produzida pela Cooperativa Agroindustrial - Alegrete Ltda – CAAL, originada da queima da casca de arroz pela Usina Termoelétrica, ver, Figura 16.

A escolha desse tipo de cinza deveu-se a três fatores primordiais: constatação de grande geração de cinza residual pelas agroindústrias, falta de processos tecnológicos para o

reaproveitamento deste resíduo e baixo custo, já que a cinza é cedida gratuitamente pela CAAL.



FIGURA 16 - Usina Termoeletrica CAAL

3.3 Métodos

3.3.1 Programa experimental

O programa experimental desenvolvido foi efetuado em três etapas, como segue:

1ª Etapa - abrangeu a coleta e caracterização do solo natural com a determinação dos seus índices físicos e mecânicos como descrito a seguir:

- Ensaio de caracterização englobando as determinações de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), granulometria e peso específico dos sólidos;
- Ensaio de compactação realizado na energia do ensaio Proctor intermediário, para definição dos parâmetros ótimos de compactação do solo natural (peso específico aparente seco ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima (w_o)).
- Ensaio de resistência à compressão Simples (RCS) realizado em corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de base e 20 cm de altura, moldados com o solo na umidade ótima.

2ª Etapa - englobou os ensaios de caracterização geotécnica e mecânica do solo com a adição de diferentes porcentagens de Cimento Portland ao solo seguindo desta forma:

- Ensaios de caracterização do solo estabilizado com cimento foram determinados o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), granulometria e peso específico dos sólidos;
- Ensaio de compactação realizado na energia intermediária do ensaio de Proctor para definição dos parâmetros ótimos de compactação da mistura solo-cimento;
- Ensaio de resistência a compressão simples (RCS) realizado em corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de base e 20 cm de altura, moldados na umidade ótima das misturas de solo e cimento, porcentagens de 6%, 10% e 13% (em massa) obedecendo-se aos períodos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias prescrito na norma NBR 12024/92.

3ª Etapa - englobou os ensaios de caracterização geotécnica e mecânica do solo com a adição de Cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz (CCA) ao solo seguindo desta forma:

- Determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), granulometria, índice de vazios e peso específico dos sólidos no solo melhorado com cimento e CCA;
- Ensaio de compactação realizado na energia intermediária do ensaio de Proctor, para definição dos parâmetros ótimos de compactação da mistura solo-cimento-CCA;
- Ensaio de resistência a compressão simples (RCS) realizado em corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de base e 20 cm de altura, moldados na umidade ótima das misturas de solo-cimento-CCA, com as seguintes porcentagens de (Solo + 10% cimento + 5% CCA), (Solo + 10% cimento + 10% CCA) e (Solo + 10% cimento + 15% CCA). Os CPs foram rompidos com 7, 14, 28 e 56 dias de cura.

O resumo do programa experimental segue ilustrado no fluxograma apresentado (Figura 17).

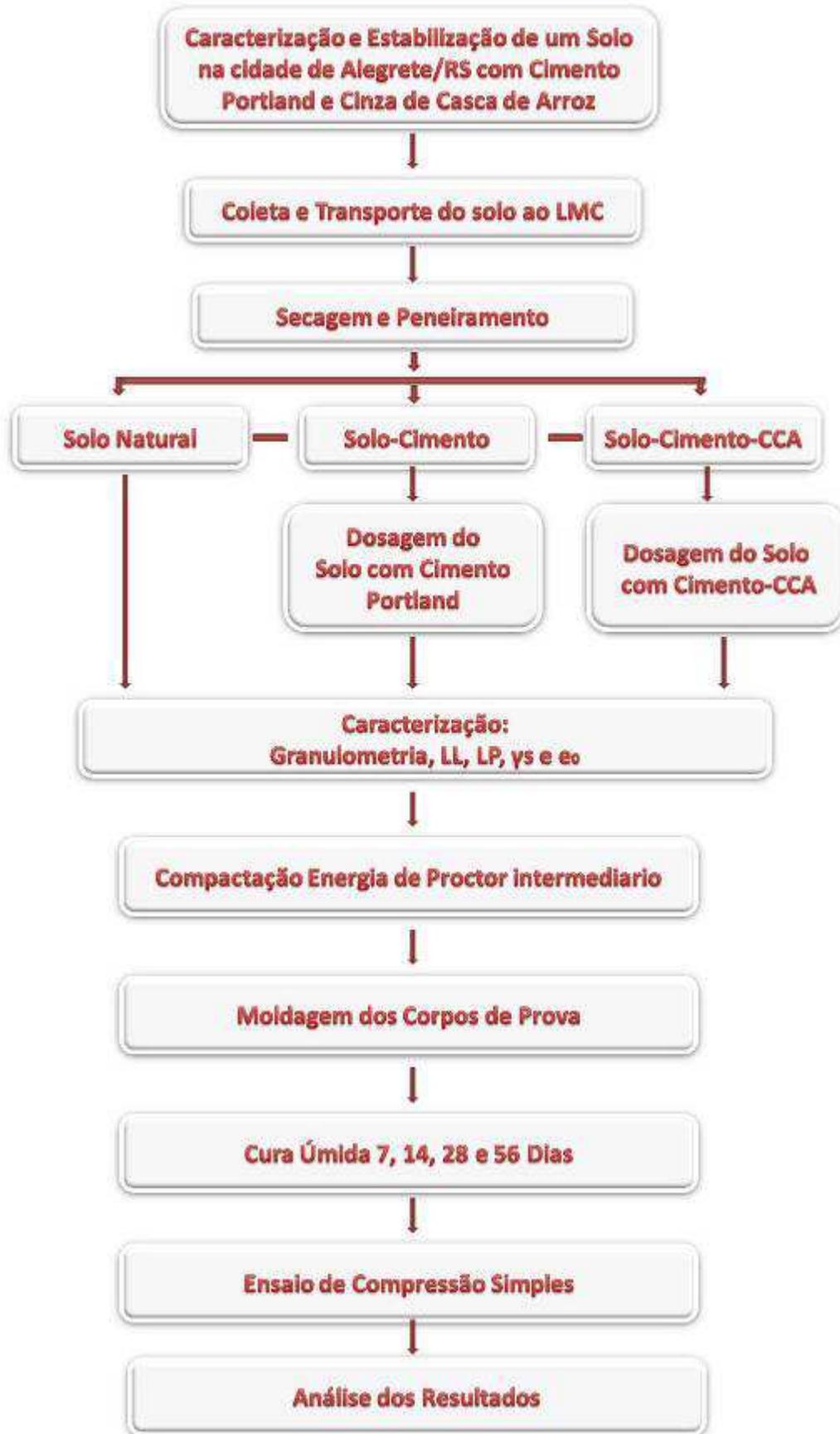


FIGURA 17 - Fluxograma do programa experimental.

3.3.2 Preparação da amostra de solo

O solo utilizado foi coletado com auxílio de uma pá e uma picareta (Figura 18a), armazenado em sacos plásticos e transportado até o Laboratório de Materiais e Construção da UNIPAMPA, campus Alegrete, (Figura 18b). Parte do material foi acondicionado em saco plástico, revestido com papel alumínio e transportado no interior de caixa térmica para realização do ensaio de umidade do solo. Já no laboratório o solo foi deixado secar ao ar (Figura 18c) e posteriormente destorroado, homogeneizado, passado na peneira nº 4 (4,8 mm), quartado (Figura 18d) e armazenados uma caixa de madeira. Os procedimentos empregados para preparação dos ensaios de compactação e caracterização obedeceram à NBR 6457/86.



FIGURA 18 - (a) Coleta do solo, (b) Solo acondicionado em sacos, (c) Solo para secagem, (d) solo quartado.

3.3.3 Preparação da amostra de cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz utilizada nesta pesquisa tem em sua composição 9,9% de teor de matéria orgânica, 89,6% Cinza e 0,5 de umidade sendo classificado segundo a NBR 10004-2004 como um material não inerte-classe IIA e sua queima não foi controlada (ECONSULTING – 26305/15.11).

Tão logo recebida no Laboratório de Materiais e Construção da UNIPAMPA foi acondicionada em sacos plásticos e estocada em recinto protegido da umidade. Posteriormente a CCA foi moída em moinho Los Angeles da marca EMIC (Figura 19). Foi colocado aproximadamente 0,15 m³ de CCA com 12 esferas de aço por um período de 10 horas.



FIGURA 19 – Cilindro de Abrasão Los Angeles

A aparência final da CCA foi de uma granulometria extremamente fina com grande porcentagem de material pulverulento. A Figura 20(a) mostra a Cinza bruta e a Cinza e na Figura 20(b) depois de passar pela moagem. A CCA foi moída com o intuito de diminuir sua granulometria, visando um maior preenchimento dos vazios do solo. A CCA utilizada apresentou coloração preta, o que indica que a mesma é amorfa (baixos índices de pozolana), desta forma a trituração do material também ajuda a liberar a pozolana que está no interior das partículas sendo possível uma melhor reação com o material solo-cimento.

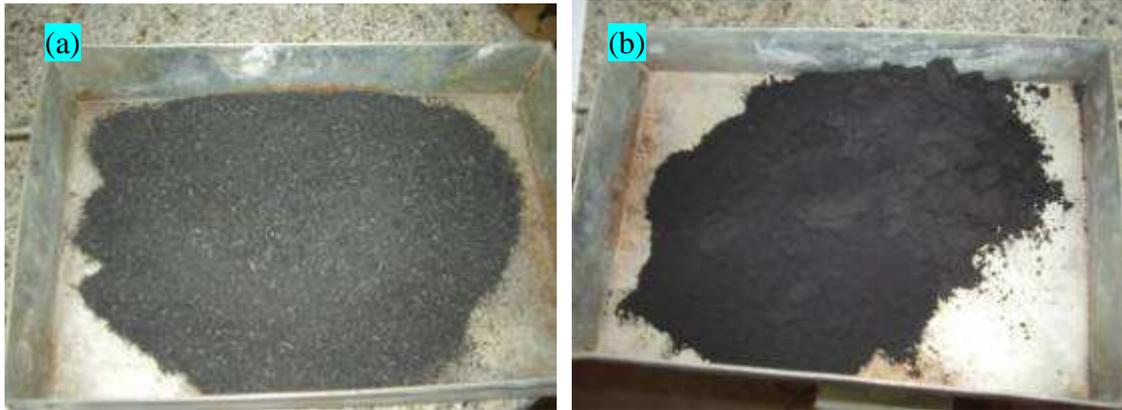


FIGURA 20 - (a) Cinza antes de ser moída e (b) após a moagem

3.3.4 Preparação e dosagem das misturas solo-cimento e solo-cimento - CCA

Amostras de solo foram colocadas em capsulas e levadas ao forno para a obtenção da umidade higroscópica como mostra a Figura 21(a). O solo empregado foi pesado em balança com precisão de 0,01 g, e misturado juntamente com os teores de cimento e CCA em uma bandeja metálica, (Figura 21(b), (c), (d), (e) e (f)). Posteriormente adicionou-se água até a umidade ótima de cada mistura para a realização da compactação.





FIGURA 21 - Preparação das misturas solo-cimento-cinza.

Para a dosagem do solo foi utilizado teores de 6%, 10% e 13% de Cimento Portland, e 5%, 10% e 15% de CCA em relação à massa seca de solo, ver Tabela 8.

TABELA 8 - Dosagem Solo-cimento-CCA

SOLO - CIMENTO	SOLO - CIMENTO - CCA
100% Solo + 0% Cimento	85% Solo + 10% Cimento + 5% CCA
94% Solo + 6% Cimento	80% Solo + 10% Cimento + 10% CCA
90% Solo + 10% Cimento	75% Solo + 10% Cimento + 15% CCA
87% Solo + 13% Cimento	

3.3.5 Análise granulométrica por peneiramento

A análise granulométrica do solo e de todas as misturas foi realizada de acordo com a NBR 7181/84. Para o peneiramento fino a amostra foi passada nas peneiras de diâmetro 1; 2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm, ver Figura 22. Os pesos retidos em cada peneira foram anotados e posteriormente graficados para determinação das dimensões das partículas.



FIGURA 22 - Peneiras no agitador

3.3.6 Peso específico dos grãos

Os pesos específicos dos grãos do solo e de todas as misturas foram determinados segundo o procedimento descrito pela NBR 6508/84.

Os ensaios foram divididos em três partes:

- Primeira Parte:
 - Foram separados em três vasilhames de porcelana amostras de 50g, 100g e 100g do material a ser analisado;
 - Separaram-se três cápsulas com o material para determinar o teor de umidade do material;
 - Posteriormente foi deixado de imersa em água destilada por 24hs.

- Segunda Parte:
 - Sempre com o auxílio de água destilada para a remoção das partículas, as amostras foram transferidas de cada vasilhame para um dispersor evitando qualquer perda;
 - Foram deixadas no dispersor as três amostras durante 15 minutos;
 - Posteriormente transferiu-se para um picnômetro, com o auxílio de um funil de vidro;
 - Após transferir o material para o picnômetro, foi colocado o mesmo em “banho maria” durante um período de 2 horas;

- Após as 2 horas os três picnômetros são retirados do banho maria e colocados ao ar para resfriar.
- Terceira Parte:
- Após deixar o picnômetro à temperatura ambiente, eles foram preenchidos com água destilada até a base do menisco (Figura 23);
 - Depois foi pesado: picnômetro + amostra + água
 - E posteriormente, pesar: picnômetro + água
 - Os dados obtidos foram utilizados para o cálculo do peso específico dos grãos.



FIGURA 23 - Picnômetros com amostras

3.3.7 Limites de Atterberg

- **Limite de liquidez (LL)**

O ensaio de Limite de Liquidez foi realizado colocando-se uma porção do solo, passante na peneira 40 (0,42 mm), no recipiente e adicionando-se água destilada até que este se torne uma pasta homogênea. Em seguida, essa mistura é colocada no aparelho Casagrande como mostra a Figura 24 e é realizado então o ensaio conforme recomenda a norma NBR 6459/84.



FIGURA 24 - Aparelho de Casagrande

Foram realizadas 5 (cinco) etapas para cada ensaio com umidades crescentes cujo parâmetro para a determinação da umidade é o número de golpes.

Em todos os ensaios as amostras foram homogeneizadas elevando-se a quantidade de água utilizada em cada uma delas. Para cada uma das etapas descritas foi retirada uma cápsula com uma parcela da mistura e levada à estufa para a determinação da umidade (Figura 25).



FIGURA 25 - Cápsulas com as amostras

De posse dos valores de umidade, é traçado um gráfico, cujo valor do LL é determinado pela umidade correspondente a 25 golpes.

- **Limite de plasticidade (LP)**

Para o ensaio de Limite de Plasticidade foi preparado uma amostra de solo passante na peneira número 40 (0,42 mm), a mesma utilizada para o ensaio de LL. Acrescenta-se água a

esta amostra de solo até que se forme uma pasta homogênea, e é realizado então o ensaio conforme recomenda a norma NBR 7180/84.

O procedimento do ensaio consiste em moldar uma amostra da massa de solo conforme um molde de metal com as seguintes dimensões: 3 mm de diâmetro por 10 cm de comprimento. Isso é feito através da rolagem dessa amostra no vidro fosco. Essa etapa é repetida até que o cilindro moldado inicie o processo de fissuração devido à perda de umidade, ver Figura 26.



FIGURA 26 - Ensaio de limite de plasticidade

Quando o cilindro apresentar fissuras, é colocado na cápsula, pesado e levado para a estufa para que ocorra a secagem, ver Figura 27.



FIGURA 27 - Cápsulas com amostras

- **Índice de plasticidade (IP)**

O Índice de Plasticidade (IP) foi calculado através da diferença numérica entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), como mostra a equação 5:

$$IP = LL - LP \quad (5)$$

3.3.8 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados na energia intermediária do ensaio de Proctor segundo a NBR 7182/82. Para a realização do ensaio, o solo é destorroado e passado na peneira nº 4 (4,76 mm), de maneira a obter uma porção de 3.000 g de solo seco. Adiciona-se água, de forma conveniente, para se obterem pontos com umidade abaixo e acima da umidade ótima. A amostra homogeneizada é colocada no molde, de forma a obter camadas ocupando 1/3 do seu volume. Aplicaram-se 21 golpes para cada camada, depois é retirado o excesso de material com uma régua metálica e pesa-se o conjunto. A partir da curva dos resultados é determinado o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_o) do solo, ver Figura 28(a).



FIGURA 28 - Realização do Ensaio de Proctor

3.3.9 Moldagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de RCS

Os corpos-de-prova foram moldados com o solo em sua umidade ótima (w_o) com a energia intermediária do ensaio de Proctor. Os corpos-de-prova foram compactados por processo dinâmico em três camadas iguais, aplicando-se 21 golpes com um soquete de massa igual a 4,500 Kg e altura de queda de 45,50 cm em cada camada e utilizando-se um molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (Figura 29).



FIGURA 29 - Moldagem dos corpos-de-prova

Nas moldagens foi usado óleo desmoldante em todos os cilindros metálicos para facilitar a desmoldagem de modo a evitar a aderência do solo compactado com a superfície metálica da base e lateral do cilindro. A Figura 30 apresenta CPs danificados durante a desmontagem.



FIGURA 30 - Corpo-de-prova danificado

3.3.10 Cura dos corpos-de-prova

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram armazenados encima de uma bancada dentro de um reservatório com água na altura de 20 cm, ver Figura 31, os tempos de cura adotados neste estudo foram respeitados. Como visto inicialmente, esses tempos são de 7, 14, 28 e 56 dias.



FIGURA 31 - Cura úmida dos CPs dentro de um reservatório

3.3.11 Preparação dos topos dos Corpos-de-prova para o ensaio RCS

De acordo com (Scanduzzi; Andriolo, 1986) para os ensaios de compressão axial dos corpos-de-prova de concreto, é necessário que as superfícies onde se aplicam as cargas sejam planas, paralelas e lisas, de modo que o carregamento seja uniforme. Pequenas irregularidades na superfície já são suficientes para provocar excentricidade pelo carregamento não uniforme e, conseqüentemente, uma diminuição da resistência final (BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983 apud BEZERRA, 2007).

No presente estudo foram testados dois sistemas de regularização: o sistema de capeamento com enxofre e caulim e sistema de desgaste mecânico.

O primeiro sistema de regularização adotado nos corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-CCA foi o sistema de capeamento colado, que é uma mistura derretida de enxofre com caulim (um minério composto de silicatos hidratados de alumínio), pois sua vantagem é o endurecimento rápido ver Figura 32.



FIGURA 32 - Derretimento do enxofre e caulim

Porém, se constatou que logo após o resfriamento do enxofre quando se retirava o gabarito do corpo-de-prova capeado o CP se rompia danificando o corpo-de-prova como mostra a (Figura 33).



FIGURA 33 - Topos dos CP's aderidos ao capeamento

Devido a esses incidentes foi adotado o segundo sistema que é o Sistema de desgaste mecânico onde as superfícies foram serradas para que ficassem planas, ortogonais ao eixo longitudinal do cilindro e isentas de qualquer desuniformidade, proporcionando uma superfície lisa e garantindo a integridade estrutural do corpo-de-prova, ver Figuras 34 e 35).



FIGURA 34 - Serragem dos topos dos corpos-de-prova



FIGURA 35 - Topos serrados

3.3.12 Ensaio de Resistência à Compressão Simples - RCS

Realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples do solo, mistura solo-cimento e mistura solo-cimento e cinza de casca de arroz com 7, 14, 28, 56 dias de cura. Todos os corpos-de-prova passaram pelos procedimentos descritos anteriormente para depois serem submetidos à determinação da resistência através do ensaio de compressão simples de acordo com a NBR 12025/90, sendo, porém, excluída a fase de imersão dos corpos-de-prova em água, antes do rompimento, pois esse procedimento afetaria diretamente a resistência. A

resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo.

Na Figura 36 pode ser visto a mudança de coloração de cada corpo-de-prova devido a cada teor de CCA adicionado na mistura solo-cimento. Todos os ensaios de RCS foram realizados em prensa hidráulica EMIC, ver Figura 37.



FIGURA 36 - Corpos-de-prova para serem rompidos



FIGURA 37 - Execução do ECS

3.3.13 Modo de ruptura dos corpos-de-prova

A Figura 38 abaixo mostra o aspecto de corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência a compressão simples. Durante a execução do ensaio foi observado uma ruptura frágil das amostras com a deformação de um ou mais planos de ruptura (rompimento cisalhado e/ou cisalhado cônico), rompimento característico do ensaio de resistência a compressão simples.



