



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS



**ESTUDO DA DURABILIDADE DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO
COM A INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ**

FRANCISCO AUGUSTO DE SOUZA

Campina Grande - Paraíba

2011

FRANCISCO AUGUSTO DE SOUZA

**ESTUDO DA DURABILIDADE DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO
COM INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos do Centro Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos.

Orientadores:

Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Campina Grande - Paraíba

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DO CFP/UFCG
Dados Internacionais de Catalogação -na- Publicação - (CIP)

S729e Souza, Francisco Augusto de
Estudo de durabilidade de blocos de solo-cimento com a
incorporação de casca de arroz./ Francisco Augusto de Souza.
Campina Grande, 2011.
227f. : il.
Bibliografia.

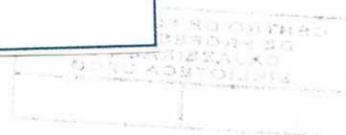
Orientadores: José Wallace Barbosa do Nascimento.
Gelmires de Araújo Neves.
Tese (Doutorado) CCT/UFCG

1. Reciclagem. 2. Resíduos agroindustriais – danos a natureza.
3. Construção civil – aproveitamento de resíduos sólidos.
4. Meio ambiente. I. Nascimento, José Wallace Barbosa do.
II. Melo, Gelmires de Araújo. III. Universidade Federal de
Campina Grande. IV. Título.

UFCG/CFP/BS

CDU - 502.174.1(043.2)

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG



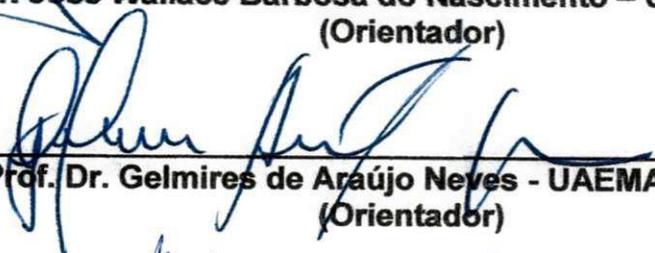
FRANCISCO AUGUSTO DE SOUZA

Este exemplar corresponde à redação da Tese apresentada por **Francisco Augusto de Souza**, em **22/08/2011**, para Comissão julgadora, e para apresentação ao Curso de Doutorado em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como exigências para obtenção do título de doutor.

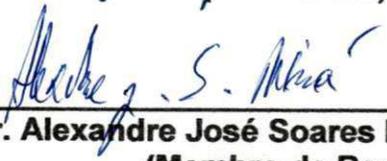
BANCA EXAMINADORA:



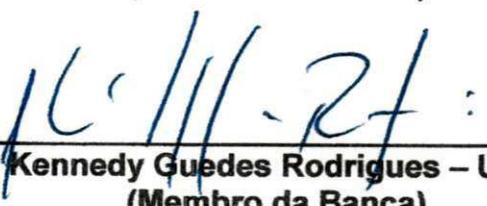
Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento – UAEA/CTRN/UFCG
(Orientador)



Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves - UAEMA/CCT/UFCG
(Orientador)



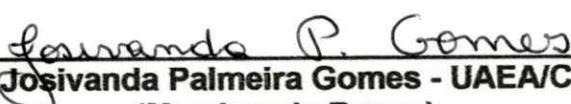
Prof. Dr. Alexandre José Soares Miná – CCHSA/UFPB
(Membro da Banca)



Prof. Dr. Jonh Kennedy Guedes Rodrigues – UAEC/CTRN/UFCG
(Membro da Banca)



Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Moraes – UAEMA/CCT/UFCG
(Membro da Banca)



Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes - UAEA/CTRN/UFCG
(Membro da Banca)

Campina Grande - Paraíba

2011

Aos meus filhos, Rômulo, Rodrigo,
Michelle, Julli e a minha esposa Juliana,
por estar sempre ao meu lado,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter iluminado o meu espírito com boas idéias, conforto e segurança para a elaboração deste trabalho.

Aos Professores orientadores: Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento e Dr. Gelmires de Araújo Neves pela dedicação, amizade, compreensão e conhecimento transmitido ao longo da execução deste trabalho.

Ao Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Coordenador do Doutorado em Engenharia de Processos, da Universidade Federal de Campina Grande, pelo apoio, atenção e colaboração para que o presente trabalho pudesse ser realizado.

À Secretária da Pós-Graduação Maria de Fátima, pelo atendimento sempre eficiente gentil e carinhoso.

Ao Professor Dr. Marcelo Henrique de Melo Brandão do Curso de Geografia da UACS – Unidade Acadêmica de Ciências Sociais do CFP – Centro de Formação de Professores da UFCG, colega e companheiro pelo incentivo e por ter assumido as minhas atividades docentes durante o meu afastamento, meus sinceros agradecimentos.

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos do CCT/UFCG, pelo companheirismo, pelo profissionalismo e pela contribuição direta para a elaboração deste trabalho.

Aos Professores Pesquisadores Dr. Romualdo, Dra. Lizandra e Juliana de Melo Cartaxo da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande pela realização de ensaios de Raios X, Análise Granulométrica a Laser e de Análise Térmica do solo.

Aos Professores Pesquisadores do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande Dr. Fernando Almeida da Silva, Dr. Kegenaldo Alves de Souza, Dra. Alexsandra Cristina Chaves e Dra. Wilma Sales.

Ao técnico do Laboratório de Reciclagem de Materiais Sólidos da UAMat/CCT/UFCG, Joselito Araujo, pelas suas orientações técnicas, sem o qual a criação e adequação dos equipamentos utilizados no experimento não seriam possíveis.

Aos funcionários do Laboratório de Reciclagem de Materiais Sólidos da UAMat/UAMat/CCT/UFCG, Luiz Carlos Vieira (Baiano) e Everaldo Gomes, pela ajuda na preparação dos materiais e na moldagem dos corpos-de-prova e dos blocos de solo-cimento e casca de arroz.

Às colegas, alunas do Doutorado em Engenharia de Materiais, Suellen Lisboa, Izabelle Marie, Rosa do Carmo e Ana Maria Gonçalves, pelo auxílio na realização dos ensaios técnicos.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade e possibilidade de ampliar meus horizontes através da melhoria de minha formação profissional.

Aos colegas do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos pela convivência e apoio; em especial o colega Professor Marcos Assis Pereira de Souza, pela grandeza de espírito no auxílio das dificuldades, que não foram poucas.

Aos meus familiares e amigos, pela generosa contribuição para o desenvolvimento da pesquisa e, principalmente, pela compreensão da minha ausência.

Ao Sr. Francisco Gonçalves Neto, proprietário da máquina de beneficiamento de arroz, pelo empenho no fornecimento da matéria prima casca de arroz, ao qual desejo e, tenho a certeza, de que terá sucesso em seus empreendimentos.

Ao Sr. Renato Pereira da Silva, do Sítio Catolé, município de Cajazeiras – PB, pela gentileza e bondade de fornecer o solo para os ensaios e confecção dos blocos.

E a todos aqueles que deram a sua contribuição direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
2. JUSTIFICATIVA.....	23
3. OBJETIVOS.....	24
3.1. Objetivos Gerais.....	24
3.2. Objetivos Específicos.....	24
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
4.1. Produção de Arroz em Casca.....	25
4.2. Casca de Arroz	30
4.2.1. Considerações Gerais.....	30
4.2.2. Caracterização Física da Casca de Arroz.....	32
4.2.3. Problemas Ambientais, uso e aproveitamento da Casca de Arroz.....	33
4.3. Solo-Cimento.....	38
4.3.1. Caracterização Física e Mecânica do solo.....	38
4.3.2. Estabilização do Solo com Cimento Portland.....	41
4.3.2.1. Mecanismo de Estabilização dos Solos com Cimento.....	43
4.3.2.2. Fatores que Influenciam na Estabilização do Solo-Cimento.....	44
4.3.3. Solo-Cimento como Material de Construção.....	47
4.3.4. Solo-Cimento com Adição de Casca de Arroz como Material de Construção.....	50
4.4. Durabilidade.....	53
4.4.1. Análises e Avaliações de Durabilidade em Materiais de Construção	54
4.4.2. Ensaio Realizados Sobre Durabilidade de Materiais de Construção.....	56
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
5.1. Materiais.....	59
5.1.1. Casca de Arroz.....	59
5.1.2. Solo.....	60
5.1.3. Cimento Portland.....	61
5.1.4. Água.....	62

5.2. Métodos.....	63
5.2.1. Primeira Etapa – Preparação e Caracterização Físico-Mecânica e Mineralógica dos Materiais.....	64
5.2.1.1. Caracterização Física da Casca de Arroz e do Solo.....	64
5.2.1.2. Caracterização Mineralógica do Solo.....	66
5.2.2. Segunda Etapa – Estudo das Misturas de Solo-Cimento e Casca de Arroz.....	68
5.2.2.1. Definição da Composição da Mistura de Solo-Cimento e Casca de Arroz.....	68
5.2.2.2. Determinação do Teor Ótimo de Água na Mistura.....	70
5.2.3. Terceira Etapa – Confeção e Caracterização Físico-Mecânica de Corpos-de-Prova das Misturas de Solo-Cimento e Casca de Arroz.....	71
5.2.3.1. Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova.....	71
5.2.3.2. Ensaio Tecnológicos.....	73
5.2.4. Quarta Etapa – Confeção e Caracterização Físico-Mecânica de Blocos de Solo-Cimento e Casca de Arroz.....	81
5.2.4.1. Confeção de Blocos de Solo-Cimento Incorporados com Casca de Arroz.....	81
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86
6.1. Caracterização Física e Mineralógica dos Materiais.....	86
6.1.1. Caracterização Física da Casca De Arroz.....	86
6.1.2. Caracterização Física do Solo.....	87
6.1.2.1. Massa Específica dos Sólidos (Grãos).....	87
6.1.2.2. Limites de Consistência do Solo.....	87
6.1.2.3. Análise Granulométrica.....	89
6.1.2.4. Classificação do Solo.....	92
6.1.2.5. Ensaio de Compactação do Solo.....	94
6.1.2.6. Caracterização Mineralógica do Solo.....	96
6.2. Estudo da Dosagem das Misturas de Solo-Cimento e Casca de Arroz e Confeção de Corpos-de-Prova.....	99

6.2.1. Comportamento dos corpos-de-prova confeccionados com solo mais a combinação de cimento e casca de arroz.....	99
6.2.2. Resultados dos ensaios de absorção de água.....	102
6.2.2.1. Corpos-de-prova confeccionados com solo e a combinação de 10% de cimento e casca de arroz.....	102
6.2.2.2. Corpos-de-prova Confeccionados com Solo-Cimento e Casca de Arroz Substituindo Percentuais do Solo.....	104
6.2.2.3. Blocos de solo-cimento e casca de arroz.....	106
6.2.3. Resultados dos ensaios de durabilidade.....	108
6.2.3.1. Ensaio de resistência à compressão simples.....	108
6.2.3.2. Ensaio de variação de volume pelo processo de degradação acelerada por molhagem e secagem.....	122
6.2.3.3. Ensaio de perda de massa pelo processo de degradação acelerada por molhagem e secagem.....	123
6.2.4. Caracterização dos constituintes antes e após os ensaios de durabilidade.....	131
6.2.4.1. Análise de difração de raios – X.....	131
6.2.4.2. Análise térmica diferencial (DTA).....	140
6.2.4.3. Análise termogravimétrica (TGA) e termogravimétrica derivada (DTGA).....	159
7. CONCLUSÕES.....	195
SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	197
REFERÊNCIAS.....	198
ANEXOS.....	210

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1	Cultura de arroz.....	27
Figura 4.2	Casca de Arroz.....	30
Figura 4.3	Equipamentos necessários para a geração de energia a partir da casca de arroz na Arrozeira Urbano, em São Gabriel (RS).....	36
Figura 5.1	Casca de arroz utilizada na pesquisa.....	59
Figura 5.2	Solo utilizado na pesquisa.....	60
Figura 5.3	Cimento Portland CP II – F – 32.....	62
Figura 5.4	Fluxograma das etapas da pesquisa.....	63
Figura 5.5	Equipamento de difratometria a laser CILAS Modelo 1064.....	65
Figura 5.6	Determinação dos índices físicos do solo.....	66
Figura 5.7	Florescência de raios X – EDX - 720.....	67
Figura 5.8	Difratômetro de raios X – DRX-6000 SHIMADZU.....	67
Figura 5.9	(a) Equipamento para análise térmica – RB 3000. (b) Analisador térmico TA 60h.....	68
Figura 5.10	Processo de homogeneização da mistura solo-cimento e casca de arroz.....	70
Figura 5.11	Determinação do teor ótimo de água na mistura de Solo-cimento e casca de arroz.....	71
Figura 5.12	Processo de moldagem dos corpos-de-prova.....	72
Figura 5.13	Corpos-de-prova em regime de cura.....	72
Figura 5.14	Ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos.....	73
Figura 5.15	Ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova.....	74
Figura 5.16	Ensaio para determinar volume e massa dos corpos-de-prova.....	76
Figura 5.17	Processo manual de moldagem e desmoldagem dos blocos.....	81

Figura 5.18	Blocos de solo-cimento e casca de arroz (a) período de cura e (b) serrados para os ensaios tecnológicos.....	82
Figura 5.19	Blocos de solo-cimento e casca de arroz imersos em água e na estufa com temperatura de (105°C e 110°C)	83
Figura 5.20	Equipamento AG – IS 100 kN para ensaio de resistência à compressão simples.....	85
Figura 6.1	A curva de distribuição granulométrica do solo por difratometria a laser (μm).....	90
Figura 6.2	Classificação trilinear do solo estudado.....	93
Figura 6.3	Curva de compactação do solo.....	96
Figura 6.4	Difratograma de raios X do solo.....	98
Figura 6.5	Curvas de Análise Térmica Diferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG) do Solo.....	99
Figura 6.6	Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova cilíndricos nos períodos de 7 e 28 dias.....	101
Figura 6.7	Após ensaio de resistência à compressão simples: (a) corpo-de-prova convencional de solo-cimento e (b) corpo-de-prova alternativo de solo-cimento e casca de arroz.....	102
Figura 6.8	Absorção de água dos corpos-de-prova de cada tratamento, em 7 e 28 dias.....	103
Figura 6.9	Absorção de água para os corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz.....	106
Figura 6.10	Absorção de água dos blocos convencionais e alternativos.....	108
Figura 6.11	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento e casca de arroz.....	110
Figura 6.12	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais de solo-cimento.....	113
Figura 6.13	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova Alternativos de solo-cimento incorporado com 2% de casca de arroz.....	113

Figura 6.14	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz.....	114
Figura 6.15	Tipos de fissuras apresentados pelos corpos-de-prova após ensaios de compressão simples.....	115
Figura 6.16	Resistência à compressão simples, após os 28 dias de cura.....	117
Figura 6.17	Resistência à compressão simples, após os 60 dias de cura.....	118
Figura 6.18	Resistência à compressão simples, após os 90 dias de cura.....	119
Figura 6.19	Área de concentração de tensão nos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.....	120
Figura 6.20	Rupturas apresentadas pelos blocos após ensaios de compressão simples.....	121
Figura 6.21	Valores percentuais de variação de volume dos corpos-de-prova de solo-cimento e casca de arroz.....	123
Figura 6.22	Valores percentuais de variação de volume dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz.....	124
Figura 6.23	Valores percentuais de variação de volume dos blocos de solo-cimento convencionais e alternativos.....	126
Figura 6.24	Valores percentuais de perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz.....	127
Figura 6.25	Valores percentuais de perda de massa dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz.....	128
Figura 6.26	Valores percentuais de perda de massa ocorrida durante os ensaios de durabilidade, após os ciclos de molhagem e secagem.....	130
Figura 6.27	Difratogramas de raios X dos CPs convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.....	131

Figura 6.28	Difratograma de raios X da amostra do traço T ₄ , T ₅ e T ₅ ..	133
Figura 6.29	Difratograma de raios X da amostra do traço T ₁	135
Figura 6.30	Difratograma de raios X das amostras do traço T ₂	136
Figura 6.31	Difratogramas de raios X das amostras do traço T ₃	138
Figura 6.32	Curvas DTA dos CPs convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento com adição de 2% e 4% de CA.....	140
Figura 6.33	Curvas DTA dos CPs convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem.....	143
Figura 6.34	Curvas DTA dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA.....	146
Figura 6.35	Curvas DTA dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA.....	148
Figura 6.36	Curvas DTA dos blocos convencionais de solo-cimento..	151
Figura 6.37	Curvas DTA dos blocos alternativos de solo-cimento com 2% de CA.....	154
Figura 6.38	Curvas DTA dos blocos alternativos de solo-cimento com 4% de CA.....	156
Figura 6.39	Curvas TGA/DTGA dos CPs convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento incorporados com CA.....	159
Figura 6.40	Curvas TGA/DTGA dos CPs convencionais de solo-cimento.	165
Figura 6.41	Curvas TGA/DTGA dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA.....	170
Figura 6.42	Curvas TGA/DTGA dos CPs alternativos de solo-cimento com adição de 4% de CA.	175
Figura 6.43	Curvas TGA/DTGA dos blocos convencionais de solo-cimento.....	180
Figura 6.44	Curvas TGA/DTGA dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA.....	185
Figura 6.45	Curvas TGA/DTGA dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA.....	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Caracterização física dos solos estudados.....	40
Tabela 4.2	Características físicas do solo utilizado na fabricação dos corpos-de-prova cilíndricos.....	40
Figura 4.3	Resistência à compressão simples e absorção d'água dos tijolos de solo-cimento.....	50
Tabela 5.1	Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II F – 32.....	61
Tabela 5.2	Propriedades químicas do cimento Portland CP II – F – 32.....	62
Tabela 5.3	Estudo da mistura solo mais a combinação do cimento e casca de arroz (Grupo A).....	69
Tabela 5.4	Mistura cimento mais a combinação do solo e casca de arroz (Grupo B).....	70
Tabela 5.5	Normas para os ensaios tecnológicos.....	73
Tabela 5.6	Ensaio de durabilidade pelo método normatizado por molhagem e secagem.....	76
Tabela 5.7	Etapas de ensaios de envelhecimento acelerado por molhagem e secagem.....	79
Tabela 5.8	Confecção de blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.....	83
Tabela 6.1	Caracterização da casca de arroz (CA).....	86
Tabela 6.2	Resultados dos ensaios de limites de Atterberg do solo...	87
Tabela 6.3	Análise granulométrica por peneiramento.....	89
Tabela 6.4	Distribuição do tamanho das partículas do solo.....	91
Tabela 6.5	Caracterização físico-mecânicas do solo estudado.....	92
Tabela 6.6	Classificação do solo.....	93
Tabela 6.7	Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal do solo.....	95
Tabela 6.8	Composição química por fluorescência de raios X do solo estudado.....	96

Tabela 6.9	Resistência à compressão simples e absorção de água para os dois períodos de cura.....	100
Tabela 6.10	Absorção de água dos corpos-de-prova incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	104
Tabela 6.11	Capacidade de absorção de água dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, aos 28, 60 e 90 dias.....	106
Tabela 6.12	Ensaio de resistência à compressão simples realizados ao final dos seis ciclos de molhagem e secagem dos corpos-de-prova após 7 (sete) dias de cura.....	109
Tabela 6.13	Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples realizados nos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz sem escovação.....	113
Tabela 6.14	Valores de resistência à compressão simples (MPa) dos blocos envelhecidos pelo processo de molhagem e secagem.....	116
Tabela 6.15	Valores percentuais de variação de volume dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz.	122
Tabela 6.16	Índices de variação de volumes dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	124
Tabela 6.17	Índices de variação de volumes dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	125
Tabela 6.18	Índices de perda de massa dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	128
Tabela 6.19	Índices de perda de massa dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.....	129

Tabela 6.20	Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.....	160
Tabela 6.21	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.	161
Tabela 6.22	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.	162
Tabela 6.23	Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.....	165
Tabela 6.24	Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.....	167
Tabela 6.25	Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após dias 90 de cura.....	168
Tabela 6.26	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.....	171
Tabela 6.27	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.....	172
Tabela 6.28	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.....	173
Tabela 6.29	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.....	176
Tabela 6.30	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.....	177

Tabela 6.31	Dados de decomposição térmica de CPs alternativos com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.....	178
Tabela 6.32	Dados de decomposição térmica de blocos convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.....	181
Tabela 6.33	Dados de decomposição térmica de blocos convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.....	182
Tabela 6.34	Dados de decomposição térmica de blocos convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.....	183
Tabela 6.35	Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.....	186
Tabela 6.36	Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento com adição de 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.....	187
Tabela 6.37	Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.....	188
Tabela 6.38	Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.....	191
Tabela 6.39	Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.....	192
Tabela 6.40	Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.....	193

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1	Produção nacional de arroz por região – safra 2009.....	26
Quadro 4.2	Municípios do Estado da Paraíba – produtores de arroz em Casca – safra 2008.....	29

ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Absorção de água

ASTM – American Society for Testing and Materials

ATD – Análise Térmica Diferencial

ATECEL – Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior

ATG – Análise Termogravimétrica

BR – Brasil

CA – Casca de Arroz

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento

CCT – Centro de Ciências e Tecnologia

CP II - F - Cimento Portland composto com filler

CPs – Corpos-de-prova

DRX – Difração de Raios X

EDX - Análise química por fluorescência de raios X com detector de energia Dispersiva.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

g/cm³ - Gramas por Centímetros Cúbicos

hot – Umidade ótima

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICPA – Instituto do Conhecimento e Ciências Aplicadas

γ_s – Peso Específico dos sólidos

γ_{max} - Peso Específico Seco Máximo

kgf/s – Quilograma Força por Segundo

kg/m³ - quilograma por Metro Cúbico

kJ/kg – Quilojoule por quilograma

kN – Quilonewton

kN/m³ - Quilonewton por metro cúbico

LC – Limite de Consistência

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MJ/kg – Megajoules por quilograma

mm – Milímetro

MPa – Mega Pascal

MW – Megawatt

NP – Não Plástico

pH - Potencial hidrogeniônico'

ResidLab – Laboratório de Reciclagem de Resíduos Sólidos

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Brasileira

PB – Paraíba

RCS – Resistência à Compressão Simples

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UAEMa – Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais

W_{ot} - Teor Ótimo de Umidade

RESUMO

O acelerado processo de modernização na agroindústria tem contribuído para o aumento significativo na geração de resíduos agrícolas que acarretam danos para o meio ambiente. O processo de beneficiamento do arroz gera grande quantidade de casca, estes resíduos são, geralmente, depositados em terrenos ou lançados em cursos d'água, ocasionando degradações ambientais, devido à lenta biodegradação. O seu aproveitamento na construção civil, como produto alternativo, pode contribuir para a conservação e a preservação do meio ambiente. Este trabalho tem por objetivo o estudo da durabilidade de blocos de solo-cimento com a incorporação de casca de arroz. Os ensaios foram realizados com auxílio de ciclos de molhagem e secagem, para avaliar a durabilidade dos blocos convencionais e alternativos incorporados com casca de arroz. Os resultados obtidos indicam que o aumento do teor de casca de arroz, eleva o valor de absorção de água, diminui a resistência à compressão simples, aumenta a perda de massa e a variação de volume, devido o grande volume de vazios apresentados pela casca de arroz e a falta de interação entre o sistema solo-cimento e casca de arroz. Os ensaios de durabilidade pelo método de degradação acelerada e os ensaios de caracterização mineralógica realizados com os blocos alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz indicaram a composição de 10% de cimento mais a combinação de 86% solo e 4% de casca de arroz, ideal para a fabricação de blocos de alvenaria para construção civil.

Palavras chave: meio ambiente, produto alternativo, resistência.

ABSTRACT

The accelerated process of modernization in the agricultural industry has contributed to the significant increase in the generation of agricultural residues that cause damage to the environment. The beneficiation process generates large quantities of rice husk, these wastes are usually deposited on land or thrown into streams, causing environmental degradation due to slow biodegradation. Its use in construction, such as alternative product, can contribute to the conservation and preservation of the environment. This work aims to study the durability of soil-cement with the addition of rice husk. The tests were carried out using cycles of wetting and drying, to evaluate the durability of conventional and alternative blocks embedded with rice husk. The results indicate that increasing the amount of rice husk, raises the value of water absorption, decreases the compressive strength, increases the loss of mass and volume change, due to the large volume of voids produced by rice husk and lack of interaction between the soil-cement and rice husk. Durability testing by the method of accelerated degradation and mineralogical characterization tests performed with the alternative blocks of soil-cement incorporated with rice husk indicated the composition of 10% cement plus the combination of soil and 4% 86% peel rice, ideal for the manufacture of masonry blocks for construction.

Keywords: environment, alternative product, resistance.

1. INTRODUÇÃO

A agroindústria no Brasil gera, anualmente, grande volume de produtos de cereais, entre os quais, o arroz tem representado as maiores colheitas. As partes dos cereais não aproveitáveis como folhas, caule e casca, são em geral consideradas como resíduos, e por seu volume, contribuem para os problemas ambientais. Dentre os principais resíduos, a casca de arroz é um dos mais abundantes resíduos agroindustriais. É um material fibroso composto principalmente por celulose, lignina e possui elevado volume e baixa densidade.

O processo de beneficiamento do arroz gera grande quantidade de resíduos. Parte desses resíduos é aproveitada pelas próprias usinas de beneficiamento, como fonte alternativa de energia para produzir calor para secagem e parboilização dos grãos. No caso de empresas de pequeno porte, não possuem processos para aproveitamento e descarte adequados das cascas e das cinzas produzidas, esses resíduos são geralmente depositados em terrenos baldios ou lançadas em cursos d'água, ocasionando degradações ambientais, devido à lenta biodegradação desses resíduos.

Martinez *et al.*, (2005), com a finalidade de reduzir impactos ambientais e propor soluções alternativas possíveis para as habitações populares, desenvolveram pesquisas utilizando a casca de arroz na confecção de painéis de fechamentos verticais em substituição aos tijolos cerâmicos, onde verificaram as propriedades físico-mecânicas, concluindo sua viabilidade técnica e ambiental.

Com a utilização racional dos recursos naturais, o uso do solo como material de construção tem se intensificado ultimamente, sendo que o comportamento físico-mecânico do solo melhora por meio da estabilização com aglomerantes minerais. Na estabilização do solo com o 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 maior resistência inicial: paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons provenientes da hidratação do cimento

adicionado. Além dessas modificações iniciais, formam-se compostos cimentantes que contribuem para o melhoramento de propriedades físico-mecânicas do material.

A potencialidade e as características físico-mecânicas desses materiais, conforme pesquisas realizadas, torna-se importante porque envolve o estudo de mistura de solo-cimento e casca de arroz para possível utilização na construção civil e buscar condições para minimizar os problemas ambientais causados pelos resíduos produzidos a partir da agroindústria.

Diante dessas considerações, o aproveitamento da casca de arroz para fins de obtenção de materiais alternativos para a construção civil tem permitido a busca de soluções possíveis para reduzir os custos operacionais na construção, além de não prejudicar o meio ambiente, considerando-se como uma fonte de matéria-prima abundante e barata. Outro aspecto considerado importante é a durabilidade apresentada pelos produtos incorporados com esse resíduo nos ensaios realizados nos laboratórios por demais pesquisadores.

A durabilidade deve ser entendida como a propriedade que garante o desempenho, a integridade e a vida útil do material, desde a sua instalação e durante todo o tempo de sua utilização, resistindo os ataques dos agentes agressivos físicos e químicos do meio ambiente no qual está inserido.