FIGURA 38 - Modo de ruptura dos corpos-de-prova submetidos a RCS

4.0 Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados os resultados oriundos dos ensaios de caracterização, compactação, resistência a compressão simples e suas respectivas análises.

4.1 Resultados dos ensaios de caracterização

4.1.1 Análise granulométrica

A Tabela 9 sumariza o percentual das partículas que constituem o solo e as misturas solo-cimento-cinza utilizado na presente pesquisa.

TABELA 9 - Granulometria do Solo e misturas Solo-Cimento-CCA

	Pedregulho (> 4,8 mm)	Areia Grossa (4,8 - 2,0 mm)	Areia Média (2,0 - 0,42 mm)	(0,42 - 0,074 mm)	Silte + Argila (< 0,074 mm)
Solo Natural	0,00%	0,00%	30,64%	67,14%	2,22%
Solo + 6% Cimento	0,00%	0,00%	41,81%	55,86%	2,33%
Solo + 10% Cimento	0,00%	0,00%	39,76%	57,72%	2,52%
Solo + 13% Cimento	0,00%	0,00%	43,53%	54,07%	2,40%
Solo + 10% Cimento + 5% CCA	0,00%	0,00%	36,28%	58,08%	5,64%
Solo + 10% Cimento + 10% CCA	0,00%	0,00%	36,23%	62,52%	1,24%
Solo + 10% Cimento + 15% CCA	0,00%	0,00%	40,39%	58,99%	0,62%

A seguir é apresentado graficamente as curvas granulométricas do Solo natural e Solo-cimento de acordo com a NBR – 7181/84.

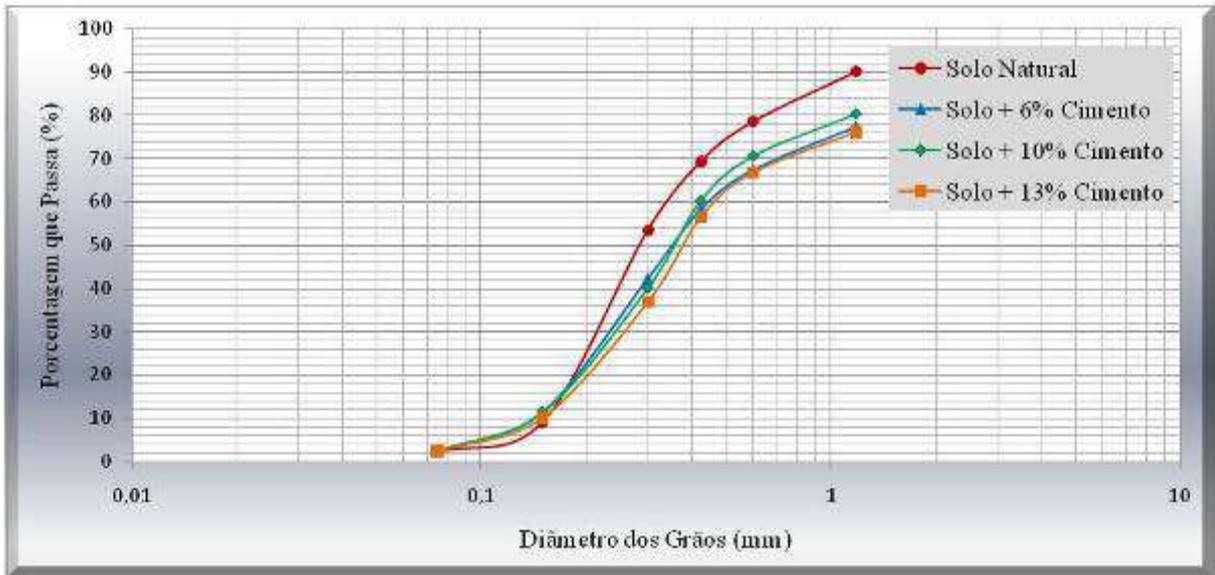


FIGURA 39 - Curva Granulométrica do Solo e Mistura com Cimento

Nesta primeira análise da Figura 39 pode-se verificar através dos percentuais expostos no resumo de ensaios, e através das curvas granulométricas que o solo natural e as misturas de 6%, 10% e 13% de cimento assemelham-se quanto a distribuição granulométrica.

Da mesma forma são apresentadas graficamente na Figura 40 as curvas granulométricas do Solo natural e Solo-cimento-CCA de acordo com a NBR – 7181/84.



FIGURA 40 - Curva Granulométrica do Solo e misturas solo-cimento-CCA

Neste gráfico da Figura 40 pode-se perceber que a mistura (Solo + 10% Cimento + 5% CCA) teve um aumento na fração silte + argila, enquanto que na mistura (Solo + 10%

cimento + 10% CCA) e (Solo + 10% cimento + 15% CCA) reduziram suas frações de silte + argila.

Segundo a CEPED (1984) os solos devem ter um teor mínimo da fração fina, pois a resistência inicial do solo-cimento compactado ocorre devido à coesão da fração fina compactada, uma vez que ainda não se processaram as reações de endurecimento do cimento.

A seguir para melhor visualização é apresentado na Figura 41 os resultados das análises granulométricas conjunta das amostras de solo e das misturas Solo-Cimento-CCA.

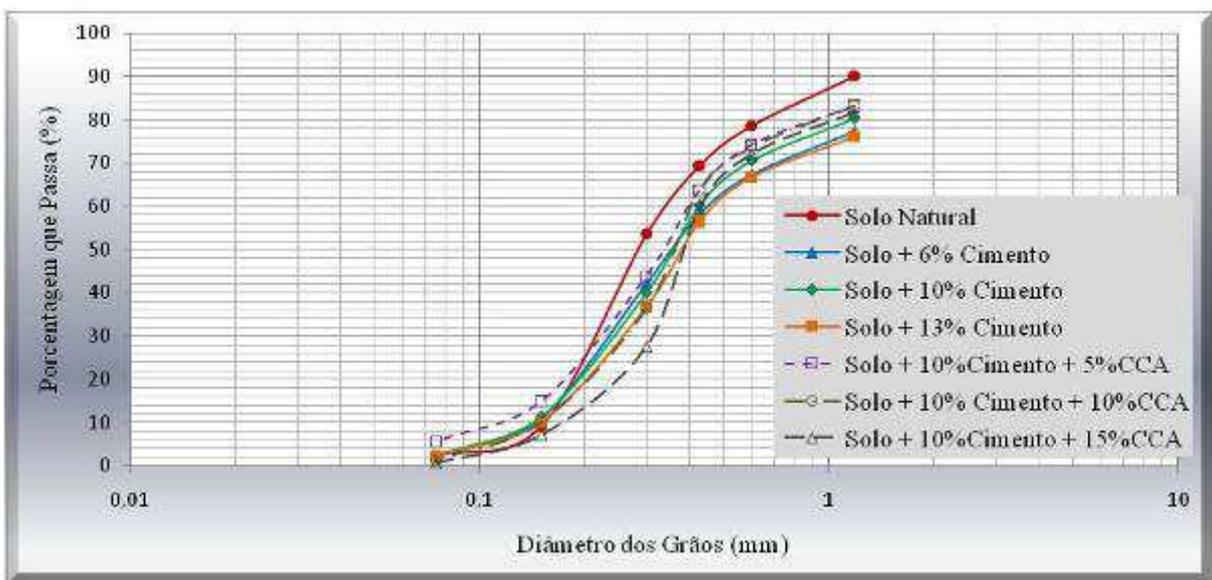


FIGURA 41 - Curva Granulometrica do Solo e misturas Solo-Cimento-CCA

Analisando a Figura 41 percebe-se claramente onde se encontra a faixa de distribuição granulométrica do solo natural e estabilizado. É possível classificar o material dentro das zonas de utilização recomendadas pelas normas do DNIT (058/2004 – ES Pavimento Rígido - Execução de Sub-base de Solo-Cimento) e DNIT (143/2010 – ES Pavimentação - Base de Solo-Cimento).

- Passando na peneira ABNT 76 mm – 100%
- Passando na peneira ABNT nº 4 – 50 a 100%
- Passando na peneira ABNT nº 40 – 15 a 100%
- Passando na peneira ABNT nº 200 – 5 a 35%

Desta forma, conclui-se que a granulometria do solo natural e das misturas solo-cimento-CCA em questão estão adequadas para utilização em base e sub-base de pavimentos.

4.1.2 Índices Físicos

Conforme descrito no item 3, os índices físicos foram calculados a partir de ensaios realizados em amostras do solo natural e amostras do solo natural acrescido de porcentagens de cimento e CCA. A Tabela 10 apresenta o resumo dos resultados encontrados.

É possível perceber que o peso específico dos grãos (G_s) apresentou pouca variação. Com exceção da amostra com 90% de solo + 10% de cimento que, apresentou massa de 2,93 g/cm³, a faixa de variação dos outros traços foi pequena, sendo 2,62 g/cm³ o valor mínimo e 2,64 o valor máximo, ver Figura 42.

Já o grau de saturação (S_r) variou de forma homogênea em todas as amostras ensaiadas. O valor de S_r de 0,67% foi o mínimo encontrado para a amostra com 90% de solo e 10% de cimento e o valor de S_r de 0,85% foi o máximo e corresponde a amostra com 85% de solo, 10% de cimento e 5% de CCA. A Figura 43 apresenta os resultados na forma de barras.

O índice de vazios (e_0) mínimo encontrado corresponde ao solo natural ($e_0=0,30$). Ele aumenta com a inclusão de porcentagens de cimento e de CCA, chegando a 0,51 para o traço composto com 75% de solo, 10% de cimento e 15% de CCA. A Figura 44 apresenta os resultados.

Analisando os valores do peso específico dos grãos (G_s), grau de saturação (S_r) e índice de vazios (e_0) de todos os traços realizados é possível ver uma homogeneidade geral nos resultados. A exceção é o traço com 90% de solo e 10% de cimento que apresenta valores diferentes dos demais. O autor conclui que, provavelmente houve algum erro durante a realização do ensaio desse traço, muito provavelmente durante a preparação da amostra.

TABELA 10 - Índices Físicos do solo e misturas

Misturas	G_s (g/cm ³)	S_r (%)	e
Solo Natural	2,66	0,84	0,30
Solo + 6% Cimento	2,66	0,83	0,34
Solo + 10% Cimento	2,93	0,67	0,49
Solo + 13% Cimento	2,64	0,76	0,37
Solo + 10% Cim + 5%CCA	2,64	0,85	0,42
Solo + 10% Cim + 10%CCA	2,62	0,76	0,48
Solo + 10% Cim + 15%CCA	2,62	0,72	0,51

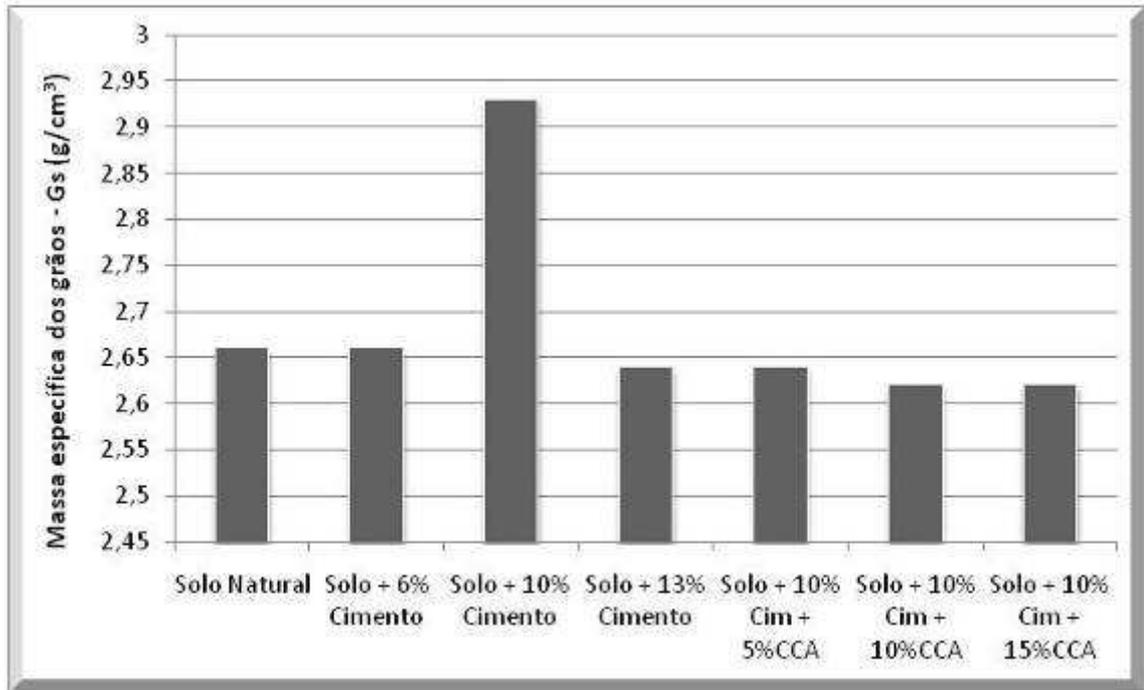


FIGURA 42 - Massa específica do solo e misturas solo-cimento-cinza

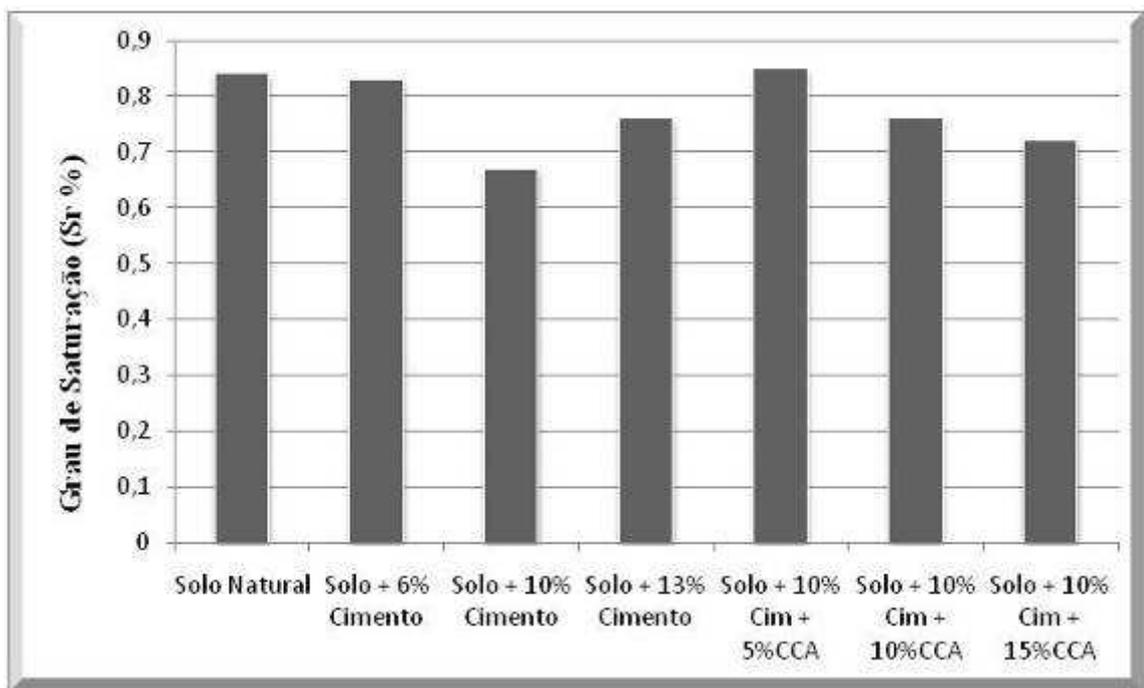


FIGURA 43 - Grau de Saturação do solo e misturas solo-cimento-cinza

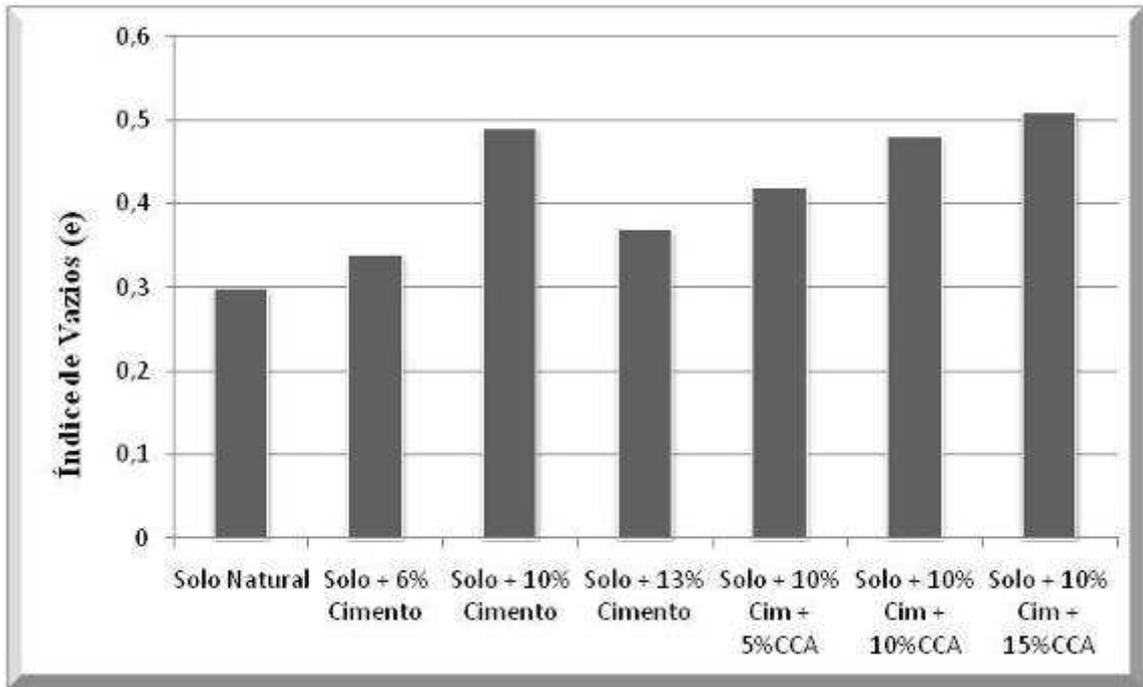


FIGURA 44 - Índice de vazios do solo e misturas solo-cimento-cinza

4.1.3 Classificação do solo e misturas

Com base nos resultados obtidos ver Tabela 11, verificou-se que as amostras de solo e as combinações de cimento e CCA se enquadraram na mesma classificação segundo a TRB (A-2-4) como (Solo arenoso) e na classificação SUCS (SP) como sendo (Solo mal graduado).

TABELA 11 - Classificação TRB e SUCS

Sistema de Classificação	Sistema de Classificação	
	TRB	SUCS
Solo Natural	A-2-4	SP
Solo + 6% Cimento	A-2-4	SP
Solo + 10% Cimento	A-2-4	SP
Solo + 13% Cimento	A-2-4	SP
Solo + 10% Cimento + 5% CCA	A-2-4	SP
Solo + 10% Cimento + 10% CCA	A-2-4	SP
Solo + 10% Cimento + 15% CCA	A-2-4	SP

Segundo o sistema TBR, usualmente utilizado na classificação dos materiais a serem empregados em aterros, subleitos, sub-bases e bases de rodovias, o solo analisado possui uma excelente qualidade para construção das camadas do pavimento, tendo em vista se tratar de um solo predominantemente arenoso com pouca presença de finos (silte/argila).

4.1.4 Limites de Atterberg

Na Figura 45, são apresentados os resultados dos ensaios de limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) do solo e respectivamente com as combinações de cimento e cinza de casca de arroz.

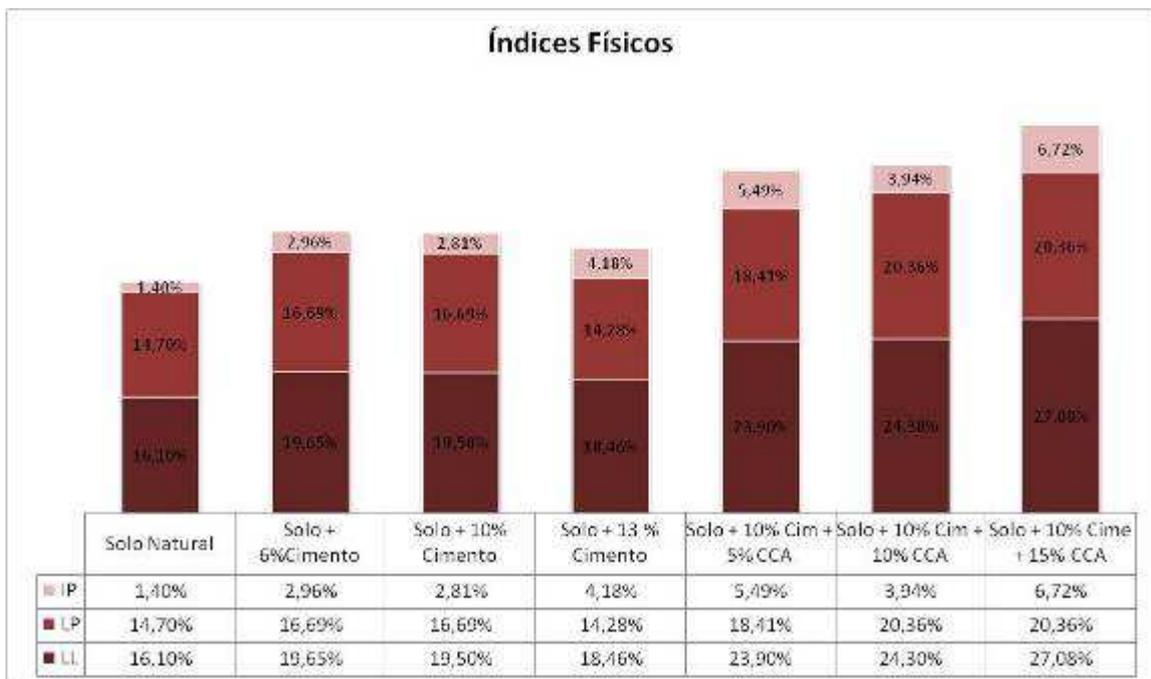


FIGURA 45 - Limites de Atterberg

Craterre (1979) classifica um solo arenoso como aquele que tem o IP(%) 0 – 10 e LL (%) 0 – 30. Desta maneira de acordo com a Figura 45, é possível classificar o solo natural e as misturas como um material arenoso.

Também (BURMISTER, 1949), classificou o índice de plasticidade de forma qualitativa afirmando que se o IP (%) apresentar entre 1 – 5 é classificado como um material ligeiramente plástico e se apresentar IP (%) entre 5 – 10 é classificado com um material de plasticidade baixa. Desta maneira, o Solo Natural, Solo + 6% Cimento, Solo + 10% Cimento, Solo + 13% Cimento e Solo + 10% Cimento + 10% CCA apresentaram o índice de plasticidade menor que 5% caracterizando-se como um material ligeiramente plástico e as misturas de Solo + 10% Cimento + 5% CCA e Solo + 10% Cimento + 15% CCA maiores que

5% classificou-se como um material de plasticidade baixa. Ou seja, a presença da CCA deixa o material mais plástico.

Com relação à normatização vigente, o solo natural e todos os traços estudados atendem às especificações do DNIT 058/2004 e DNIT 143/2010 que estabelece um (LL) máximo de 40% e o (IP) máximo de 18% para serem empregados em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

4.2 Resultados dos ensaios de compactação

A finalidade desse ensaio é determinar a curva de compactação e a massa específica do solo natural e das misturas solo-cimento e solo-cimento-CCA em função da umidade da amostra. Tal curva indica o teor de umidade ótima para compactação do solo e mistura, quando submetidos a uma energia constante.

Os valores da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima das diferentes misturas de solo-cimento-cinza obtidas do ensaio de compactação Intermediária de Proctor realizado conforme as diretrizes da norma NBR – 7182/86, ver Tabela 12.

TABELA 12 - Ensaio de Compactação

Ensaio de Compactação Proctor Intermediário		
	Mas.esp aparente seca máx (g/cm³)	Umidade ótima (%)
Solo Natural	2,04	9,37
Solo + 6% Cimento	1,98	10,74
Solo + 10% Cimento	1,97	11,07
Solo + 13% Cimento	1,93	10,56
Solo + 10% Cimento + 5% CCA	1,86	13,43
Solo + 10% Cimento + 10% CCA	1,77	13,90
Solo + 10% Cimento + 15% CCA	1,73	14,19

A seguir são mostradas as curvas para cada teor de cimento estudado e misturas de solo-cimento-CCA, juntamente com a curva de compactação do solo natural nas Figura 46 e Figura 47.

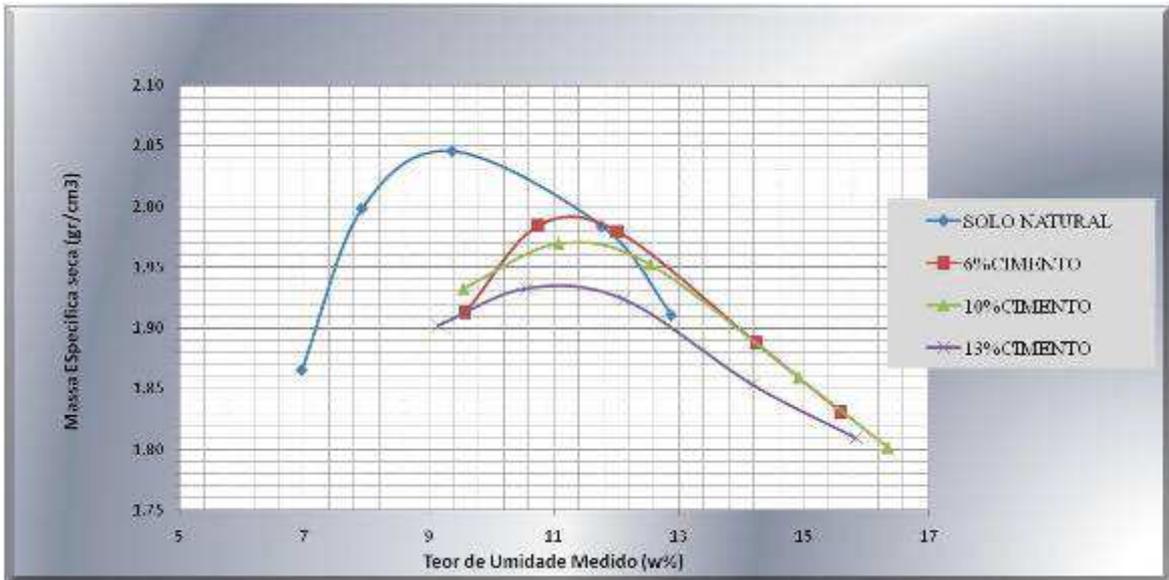


FIGURA 46 - Curvas de Compactação

Neste primeiro gráfico de compactação, Figuras 46 foram apresentados os resultados do solo natural e com os teores de 6%, 10% e 13% de cimento em massa. Observa-se que quanto maior a porcentagem de cimento, maior será o teor de umidade ótima e menor será a massa específica aparente seca.

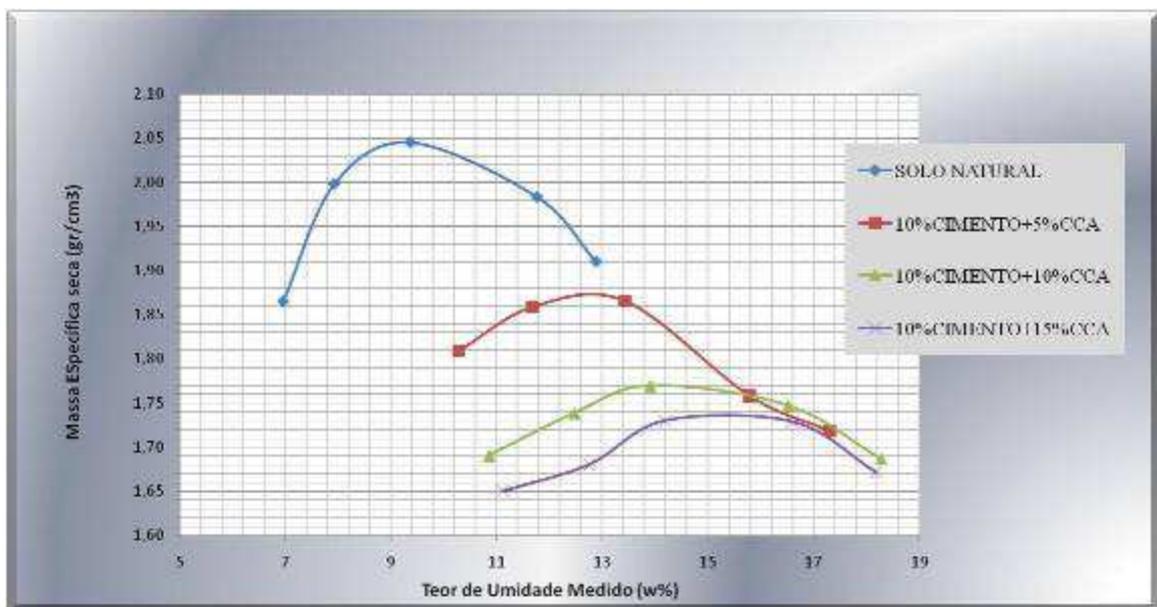


FIGURA 47 - Curvas de Compactação

A Figura 47 apresenta a mesma tendência da Figura 46, ou seja, quanto maior a porcentagem de cimento e CCA, maior será a umidade ótima e menor será a massa específica seca máxima, sendo as duas curvas com as maiores porcentagens de CCA não apresentam pico, mesmo comportamento de solos argilosos.

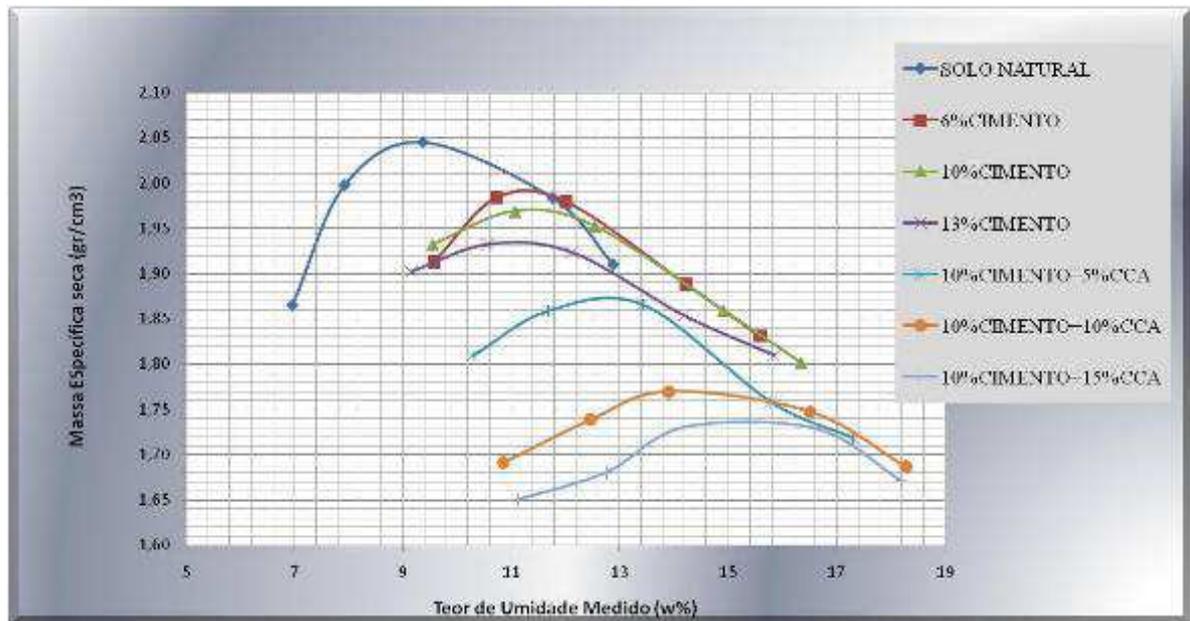


FIGURA 48 - Curvas de Compactação

Comparando os resultados das curvas de compactação em um mesmo gráfico como mostra a Figura 48 percebe-se que esta combinação solo-cimento-cinza promoveu efeitos significativos nas variáveis: massa específica aparente seca máxima (γ_d) e umidade ótima (w_{ot}) das misturas.

A mistura Solo + 10% de cimento com adições de teores de cinza de casca de arroz em sua composição apresentou resultados de γ_d inferiores aos valores das misturas onde foram somente incorporados ao solo teores de cimento.

Destaca-se que, quanto maior for o teor de cinza incorporado ao solo, menor será seu peso específico seco máximo (γ_d) e maior será a sua umidade ótima (w_{ot}).

Outra constatação importante é que, durante a mistura dos materiais, conforme era aumentada a quantidade de cinza de casca de arroz nas misturas, maior era o volume da pré-mistura e, conseqüentemente, maiores as dificuldades no momento de compactação da mistura.

4.3 Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples - RCS

O estudo da resistência à compressão simples tem como objetivo mostrar a influência de teores de cimento e cinza de casca de arroz incorporado ao solo para fins de aplicação ao dimensionamento de estruturas de base e sub-base de pavimentos.

Segundo o DNIT e a NBR 12253/92 o teor de cimento a ser adotado, capaz de estabilizar uma camada de pavimento através de uma mistura solo-cimento, será o menor dos teores que forneça resistência média à compressão simples aos 7 dias, igual ou superior a 2,1 MPa. Também O DER do Paraná, especifica limites para utilização de solos tratados com porcentagens cimento variando de 1% a 5%. Quando a resistência à compressão simples for \geq 1,2 MPa, poderá ser empregado apenas como sub- base, e para valores $>$ 1,5 MPa este solo poderá ser utilizado como camada de base.

O valor de 2,1 MPa foi fixado por ser um número já consagrado no meio rodoviário, devido ao bom desempenho dos pavimentos.

Na Tabela 13, estão apresentados os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova produzidos com diferentes teores de cimento e diferentes combinações de solo-cimento-CCA, rompidos nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias.

TABELA 13 - Ensaio de resistência à compressão Simples (RCS)

Resistência à Compressão Simples (MPa)				
Material	7 Dia	14 Dias	28 Dias	56 Dias
Solo Natural	0,46	0,44	0,89	1,17
Solo + 6% Cim	1,41	1,13	1,29	1,56
Solo + 10% Cim	3,06	2,77	3,34	3,91
Solo + 13% Cim	4,06	3,85	3,81	5,11
Solo + 10% Cim + 5%CCA	3,74	4,40	4,66	4,13
Solo + 10% Cim + 10%CCA	2,69	2,93	3,41	4,32
Solo + 10% Cim+ 15%CCA	2,35	2,54	2,80	3,21

Nas Figuras 49, 50, 51, 51 e 52 é possível ter uma melhor visualização do comportamento do solo-cimento-cinza em relação à variação no teor de cimento e cinza e o desenvolvimento da resistência no decorrer do tempo no ensaio de compressão simples.

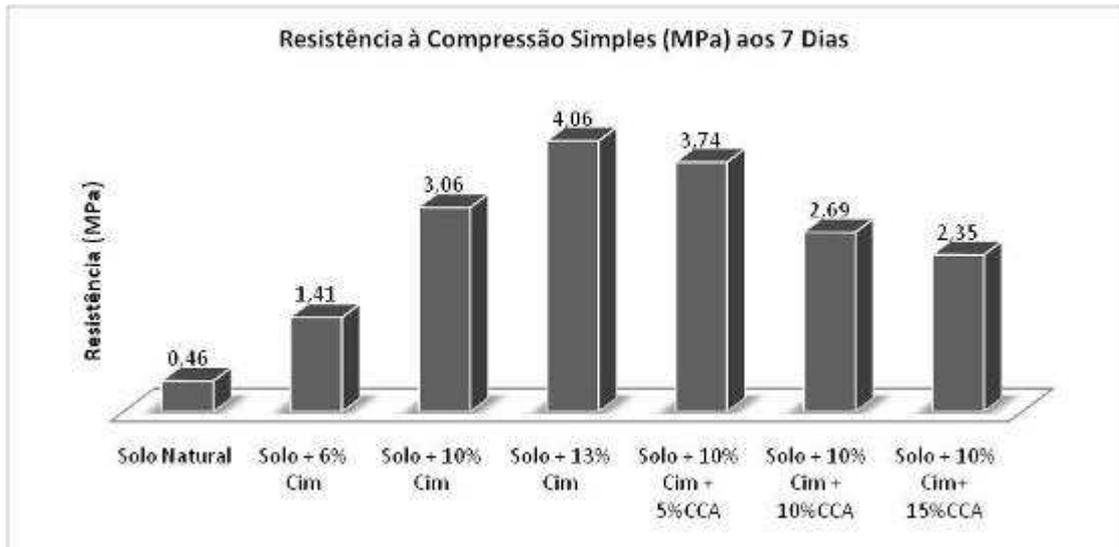


FIGURA 49 - Resistência à compressão simples aos 7 dias

Analisando os resultados da Figura 49, percebe-se que aos 7 dias houve crescimento linear de resistência à compressão simples com as porcentagens de 6% 10% e 13% de cimento chegando-se com uma maior resistência de 4,06 MPa com 13% de cimento. Porém ao se incorporar a cinza de casca de arroz a mistura solo-cimento, notou-se que a resistência diminuiu conforme o aumento do teor de cinza de casca de arroz.

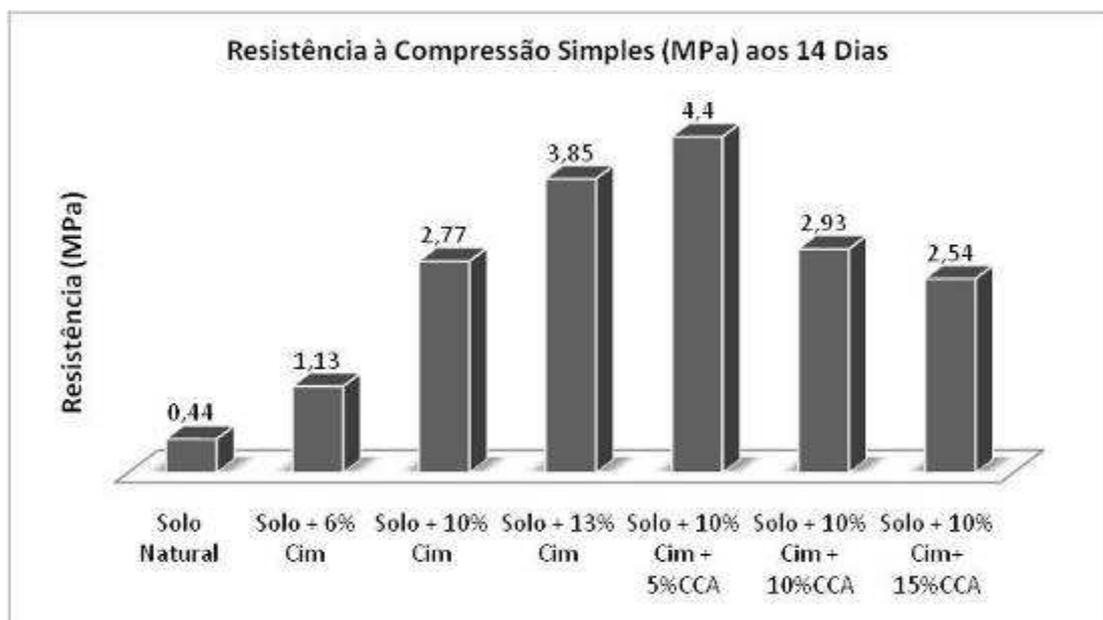


FIGURA 50 - Resistência à compressão simples aos 14 dias

Percebe-se na Figura 50 que aos 14 dias a resistência das combinações com teores de cimento apresentaram um crescimento linear de resistência à compressão simples.

Com a incorporação da cinza de casca de arroz, verificamos quanto maior a adição de teores de cinza menores eram as resistências.

A combinação (Solo + 10% cimento + 5%CCA) atingiu a maior resistência com valor de 4,40 MPa.