2. JUSTIFICATIVA

Há tempo, inúmeros setores produtivos têm se preocupado com a sustentabilidade, principalmente, com a qualidade de vida da população atual e das futuras gerações. O uso inadequado dos recursos naturais e o desperdício de matérias-primas disponíveis, a mão-de-obra ociosa e desvalorizada e os altos custos de produção, têm sido alvos das grandes discussões e debates na comunidade científica.

Quanto ao aproveitamento da casca de arroz, incorporando ao solo-cimento na produção de blocos alternativos para a construção civil, pode-se justificar o desenvolvimento desta pesquisa, pelos seguintes fatores:

- De acordo com o IBGE (2010), o Estado da Paraíba produz anualmente cerca de 8,4 mil toneladas de arroz em casca. As áreas de maiores produções estão concentradas no vale do Rio do Peixe e no vale do Rio Piancó. Nessas áreas, após o beneficiamento do arroz, gera-se uma grande quantidade de resíduos que são depositados sobre o solo ou em mananciais causando degradações ambientais;

- Os municípios de Sousa e São João do Rio do Peixe se destacam na produção de arroz no vale do Rio do Peixe/PB, e a região dispõe de solos adequados para ser usado na fabricação de blocos de solo-cimento e casca de arroz;

- O bloco de solo-cimento incorporado com casca de arroz é um material alternativo para construção civil de boa qualidade, de baixo custo, oferece boas condições de conforto e integrado à sustentabilidade ambiental;

- O solo-cimento incorporado com casca de arroz torna-se um material alternativo com resistência suficiente para diversas aplicações na construção civil;

- A casca de arroz possui uma granulometria relativamente uniforme, o que facilita a dosagem do material para produção de blocos alternativos;

- Uma solução importante para construção civil, podendo produzir blocos ou tijolos em maquinários simples e de baixíssimo custo, pode ser produzido no próprio local e minimiza a degradação do meio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a produção de blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, como alternativa para uso em construção civil, submetendo-os ao processo de degradação acelerada por ciclos de molhagem e secagem e à avaliação do desempenho das propriedades físico-mecânicas dos materiais, considerando os parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes da ABNT.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física e mineralogicamente os materiais (solo e cimento) e o resíduo (casca de arroz);
- Identificar composições de cimento e casca de arroz a serem adicionadas ao solo, de forma que promovam melhorias nas propriedades físico-mecânicas dos blocos;
- Avaliar o comportamento mecânico dos blocos de solo-cimento incorporados com de casca de arroz na produção de blocos de solo-cimento através das propriedades físico-mecânicas comparando com as normas da ABNT;
- Estudar a durabilidade dos blocos de solo-cimento incorporados com resíduos de casca de arroz, através dos ciclos de molhagem e secagem.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão bibliográfica iniciada neste item está dividida em quatro subitens: o primeiro subitem refere-se à produção de arroz em casca; no segundo subitem buscou-se fazer um relato sobre as características da casca de arroz, sua importância como matéria-prima, ensaios de caracterização física realizados, problemas ambientais, aproveitamento e uso da casca de arroz; no terceiro subitem foi feita uma ampla abordagem sobre as propriedades físicas dos solos, solo-cimento como material de construção e solo-cimento com adição de casca de arroz como material de construção, também foi feito um apanhado dos métodos, trabalhos de pesquisas realizados e índices de avaliação das propriedades físico-mecânicas de solo-cimento e casca de arroz e; no quarto subitem foi feita uma abordagem sobre análise e avaliação da durabilidade dos materiais de construção e ensaios realizados.

4.1. Produção de arroz em casca

O arroz é originário do sudeste asiático, mais precisamente do sul da China, onde é cultivado a cerca de cinco mil anos. De acordo com a EMBRAPA (2008), no século VIII foi levado à Europa pelas mãos dos árabes, através da Península Ibérica, de lá chegou ao Brasil, trazido pelos portugueses, no período da colonização. Em 1587, as lavouras arrozeiras ocupavam terras na Bahia e, por volta de 1745, no Maranhão. Em 1766, a Coroa Portuguesa autorizou a instalação da primeira descascadora de arroz no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. A prática da rizicultura no Brasil, de forma organizada e racional, aconteceu em meados do século XVIII e daquela época até a metade do século XIX, o país foi um grande exportador de arroz.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), o Brasil produziu 12.604.159 toneladas de arroz em casca no ano de 2009, houve um crescimento de 4,2% em relação à safra de 2008 que registrou produção de 12.100.946 toneladas de arroz. A região Sul é a maior produtora de arroz no Brasil e a região Nordeste ocupou o terceiro lugar na produção nacional em 2009. O Rio Grande do Sul, maior produtor nacional, responsável por 61,9% da produção brasileira de arroz em casca.

O Quadro 4.1 mostra a produção nacional de arroz em casca por regiões, safra de 2009.

Quadro 4.1 - Produção nacional de arroz por região – safra 2009

Regiões	Produção (toneladas)	Produção nacional (%)
Norte	949.469	7,53
Nordeste	1.096.058	8,70
Sudeste	213.617	1,69
Sul	9.117.220	72,34
Centro-Oeste	1.227.795	9,74
Brasil	12.604.159	100

Fonte: CEPAGRO – Comissão Especial de Planejamento, controle e Avaliação das Estatísticas agropecuárias – IBGE (2009).

No Brasil, o arroz é cultivado praticamente em todo território nacional sob dois sistemas tradicionais de cultivos: sequeiro e irrigado. O arroz sequeiro é cultivado anualmente, nos períodos chuvosos em terras altas, geralmente, ele tem sido cultivado em áreas de pastagens degradadas, pois tem boa tolerância a solos ácidos, sendo utilizados como forma de recuperação desses solos. Esse tipo de cultura se concentra na Região de Cerrado e, apesar de ocupar em torno de 60% da área cultivada, responde apenas por 39% da produção nacional. O arroz irrigado é cultivado durante todo o ano, dependendo das condições das áreas de irrigações ou das vazantes dos mananciais. É completamente dependente da radiação solar e temperatura do ambiente, sendo estas os fatores que exercem os maiores efeitos na variabilidade de crescimento e desenvolvimento da cultura, tendo como limitantes temperaturas maiores que 40°C e menores que 16°C. Ocupa apenas 40% da área cultivada é responsável por aproximadamente 61% da produção nacional (EMBRAPA, 2008).

Segundo dados do IBGE (2011), a produção de arroz em casca no Estado da Paraíba, na safra de 2009 foi de 8.385 toneladas, os 10 municípios que se destacam na produção de arroz em casca são: Sousa, no vale do Rio

do Peixe, com uma produção anual em torno de 3.100 toneladas; Itaporanga, no vale do Piancó, produção anual de 862 toneladas; São João do Rio do Peixe, município do vale do Rio do Peixe, produção anual de 530 toneladas; Santana dos Garrotes, no vale do Piancó, produção anual em torno de 504 toneladas; Olho d'Água, no vale do Piancó, produção anual em torno de 378 toneladas; Aparecida, vale do Rio do Peixe, produção anual em torno de 365 toneladas; Pedra Branca, vale do Piancó, produção de 243 toneladas anual; Piancó, produção de 220 toneladas; Diamante, vale do Piancó, produção anual de 210 toneladas e; Nova Olinda, vale do Piancó, produção anual de 192 toneladas por ano.

A Figura 4.1 apresenta a cultura de arroz no período de colheita.



Figura 4.1 – Cultura de arroz
Fonte: www.portaldoagronegocio.com.br (2010).

No Estado da Paraíba, a rizicultura em 2009, destacou-se no vale do rio do Peixe, principalmente no município de Sousa e no vale do rio do Piancó, praticada sob os sistemas tradicionais de cultivo, sistema de arroz sequeiro e sistema de arroz irrigado (IBGE, 2011).

No Estado da Paraíba, principalmente no vale do rio do Peixe, grande parte da casca de arroz é jogada fora ou queimada produzindo grande quantidade de cinzas que são depositadas sobre o solo ou em mananciais

causando impacto ambiental (IBGE, 2008). Diante disso, esse resíduo é considerado um problema ambiental para a região. No entanto, esse material pode ser aproveitado como aditivo em produto à base de cimento.

Observa-se no Quadro – 4.2 a produção de arroz em casca por municípios no Estão da Paraíba, considerando dados do IBGE (2011).

Quadro 4.2 - Municípios do Estado da Paraíba – produtores de arroz em Casca – safra 2009.

Municípios	Produção (ton)	Área de cultivo (ha)	Municípios	Produção (ton)	Área de cultivo (ha)
Água Branca	12	10	Monte Horebe	06	10
Aguiar	68	100	Nazarezinho	45	50
Alagoinha	02	02	Nova Olinda	192	400
Aparecida	365	80	Nova Palmeira	08	15
Bananeiras	05	04	Olho d'Água	378	420
Belém	06	05	Paulista	11	18
Belém do Bj. do Cruz	01	02	Pedra Branca	243	405
Boa Ventura	150	300	Piancó	220	350
Bom Jesus	04	03	Poço Dantas	03	02
Bom Sucesso	04	06	Poço José de Moura	57	18
Bonito de Santa Fé	48	60	Pombal	15	20
Borborema	06	06	Princesa Isabel	30	30
Brejo do Cruz	06	09	Riacho dos Cavalos	15	25
Brejo dos Santos	08	10	Santa Cruz	06	05
Cachoeira dos Índios	08	15	Santa Helena	178	50
Cacimba de Areia	08	25	Santa Inês	45	60
Cacimbas	02	02	Santa Terezinha	16	40
Cajazeiras	29	22	Santana de Mangueira	63	70
Cajazeirinhas	18	20	Santana dos Garrotes	504	850
Carrapateira	05	05	Santarém	13	16
Catingueira	54	90	São Bentinho	05	09
Catolé do Rocha	06	10	São Bento	09	14
Conceição	26	40	S. Domingos de Pombal	04	07
Coremas	12	20	São Francisco	06	08
Curral Velho	78	130	S. João do Rio do Peixe	530	150
Desterro	06	06	S. José da Lagoa Tapada	20	15
Diamante	210	350	São José de Caiana	33	55
Emas	72	130	São José de Espinharas	08	10
Ibiara	130	200	São José de Piranhas	27	40
Igaracy	65	130	S. José do Brejo do Cruz	11	15
Imaculada	16	14	Serra Grande	23	35
Itaporanga	862	1.250	Serraria	05	05
Jericó	09	15	Sertãozinho	01	01
Juru	45	150	Solânea	12	10
Lagoa	04	06	Sousa	3.100	700
Lastro	04	03	Tavares	18	15
Mãe d'Água	08	10	Triunfo	110	28
Manaira	03	04	Uiraúna	09	10
Marizópolis	14	08	Várzea	02	03
Mato Grosso	10	10	Vieirópolis	04	03
Maturéia	04	05	Vista Serrana	07	10
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxx x	Estado da Paraíba	8.385	7.264

Fonte: IBGE (2011)

4.2. Casca de arroz

4.2.1. Considerações gerais

A casca de arroz é produzida em grande quantidade em consequência da produção elevada de arroz em todo o mundo. No Brasil, é produzido anualmente cerca de 2,2 milhões de toneladas de casca. A cinza desse resíduo vem sendo estudado nos últimos anos, como material alternativo para substituir parte do cimento e os resultados são promissores (AKASAKI, 2008).

Della (2001) relata que a evolução tecnológica do beneficiamento do arroz, resulta a casca com alto poder calorífico, substituindo parte da lenha empregada nos fornos ou fornalhas para a produção de calor para secagem de grãos de arroz.

Apresenta-se na Figura 4.2 uma amostra da casca de arroz obtida na máquina de beneficiamento.



Figura 4.2 – Casca de arroz.

Fonte: Tashima *et al.*, (2004).

Pouey (2006) e Prudente Jr *et al.*, (2003) afirmaram que as empresas de beneficiamento de arroz utilizam a casca de arroz como fonte de geração de calor e de vapor para o processo de secagem e parboilização dos grãos. A

maioria dessas empresas não apresenta controle tecnológico no processo da queima das cascas, os resíduos, ou seja, a cinza é depositada em terrenos baldios ou em mananciais, ocasionando poluição e contaminação.

A casca de arroz representa cerca de 22% do peso do arroz, devido a sua alta dureza, fibrosidade e natureza abrasiva, leva a obtenção de produtos de baixa propriedade nutritiva, boa resistência ao desgaste e muita cinza. Atualmente parte dessa casca está sendo utilizada na fabricação de tijolos e painéis empregados na construção civil, onde substitui a fibra de madeira comumente usada (DELLA, 2001).

Krishnarao *et al.*, (2001) mostram como constituintes químicos orgânicos presentes na casca de arroz, a celulose, a lignina, a D-xilose, pequenas quantidades de ácido metilglucurônico e D-galactose, o que representa a cerca de 51%, em massa, do elemento carbono, 7%, em massa, do elemento hidrogênio e a 42%, em massa, do elemento oxigênio, de modo que a sua combustão em baixas temperaturas (inferiores a 400 °C) resulta em cinzas com elevado teor de carbono.

Hwang e Chandra (2002) afirmam que a constituição química da casca de arroz pode apresentar uma composição variada, dependendo das condições climáticas da região do cultivo, do tipo de solo utilizado na lavoura, dos tipos de fertilizantes empregados e das espécies de arroz cultivadas.

De acordo com Ferreira (2005), a casca de arroz é composta basicamente de quatro camadas estruturais:

- 1) epiderme externa, coberta com uma espessa cutícula de células silificadas;
- 2) esclerênquima ou fibra hipoderme, com parede lignificada;
- 3) célula parênquima esponjosa e;
- 4) epiderme interna. Dentre as camadas, a sílica encontra-se mais concentrada na epiderme externa.

4.2.2. Caracterização física da casca de arroz

Milani e Freire (2006) estudaram a casca de arroz em condição natural, caracterizaram-a como sendo um material leve, com massa unitária de $0,086 \text{ g/cm}^3$ e de granulometria uniforme (89% compreendido entre as peneiras de aberturas 2,00 mm e 1,19 mm). Por outro lado, depois de passar pelos processos de fracionamento, peneiramento e pré-tratamento, a massa unitária da casca de arroz aumentou para $0,152 \text{ g/cm}^3$. Cerca de 90% da sua massa apresentou-se com diâmetro variando de 1,19 mm a 0,42 mm.