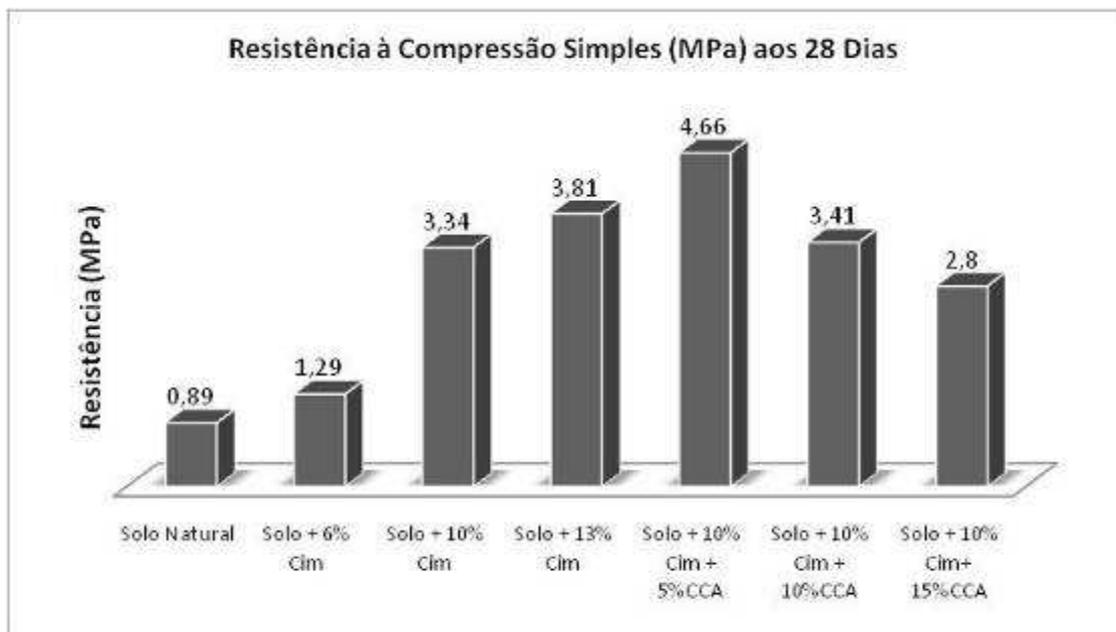


FIGURA 51 - Resistência à compressão simples aos 28 dias

Como mostra a Figura 51 aos 28 dias, a resistência do solo com adições de teor de cimento manteve o seu crescimento de forma linear bem como o solo com adições de CCA mostrou o mesmo comportamento visto aos 14 dias, ou seja, quanto maiores os teores de CCA menores as resistências. A maior resistência continuou sendo a combinação (Solo + 10% cimento + 5%CCA), porem sua resistência aos 14 dias que era de 4,40 MPa, chegou aos 4,66 MPa aos 28 dias.

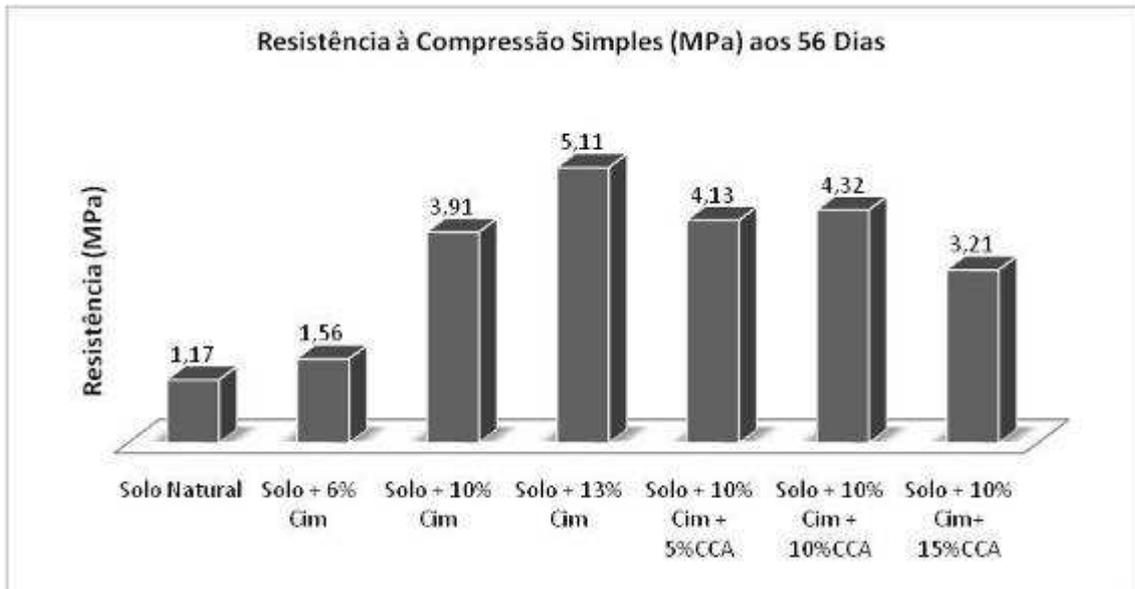


FIGURA 52 - Resistência à compressão simples aos 56 dias

Já aos 56 dias como mostra a Figura 52 nota-se que mistura solo-cimento 6%, 10% e 13% demonstraram um crescimento linear de resistência. O solo-cimento com as adições de CCA não manteve um comportamento padrão como demonstrado nas demais idades ensaiadas. Ao contrário dos resultados obtidos para as idades já ensaiadas a maior resistência foi encontrada com a combinação de (Solo + 13% cimento).

Neste gráfico da Figura 53, é possível comparar as resistências das combinações com os respectivos tempos de cura. E no gráfico da Figura 54 vemos quais combinações ficaram dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT e NBR 12253/92.

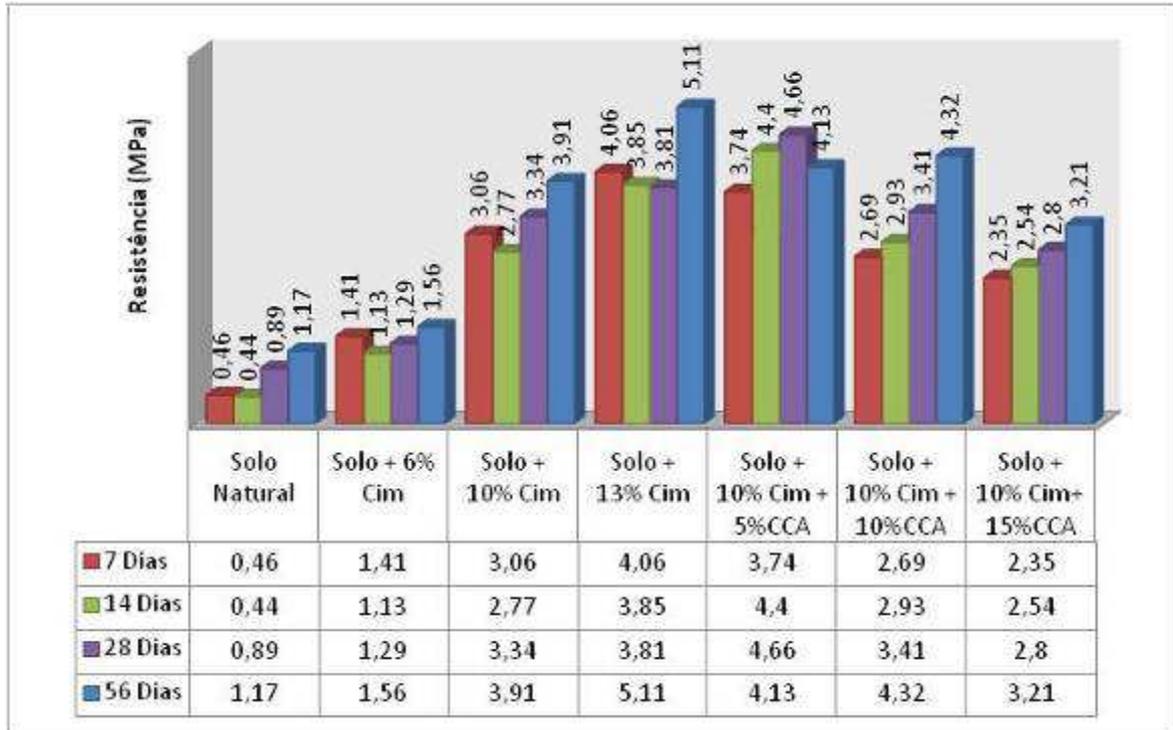


FIGURA 53 - Resistência à compressão simples aos 7, 14, 28 e 56 dias

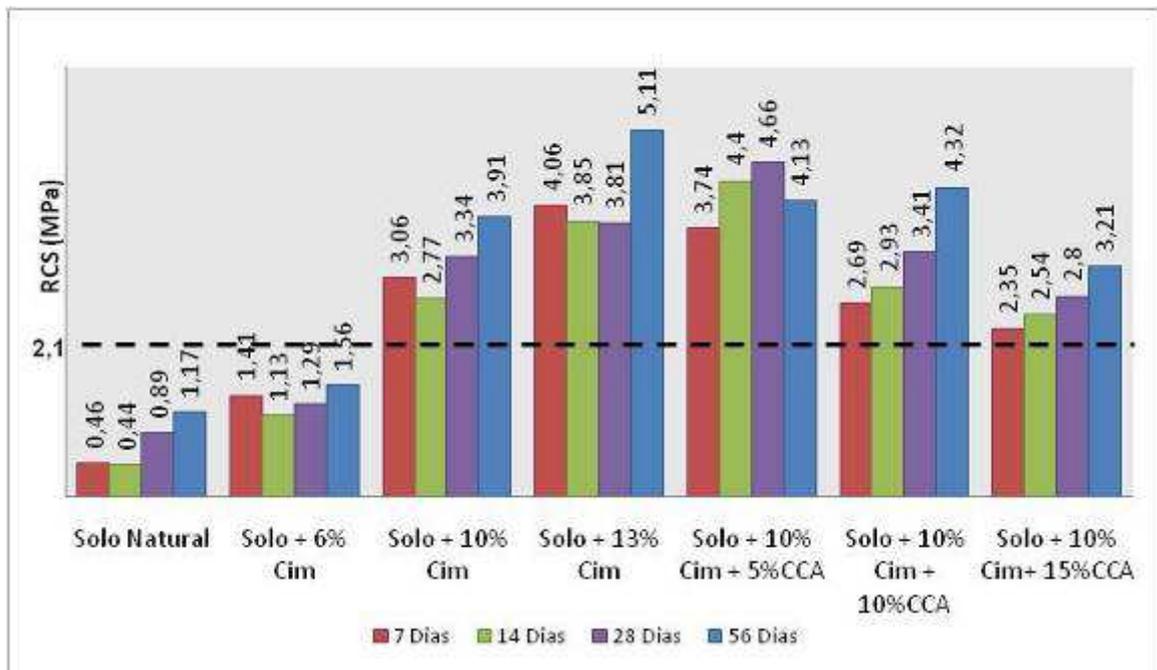


FIGURA 54 - Resistência à compressão simples aos 7, 14, 28 e 56 dias

Na Figura 54 pode-se observar uma linha arbitrando a resistência mínima de 2,1 MPa para utilização de camada de base e sub-base de pavimento segundo a o DNIT e NBR 12253/92.

Analisando a Figura 53 observamos um aumento na resistência à compressão simples quando incorporado teores de 6%, 10% e 13% de cimento ao solo, este aumento de resistência

também foi encontrado por Ferreira (2003) em solos arenosos adicionados 10% de cimento Portland, onde a resistência à compressão simples, obteve 2,09 MPa aos 7 (sete) dias, 2,74 MPa aos 28 (vinte e oito) dias e 4,50 MPa aos 56 (cinquenta e seis) dias. Milani (2008) em sua pesquisa adicionou 10% de cimento em solo arenoso, e em 7 (sete) dias de cura, obteve 2,35 MPa.

Milani (2008) explica que esse aumento de resistência se dá pela formação de um composto cimentante ao decorrer do tempo melhorando as propriedades mecânicas dos materiais e também relata que no mecanismo de estabilização em solos finos com cimento surgem matrizes hexagonais do solo geradas pelas ligações químicas entre as partículas do solo e as partículas do cimento, essas matrizes envolvem fortemente a aglomeração de partículas que evitam deslizamentos de uma sobre as outras, gerando resistências ao cisalhamento.

Com isso, a formação da estrutura cimentada apresenta maior resistência à compressão simples devido às fortes ligações mecânicas que se estabelecem na interface do gel com as partículas do solo.

Nestas primeiras análises da resistência do Solo natural quando qualificado pelas diretrizes do DNIT mostraram-se deficientes diante dos parâmetros estabelecidos pelas técnicas do órgão competente para utilização como base e sub-base de pavimentos devido sua capacidade de suporte ser baixa atingindo RCS inferior a 2,1 MPa aos 7 dias.

Podemos concluir que combinações de (Solo + 10% cimento), (Solo + 13% cimento), (Solo + 10% cimento + 5% CCA), (Solo + 10% cimento + 10% CCA) e (Solo + 10% cimento + 15% CCA) atendem a resistência à compressão simples mínima exigida pelo DNIT e pela norma de dosagem solo-cimento NBR 12253/92 com resistência maior que 2,1 MPa para a utilização como camada de base de pavimento. A única combinação a não atender o valor mínimo de resistência exigido pelo DNIT e NBR 12253/92 para utilização de camada de base de pavimento é a de (Solo + 6% cimento).

5.0 Considerações Finais e Sugestões

O presente capítulo corresponde as conclusões a respeito dos ensaios realizados objetivando a estabilização do solo em questão. Após isso são feitas algumas sugestões para futuras pesquisas.

5.1 Conclusões

Com base nos estudos realizados nesta pesquisa, podem-se tirar algumas conclusões a respeito da incorporação ao solo de cimento e cinza de casca de arroz com objetivo de definir as características físicas do solo em estudo, e determinar qual aglomerante, e o respectivo teor terão maior resistência à compressão simples das amostras de solo.

As avaliações de desempenho do material solo-cimento-CCA foram obtidas por meio de uma metodologia baseada em procedimentos de ensaios em laboratórios, fundamentados em normas técnicas e recomendações práticas e que se mostraram eficientes para o desenvolvimento de análises e orientações que devem ser consideradas em novas pesquisas que tenham como objetivo de estudo a estabilização de solos com cimento e cinza de casca de arroz.

✓ A cinza de casca de arroz utilizada nesta pesquisa tem em sua composição 9,9% de teor de matéria orgânica, 89,6% Cinza e 0,5 de umidade sendo classificado segundo a NBR 10004-2004 como um material não inerte-classe IIA e sua queima não foi controlada.

✓ O solo arenoso foi considerado adequado para processos de estabilização com cimento Portland, e segundo a classificação enquadraram-se conforme a TRB (A-2-4) como (Solo arenoso) e na classificação SUCS (SP) como sendo (areis mal-graduada). No entanto o solo avaliado neste trabalho quando qualificado pelas diretrizes do DNIT mostraram-se deficientes diante dos parâmetros estabelecidos pelas técnicas do órgão competente para utilização como base e sub-base de pavimentos devido sua capacidade de suporte ser baixa atingindo RCS inferior a 2,1 MPa aos 7 dias.

✓ Nas análises granulométricas os resultados obtidos em todas as misturas solo-cimento e solo-cimento-CCA se enquadram em relação às zonas de utilização ótimas recomendadas pelas normas do (DNIT 058/2004 –ES Pavimento Rígido - Execução de Sub-

base de Solo-Cimento) e (DNIT 143/2010 – ES Pavimentação - Base de Solo-Cimento), portanto, são adequados para utilização em base e sub-base de pavimentos.

✓ Quanto aos limites de consistência, as misturas de solo-cimento e solo-cimento-CCA se enquadram nas especificações do (DNIT 058/2004) e (DNIT 143/2010) que estabelece um (LL) máximo de 40% e o (IP) máximo de 18% para serem empregados em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, classificando-se como um material de plasticidade baixa ou ligeiramente plástico. Vale salientar que ao conhecer os limites definidos pela umidade em projeto de rodovias, tem fundamental importância, pois no processo de execução das camadas a água entra como agente no processo de moldagem e para se conseguir a densidade máxima desejada.

✓ Quanto aos ensaios de compactação observou-se que a incorporação de cimento e cinza promoveu efeitos significativos nas variáveis: massa específica aparente seca máxima (γ_{dmax}) e umidade ótima (w_{ot}) das misturas. Destaca-se também a proporcionalidade, uma vez que quanto maior era o teor de cimento incorporado ao solo, maiores eram os valores de umidade ótima e menores os valores da massa específica seca máxima. O mesmo ocorreu para as misturas solo-cimento-CCA.

✓ Quanto aos resultados de resistência à compressão simples, verificou-se um crescimento linear da resistência com o aumento de teor de cimento concluindo-se que a adição de cimento ao solo promove ganhos significativos de resistência. Esse aumento de resistência se dá pela formação de um composto cimentante ao decorrer do tempo melhorando as propriedades mecânicas dos materiais e o surgimento de matrizes hexagonais do solo geradas pelas ligações químicas entre partículas do solo e as partículas do cimento fazendo com que a estrutura cimentada apresente maior resistência à compressão simples.

✓ Portanto conclui-se que todas as combinações de solo com cimento e cinza de casca de arroz atendem a resistência à compressão simples mínima exigida pelo DER do Paraná - ES-P 11/05 - solo tratado com cimento, podendo ser empregados como material de sub-base por atingir uma resistência maior que 1,2 MPa. E as combinações de (Solo + 10% cimento), (Solo + 13% cimento), (Solo + 10% cimento + 5% CCA), (Solo + 10% cimento + 10% CCA) e (Solo + 10% cimento + 15% CCA) podem ser empregados como camada de base de pavimentos sendo exigido pelo DNIT e pela norma de dosagem solo-cimento NBR 12253/92 uma resistência maior que 2,1 MPa. Com exceção de apenas uma mistura a de (Solo + 6% cimento) que não se enquadra nos critérios exigidos pelo DNIT e pela norma de

dosagem solo-cimento NBR 12253/92 como camada de base de pavimentos, mas podendo ser empregada como material de sub-base.

✓ Teores de 10% de cimento incorporado ao solo foram suficientes para promover uma estabilização mínima, resultando em valores de resistência adequados para sua utilização como material de base de rodovias, visando maior desempenho e durabilidade das estradas e levando em consideração questões sócio-ambientais.

✓ A utilização conjunta da cinza da casca de arroz com o cimento apresentou potencial técnico para a estabilização do solo analisados neste trabalho, podendo apresentar vantagens econômicas na sua utilização como material de base e sub-base de rodovias. Desta forma é interessante a difusão desta técnica de estabilização já que ela pode representar uma grande economia para os municípios produtores de arroz e a viabilização de programas de pavimentação nas regiões de ocorrência destes grupos de solos.

✓ Quanto maior for o teor de cinza incorporado na mistura composta por 90% de solo + 10% de cimento, maior será a sua umidade ótima e menor será o seu peso específico seco máximo. Com relação à resistência a compressão simples é possível afirmar que todos os traços estudados atenderam a normatização vigente e que o acréscimo da CCA além de melhorar a resistência em alguns casos também colabora com a reutilização desse material, considerado um passivo ambiental.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Verifica-se que muitas dúvidas puderam ser esclarecidas neste estudo, contudo algumas preocupações e investigações ainda necessitam serem melhores analisadas. Neste sentido, sugere-se a realização de estudos adicionais e pesquisas futuras que possam esclarecer melhor alguns pontos ou mesmo complementar estas investigações.

- ✓ Analisar cinzas de casca de arroz incineradas a temperatura controlada com métodos diferentes utilizado na pesquisa e variando o tempo de incineração para avaliar os efeitos destes fatores de incineração no tipo de cinza produzida;
- ✓ Estudar diferentes tempos de moagem da cinza de casca de arroz para avaliar os efeitos destes fatores na resistência a compressão simples;
- ✓ Comparar o comportamento dos solos estabilizados com CCA utilizando diferentes traços;
- ✓ Analisar o comportamento de outros tipos de solos misturados com esses aditivos;
- ✓ Realizar um estudo a respeito do comportamento de diversos tipos de solos com outras dosagens de aditivos.
- ✓ Estudar a RCS de CP's com outras energias de compactação;
- ✓ Realização de trecho experimental na rodovia, para avaliação do desempenho de pavimentos com camadas de solos estabilizados com cinza de casca de arroz e cimento;
- ✓ Analisar a influencia dos outros tipos de cimento Portland na estabilização de solos;
- ✓ Fazer experimentos com as misturas observando o ganho de resistência com a temperatura e tempo de cura.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12023** – Solo-cimento: ensaio de compactação. Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT 1992.

_____. **NBR 12025** – Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1990.

_____. **NBR 12253** – Solo-cimento: Dosagem para o emprego como camada de pavimento. Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

_____. **NBR 6457** - Amostras de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6459** - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**- Massa específica dos Sólidos. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180** - Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR-7181** – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR-7182** – Solo Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1984.

DNIT 058/2004 – Pavimento Rígido – execução de sub-base de solo-cimento – especificações de serviço.

DNIT 143/2010 – Pavimentação – Base de solo-cimento - especificações de serviço.

DER/PR ES-P 11/05 – Pavimentação – solo-cimento e solo tratado com cimento.

ASSOCIAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Solo-Cimento na pavimentação**. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento> > Acesso em: 05 de Abril de 2011.