Souza (2008) nos ensaios de caracterização verificou que a casca de arroz apresentou massa unitária de $0,12 \text{ g/cm}^3$ e caracterizou-a como um material leve e volumoso. Característica relacionada ao tipo de estrutura física da casca (côncava e oca) que leva à grande presença de vazios entre elas. A dimensão máxima da casca de arroz foi de 4,8 mm e o módulo de finura foi de 5,80% que, quando comparado ao módulo de finura do agregado miúdo (areia), normalmente empregado em argamassas de construção civil, foi praticamente o dobro.

Milani (2005) estudou a massa unitária da casca de arroz em diferentes condições e obteve os seguintes resultados: $0,11 \text{ g/cm}^3$ para casca natural, $0,24 \text{ g/cm}^3$ para casca após trituração e $0,20 \text{ g/cm}^3$ casca após trituração, peneiramento, lavagem e secagem. A casca de arroz natural, caracterizou-a como um material leve e volumoso. No caso da casca de arroz triturada, peneirada, lavada e seca, teve sua superfície específica aumentada e, conseqüentemente, a presença de vazios diminuída, o material apresentou aumento na massa específica unitária ($0,20 \text{ g/cm}^3$). Com este aumento de massa unitária, a casca de arroz, tornou-se um material adequado para sistema solo-aglomerante.

Martinez (2003) trabalhou com placas pré-moldadas de argamassa armada e casca de arroz. De acordo com sua pesquisa ele realizou ensaios de absorção de água com a casca de arroz, o valor médio obtido em três medições foi de 154,65%. Sendo que o valor de absorção de água pelas areias usadas no preparo de argamassa é em torno de 30%, 5 vezes menor que o

valor médio encontrado na casca de arroz. Diante disso, a absorção de água da casca de arroz causa variação no fator água/cimento da argamassa.

Tojal (2002) estudando a composição granulométrica da casca de arroz natural na análise granulométrica verificou que o módulo de finura de 3,70 mm, similar à areia média que possui módulo de finura entre 2,40 mm a 3,90 mm. Quanto ao teor de umidade da casca de arroz foi em torno de 14%. No ensaio de absorção de água, a taxa de água absorvida foi na ordem de 74%, para o autor esse valor parece problemático, por vir a modificar substancialmente o traço escolhido, pelo fato da maior parte da água se encontra presa na superfície côncava da casca de arroz. O valor obtido na massa específica aparente da casca de arroz foi de 110 kg/m³.

4.2.3. Problemas ambientais, uso e aproveitamento da casca de arroz.

a) Problemas ambientais

O progresso tecnológico tem trazido grandes inovações na produção industrial, porém paralelamente a este processo, os recursos naturais são explorados de forma indiscriminada, gerando esgotamento desses recursos e quase sempre resultam na geração de resíduos que na maior parte não são aproveitados pela sociedade humana, provocando danos irreversíveis ao meio ambiente.

A geração de resíduos agrícolas como o bagaço da cana-de-açúcar e casca de arroz têm assumido valores expressivos, e vêm apresentando sérios problemas ambientais. A atividade agroindustrial se destaca pela elevada quantidade de resíduos produzidos na primeira década do século XXI, principalmente as indústrias de beneficiamento de arroz que produzem um grande volume de cascas (MILANI, 2008).

A casca de arroz é um resíduo da biomassa vegetal, resultante da agroindústria de beneficiamento dos grãos de arroz. Esse resíduo tem sido um dos grandes problemas ambientais, por não ter destinação adequada e acabam sendo depositado no solo, em aterros sanitários ou lançado em cursos d'água, ocasionando poluição ou contaminação dos mananciais devido sua resistência à decomposição no solo causada pelo seu alto teor de lignina e

sílica e como também leva aproximadamente 5 anos para se decompor e possuir um elevado volume de metano (CH₄) emanado e, quando queimada a céu aberto emite grande quantidade de monóxido e dióxido de carbono (CO e CO₂ respectivamente) (MAYER *et al.*, 2006).

Os acúmulos de grandes quantidades de casca de arroz no meio ambiente podem causar mudanças no ecossistema local e, de acordo com os profissionais da saúde, a prática da queima de casca de arroz, constantemente, como forma de eliminação desse resíduo, pode provocar ataque de asma nos seres humanos (MUSSATO e ROBERTO, 2002).

b) Uso e aproveitamento da casca de arroz

O crescimento populacional no mundo e a evolução tecnológica têm provocado a cada momento, aumento dos problemas ambientais decorrentes do uso de materiais fósseis como fonte de energia e os demais recursos naturais como matéria-prima para a produção de bens industrializados. A degradação do meio ambiente tem levado a sociedade global a buscar soluções possíveis denominadas de "alternativas", para amenizar essas questões. Algumas dessas soluções estão focalizadas no uso da biomassa, mais especificamente nos resíduos agrícolas, como o bagaço da cana-de-açúcar, a palha do trigo, a fibra do sisal, resíduos de madeira e a casca de arroz (FÁVARO *et al.*, 2006).

Quanto ao uso e aproveitamento da casca de arroz, vários procedimentos metodológicos estão sendo desenvolvido com o objetivo de reduzir a quantidade de resíduos depositados no meio ambiente, causando impactos ambientais e como também encontrar soluções possíveis econômicas e técnicas viáveis para a utilização desse resíduo como matéria-prima na construção rural e civil, além de ser utilizada como fonte de energia pelas empresas de beneficiamento de arroz.

O aproveitamento de resíduos agrícolas tem-se tornado uma necessidade em função do alto custo ambiental derivado do seu inadequado descarte na natureza. A casca de arroz, assim como a cinza produzida pela sua queima indiscriminada tornaram-se preocupantes quanto aos danos causados ao meio ambiente, em virtude do grande volume produzido

anualmente (ZUCCO e BERALDO, 2008). Já o reaproveitamento de resíduos aparece nos dias atuais como questão fundamental na melhoria do meio ambiente, tanto em função da redução de desperdícios de recursos naturais, quanto na minimização dos impactos ambientais oriundos da disposição final dos resíduos. Essa percepção ambientalista originou a chamada era ecológica que provocou o surgimento de uma legislação ambiental mais rigorosa, obrigando o gerador dos resíduos a dispô-los de maneira adequada sem agredir o meio ambiente (MITSUUCHI *et al.*, 2004).

O aproveitamento dos resíduos agroindustriais é uma forma de se evitar a geração de problemas ambientais que acarretarão contaminação do meio ambiente e prejuízos a vida humana. Os resíduos agrícolas que são utilizados como materiais para as construções rurais e civis tornam-se importante quanto ao ponto de vista econômico, tecnológico e ambiental, pois é uma forma alternativa que minimiza a contaminação dos mananciais, do solo e reduz a emissão de carbono na atmosfera (RODRIGUES, 2008).

Na indústria da construção civil, pode-se observar uma grande variedade de resíduos agrícolas sendo utilizados como a casca de arroz e o bagaço da cana-de-açúcar (FREITAS, 2005). Além desses resíduos, também estão sendo pesquisados outros tipos de resíduos agrícolas disponíveis em grandes volumes, que poderão ser aproveitados na construção civil.

A utilização de resíduos agrícolas na construção civil busca a obtenção de novos materiais, que atendam basicamente às necessidades, reduzindo os custos operacionais da construção, pela grande quantidade de matéria-prima de origem natural que se encontra disponível e pela preocupação com o esgotamento das reservas naturais de agregados convencionais (RODRIGUES, 2008).

Segundo Leirias *et al.*, (2005) citado por Souza (2008), a casca de arroz está sendo utilizada como biomassa para a geração de energia térmica na indústria de cerâmica e na indústria de alimentos, por possuir alto poder calorífico, cerca de 16.720 kJ/kg, reduzindo assim o consumo de lenha pelos fornos das indústrias de cerâmicas e alimentícias, evitando o desmatamento e o desequilíbrio ambiental.

A primeira termoelétrica que aproveitou a casca de arroz como combustível no Brasil foi instalada na filial de São Gabriel (RS) da Arrozeira Urbano, em 1996, e tem capacidade para gerar 2.200 MW de energia (PEROZZI, 2009).

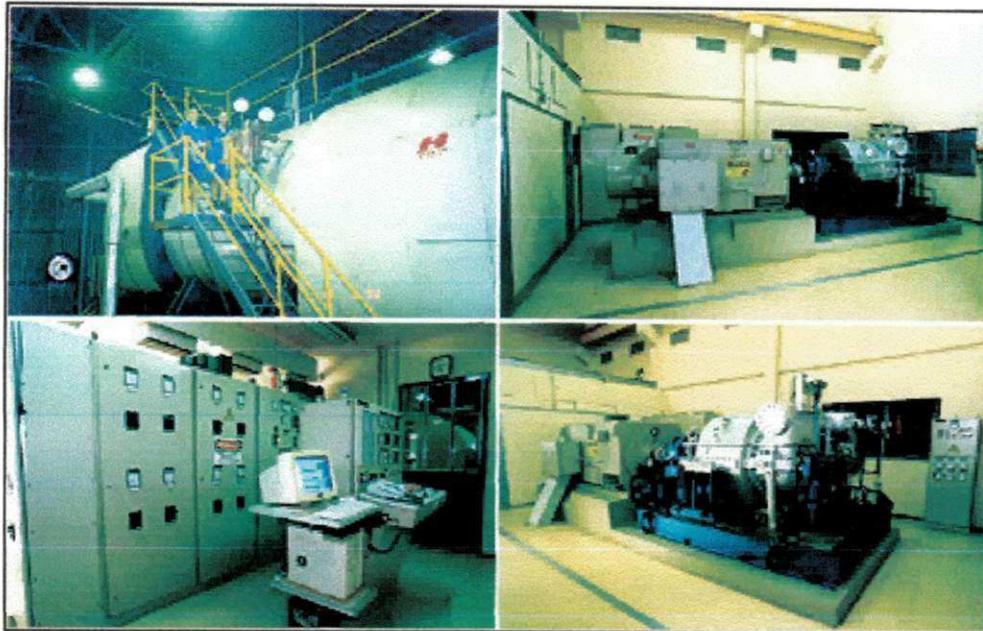


Figura 4.3 - Equipamentos necessários para a geração de energia a partir da casca de arroz na Arrozeira Urbano, em São Gabriel (RS).
FONTE: PEROZZI (2009).

A geração de energia através da queima da casca de arroz é uma alternativa praticável do ponto de vista tecnológico e viável do ponto de vista econômico, uma vez que existe tecnologia para a conversão, a matéria-prima é abundante e todo o CO_2 produzido na queima volta para o ciclo de carbono da biosfera terrestre (FERREIRA, 2005).

A questão ambiental, com a necessidade de minimização das emissões globais de CO_2 , é um ponto favorável ao uso da biomassa, pois quando esta é queimada, CO_2 é liberado na atmosfera. Entretanto esse gás é absorvido pelas plantas durante a fotossíntese, mantendo constante a sua quantidade na atmosfera.

Della *et al.*, (2001) relatam que a evolução tecnológica na indústria de beneficiamento de arroz tem substituído a lenha pela casca de arroz para geração de calor e vapor, necessários para secagem dos grãos de arroz e, que

esse processo tem gerado uma cinza, rica em sílica (SiO_2), uma potencial fonte alternativa de matéria-prima para a indústria cerâmica e utilizada para construção civil.

Devido o alto teor de óxido de silício, a cinza da casca de arroz é utilizada na fabricação de vidros, isolante térmico, tijolos prensados e materiais refratários. Além desses produtos, a cinza da casca de arroz misturada com cimento Portland fornece um material cimentício, o qual, por sua vez, permite a obtenção de argamassas e concretos de elevada resistência (RODRIGUES, 2008).

De acordo com a ANPEL (2010) a sílica da casca de arroz está sendo utilizada pela Pirelli para produção de pneus. Essa inovação desenvolve uma linha completa do pneu verde fabricado com os mesmos materiais do pneu tradicional, mas economiza em média 5% do combustível consumido pelo automóvel e apresenta ótima resistência. Isso é possível devido à incorporação da sílica da cinza de casca de arroz.

4.3. Solo-Cimento

4.3.1. Caracterização física e mecânica do solo

Considerando os diferentes tipos de solo, de acordo com Silva (2005), o material solo-cimento apresenta características físico-mecânicas dependente das características físicas e mecânicas do solo utilizado, o que pode muitas vezes inviabilizar sua utilização como material alternativo, por isso, é necessário a realização de ensaios para a caracterização dos solos. Os ensaios mais importantes são os de granulometria, compactação e os limites de atterberg (limite de liquidez, limite e índice de plasticidade).

A classificação granulométrica do solo é o processo que determina a percentagem em peso para cada faixa especificada de tamanho das partículas representadas na massa total ensaiada. Os resultados obtidos no ensaio são utilizados para a construção da curva de distribuição granulométrica, importante para a classificação dos solos e para a estimativa de parâmetros para filtros, bases estabilizadas, permeabilidade, capilaridade etc.

A plasticidade é a propriedade do solo que consiste na sua maior ou menor capacidade de ser moldado sob certas condições de umidade. Os limites de consistência do solo (limites de Atterberg) definem o limite de contração (LC) - o teor de umidade abaixo do qual o solo passa da condição "semi-sólida" para a condição "sólida"; o limite de plasticidade (LP) - o teor de umidade abaixo do qual adquire uma condição "semi-plástica"; o limite de liquidez (LL) - o teor de umidade que corresponde à transição entre a condição de consistência fluida (teor de umidade acima do LL) e a de consistência plástica (teor de umidade abaixo do LL e acima do LP) e; o índice de plasticidade (IP) - o teor de umidade dentro da qual o solo possui plasticidade, calculado pela diferença dos valores numéricos entre LL e LP (MILANI, 2005).

Compactação é o processo de aplicação de cargas dinâmicas sobre o mesmo tem como finalidade reduzir seu volume de vazios, a fim de se conseguir maior resistência. A densidade do solo compactado, o teor de umidade ótima que promove uma lubrificação das partículas, facilita energia de compactação no preenchimento de todos os vazios possíveis. O solo compactado reduz sua permeabilidade, compressibilidade e capacidade de

absorção de água, tornando-se mais estável. Portanto é importante conhecer a umidade ótima do solo numa determinada energia de compactação aplicada para obter sua massa específica aparente seca máxima (MILANI, 2005).

Em estudos realizados, Milani e Freire (2006) afirmaram que os índices físicos dos solos estudados mostraram que o solo arenoso utilizado foi adequado para estabilização com cimento, pois possuía granulometria desuniforme que facilitou a interação entre o solo e o aglomerante, e quantidade suficiente de finos (argila + silte) que confere maior plasticidade à mistura. O solo argiloso apresentou grande porcentagem de finos e elevado Índice de Plasticidade (IP), o que, segundo ABCP (1985) citado por Milani (2005), dificulta o processo de estabilização do solo. Pode-se confirmar essa dificuldade nos corpos-de-prova de solo argiloso-cimento incorporado com casca de arroz, pois houve necessidade de altos teores de aglomerante para que as misturas atingissem valores de resistência mínima para utilização como componente construtivo.

A partir dos resultados da granulometria e dos índices físicos, o solo arenoso classificado como A_{2-4} e o solo argiloso como A_{7-5} de acordo com o sistema AASHTO e os valores de massa específica aparente mostraram que o solo arenoso é o mais adequado, em relação ao solo argiloso, para confecção de blocos de solo-cimento incorporado com casca de arroz (MILANI E FREIRE, 2006).

Valenciano e Freire (2004) estudaram as características dos solos, arenoso e argiloso, com o objetivo de analisar as propriedades físico-mecânicas da mistura de solo, cimento e cinza de bagaço de cana de açúcar para possível utilização na fabricação de materiais alternativos para construção civil. Estudando os solos, os autores encontraram resultados que lhes favorecem para pesquisa. Os resultados obtidos nos ensaios estão expressos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Caracterização física dos solos estudados.

Parâmetros		Solos	
		Arenoso	Argiloso
Composição textural (% em peso)	Areia grossa (0,42 – 2,00 mm)	14,83	8,45
	Areia fina (0,05 -0,42 mm)	64,71	37,32
	Silte (0,005 – 0,05 mm)	13,34	14,25
	Argila (< 0,005 mm)	2,38	35,18
Limites de consistência (%)	Limite de Liquidez	15,50	47,40
	Limite de Plasticidade	13,80	31,87
	Índice de Plasticidade	1,70	15,53
Classificação	AASHTO	A ₂₋₄	A ₇
	Bureau of Public Roads	Arenoso	Argiloso
Massa específica dos grãos (g/cm ³)		2,63	2,88

Fonte: Velenciano e Freire (2004)

Ferreira e Oliveira (2007) a partir de resultados obtidos em ensaios de caracterização física de solo argiloso, concluíram que os valores encontrados mostraram a inadequação do solo argiloso (normal) para uso em mistura de solo-cimento, devido ao seu teor máximo de argila e está em desacordo com a recomendação da ABCP (1985). Dessa maneira, foi adicionado 50% de areia fina à massa do solo natural para corrigir a sua granulometria. Os valores obtidos nos ensaios pelos autores estão expressos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características físicas do solo utilizado na fabricação dos corpos-de-prova cilíndricos.

Solo	Granulometria			Índices físicos				Classificação AASHTO
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Mesp (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
Normal	31,94	5,87	62,19	3,38	41,70	28,00	13,70	A ₇
Corrigido	55,82	21,21	22,97	2,72	21,10	16,30	4,80	A ₄

Fonte: Ferreira e Oliveira (2007)

1 - Mesp – Massa específica aparente seca; IP – Índice de Plasticidade; LP- Limite de Plasticidade e LL – Limite de Liquidez.

2 – AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials, citada por CAPUTO (2003).

4.3.2. Estabilização do solo com cimento Portland

A estabilização do solo é um processo natural e artificial, pelo qual o solo, sob efeito de cargas aplicadas, torna-se mais resistente à deformação e ao deslocamento do que o solo original. Esse processo consiste em modificar as características naturais do solo com a finalidade de se obter propriedades físico-mecânicas resistentes e de longa duração (FERREIRA *et al.*, 2005).

A estabilização de solos através de adição de aditivo como o cimento, constitui um processo de tratamento com base em reações químicas entre as partículas do solo, a água e os materiais adicionados, resultando alterações no solo e originando um novo material com características diferentes e necessariamente aproximadas do que se pretende para confecção de materiais para construção civil e rural (MILANI, 2008).

Segundo França (2003) a estabilização química de um solo, trata-se de alterações produzidas na sua estrutura introduzindo certa quantidade de aditivo suficiente para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, possibilitando a sua utilização para fins de projetos.

A utilização do cimento na estabilização do solo iniciou-se com a aplicação na pavimentação de estradas e rodagens, hoje, o cimento está sendo utilizado como agente estabilizador do solo na produção de materiais para construção civil e rural de baixos custos e uso ecológico.

Segundo Cristelo (2001), o cimento é utilizado como agente estabilizador do solo plástico ou não plástico, com teores de água suficientemente elevados, para não impedir a adequação aos trabalhos com solo-cimento. A utilização do cimento na estabilização de solos tem como objetivo melhorar as características físico-mecânicas e maior estabilidade relativa à variação do teor de água. Na estabilização de solos, os cimentos de tipos Portland são os mais utilizados, embora praticamente todos os tipos de cimento possam ser utilizados para a estabilização de solos. O cimento deve estar conforme as especificações que o caracterizam, deve ser um cimento de qualidade e que não esteja danificado.

O cimento Portland é uma substância alcalina composta na sua maior parte por silicatos e aluminatos de cálcio que durante a reação com água liberam hidróxidos de cálcio, dando origem a compostos cristalinos hidratados e gel. Esses compostos cristalinos criam estruturas que dão resistência ao material, enquanto que o gel do cimento desenvolve-se espontaneamente sobre a superfície mineral, ligando-se aos íons de oxigênio exposto nos silicatos e incorporando íons de cálcio livre a uma superestrutura formada pelo agrupamento de silicatos (FERREIRA, 2003).

A reação do cálcio livre liberado durante o processo de hidratação do cimento provoca a agregação do solo-cimento. Uma das mais importantes características do cimento é a condutibilidade elétrica das suas partículas apresentada na mistura de solo-cimento. A presença de cargas elétricas nas partículas de cimento provoca uma atração entre o cimento e as partículas de argila, produzindo agregados (FERREIRA, 2003).

As partículas de cimento envolvem os grânulos do solo formando agregados aumentando de tamanho à medida que se processa a hidratação e a cristalização do cimento. A estabilidade do solo-cimento ocorre principalmente com a hidratação do cimento e não pela coesão e atrito interno dos componentes, assim, sendo, pode-se utilizar todos os tipos de solo e combinações de solo para a mistura de solo-cimento. Os solos finos necessitam de maior percentual de cimento que os solos granulares, por apresentarem maior superfície específica (FERREIRA, 2003).

Nos solos finos plásticos, as forças de ligações entre as partículas constituintes impedem uma adequada mistura do solo com o cimento. É importante quebrar essas ligações, recorrendo ao tratamento com cal. Isto permite que o cimento entre como ligante dessas novas partículas, melhorando consideravelmente as propriedades do solo (CRISTELO, 2001).

Segundo Milani (2008), na estabilização do solo fino com cimento surgem matrizes hexagonais entre as partículas do solo e do cimento que se aglomeram fortemente e impedem o deslizamento das partículas maiores sobre as outras, com o decorrer do tempo reduz a variação volumétrica e a variação de umidade do material em função da cimentação, resultando numa estrutura com maior resistência à compressão devido às fortes ligações mecânicas do

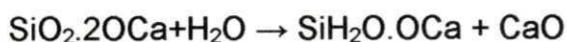
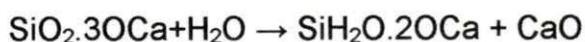
gel formado pelo cimento e as partículas do solo. Ao longo do tempo, podem ocorrer reações pozolânicas no sistema solo-cimento através da presença da água com o silício e o alumínio dos minerais do solo que contribuem para melhorar as propriedades físico-mecânicas e químicas do material. As reações químicas do sistema solo-cimento ocorrem intensamente pela presença de argila no solo com grande percentual de caulinita e illita que possibilitam a hidratação do cimento. A argila composta por montmorilonita enfraquece a resistência à compressão do cimento devido à absorção dos íons de cálcio interfoliar frágil existente nesse tipo de argila.

4.3.2.1. Mecanismo de estabilização dos solos com cimento

O mecanismo de estabilização do solo com o cimento ocorre a partir do desenvolvimento das reações químicas geradas pela hidratação do cimento misturado com água, diante desse processo desenvolve vínculos químicos entre as superfícies dos grãos de cimento e as partículas do solo (MARQUES, 2010).

A argila a base de montmorilonita, a evolução da curva de tensão-deformação, para baixos teores em cimento, verifica-se a constituição de núcleos de cimento espalhados pela massa do solo, enquanto que para teores mais elevados de cimento ocorre uma progressiva interligação dos referidos núcleos, transformando o cimento em um esqueleto das partículas de solo (CRISTELO, 2001).

Segundo Cristelo (2001), o cimento Portland constituído por cerca de 45% de silicatos tricálcio ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{OCa}$), hidratado com o solo formam um gel de silicato hidratado de bicálcio e monocálcio ($\text{SiH}_2\text{O} \cdot 2\text{OCaO} \cdot \text{OCa}$). A reação química pode ser representada da seguinte forma:



A proporção de partículas argilosas aglutinadas será bastante pequena comparada com a proporção de partículas granulares que passarão a estar interligadas. Independente do tipo de solo, o processo de hidratação do

cimento caracteriza a mistura, dependendo da compactação e do teor de umidade ótima.

Os solos granulares possuem algumas semelhanças com um típico concreto de cimento. Nas misturas de cimento utilizado não é suficiente para preencher os vazios, o cimento apenas liga as áreas de contato das partículas. A quantidade de cimento a ser utilizada na mistura depende da granulometria para atingir determinada resistência.

Nos solos coesivos, em termo de comportamento, a adição de cimento produz a plasticidade do solo, atribuindo libertação dos íons de cálcio durante as reações de hidratação do cimento e fixação dos cátions nas partículas da argila alterando a distribuição das cargas elétricas provocando a atração mútua entre as partículas e a sua conseqüente floculação. As partículas agregadas passam a se comportarem como partículas de maiores dimensões e com menor plasticidade e coesão (CRISTELO, 2001).

4.3.2.2. Fatores que influenciam na estabilização do solo-cimento

A estabilização da mistura solo-cimento é influenciada por inúmeros fatores que condicionam as propriedades físicas dos solos estabilizados com cimento. O cimento exerce a função de estabilização conforme o teor utilizado na mistura. Quando os teores de cimento são altos ocorre um efeito preponderante que consiste no aumento de resistência mecânica devido a ação aglutinante do aditivo e quando os teores de cimento são baixos consiste fundamentalmente na alteração da fração argilosa do solo, na diminuição da plasticidade e podendo ocorrer uma redução na resistência mecânica (CRISTELO, 2001).

a) O tipo de solo

Todos os tipos de solo podem ser estabilizados com cimento Portland, dependendo dos aspectos físico-químicos do solo e do cimento, sob as condições de avaliação de distribuição granulométrica, limite de liquidez e de plasticidade, índice de plasticidades e teor de umidade ótima de compactação para se obter um bom desempenho físico-mecânico e durabilidade do produto final (DELGADO e GUERRERO, 2007).

Milani (2005) durante a pesquisa sobre a estabilidade de um solo argiloso observou-se que os solos com índices de plasticidades e limite de liquidez elevado dificultam estabilização do solo, por isso, requerem teores elevados de cimento para que a mistura de solo-cimento possa atingir a resistência mínima para fins de utilização como tijolos prensados.

Quando a granulometria do solo não é adequada para a estabilização com cimento, pode-se corrigi-la adicionando-se outros tipos de solos. Sousa e Barbosa (2000) trabalharam com solo arenoso, para que esse solo conferisse-lhe coesão para moldagem de tijolos de solo-cimento foi necessário adicionar solos finos contendo silte e argila.

Segundo a ABCP (1985) citada por FERREIRA (2003), os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, mas sendo necessária a presença de argila na sua composição, visando dar a mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas.

b) Presença no solo de materiais nocivos ao cimento

Segundo Marques (2010), a presença de matéria orgânica no solo afeta a hidratação do cimento, devido a absorção dos íons do cálcio que resulta queda no PH da mistura e os sulfatos encontrados nas águas do solo combinam com o aluminato tricálcio do cimento hidratado formando o sulfo-aluminato de cálcio que provoca queda de ligações cimentícias.

c) Teor de cimento

O teor de cimento depende do tipo de solo a ser utilizado na mistura solo-cimento, quanto maior for o percentual de silte e argila, maior será o teor de cimento exigido na mistura. Para se obter o teor ideal de cimento para um determinado tipo de solo, deve-se recorrer aos procedimentos de dosagens (MARQUES, 2010).

Segundo Milani (2008) o teor de cimento a ser adicionado ao solo depende de critérios técnicos (resistência e durabilidade) e critérios econômicos que se pretende alcançar para o produto final. Sendo que, a resistência do solo aumenta em função do aumento do teor de cimento, dependendo do tipo de solo utilizado na mistura solo-cimento, isso ocorre

devido às alterações físico-químicas produzidas pela interação entre as partículas do solo e as do cimento hidratado.