ABIKO, A. K (1980). Estabilização de solos com cimento pozolânico de cinza de casca de arroz e de resíduos cerâmico. Tese de Doutorado SP – EPUSP.

ALI, F. H; ADNAN, A.; CHOY, C. K. Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized soil from Malaysia with Husk Ash as an Additive. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 10, n. 2, pp 117 – 134 Amsterdam, 1992.

ALMEIDA, G. C. P. Caracterização física e classificação dos solos. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2005.

BALBO, J. T. (2007). Pavimentação Asfáltica, materiais, projeto e restauração. Edit. Oficina de Textos – SP.

BARBOSA, N. P.; TOLÊDO FILHO, R. D. Construção com terra crua. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap. 4, p.113-43.

BASHA E.A.; HASHIM, R.; MAHMUD, H.B.; MUNTOHAR, A.S. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. **Construction and Building Materials**, 2005.

BEZERRA, A. C. S. Influência das Variáveis de Ensaio nos Resultados de Resistência à Compressão de Concretos: uma análise experimental e computacional, Dissertação, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção: Volume 2. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001. 951 p.

CASANOVA, F. J. O. C. Um Estudo Físico-químico-matemático da estabilização Alcalina de Solos Argilosos. Dissertação – Mestrado em Engenharia – UFRJ.

COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL - ALEGRETE LTDA – CAAL, **queima da casca de arroz Usina Termoelétrica. Disponível em:** < <http://www.caal.com.br/site/paginas/ver/usina-termoeletrica-caal> > Acesso em: 10 de Abril de 2011.

CROFT, J. B. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization
Geotechnique – 1967

<http://CRATERRE.org/> acessado em 21 de Junho 2012.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC, 9, 2002, Foz do Iguaçu, PR. Anais... São Paulo: Epusp/Antac. p.1671-80.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 560 p. il.

DELGADO, M. C. J.; GUERRERO, I. C. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*. n.21. p.237-51. 2007.

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de Cinza de Casca de Arroz para Uso como Matéria-Prima na Fabricação de Refratários de Sílica. *Química Nova*, V. 24. Florianópolis/SC: DCEN/UFSC, 2001.

DNIT, (2006). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR, 3ª Ed. Rio de Janeiro.

FELTRIN, Maikon Gonçalves. Desenvolvimento de blocos vazados de solo cimento visando à autoconstrução de habitações populares. 2008. 98 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

FERREIRA, A. A.; SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C. A cinza da casca de arroz : possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção. In: Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis,

1, 1997, Canela, RS. Anais... São Paulo: [s.n.].

FERRAZ, R. L. Contribuição ao Estudo da Estabilização de Solos para Fins Rodoviários e Habitacionais. Viçosa UFV, 1994 – Dissertação – Mestrado em Engenharia Civil

FREIRE, W. J. Construções rurais: materiais. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991. p.105-61.

GOOGLE EARTH. **Programa de Imagens por Satélite**. Versão 6.1.0.5001, acessado em 5 de abril 2012.

GRANDE, Mazzeo Fernando. **Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-Cimento por Prensagem Manual Com e Sem Adição de Sílica Ativa**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo: Dissertação de mestrado 2003.

GRANDE, F. M. Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, SP. 2003.

GUIMARÃES, J. E. P. A cal: Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil. São Paulo: Pini, 1997. 285p.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. Earth Construction – A comprehensive guide. London: Intermediante Technology Publications, 1994. 362p.

ISAIA, G. C. Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo da durabilidade com vistas à corrosão da armadura. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F.; TAMBA, S.; CISSE, I. Origin of the pozzolanic effect of rice husks. Construction and Building Materials. n.14, p.419 -23, 2000.

KRISHNARAO, R.V.; SUBRAHMANYAM, J. e KUMAR, T.J. Studies on the formation of

black particles in rice husk silica ash. Journal of the European Ceramic Society. n.21, p.99-104, 2001.

LAMBE, T. W. (1958). The structure of compacted Clay. Jnl. Of the mech. And foundn. Div ASCE, 84 (SM2), 10-34.

LIMA, T.V.; ALEXANDRE. **Influência do tipo de solo na produção de blocos ecológicos (solo-cimento)**. in: conferência brasileira sobre materiais e tecnologias não-convencionais na construção ecológica e sustentável - nocmat, 2006, Salvador, **Banais**. Salvador:

MACHADO, S. L. (2002) – “Apostila de Mecânica dos Solos” – Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Departamento de Geotecnia da Escola Politécnica de Engenharia
MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. Notas de Aula 4: O Pavimento Rodoviário. **Net**. Juiz de Fora, jun. 2005. Disponível em: <<http://www.pavimentação.ufjf.br>> Acesso em: 15 de Novembro de 2011.

METHA, P. K.. Properties of Blended Cements Made from Rice Husk Ash. ACI Journal.. p.440-42, 1977

MILANI, Ana Paula da Silva. Avaliação **física, mecânica e térmica do material solo cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica**
Campinas, SP: [s.n.], 2008.

MOH, Z.C Soil stabilization with cement and sodium additives. Journal of the Mechanics and Foundations Division, 1962.

NAKATA, Y., SUZUKI, M., OKUTANI, T.,. JPN. J Ceram, Soc 97 (1989).

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. Ed. Pini, 1ª Edição, São Paulo, 1982, apud LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Produção de painéis cimentomadeira de eucalipto. Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.

NÚÑEZ, W. P.. **Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1991.

ORTIGÃO, J.R.A. Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos 2007.

PETRUCCI, E. G. R. Materiais de construção. 13º Ed. SP – Globo S.A - 1998

PICCHI, F. A.; CINCOTTO, M. A.; BARROS, J. M. C. Tijolos de solo-cal. Revista A Construção, São Paulo, p.93-8, 1990. Tecnologia de edificações IPT / Ded90.

PINHEIRO, José Barbosa. **Princípio da estabilização dos solos.** Materiais para infraestrutura de transportes, (2009), UFSM. D.Sc pela UFRGS.

PINTO, C.S. (2002). “Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas”.

PITTA, M. R. Características tecnológicas dos solos estabilizados com cimento. São Paulo: ABCP, 1980. 16p.

POUEY, M. T. F. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. 275p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2006.

PROCTOR, R. R.; (1933) “Fundamental Principles of Soil Compaction”, Engineering News Record, August, 31.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. Cinza da casca de arroz. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. Utilização de resíduos na construção habitacional. Porto Alegre: Coletânea Habitar/ Antac, 2003. v.4, cap.8, p.240-61.

RAHMAN, M. A. Effect of Cement Rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lareritic Soil. Journal Soil Foundation, 1986.

RODRIGUES FILHO, H. C. e BUCHER, H. R. E. - Argamassas de enxofre para capeamento de corpos de prova. Seminário sobre controle de resistência do concreto, IBRACON, São Paulo, 1983.

SANTOS, Aline Selau. Análise das Propriedades Mecânicas dos Solos Estabilizados com Aditivo Químico CON-AID® Para o Emprego em Obras de Pavimentação. 2008. 140 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

SCANDIUSSI, L.; ANDRIOLO, F. R. Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios. São Paulo: Pini, 1986.

TAYLOR, H.F.W. Cement Chemistry. London: Academic Press, 1992. 475p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. Mecânica dos solos na prática da engenharia. Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1962.

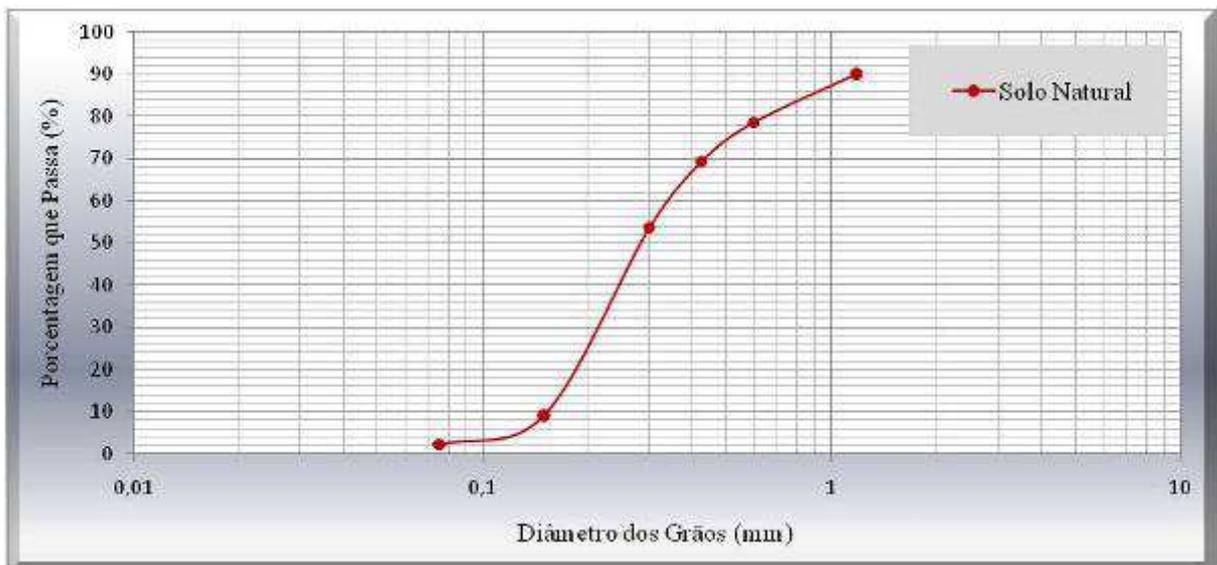
TRINDADE, Tiago Pinto da et al. Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibra de polipropileno de distribuição aleatória, 2006.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

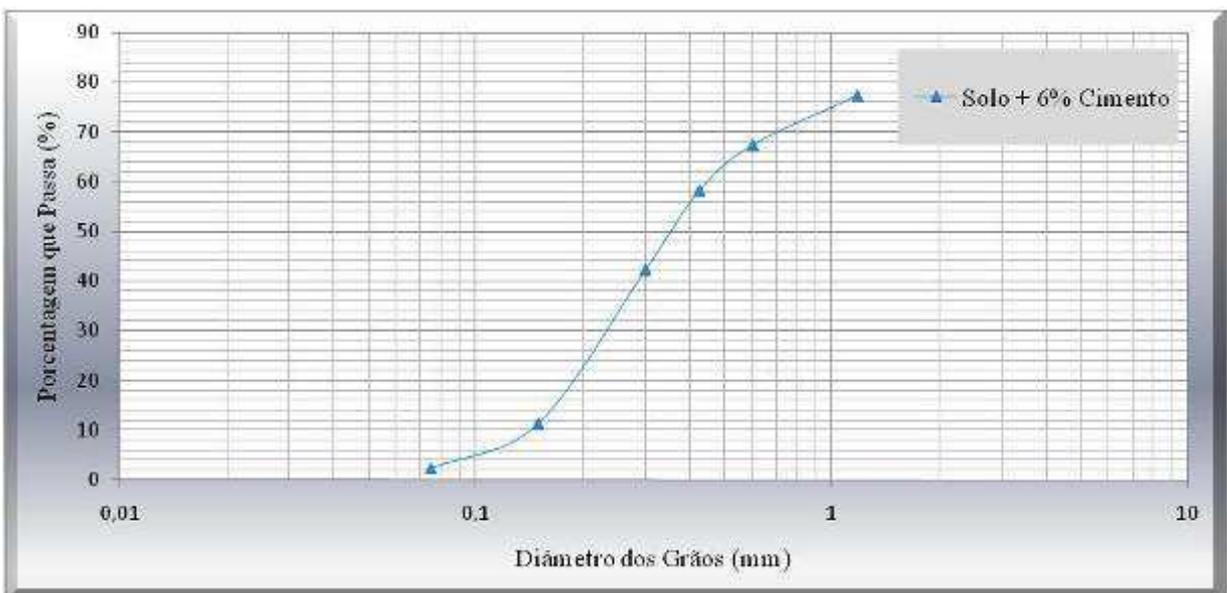
VENDRUSCOLO, M. A. Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais. Porto Alegre, 2003. 224 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

APÊNDICE A – Planilhas dos Ensaio de Caracterização do Solo e Misturas Solo-Cimento-Cinza

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Material: SOLO NATURAL					
Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1.074	Cápsula Nº	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido nº 10 (g)	0,00	Peso Cápsula Nº (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando Nº 10 Úmida (g)	1.073,80	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	30,64
Água (g)	73,83	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	67,14
Passando Nº 10 Seca (g)	999,97	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	2,22
Amostra Total Seca (g)	999,97	Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
		Fator de Correção	0,9312		
PENEIRAMENTO					
Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
Nº 4		0	0	100	4,8
Nº 10		0	0	100	2,0
Nº 16	98,74	10	10	90	1,2
Nº 30	114,88	11	21	79	0,6
Nº 40	92,81	9	31	69	0,42
Nº 50	157,92	16	46	54	0,30
Nº 100	444,04	44	91	9	0,15
Nº 200	69,40	7	98	2	0,074



 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Material: SOLO + 6% CIMENTO					
Amostra Total Úmida (g)	1.073	Cápsula Nº	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido nº 10 (g)	0,00	Peso Cápsula Nº (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando Nº 10 Úmida (g)	1.072,75	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	41,81
Água (g)	73,75	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	55,86
Passando Nº 10 Seca (g)	999,00	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	2,33
		Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
Amostra Total Seca (g)	999,00	Fator de Correção	0,9312		
PENEIRAMENTO					
Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
Nº 4		0	0	100	4,8
Nº 10		0	0	100	2,0
Nº 16	226,85	23	23	77	1,2
Nº 30	99,17	10	33	67	0,6
Nº 40	91,65	9	42	58	0,42
Nº 50	159,02	16	58	42	0,30
Nº 100	308,92	31	89	11	0,15
Nº 200	90,10	9	98	2	0,074



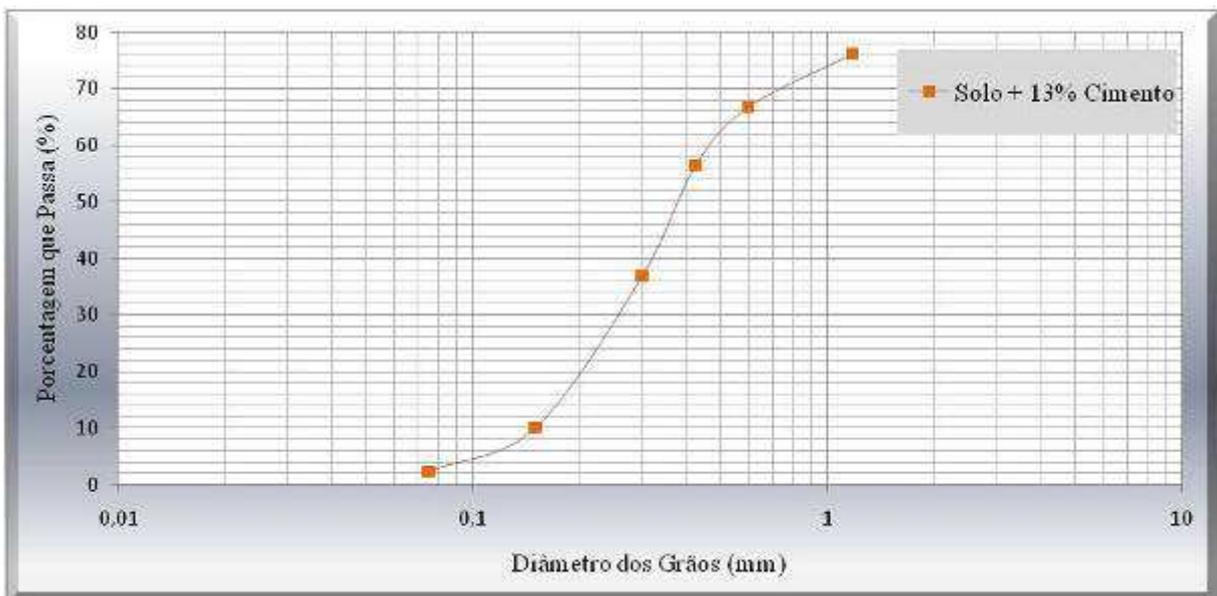
 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Material: SOLO + 10% CIMENTO					
Amostra Total Úmida (g)	1.072	Cápsula Nº	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido nº 10 (g)	0,00	Peso Cápsula Nº (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando Nº 10 Úmida (g)	1.072,40	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	39,76
Água (g)	73,73	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	57,72
Passando Nº 10 Seca (g)	998,67	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	2,52
Amostra Total Seca (g)	998,67	Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
		Fator de Correção	0,9312		

PENEIRAMENTO					
Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
Nº 4		0	0	100	4,8
Nº 10		0	0	100	2,0
Nº 16	196,67	20	20	80	1,2
Nº 30	96,93	10	29	71	0,6
Nº 40	103,44	10	40	60	0,42
Nº 50	201,12	20	60	40	0,30
Nº 100	286,11	29	89	11	0,15
Nº 200	89,23	9	97	3	0,074



 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Material: SOLO + 13% CIMENTO					
Amostra Total Úmida (g)	1.073	Cápsula Nº	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido nº 10 (g)	0,00	Peso Cápsula Nº (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando Nº 10 Úmida (g)	1.073,06	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	43,53
Água (g)	73,78	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	54,07
Passando Nº 10 Seca (g)	999,28	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	2,40
Amostra Total Seca (g)	999,28	Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
		Fator de Correção	0,9312		

PENEIRAMENTO					
Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
Nº 4		0	0	100	4,8
Nº 10		0	0	100	2,0
Nº 16	238,55	24	24	76	1,2
Nº 30	93,49	9	33	67	0,6
Nº 40	102,99	10	44	56	0,42
Nº 50	195,82	20	63	37	0,30
Nº 100	267,12	27	90	10	0,15
Nº 200	77,36	8	98	2	0,074



 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Material: SOLO + 10% CIMENTO + 5% CCA					
Amostra Total Úmida (g)	1.073	Cápsula Nº	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido nº 10 (g)	0,00	Peso Cápsula Nº (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando Nº 10 Úmida (g)	1.072,68	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	36,28
Água (g)	73,75	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	58,08
Passando Nº 10 Seca (g)	998,93	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	5,64
Amostra Total Seca (g)	998,93	Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
		Fator de Correção	0,9312		

PENEIRAMENTO

Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
Nº 4		0	0	100	4,8
Nº 10		0	0	100	2,0
Nº 16	168,33	17	17	83	1,2
Nº 30	89,44	9	26	74	0,6
Nº 40	104,65	10	36	64	0,42
Nº 50	198,05	20	56	44	0,30
Nº 100	289,53	29	85	15	0,15
Nº 200	92,63	9	94	6	0,074



Material: SOLO + 10% CIMENTO + 10% CCA

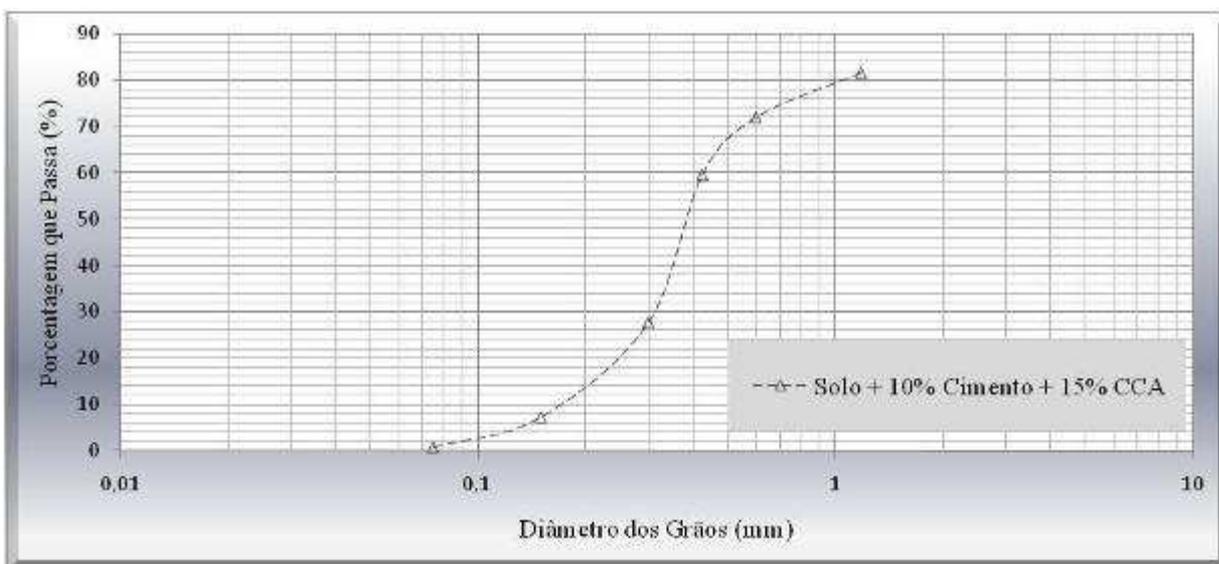
Amostra Total Úmida (g)	1.074	Cápsula Nº	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido nº 10 (g)	0,00	Peso Cápsula Nº (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando Nº 10 Úmida (g)	1.073,69	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	36,23
Água (g)	73,82	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	62,52
Passando Nº 10 Seca (g)	999,87	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	1,24
		Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
Amostra Total Seca (g)	999,87	Fator de Correção	0,9312		