A determinação do teor de cimento para a estabilização do solo apresenta algumas complexidades, o aumento do teor de cimento faz com que a resistência seja mais elevada, mas a utilização de cimento em quantidades superiores às necessárias para a mistura de solo-cimento apresenta inconveniências técnicas e econômicas (MARQUES, 2010).

d) Teor de umidade da mistura solo-cimento

Para as misturas de solo-cimento é necessário um teor de umidade que conduza a massa específica seca máxima para uma dada energia de compactação.

Mellace *et al.*, (2002) com o objetivo de determinar o teor de umidade das misturas de solo-cimento, investigaram dois tipos de solos, um solo arenoso e outro siltoso, ambos com baixa plasticidade. Os solos foram estabilizados com cimento Portland na proporção em volume de 1:10 para fabricação de blocos prensados com dois teores de umidade para moldagem (16% e 22%). Após 28 dias de cura os blocos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples e à tração na compressão diametral, os valores obtidos nos ensaios, segundo os autores, foram influenciados pelos tipos de solo e pela relação água/solo-cimento utilizada na compactação, sendo que a umidade de moldagem próxima ao teor de umidade ótima da mistura apresentou maiores valores de resistência.

e) Processo de compactação

O processo de compactação da mistura solo-cimento é um fator muito importante para o desempenho físico-mecânico, pois na compactação pode-se trabalhar umidades de moldagem em torno de teor ótimo, pois as umidades ótimas oferecem a máxima densidade do sistema solo-cimento e, conseqüentemente, maior resistência. Quanto maior for o efeito da estabilização do solo, menor será a perda de massa (MILANI, 2008).

f) Tempo e condições de cura

A mistura solo-cimento na produção de materiais para construção civil e rural ganha resistência por processo de cimentação das partículas durante o período de cura. No período de cura deve ser garantido um teor de umidade adequado à mistura solo-cimento compactada (MARQUES, 2010).

4.3.3. Solo-cimento como material de construção

Segundo a ABCP (1985) citada por Milani (2005) o solo-cimento é o produto resultante da mistura de solo, cimento Portland e água, que compactados na umidade ótima e sob a máxima densidade, em proporções previamente estabelecidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento. Solo-cimento é um material alternativo de baixo custo, obtido pela mistura homogênea de solo, cimento e água, em proporções adequadas e que, após compactação e cura úmida resulta num produto com características de durabilidade e resistências mecânicas definidas. No início, essa mistura parece uma “farofa” úmida. Após ser compactada, ela endurece e com o tempo, ganha consistência e durabilidade suficiente para diversas aplicações na construção civil. Uma das grandes vantagens do solo-cimento, é que, o solo é um material local e abundante na natureza. O solo-cimento é uma evolução de técnicas de construções do passado, como o barro e a taipa. A vantagem é que os aglomerantes naturais foram substituídos pelo cimento, produto industrializado e de qualidade controlada (CAMPOS, 2008). O solo-cimento pode ser utilizado para a fabricação de blocos ou tijolos, pavimento, parede maciça e ensacado.

Blocos ou tijolos de solo-cimento são produzidos em prensa e dispensando a queima em fornos.

Os pavimentos são compactados no próprio local, com auxílio de formas, apenas em uma única camada.

As paredes maciças são compactadas no local de construção, em camadas sucessivas, no sentido vertical, com auxílio de formas ou guias.

Solo-cimento ensacado – resulta do ensacamento da “farofa” úmida. As bocas dos sacos são costuradas e os sacos são colocados na posição de uso, onde são compactados (CAMPOS, 2008).

Segundo Milani (2008), o solo-cimento como material de construção, tem-se destacado na forma de blocos ou tijolos prensados e seu processo de fabricação passa pelas fases de destorroamento, peneiramento e secagem do solo, mistura homogênea do solo com o cimento e uma quantidade adequada de água. A prensagem é feita em prensa mecânica ou manual, os blocos ou tijolos devem ser molhados três ou quatro vezes ao dia durante uma semana.

Em publicação da ABCP (1985), cita-se que os blocos ou tijolos de solo-cimento apresentam as seguintes vantagens:

- Podem ser produzidos no próprio local do solo;
- Requerem argamassa e revestimento de espessuras mínimas e uniformes;
- O revestimento pode ser dispensado, desde que seja protegido da ação direta da água;
- Consome apenas, cerca de 0,1 MJ/kg de energia, enquanto os tijolos cerâmicos, com a queima em fornos, consomem em torno de 8 a 16 vezes mais energia.

Barbosa e Mattone (2002) afirmam que o uso do solo-cimento como tecnologia apropriada, verificando grande potencial desse material para minimizar os problemas da habitação em todo o mundo, por ser uma alternativa de baixo consumo energético e não poluente. Afirmam ainda que o solo-cimento é um material resistente à ação intempéries e oferece conforto interno nas habitações devido à sua porosidade que permite as trocas de vapor entre o interior e exterior da construção.

Lima e Alexandre (2006) estudando a produção de blocos modulares (19,5 x 10 x 5 cm³) de solos argilosos estabilizados com 10% de cimento, verificaram que a resistência à compressão no decorrer de 30 dias, alcançou valores de 3,2 MPa de resistência e 16,1% de capacidade de absorção de água. Pesquisaram a durabilidade do bloco quando submetido a ciclos de

molhamento e secagem, resultando em perda e ganho de massa não superior a 6% e resistência à compressão simples atendendo as exigências normalistas referentes a tijolos e blocos de solo-cimento.

Ferreira e Freire (2003) estudaram a combinação de métodos destrutivos e não-destrutivos para a avaliação da eficiência da estabilidade do solo e da qualidade técnica de tijolos prensados de terra crua tratada com cimento, cal e silicato de sódio. Os teores de cimento e cal foram 0%, 6% e 10% e a dosagem de silicato de sódio foi de 4% em relação ao peso seco da mistura solo-aditivo. Após a moldagem, os tijolos foram submetidos à cura durante períodos de 7, 28, 56 e 90 dias. As propriedades físico-mecânicas dos tijolos foram determinadas através de testes destrutivos (resistência à compressão simples) e não-destrutivos (ensaio de ultra-som). Os resultados indicaram que as adições de 10% de cimento e 10% de cal, respectivamente para solos arenosos e argilosos, foram as que promoveram melhores resultados em termos de resistência à compressão simples.

Ferreira (2003) estudou a resistência à compressão e a absorção de água do material solo-cimento através da determinação experimental em corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e mini-painéis (0,5 m²). Utilizou os solos arenosos e argilosos, adicionando ao solo os teores de 6% e 10% de cimento Portland. Os resultados encontrados para a resistência simples e absorção de água de corpos-de-prova adicionados do teor de 10% de cimento foram em média, respectivamente, 2 MPa e 12%, aos 7 dias de idade. Com base nesses valores, ele recomendou solos com características semelhantes àquelas do solo arenoso estudado para estabilização com cimento, concluindo ser esse material promissor para o atendimento às demandas por tecnologias apropriadas.

Ferreira e Freire (2003) estudaram tijolos prensados de solo-cimento comparando-os com tijolos maciços comuns e tijolos furados, com o objetivo de definir critérios de aplicação prática, controle de patologias e comparação de custos. Foi utilizado na fabricação dos tijolos de solo-cimento, um solo A₆₋₁, tendo sido corrigida sua granulometria com a adição de 10% de areia média e incorporada ao solo um teor de 10% de cimento Portland (CP II-E 32). Na fabricação dos tijolos foi empregada uma máquina de fabricação de tijolos de

acionamento mecânico e a cura foi efetuada após 6 horas de moldagem e durante os sete primeiros dias, com aspersão de água através de regador munido de chuveiro em um galpão para evitar os efeitos do vento e a incidência dos raios solares. Dos lotes de tijolos de solo-cimento foram retirados três tijolos, os quais foram submetidos aos ensaios de compressão nos períodos de 7, 28 e 56 dias e absorção de água em 7 dias, conforme mostra os resultados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resistência à compressão simples e absorção d'água dos tijolos de solo-cimento.

Repetições	Resistência à compressão simples (MPa)			Absorção de água (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
1	2,21	2,72	3,86	14,40
2	1,98	2,58	3,20	14,70
3	2,15	2,60	3,37	15,00
Média (%)	2,11	2,63	3,48	14,70

Fonte: Ferreira *et al.*, (2003).

4.3.4. Solo-Cimento com adição de casca de arroz como material de construção

O solo-cimento adicionado com casca de arroz tornou-se um material da construção civil de ótima qualidade, custo baixo, apresentou um bom desempenho físico-químico, integrado à sustentabilidade ambiental e apropriado para produção de tijolos cerâmicos (FERREIRA, 2003).

A adição da casca de arroz no concreto é uma das soluções viáveis e disponíveis, a qual atribui características de durabilidade ao material, reduz os custos de produção e apresenta grande importância ambiental, visto que se trata de um resíduo agro-industrial ainda pouco explorado (POSSAN *et al.*, 2007).

Ferreira *et al.*, (2008) estudaram composições da mistura de solo-cimento e casca de arroz, tendo como objetivo principal determinar os teores

máximos desse resíduo a serem incorporado sem o comprometimento de suas características mecânicas. Utilizaram a cascas de arroz e o cimento Portland CP II-F-32 para a composição dos tratamentos. Nas combinações, os teores de cimento e casca de arroz variaram desde 100% de cimento e 0% de resíduo, até 60% de cimento e 40% de casca de arroz. Os tijolos foram prensados com o auxílio de máquina de fabricação de tijolos e submetidos aos ensaios de compressão simples e absorção de água. Os melhores resultados, em termos de resistência à compressão simples e de absorção de água, foram obtidos pelos tratamentos com substituição de 10% de casca de arroz em relação ao teor de cimento. De forma geral, os resultados sugerem a possibilidade do uso da casca de arroz no teor de 10%, sem o comprometimento das propriedades mecânicas relacionadas à resistência e à absorção de água dos tijolos de solo-cimento.

Milani e Freire (2006) estudaram os efeitos da adição da casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas (capacidade de absorção de água e resistência à compressão simples e diametral) da mistura de solo-cimento, visando a obter composições de solo-cimento-casca de arroz com potencialidade para fabricação de materiais alternativos de construção. As composições solo-cimento-casca de arroz foram submetidas aos ensaios de compressão simples, aos 7, 28 e 56 dias, e de absorção de água, aos 7 dias. Após a determinação das características físico-mecânicas estudadas, eles concluíram que misturas de solo associado ao teor de 12% de combinação de cimento e casca de arroz se mostraram promissores como materiais para posterior utilização na fabricação de elementos construtivos em construções e instalações rurais.

Ferreira e Oliveira (2006) com o objetivo de adicionar a máxima quantidade de resíduo e diminuir o consumo de cimento na mistura solo-cimento-resíduo, adotou o teor de 10% da combinação de cimento e resíduo (percentual em relação à massa do solo seco). Em seguida, adotou os procedimentos realizados por Milani & Freire (2006), em que, nas combinações (tratamentos), os teores de cimento e de resíduo variaram desde 100% de aglomerante e 0% de casca de arroz, até 60% de aglomerante e 40% de casca de arroz em incrementos de 10%. Nos ensaios de compactação de Proctor

Normal realizados com a composição de solo-cimento e casca de arroz, os autores observaram que, percentagens maiores de casca de arroz afetaram negativamente a trabalhabilidade e a compactação da mistura.

Milani (2005) avaliou o desempenho das propriedades físico-mecânicas da mistura solo-cimento e casca de arroz para confecção de corpos-de-prova de tijolos. A avaliação dos corpos-de-prova de solo-cimento e casca de arroz consistiu na aplicação dos ensaios de compressão simples, de tração na compressão diametral, aos 7 e 28 dias, de absorção de água e de ultra-som. Os tijolos de solo-cimento incorporados com casca de arroz foram submetidos aos ensaios de compressão simples aos 7, 28 e 60 dias, de absorção de água e de ultra-som. No final dos ensaios concluiu-se que o solo arenoso, adicionado de 12% de combinações de cimento e casca de arroz, apresentou-se como promissor material para utilização na fabricação de tijolos prensados a serem utilizados em construções e instalações rurais.

4.4. Durabilidade

Segundo John (2001), os estudos de durabilidade foram motivados pela necessidade de avaliação do desempenho econômico dos novos produtos inseridos no mercado da construção civil. Com os paradigmas do desenvolvimento sustentável, a durabilidade ganhou uma nova dimensão, pois a ampliação da vida útil dos sistemas construtivos, seus elementos e componentes é uma forma efetiva de redução dos impactos ambientais e as pesquisas na área da construção civil ganharam novo impulso.

Para Isaia (2001), a durabilidade dos materiais está ligada à sua capacidade de se conservar em determinado estado, com as mesmas características ao longo de um dado tempo. De outra forma, é a resistência de um material ou elemento da construção à deterioração ou degradação. Este conceito está intimamente conectado com o desempenho que é o comportamento de um produto em serviço sob as condições de real funcionamento ou uso, com pleno atendimento às exigências do mercado.

Segundo Neville (2001), a durabilidade significa que uma certa estrutura terá desempenho contínuo satisfatório, para as finalidades para as quais foi projetada, isto é, que manterá sua resistência e condições normais de serviço durante a vida útil.

John (2001) afirma que a durabilidade não é uma qualidade intrínseca de apenas um material, mas determinadas combinações de materiais diversos que podem proporcionar maior proteção ao componente contra fatores de degradação. A durabilidade é a qualidade de um produto e seus constituintes, capaz de desempenhar suas funções durante um período de tempo e sob a influência de vários agentes.

A durabilidade para Silva (2002) é um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de um novo produto, onde uma nova tecnologia possa ser inserida no mercado da construção civil e rural. A durabilidade é um estudo amplo da vida útil do material que deve ser iniciado a partir da identificação dos agentes agressivos relevantes em cada aplicação, e de mecanismo de degradação a eles associados.