PENEIRAMENTO

Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
Nº 4		0	0	100	4,8
Nº 10		0	0	100	2,0
Nº 16	166,96	17	17	83	1,2
Nº 30	95,39	10	26	74	0,6
Nº 40	99,94	10	36	64	0,42
Nº 50	272,88	27	64	36	0,30
Nº 100	263,22	26	90	10	0,15
Nº 200	89,06	9	99	1	0,074



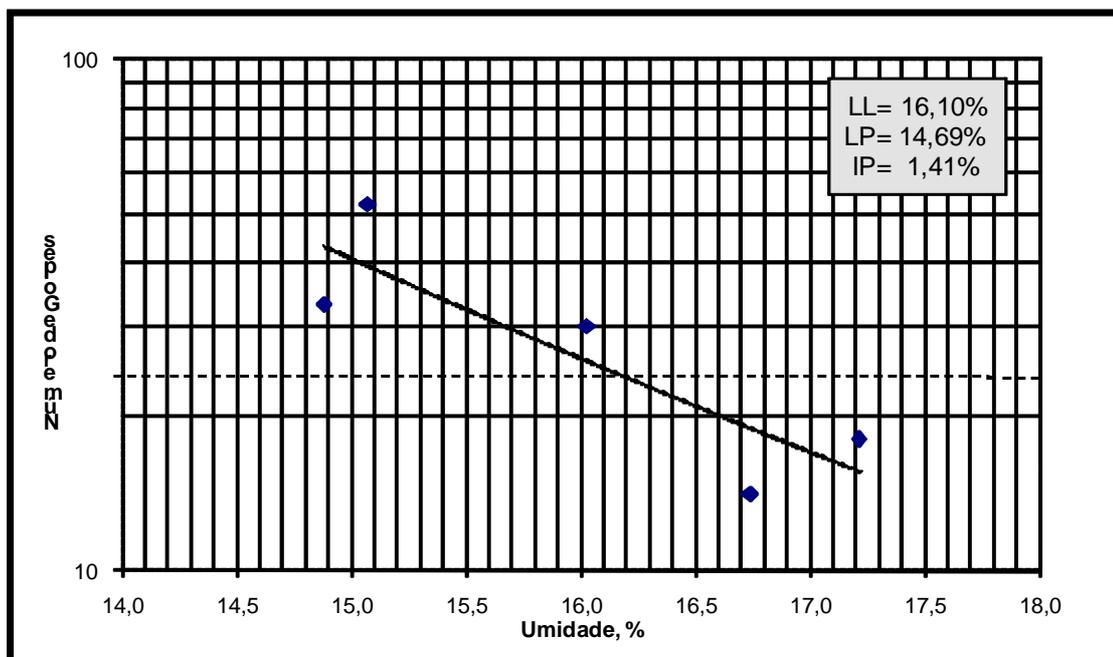
 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Material: SOLO + 10% CIMENTO + 15% CCA					
Amostra Total Úmida (g)	1.073	Cápsula Nº	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido nº 10 (g)	0,00	Peso Cápsula Nº (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando Nº 10 Úmida (g)	1.073,41	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	40,39
Água (g)	73,80	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	58,99
Passando Nº 10 Seca (g)	999,61	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	0,62
Amostra Total Seca (g)	999,61	Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
		Fator de Correção	0,9312		
PENEIRAMENTO					
Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
Nº 4		0	0	100	4,8
Nº 10		0	0	100	2,0
Nº 16	183,66	18	18	82	1,2
Nº 30	96,19	10	28	72	0,6
Nº 40	123,94	12	40	60	0,42
Nº 50	320,12	32	72	28	0,30
Nº 100	204,70	20	93	7	0,15
Nº 200	64,82	6	99	1	0,074



LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		1	3	10	13	14
S O S L L	Total Úmido	18,40	26,54	22,47	18,44	20,25
	Total Seco	18,01	25,94	21,81	18,01	19,78
	Cápsula	15,14	21,05	18,04	15,20	16,60
	Água	0,39	0,60	0,66	0,43	0,47
	Solo Seco	2,87	4,89	3,77	2,81	3,18
Umidade (%)		13,59	12,27	17,51	15,30	14,78
Limite de Plasticidade		14,69				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		52		33		30		18		14	
Número da Cápsula		90	6	70	16	26	22	9	66	86	31
S O S L L	Total Úmido	34,15	32,17	31,91	33,80	31,51	31,05	33,32	33,91	32,13	35,63
	Total Seco	33,26	31,46	31,10	32,94	30,67	30,37	32,24	32,71	31,26	34,37
	Cápsula	27,34	26,76	25,58	27,24	25,39	26,16	26,11	25,58	25,96	26,99
	Água	0,89	0,71	0,81	0,86	0,84	0,68	1,08	1,20	0,87	1,26
	Solo Seco	5,92	4,70	5,52	5,70	5,28	4,21	6,13	7,13	5,30	7,38
Umidade (%)		15,0	15,1	14,7	15,1	15,9	16,2	17,6	16,8	16,4	17,1
Umidade Média (%)		15,1		14,9		16,0		17,2		16,7	



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

ALUNO: RICARDO

LAB. DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

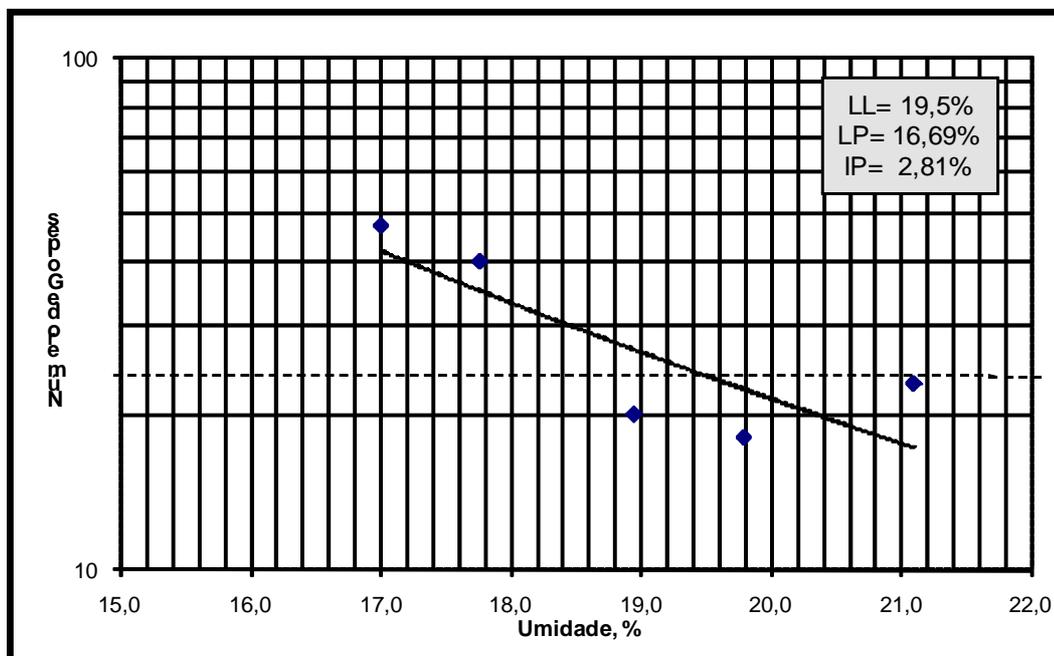
PROFESSOR: MAGNOS

AMOSTRA: 100% SOLO NATURAL

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		6	2	22	80	86
S O L O	Total Úmido	21,28	20,21	19,21	21,42	21,02
	Total Seco	20,91	19,88	18,99	20,85	20,56
	Cápsula	18,72	17,78	17,63	17,36	18,05
	Água	0,37	0,33	0,22	0,57	0,46
	Solo Seco	2,19	2,10	1,36	3,49	2,51
Umidade (%)		16,89	15,71	16,18	16,33	18,33
Limite de Plasticidade		16,69				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		47		40		23		20		18	
Número da Cápsula		41	30	88	10	8	93	1	75	85	58
S O L O	Total Úmido	26,74	24,92	23,61	24,87	25,38	27,69	24,83	24,50	27,42	27,15
	Total Seco	25,97	23,89	22,82	23,99	23,93	26,07	23,80	23,47	26,05	25,76
	Cápsula	21,43	17,85	18,49	18,90	17,55	17,75	18,42	17,98	19,24	18,62
	Água	0,77	1,03	0,79	0,88	1,45	1,62	1,03	1,03	1,37	1,39
	Solo Seco	4,54	6,04	4,33	5,09	6,38	8,32	5,38	5,49	6,81	7,14
Umidade (%)		17,0	17,1	18,2	17,3	22,7	19,5	19,1	18,8	20,1	19,5
Umidade Média (%)		17,0		17,8		21,1		19,0		19,8	



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

ALUNO: RICARDO

LAB. DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

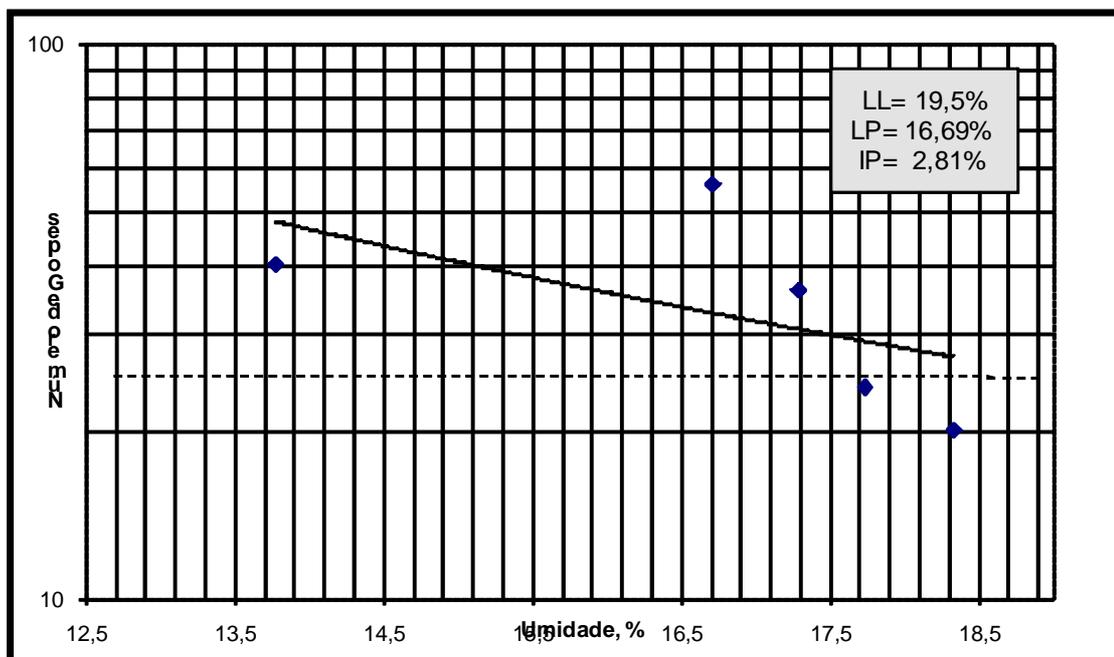
PROFESSOR: MAGNOS

AMOSTRA: 94% SOLO + 6% CIMENTO

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		17	78	51	94	36
S O S L L	Total Úmido	19,81	21,82	24,31	20,64	21,52
	Total Seco	19,64	21,50	24,11	20,26	21,11
	Cápsula	18,07	18,97	22,26	17,62	18,21
	Água	0,17	0,32	0,20	0,38	0,41
	Solo Seco	1,57	2,53	1,85	2,64	2,90
Umidade (%)		10,83	12,65	10,81	14,39	14,14
Limite de Plasticidade		12,56				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		56		40		36		24		20	
Número da Cápsula		27	45	72	55	87	79	37	100	66	31
S O S L L	Total Úmido	26,75	30,31	24,41	28,96	24,85	24,44	27,55	25,16	24,72	25,55
	Total Seco	25,51	29,11	23,73	28,17	23,42	23,81	26,11	24,23	23,58	24,51
	Cápsula	18,14	21,88	18,68	22,56	17,55	17,64	18,09	18,92	17,37	18,83
	Água	1,24	1,20	0,68	0,79	1,43	0,63	1,44	0,93	1,14	1,04
	Solo Seco	7,37	7,23	5,05	5,61	5,87	6,17	8,02	5,31	6,21	5,68
Umidade (%)		16,8	16,6	13,5	14,1	24,4	10,2	18,0	17,5	18,4	18,3
Umidade Média (%)		16,7		13,8		17,3		17,7		18,3	



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

ALUNO: RICARDO

LAB. DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

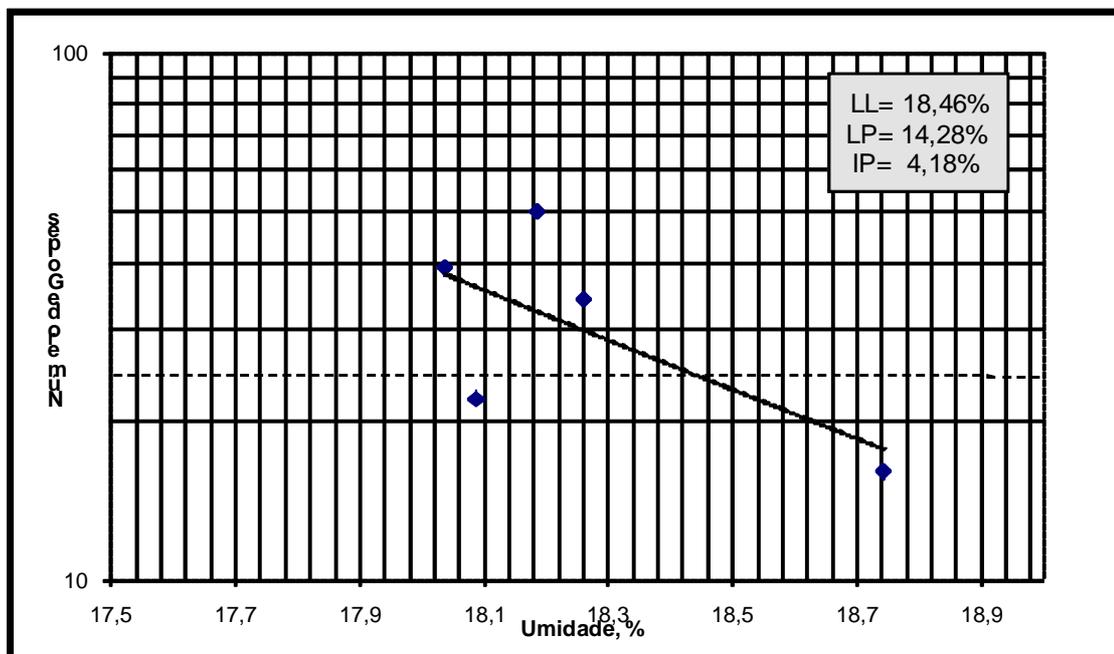
PROFESSOR: MAGNOS

AMOSTRA: 90% SOLO + 10% CIMENTO

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		155	147	137	169	132
D O S E L	Total Úmido	16,49	14,28	19,78	18,23	20,68
	Total Seco	16,30	13,98	19,32	17,92	20,14
	Cápsula	14,79	11,83	16,27	15,92	16,36
	Água	0,19	0,30	0,46	0,31	0,54
	Solo Seco	1,51	2,15	3,05	2,00	3,78
Umidade (%)		12,58	13,95	15,08	15,50	14,29
Limite de Plasticidade		14,28				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		50		39		34		22		16	
Número da Cápsula		174	167	136	153	170	164	173	150	140	156
D O S E L	Total Úmido	19,56	24,32	22,98	22,38	23,13	22,47	23,67	17,55	22,40	17,20
	Total Seco	18,40	23,05	21,77	21,17	21,86	21,11	22,49	16,45	21,33	16,26
	Cápsula	12,00	16,09	14,96	14,56	14,88	13,69	15,91	10,42	15,51	11,34
	Água	1,16	1,27	1,21	1,21	1,27	1,36	1,18	1,10	1,07	0,94
	Solo Seco	6,40	6,96	6,81	6,61	6,98	7,42	6,58	6,03	5,82	4,92
Umidade (%)		18,1	18,2	17,8	18,3	18,2	18,3	17,9	18,2	18,4	19,1
Umidade Média (%)		18,2		18,0		18,3		18,1		18,7	



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

ALUNO: RICARDO

LAB. DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

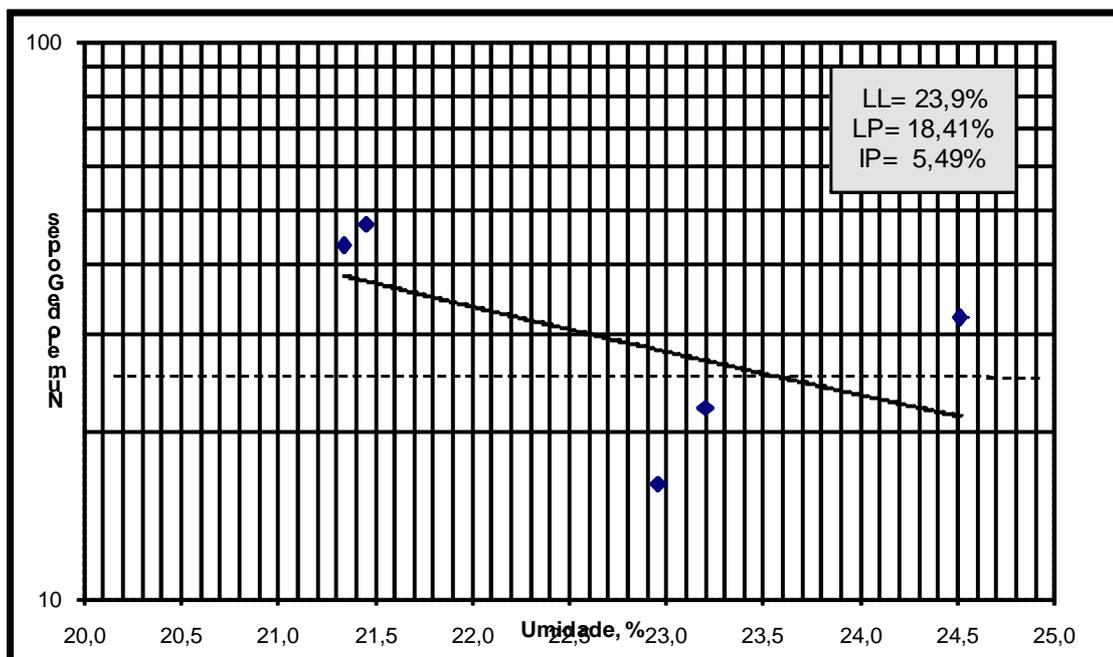
PROFESSOR: MAGNOS

AMOSTRA: 87% SOLO + 13% CIMENTO

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		83	92	6	21	11
S O S L L	Total Úmido	23,43	21,01	20,57	20,69	21,93
	Total Seco	22,90	20,63	20,32	20,38	21,32
	Cápsula	20,04	18,55	18,75	18,76	18,30
	Água	0,53	0,38	0,25	0,31	0,61
	Solo Seco	2,86	2,08	1,57	1,62	3,02
Umidade (%)		18,53	18,27	15,92	19,14	20,20
Limite de Plasticidade		18,41				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		47	43	32	22	16					
Número da Cápsula		89	1	26	69	2	25	5	47	54	53
S O S L L	Total Úmido	27,41	26,72	23,85	24,36	25,13	25,35	26,57	27,27	26,83	26,25
	Total Seco	25,99	25,25	22,78	23,14	23,81	24,02	25,14	25,69	25,30	24,86
	Cápsula	19,37	18,40	17,65	17,55	17,81	19,10	19,09	18,75	18,74	18,71
	Água	1,42	1,47	1,07	1,22	1,32	1,33	1,43	1,58	1,53	1,39
	Solo Seco	6,62	6,85	5,13	5,59	6,00	4,92	6,05	6,94	6,56	6,15
Umidade (%)		21,5	21,5	20,9	21,8	22,0	27,0	23,6	22,8	23,3	22,6
Umidade Média (%)		21,5	21,3	21,3	21,3	24,5	23,2	23,2	23,0	23,0	23,0