A durabilidade pode ser definida como sendo a capacidade de um material manter a sua integridade quando submetido à ação de agentes

externos e à degradação acelerada. Entre as formas de avaliação da durabilidade está a perda de massa e a variação de volume no final de determinado tempo ou número de ciclos de secagem e molhagem de misturas de solo-cimento (MACHADO *et al.*, 2006).

De acordo com Farias Filho (2007), o estudo da durabilidade é fundamental para o conhecimento dos novos materiais em desenvolvimentos, avaliando as ações dos agentes físicos, químicos e biológicos que afetam o desempenho das propriedades dos materiais ao longo do tempo de vida útil ou em anos de uso.

Segundo Souza (2008) durabilidade é a capacidade que um produto possui de manter suas condições de serviço, para o qual foi projetado e construído, durante determinado período de tempo. A durabilidade do produto pode ser avaliada pelo seu tempo de vida em anos ou pela sua resistência a agentes que afetam seu desempenho.

Rojas *et al.*, (2008) cita que El American Concrete Institute sugere dois tipos de testes de durabilidade de solo-cimento: ASTM D559 (1996), define o ensaio de perda de massa por ciclo molhagem e secagem e, ASTM D560 (1996), define a perda de massa por ciclos de congelamento e descongelados, o segundo teste não é utilizado em países tropicais como o Brasil. A NBR 13554 (1996) é quase idêntica à D559 ASTM (1996), em que apenas o número de ciclos se diferem.

4.4.1. Análises e avaliações de durabilidade em materiais de construção

A avaliação da durabilidade se baseia primeiramente na identificação das necessidades do usuário, para avaliação de um material que será usado como alternativo, deve-se observar a importância da manutenção das suas características físicas e químicas, de suas resistências e esforços dinâmicos e estáticos e principalmente observar se o material é durável ao longo do tempo. Tomando por base a função do produto e as exigências inerentes a ele, parte-se então para identificar as condições às quais o produto será submetido (SILVA, 2002).

A análise da durabilidade de uma edificação é muito complexa, pois depende de muitos fatores que vão ocorrendo durante a vida útil da edificação.

O meio ambiente pode sofrer variações passando a serem mais agressivo, os materiais sofrem transformações que muitas vezes não conseguem ser simuladas por ensaios de envelhecimento, por exemplo, o mau uso da edificação pode afetar o seu comportamento. Portanto, é muito difícil simular, através de ensaios e avaliações, o desempenho de uma edificação ao longo de sua vida útil. Pode-se, no entanto, estimar a vida útil dos componentes da edificação, desde que sejam utilizadas técnicas adequadas para a construção, controle da mão de obra e produtos de boa qualidade, de preferência com garantia de qualidade pelo fabricante. Uma avaliação prévia dos produtos e componentes, por exemplo, se atendem às normas técnicas, colabora para a determinação da durabilidade potencial da edificação. Todas estas avaliações e ensaios de qualidade de produtos e componentes devem ser acompanhados por uma análise de custo global, que inclui os custos iniciais da construção e os que surgem durante a vida útil da obra, correspondentes aos serviços da manutenção (KLEIN *et al.*, 2004).

Na avaliação de desempenho propõe-se que o novo material alternativo com e sem revestimento (com e sem proteção), deve ser durável, quando exposto às condições externas típicas dos efeitos da chuva e do sol. A simulação dessa situação pode ser feita através de ensaios acelerados de molhagem e secagem (SILVA, 2002).

Segundo John *et al.*, (1997) para avaliação da durabilidade é possível recorrer a três metodologias: ensaios de degradação acelerada, ensaios de degradação natural e estudos de deterioração em uso; sendo apresentados neste trabalho apenas alguns resultados obtidos com o ensaio de envelhecimento acelerado.

Os ensaios de degradação acelerada envolvem a exposição do material a elevadas concentrações do fator de degradação ou a temperaturas mais elevadas que favorecem a taxa de reação química. Como na maioria das vezes a correlação desses resultados com os de degradação natural é difícil, sua maior utilidade é comparativa. Não é possível projetar um método de degradação acelerada sem o conhecimento prévio e preciso dos fatores de degradação relevantes (JOHN *et al.*, 2001).

Os indicadores de degradação são as propriedades mensuráveis utilizadas para medir o avanço da queda de desempenho do produto em uso. A seleção desse indicador é etapa importante do estudo, pois deve ser de fácil mensuração e preferencialmente correlacionado com o desempenho. Após cada período de degradação deveriam ser repetidos todos os ensaios e avaliações de desempenho relativo às demais necessidades dos usuários, mas este procedimento é dispendioso e desnecessário, porque na maioria das vezes a degradação afeta apenas o desempenho relativo a algumas necessidades (JOHN *et al.*, 2001).

4.4.2. Ensaio realizados sobre durabilidade de materiais de construção

Muitas pesquisas têm sido realizadas com materiais alternativos para construção civil e rural com o objetivo de avaliar a sua durabilidade submetendo-os às condições que serão submetidas na utilização durante a vida útil. Diante disso, apresenta-se alguns trabalhos recentes sobre durabilidade realizados no campo da construção civil e rural.

A adição de casca de arroz em matriz cimentícia resulta em material novo, ainda pouco estudado e conseqüentemente não existem normas específicas para a avaliação da durabilidade deste material, por isso, busca-se métodos ou metodologias de ensaios específicos para blocos de solo-cimento.

Mateus (2002) realizou ensaios de degradação acelerada para simular condições ambientais adversas através dos componentes elementares que atuam sobre fibras provocando a sua degradação. Esse tipo de avaliação, tornou-se a melhor forma para entender o comportamento e o desempenho dos materiais ao longo do tempo. Para o autor, as condições escolhidas para a realização dos ensaios em laboratório comparados as condições em campo poderão produzir boas correlações que auxiliarão na escolha do tipo de material adequado para ser utilizado na construção civil.

Oliveira (2004) realizou ensaios de durabilidade para avaliar blocos convencionais e alternativos com a função estrutural, utilizou o método de molhagem e secagem modificado, adaptando modificações na norma da NBR 13554 (ABNT, 1996), utilizando a resistência à compressão simples como um indicador de degradação. A cura foi realizada nos períodos de 7 dias e 28 dias,

com traços contendo 0%, 30%, 60% e 100% de entulho em substituição aos agregados naturais. Os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade demonstraram ganhos de resistência à compressão simples durante os primeiros ciclos, em geral até o quinto ciclo, seguido de quedas até o 12º ciclo.

Lima (2010) estudou a durabilidade em corpos-de-prova para paredes monolíticas de solo-cimento e blocos de solo-cimento através de ensaios de molhagem e secagem em seis ciclos. Os ciclos tiveram inícios aos 28 dias de cura. As amostras foram divididas em dois grupos, um grupo foi submetido à escovação e o outro não foi submetido a escovação. No final de cada ciclo foi determinada a resistência à compressão simples dos dois grupos. Os resultados apresentados no estudo evidenciaram a possibilidade de utilização de resíduos de serragem de granito em solo-cimento para a aplicação em parede monolítica e tijolos para habitação de interesse social.

Silva (2002) estudou a durabilidade de compósitos reforçados com fibra de celulose, fazendo a avaliação do comportamento dos compósitos produzidos com cimento. Nos ensaios de degradação acelerada foram planejados visando simular a ação de intempéries através de ciclos de molhagem e secagem, 6 horas de imersão em água potável a 70 °C, temperatura escolhida para condicionar um processo de decomposição mais rápida do material pela extração de seus componentes.

Zuhrani *et al.*, (2003) estudaram o comportamento mecânico e a durabilidade de nove tipos de argamassas de reparo à base de cimento com adições de sílica, polímeros e fibras. A durabilidade foi avaliada por meio de ensaios de determinação da permeabilidade ao cloro, da profundidade de carbonatação e da resistividade elétrica. Os autores observaram que as argamassas modificadas por polímero apresentaram menores valores de módulo de deformação do que as argamassas padrão, e que as argamassas à base de polímero apresentaram maior resistividade elétrica. A resistência à carbonatação dependeu do tipo de polímero utilizado, porém o polímero de base acrílica forneceu boa resistência à argamassa.

Lima (2010) estudou a durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduos de granito. Para a avaliação da

durabilidade dos materiais estudados empregou a metodologia de envelhecimento acelerado através dos ciclos de molhagem e secagem. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que com o acréscimo do teor de resíduos incorporados ao solo-cimento houve um decréscimo na resistência à compressão simples e conseqüentemente aumentou a perda de massa e a variação de volume.

Farias Filho (2007) estudou a durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito utilizando percentagens de substituição, variando de 30% a 50%. Para avaliar a durabilidade dos materiais estudados, realizou ensaios de envelhecimento natural e ensaios de envelhecimento acelerado através de ciclos de molhagem e secagem. Para o envelhecimento natural evidenciou-se o comprometimento da durabilidade do material após 60 dias com redução no comportamento mecânico, sendo os melhores resultados para os corpos-de-prova com 30% e 50% de resíduos de construção. No envelhecimento acelerado para os tratamentos adotados, ocorreu um aumento no comportamento mecânico, não ocorrendo comprometimento da durabilidade do material.

Pimentel *et al.*, (2006) estudaram a durabilidade de compósito biomassa vegetal-cimento modificado por polímero. Realizaram ensaios de envelhecimento acelerado, por meio de ciclos de molhagem e secagem, por imersão em água quente e ensaio de envelhecimento natural. As propriedades físicas do compósito avaliadas foram a massa específica aparente e a absorção de água e as propriedades mecânicas foram determinadas por meio de ensaios de resistência à tração na flexão, analisando-se a tensão e a energia de ruptura. Nos ensaios realizados foi constatado que o polímero melhorou o desempenho mecânico do compósito nas primeiras idades e também promoveu significativa redução da capacidade de absorção de água, demonstrando que o uso desse material pode vir a melhorar a durabilidade desse compósito, uma vez que reduziu sensivelmente sua capacidade de absorção de água.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Materiais

No que se refere ao estudo para a produção de blocos à base de solo, cimento Portland e casca de arroz, foram utilizados os materiais abaixo relacionados.

5.1.1. Casca de arroz

A casca de arroz utilizada nos experimentos foi fornecida pelo Sr. Francisco Gonçalves Neto, proprietário da máquina beneficiadora de arroz, localizada no Bairro da Gruta, na cidade de São João do Rio do Peixe, no Estado da Paraíba. A Figura 5.1 mostra a casca de arroz utilizada neste trabalho.



Figura 5.1 - Casca de arroz utilizada na pesquisa.

A casca de arroz coletada foi acondicionada em sacos plásticos e estocada no Laboratório de Reciclagem de Resíduos Sólidos (ResidLab) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEMa/CCT/UFCG), em recinto fechado, para posterior processo de preparação e utilização.

5.1.2. Solo

O solo utilizado nos experimentos (Figura 5.2) é proveniente da propriedade do Sr. Renato Pereira da Silva, no Sítio Catolé dos Gonçalves, município de Cajazeiras/PB, a 12 quilômetros da cidade de Cajazeiras – PB, com 298 metros de altitude, Longitude 38°32' Oeste e latitude 6°47' Sul. O clima predominante é definido, de acordo com a classificação de Koppen, como Bhs, denominado de clima tropical semi-árido, com pequena variação de temperatura média anual, ocorrendo precipitações de forma expressiva nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril. A temperatura varia entre as médias de 24°C e 29°C, com uma amplitude térmica em torno de 5°C. Os meses mais frios correspondem a junho e julho e os mais quentes são outubro, novembro e dezembro.

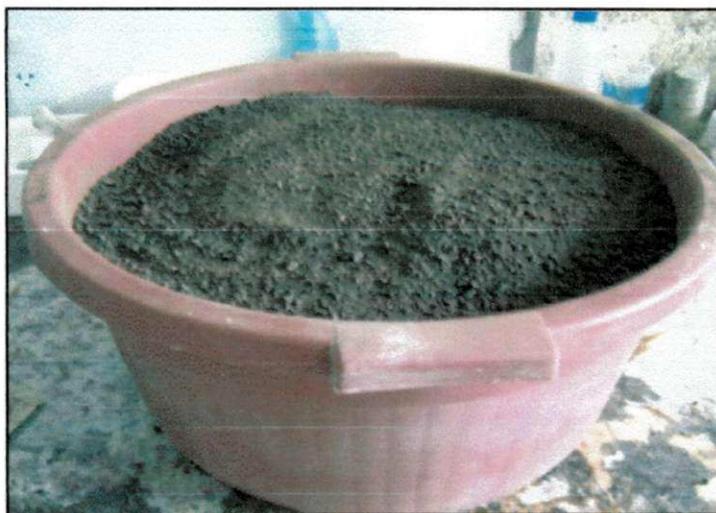


Figura 5.2 – Solo utilizado na pesquisa

As amostras foram coletadas em uma profundidade mínima de 80 centímetros para evitar presença de matéria orgânica em excesso.

A amostra coletada para os ensaios de caracterização passou por um processo de destorroamento, em seguida pelo processo de peneiramento e secagem na estufa em temperatura constante entre 105°C e 110°C, durante 24 horas.

5.1.3. Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland CP II – F – 32, com adição de filer calcário em teor de 6 e 10%, marca CIMPOR, que apresenta características físicas, químicas e mecânicas compatíveis para a fabricação de blocos de solo-cimento, atendendo aos requisitos especificados nas normas estabelecidas pela NBR 11578 (ABNT, 1991).

As Características físicas e químicas do Cimento Portland CP II – F – 32 utilizado na pesquisa, estão representadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II F – 32.