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

ALUNO: RICARDO

LAB. DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

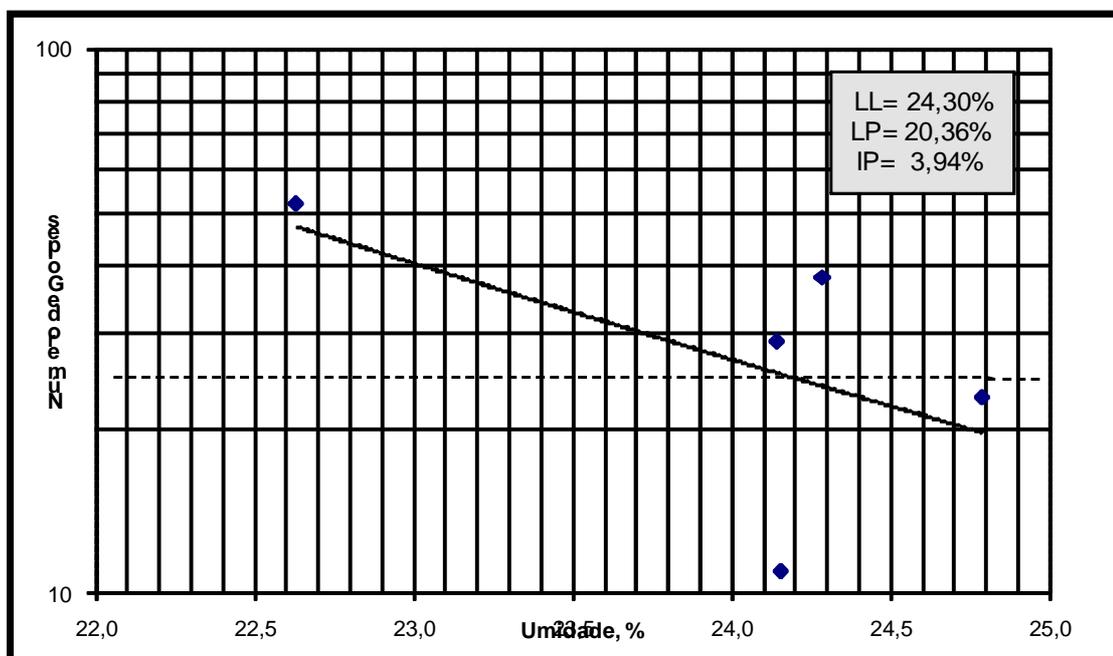
PROFESSOR: MAGNOS

AMOSTRA: 85% SOLO + 10% CIMENTO + 5% CCA

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		24	65	81	4	49
(D) O S L L	Total Úmido	21,19	20,99	22,60	22,40	20,98
	Total Seco	20,77	20,42	21,98	21,84	20,55
	Cápsula	18,66	17,75	18,87	19,18	18,35
	Água	0,42	0,57	0,62	0,56	0,43
	Solo Seco	2,11	2,67	3,11	2,66	2,20
Umidade (%)		19,91	21,35	19,94	21,05	19,55
Limite de Plasticidade		20,36				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		52		38		29		23		11	
Número da Cápsula		85	22	61	58	38	98	8	75	29	95
(D) O S L L	Total Úmido	29,28	23,23	23,15	24,92	26,85	24,88	23,96	24,74	29,69	23,81
	Total Seco	27,44	22,20	22,17	23,69	25,35	23,57	22,68	23,39	28,25	22,79
	Cápsula	19,18	17,72	18,17	18,58	19,13	18,15	17,52	17,94	22,12	18,68
	Água	1,84	1,03	0,98	1,23	1,50	1,31	1,28	1,35	1,44	1,02
	Solo Seco	8,26	4,48	4,00	5,11	6,22	5,42	5,16	5,45	6,13	4,11
Umidade (%)		22,3	23,0	24,5	24,1	24,1	24,2	24,8	24,8	23,5	24,8
Umidade Média (%)		22,6		24,3		24,1		24,8		24,2	



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

ALUNO: RICARDO

LAB. DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

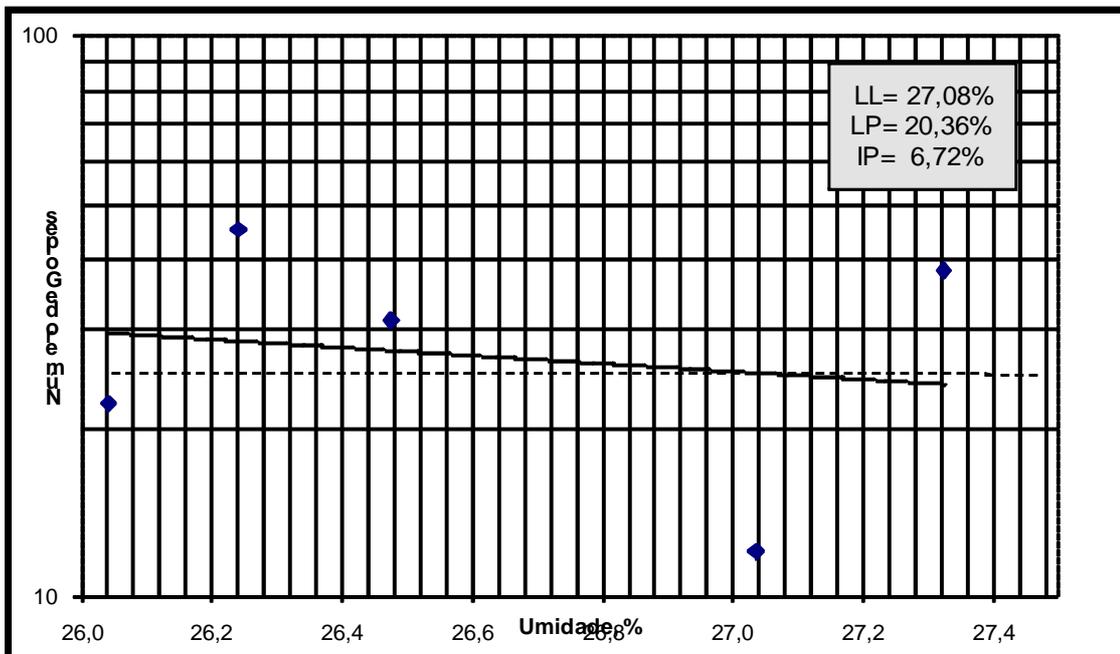
PROFESSOR: MAGNOS

AMOSTRA: 80% SOLO + 10% CIMENTO + 10% CCA

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		17	32	52	94	66
(D) O S L L	Total Úmido	20,37	22,73	21,06	19,37	21,31
	Total Seco	19,99	22,03	20,51	19,04	20,88
	Cápsula	18,07	19,19	18,00	17,60	17,39
	Água	0,38	0,70	0,55	0,33	0,43
	Solo Seco	1,92	2,84	2,51	1,44	3,49
Umidade (%)		19,79	24,65	21,91	22,92	12,32
Limite de Plasticidade		20,32				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		45		38		31		22		12	
Número da Cápsula		82	19	76	60	73	62	31	18	15	57
(D) O S L L	Total Úmido	22,68	25,49	27,88	22,91	24,25	23,06	23,89	24,15	25,45	25,88
	Total Seco	21,62	24,27	26,83	21,70	23,06	22,04	22,86	23,02	23,86	24,49
	Cápsula	17,59	19,61	23,04	17,21	18,49	18,25	18,80	18,79	18,21	19,13
	Água	1,06	1,22	1,05	1,21	1,19	1,02	1,03	1,13	1,59	1,39
	Solo Seco	4,03	4,66	3,79	4,49	4,57	3,79	4,06	4,23	5,65	5,36
Umidade (%)		26,3	26,2	27,7	26,9	26,0	26,9	25,4	26,7	28,1	25,9
Umidade Média (%)		26,2		27,3		26,5		26,0		27,0	



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

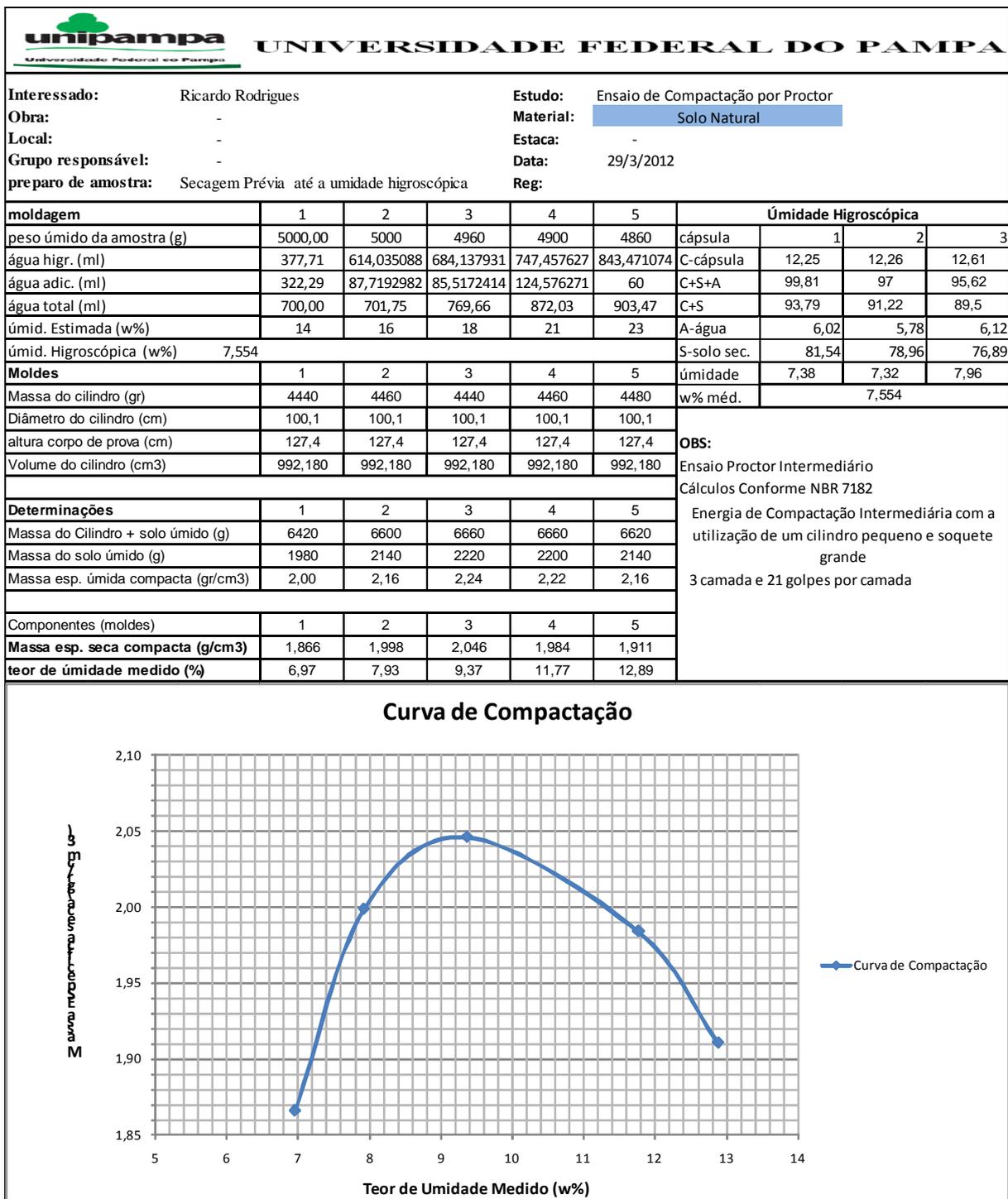
ALUNO: RICARDO

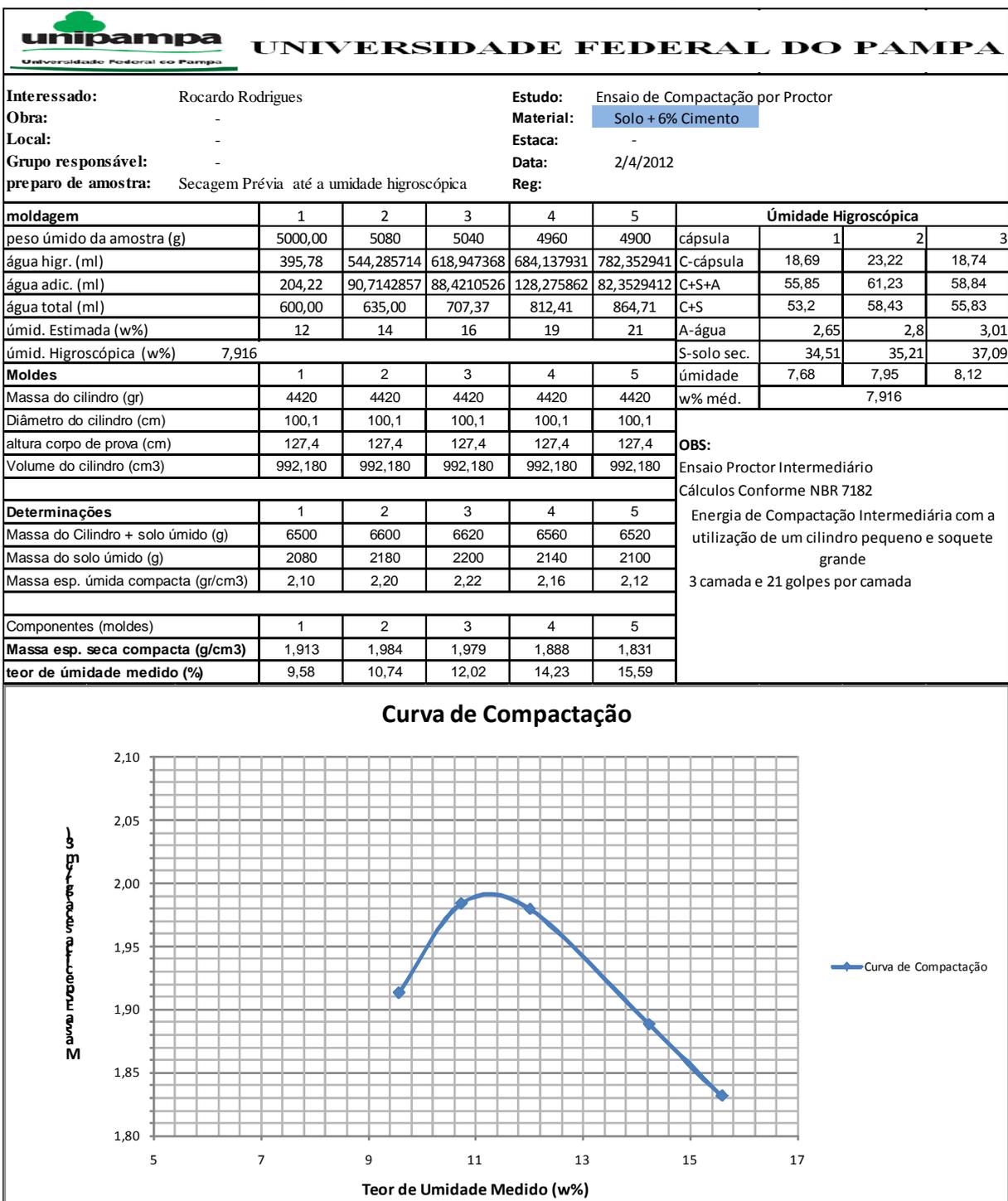
LAB. DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

PROFESSOR: MAGNOS

AMOSTRA: 75% SOLO + 10% CIMENTO + 15% CCA

APÊNDICE B – Planilhas dos Ensaio de Compactação do Solo e Misturas Solo-Cimento-Cinza



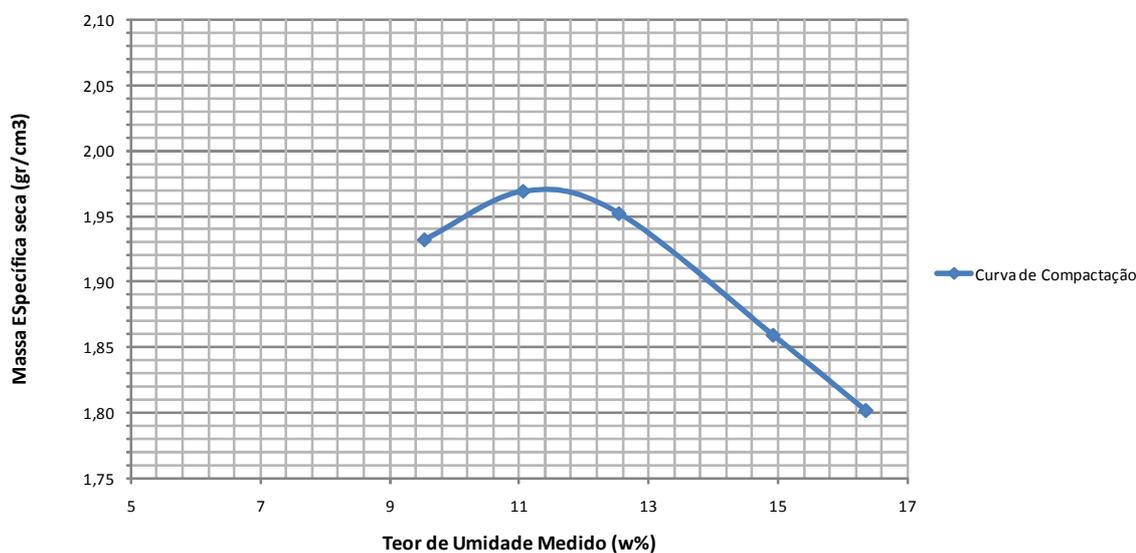


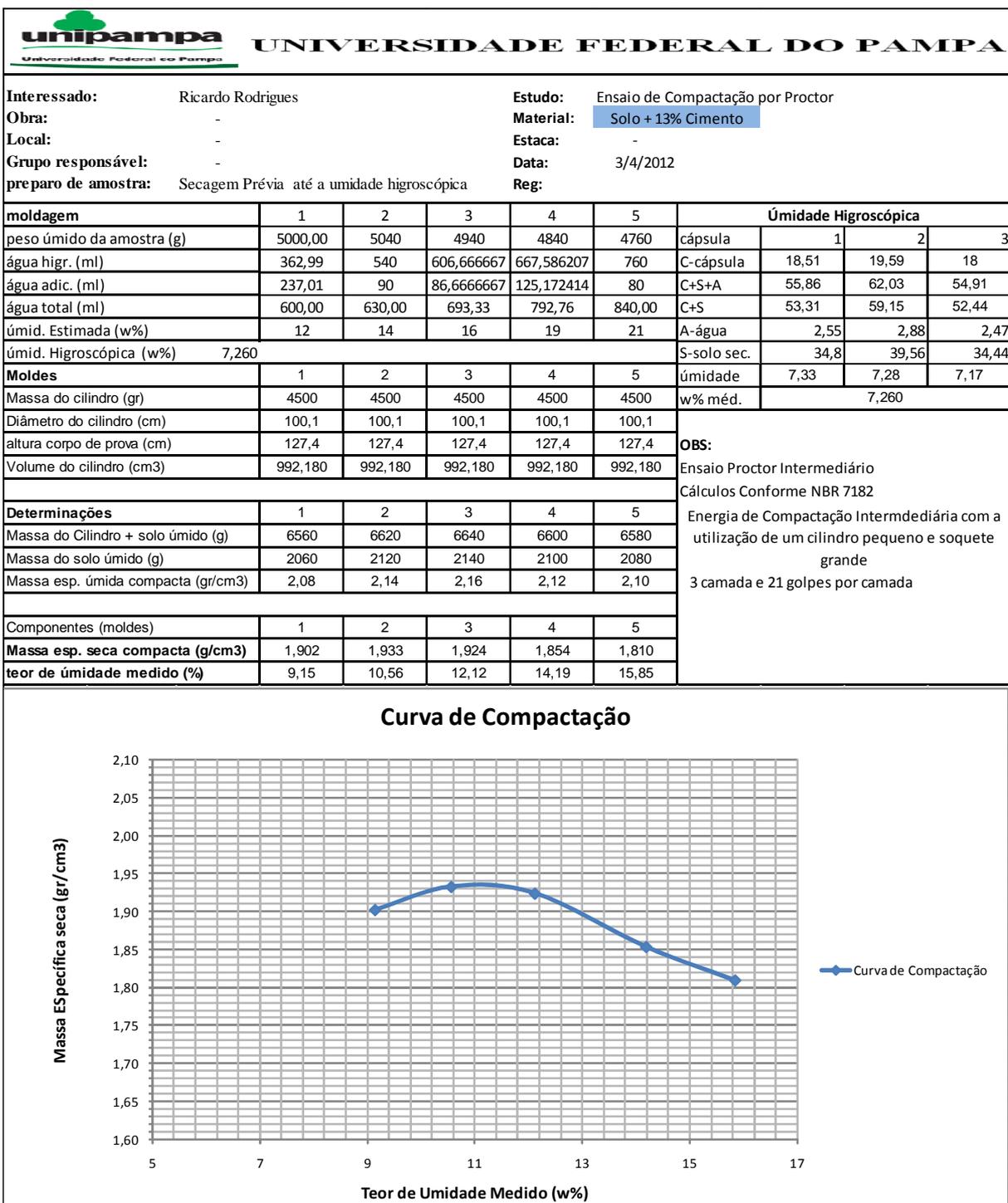


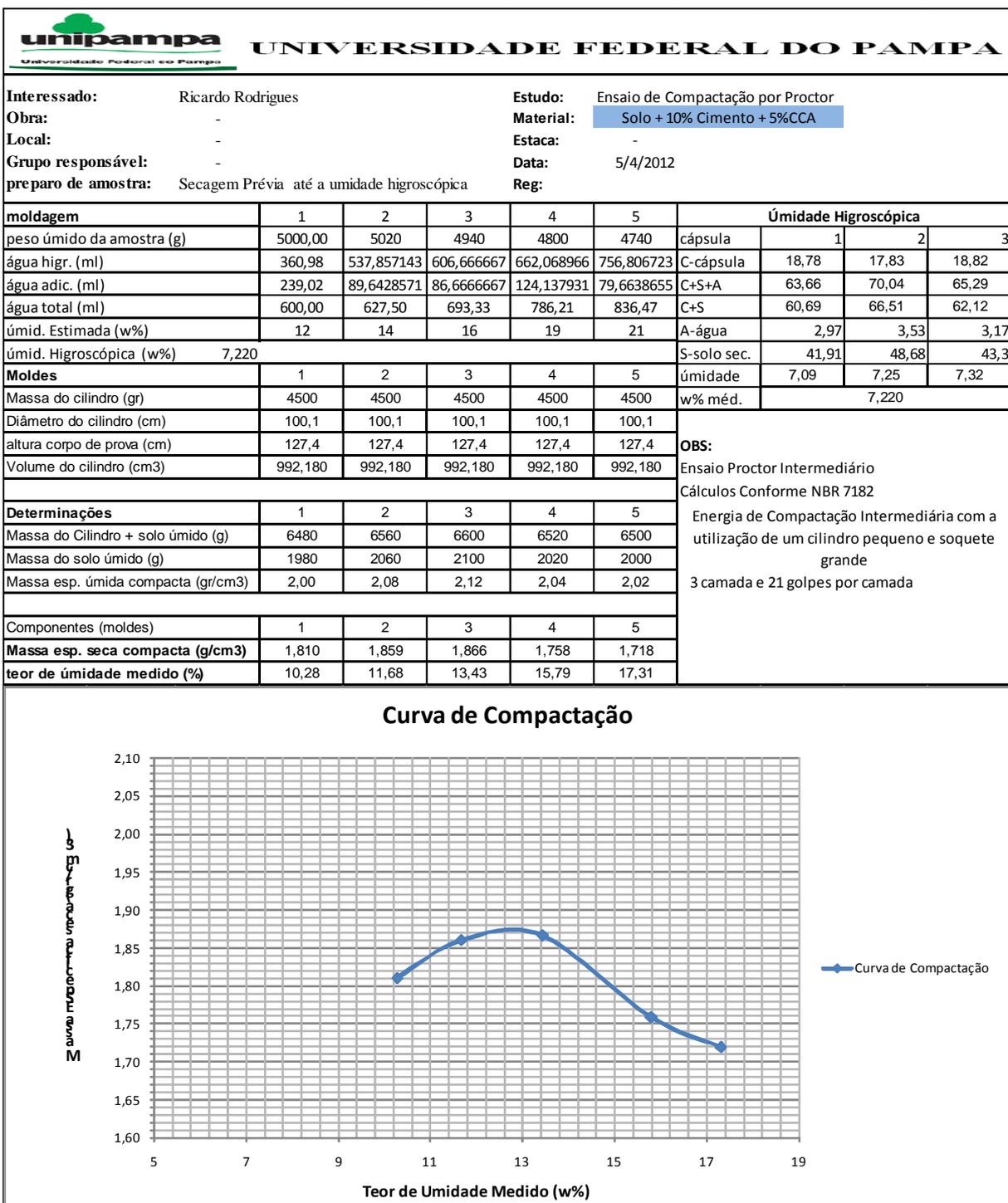
Interessado: Ricardo Rodrigues **Estudo:** Ensaio de Compactação por Proctor
Obra: - **Material:** Solo + 10% Cimento
Local: - **Estaca:** -
Grupo responsável: - **Data:** 2/4/2012
preparo de amostra: Secagem Prévia até a umidade higroscópica **Reg:**

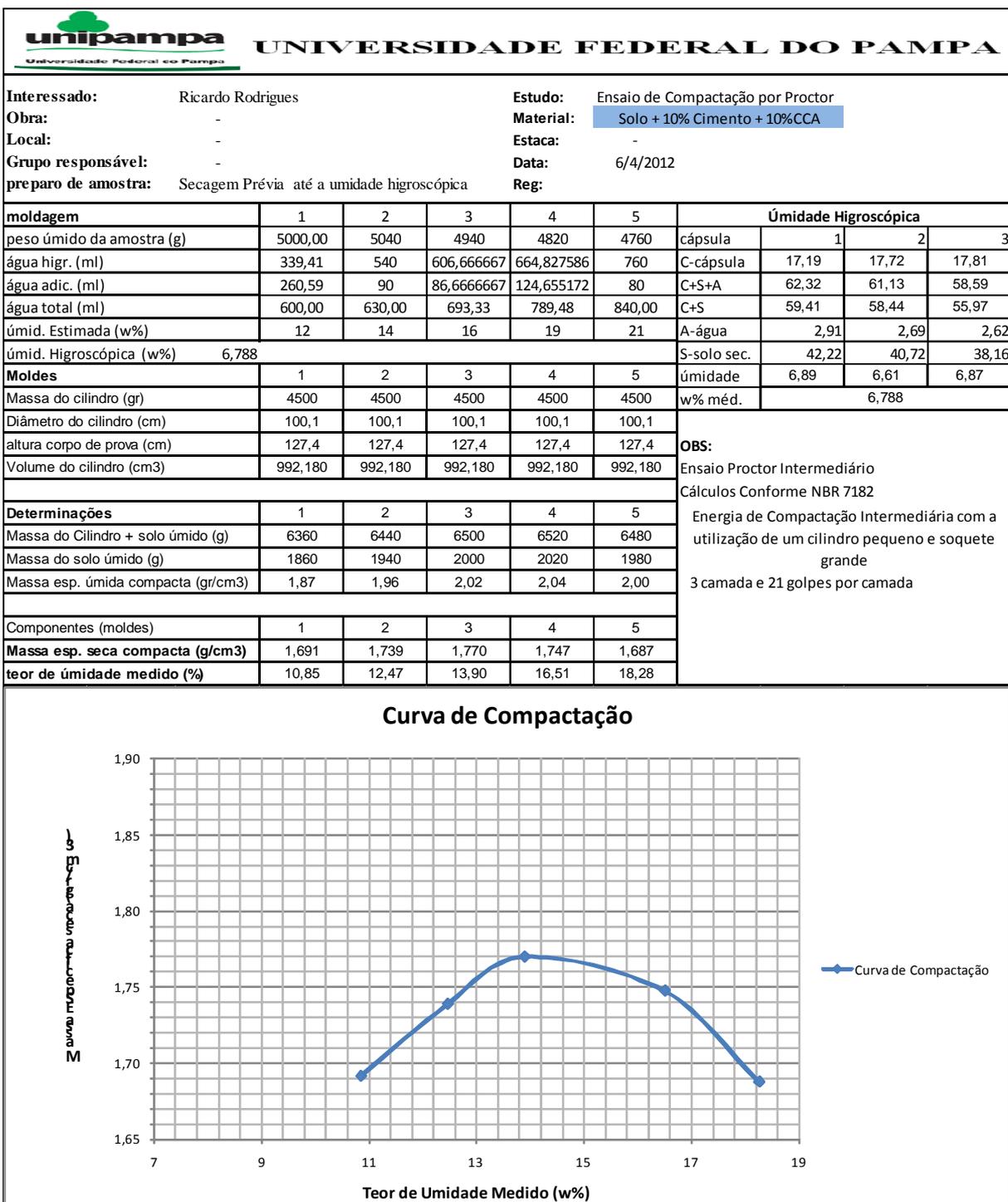
moldagem	1	2	3	4	5	Úmidade Higroscópica		
	1	2	3	4	5	1	2	3
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5000	4960	4800	4720	cápsula		
água higr. (ml)	381,26	535,714286	609,122807	662,068966	753,613445	C-cápsula	18,41	18,95
água adic. (ml)	218,74	89,2857143	87,0175439	124,137931	79,3277311	C+S+A	58,49	61,04
água total (ml)	600,00	625,00	696,14	786,21	832,94	C+S	55,66	58,07
úm. Estimada (w%)	12	14	16	19	21	A-água	2,83	2,97
úm. Higroscópica (w%)	7,625					S-solo sec.	37,25	39,12
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	7,60	7,59
Massa do cilindro (gr)	4480	4480	4480	4480	4480	w% méd.	7,625	
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camada e 21 golpes por camada		
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4			
Volume do cilindro (cm3)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180			
Determinações								
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6580	6650	6660	6600	6560			
Massa do solo úmido (g)	2100	2170	2180	2120	2080			
Massa esp. úmida compacta (gr/cm3)	2,12	2,19	2,20	2,14	2,10			
Componentes (moldes)								
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5			
Massa esp. seca compacta (g/cm3)	1,932	1,969	1,952	1,859	1,802			
teor de umidade medido (%)	9,54	11,07	12,54	14,92	16,35			

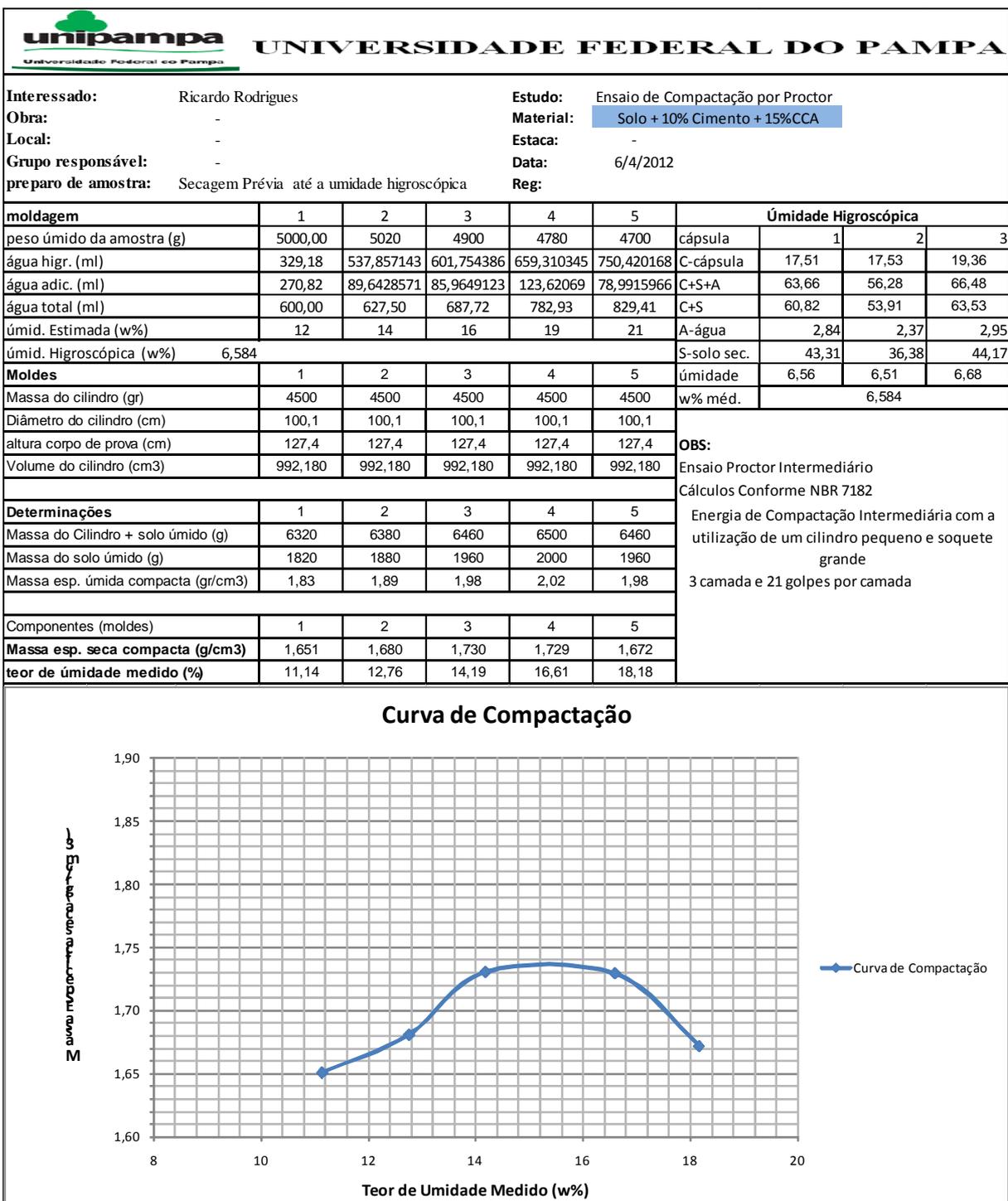
Curva de Compactação











APÊNDICE C – Planilhas dos Ensaios de Massa Específica dos Grãos do Solo e Misturas Solo-Cimento-Cinza

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA <small>Universidade Federal do Pampa</small>							
Interessado:	Ricardo			Estudo:			
Projeto pesquisa:	Massa específica dos Grãos			Material:	94% Solo + 6% Cimento		
Local:	Lab. Materiais e Construção			Estaca:			
Grupo responsável:				Data:			
preparo de amostra:	Ghaith			Reg:			
Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula N°	101	102	103	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	25,66	25,93	27,19	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	43,65	46,13	43,51	Temperatura (°C)	18,0	18,0	18,0
cap. + SS (g)	43,06	45,49	42,97	Pic. + água (g)	667,26	1307,58	1323,37
Umidade (%)	3,39	3,27	3,42	Pic. + água + solo(g)	697,22	1368,28	1383,92
		w (%):	3,36	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,63	2,68	2,67
						G _s :	2,66

Umidade higroscópica		Massa específica dos grãos # 2,4mm					
		Ensaio com picnômetro:			A	B	C
Capsula Nº	101	102	103	Picnômetro Nº	2	4	3
cap. (g)	25,74	26,30	27,48	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	41,43	43,66	44,10	Temperatura (°C)	19,0	19,0	19,0
cap. + SS (g)	40,65	42,73	43,24	Pic. + água (g)	675,50	1308,10	1323,04
Umidade (%)	5,23	5,66	5,46	Pic. + água + solo(g)	706,81	1370,37	1385,66
		w (%):	5,45	Mass. Esp. Água (g/cm ³)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm ³)	2,94	2,91	2,94
						G_s :	2,93

Observação: Devido a um erro na execução do ensaio, o picnômetro A não será considerado. Assim, a massa específica será calculada mediante a média dos picnômetros B e C.

Umidade higroscópica		Massa específica dos grãos # 2,4mm					
		Ensaio com picnômetro:			A	B	C
Capsula Nº	126	128	130	Picnômetro Nº	2	4	3
cap. (g)	14,30	16,58	14,44	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	41,95	40,44	42,91	Temperatura (°C)	21,0	21,0	21,0
cap. + SS (g)	41,16	39,77	42,11	Pic. + água (g)	675,02	1306,31	1322,47
Umidade (%)	2,94	2,89	2,89	Pic. + água + solo(g)	704,76	1367,40	1382,87
		w (%):	2,91	Mass. Esp. Água (g/cm ³)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm ³)	2,58	2,69	2,64
						G_s :	2,64

Unipampa		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Universidade Federal do Pampa							
Interessado:	Ricardo			Estudo:			
Projeto pesquisa:	Massa específica dos Grãos			Material:	85% Solo + 10% Cimento + 5% CCA		
Local:	Lab. Materiais e Construção			Estaca:			
Grupo responsável:				Data:			
preparo de amostra:	Ghaith			Reg:			
Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula Nº	51	64	65	Picnômetro Nº	2	4	3
cap. (g)	22,23	18,94	17,73	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	65,33	69,80	65,60	Temperatura (°C)	19,0	19,0	19,0
cap. + SS (g)	64,17	68,42	64,29	Pic. + água (g)	675,50	1306,00	1321,70
Umidade (%)	2,77	2,79	2,81	Pic. + água + solo(g)	705,81	1366,84	1381,53
		w (%):	2,79	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,65	2,67	2,60
						G_s :	2,64

Unipampa		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Universidade Federal do Pampa							
Interessado:	Ricardo			Estudo:			
Projeto pesquisa:	Massa específica dos Grãos			Material:	85% Solo + 10% Cimento + 10% CCA		
Local:	Lab. Materiais e Construção			Estaca:			
Grupo responsável:				Data:			
preparo de amostra:	Ghaith			Reg:			
Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula Nº	63	73	76	Picnômetro Nº	2	4	3
cap. (g)	17,81	18,44	23,04	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	58,87	57,30	62,81	Temperatura (°C)	15,0	15,0	15,0
cap. + SS (g)	57,79	56,29	61,78	Pic. + água (g)	681,48	1307,19	1326,41
Umidade (%)	2,70	2,67	2,66	Pic. + água + solo(g)	711,30	1367,38	1387,37
		w (%):	2,68	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,58	2,62	2,67
						G_s :	2,62

unipampa		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA					
Universidade Federal do Pampa							
Interessado:	Ricardo	Estudo:					
Projeto pesquisa:	Massa específica dos Grãos	Material:	75% Solo + 10% Cimento + 15% CCA				
Local:	Lab. Materiais e Construção	Estaca:					
Grupo responsável:		Data:					
preparo de amostra:	Ghaith	Reg:					
Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula Nº	18	49	74	Picnômetro Nº	2	4	3
cap. (g)	18,78	18,35	18,68	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	48,15	49,07	58,77	Temperatura (°C)	19,0	19,0	19,0
cap. + SS (g)	47,40	48,27	57,75	Pic. + água (g)	674,80	1306,40	1321,00
Umidade (%)	2,62	2,67	2,61	Pic. + água + solo(g)	704,80	1366,90	1381,40
		w (%):	2,64	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,60	2,64	2,63
						G_s:	2,62

APÊNDICE D – Planilhas dos Ensaios de Compressão Simples do Solo e Misturas Solo-Cimento-Cinza

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO NATURAL		
Data Compactação: 21/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)
28/abr	7	0,46
5/mai	14	0,44
19/mai	28	0,89
16/jun	56	1,17

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO + 6% CIMENTO		
Data Compactação: 19/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)
26/abr	7	1,41
3/mai	14	1,13
17/mai	28	1,29
14/jun	56	1,56

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO + 10% CIMENTO		
Data Compactação: 19/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)
26/abr	7	3,06
3/mai	14	2,77
17/mai	28	3,34
14/jun	56	3,91

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO + 13% CIMENTO		
Data Compactação: 19/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)
26/abr	7	4,06
3/mai	14	3,85
17/mai	28	3,81
14/jun	56	5,11

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO + 10% CIMEN+ 5%CCA		
Data Compactação: 20/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)
27/abr	7	3,74
4/mai	14	4,40
18/mai	28	4,66
15/jun	56	4,13

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO + 10% CIMEN + 10% CCA		
Data Compactação: 21/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)
28/abr	7	2,69
5/mai	14	2,93
19/mai	28	3,41
16/jun	56	4,32

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO + 10% CIMEN + 15% CCA		
Data Compactação: 21/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA (MPa)
28/abr	7	2,35
5/mai	14	2,54
19/mai	28	2,8
16/jun	56	3,21