Propriedades físicas			
Ensaio físico	Métodos de ensaios	Limites de NBR 11578	Resultados
Finura malha nº 200 (%)	NBR 11578/91	≤ 12,0	2,6
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/98	-	3,05
Área esp.(Blaine) (cm ² /g)	NBR NM 76/98	≥ 2600	3610
Tempo de pega (h:min) início	NBR 11581/91	≥ 1:00	2:00
Final		≤ 10:00	3:00
Expansibilidade à quente	NBR 11582/91	≤ 5,00	0,0
Propriedades mecânicas			
Resistência 3 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 10	24,0
Resistência 7 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 20	31,2
Resistência 28 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 32	38,7

Fonte: CIMPOR

Tabela 5.2 – Propriedades químicas do cimento Portland CP II – F – 32

Propriedades Químicas			
Composição química	Métodos de ensaios	Limites da NBR 11578	Resultados
Perda de fogo (%)	NBR 5743/89	≤ 6,5	6,14
SiO ₂ (%)	NBR 9203/85	-	21,19
Al ₂ O ₃ (%)	NBR 9203/85	-	7,12
Fe ₂ O ₃ (%)	NBR 95203/8	-	2,17
CaO (%)	NBR 9503/85	-	57,30
MgO (%)	NBR 9503/85	≤ 6,5	4,69
SO ₃ (%)	NBR 5745/89	≤ 4,0	2,35
CO ₂ (%)	NBR 11583/90	≤ 5,0	-
CaO Livre	NBR 7227/90	-	1,24
Resíduo insolúvel	NBR 5744/80	≤ 16,0	8,05

Fonte: CIMPOR

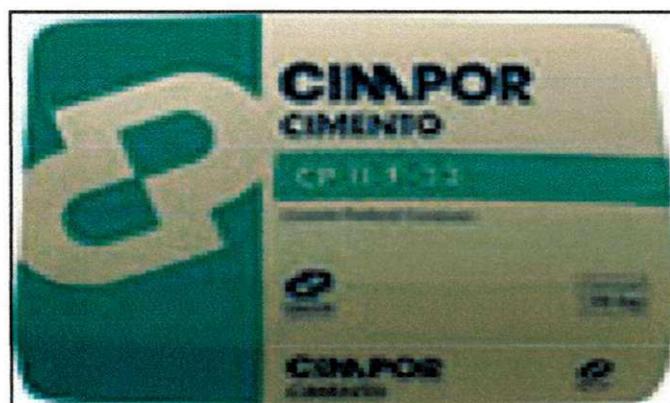


Figura 5.3 - Cimento Portland CP II – F – 32.

O cimento foi acondicionado em sacos plásticos, para evitar o envelhecimento e estocada no Laboratório de Reciclagem de Resíduos Sólidos (ResidLab) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEMa/CCT/UFCG).

5.1.4. Água

A água utilizada durante as fases de experimento foi proveniente da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA).

5.2. Métodos

Fluxograma experimental

A Figura 5.4 apresenta o fluxograma com as etapas da pesquisa.

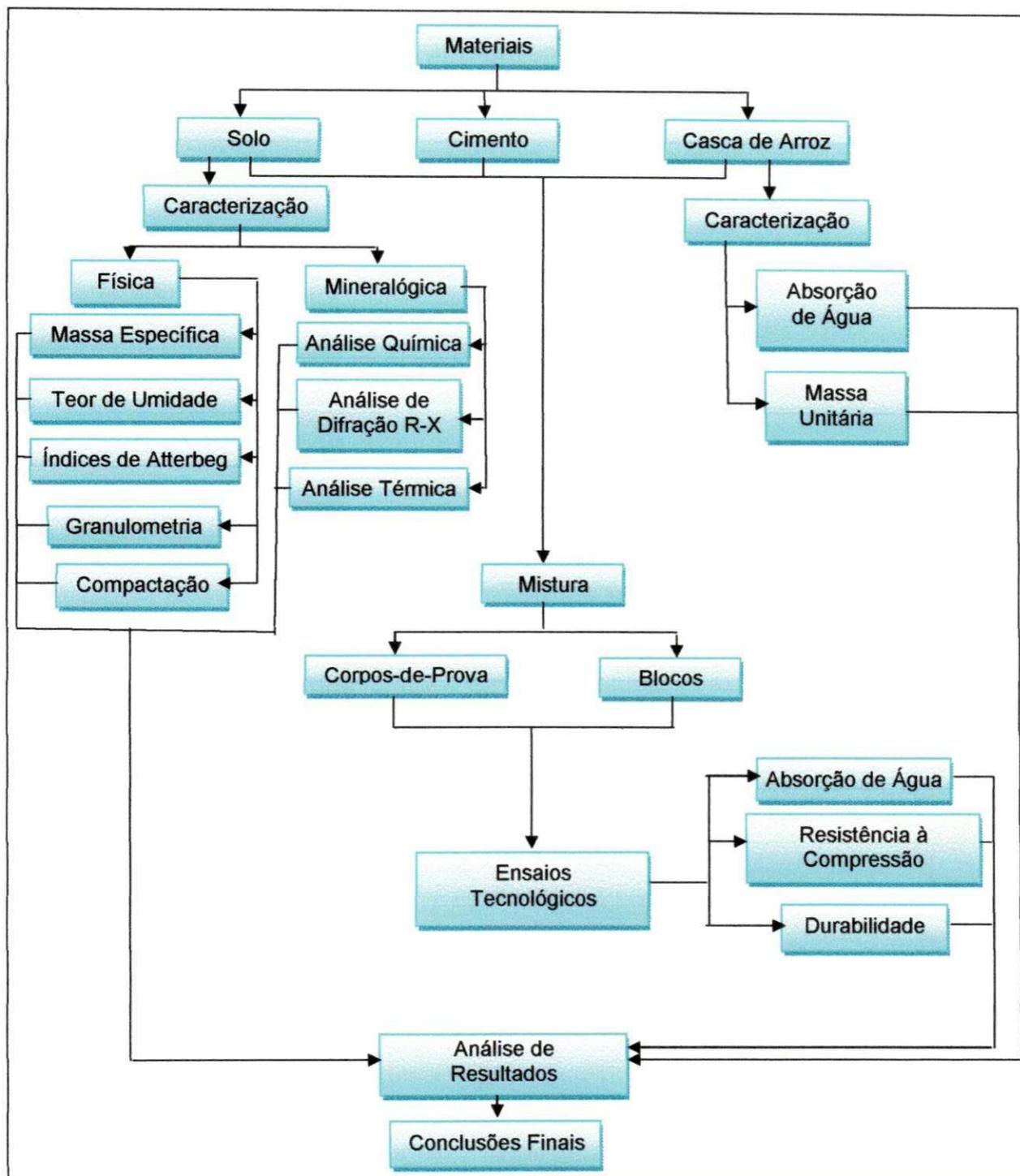


Figura 5.4 – Fluxograma das etapas da pesquisa

Os aspectos metodológicos da presente pesquisa foram desenvolvidos em três etapas.

Na primeira etapa foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica e mineralógica do solo e da casca de arroz.

Na segunda etapa foi definida a composição da mistura solo-cimento e casca de arroz para a moldagem dos corpos-de-prova.

Na terceira etapa foram realizados: a moldagem dos corpos-de-prova e ensaios de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade por ciclos de molhagem e secagem.

Na quarta etapa foram confeccionados os blocos convencionais e alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz e realizados os ensaios de absorção de água, resistência à compressão simples e durabilidade.

5.2.1. Primeira etapa – Caracterização físico-mecânica e mineralógica dos materiais.

5.2.1.1. Caracterização física da casca de arroz e do solo

O preparo da casca de arroz para os ensaios de caracterização foi feito da seguinte maneira: primeiramente foi seca em estufa com temperatura entre 105°C e 110°C, por período de 24 horas. Em seguida foram realizados os seguintes ensaios:

a) A absorção de água foi determinada segundo a norma NBR 13555 (ABNT, 1996), Obtendo-se a massa seca em estufa. Em seguida a casca de arroz foi pesada e imersa em água durante os períodos de 12 e 24 horas e depois, úmida, foi pesada novamente.

b) A massa unitária da casca de arroz na condição natural foi determinada com base a norma NBR 7251 (ABNT, 1982) (Agregado em estado solto: determinação da massa unitária).

Amostra do solo foi submetida a ensaios de caracterização, a saber:

a) Determinação da massa específica dos sólidos do solo, de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984);

b) Determinação do teor de umidade pelo método da estufa a temperatura entre 105 °C e 110 °C, durante 24 horas;

c) Análise granulométrica, por peneiramento, para se determinar a distribuição em tamanho das partículas do solo, de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984);

d) A determinação da distribuição granulométrica do solo feita através da técnica de difratometria a laser, um processo de medida óptica utilizando o método de dispersão de partículas em fase líquida, combinando a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho das partículas. O ensaio foi realizado pelo equipamento CILAS modelo 1064 LD localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais de Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEMa/CCT/UFCG) (Figura 5.6).



Figura 5.5 – Equipamento de difratometria a laser CILAS Modelo 1064.

e) Determinação do limite de liquidez, limite e índice de plasticidade do solo, de acordo com a norma NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984), respectivamente (Figura 5.6);

f) Ensaio de compactação normal de Proctor, para a determinação da massa específica aparente seca máxima do solo natural e da umidade ótima correspondente, de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

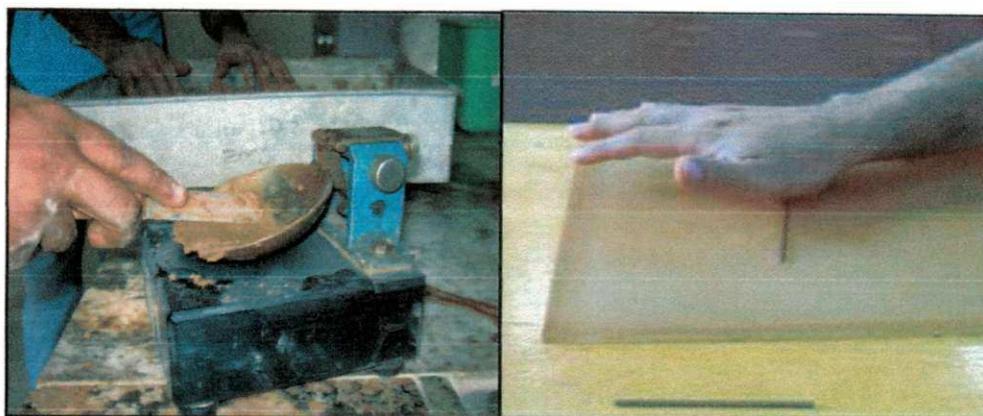


Figura 5.6 – Determinação dos índices físicos do solo

5.2.1.2. Caracterização mineralógica do solo

A Caracterização mineralógica do solo foi realizada através dos seguintes ensaios:

a) Análise química por fluorescência de raios X (EDX)

A análise química é uma das análises mais importante para se obter informações de dados fundamentais para a pesquisa científica, apesar de permitir apenas uma avaliação parcial da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas e tecnológicas.

Na análise química clássica normalmente se determina: perda ao fogo, matéria orgânica e os óxidos presentes no material em análise, como: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 .

As análises das amostras de solo foram realizadas no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEMa/CCT/UFCG), com espectrografia de energia dispersiva de raios X, em equipamento EDX 700 – marca Shimadzu (Figura 5.7).

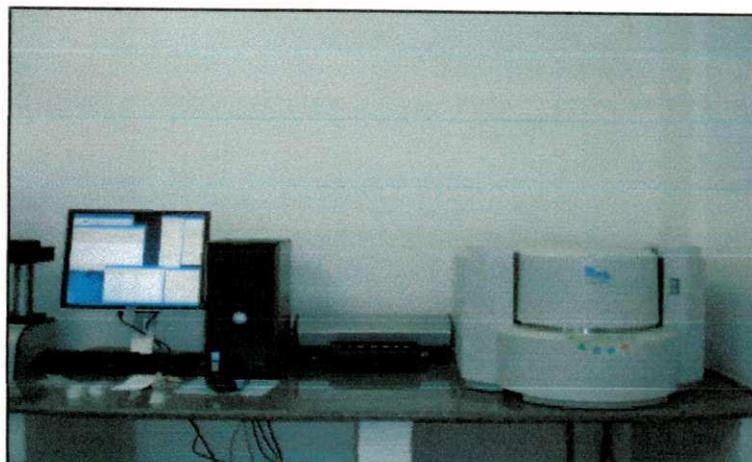


Figura 5.7 – Florescência de raios X – EDX-720

b) Difração de raios – X

A análise de difração de raios - X foi realizada com o solo, com a finalidade de identificar as suas propriedades mineralógicas, em difratômetro de raios – X, um equipamento modelo DRX-6000 de marca SHIMADZU (Figura 5.8), com radiação CuK α , tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, modo fixe time, com passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6 segundos, com ângulo de 2θ percorrido de 10°C a 60°C.

A análise de difração de raios – X foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEMa/CC/UFCG).

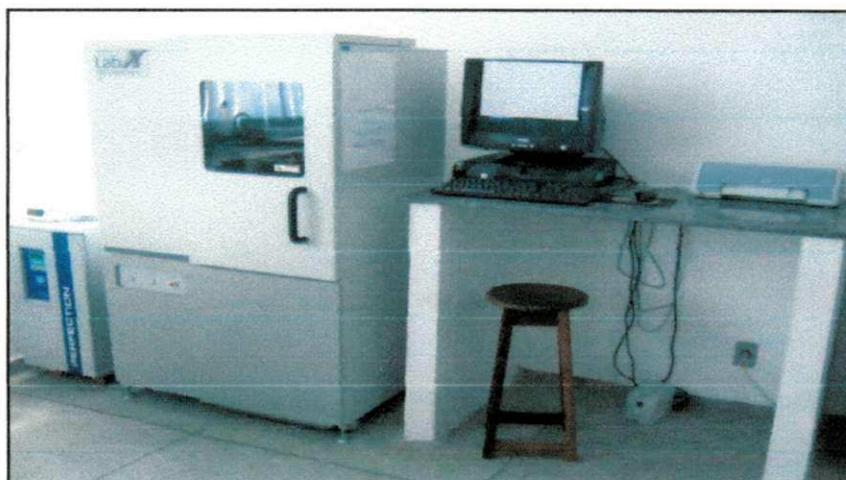


Figura 5.8 – Difratômetro de raios X – DRX-6000 SHIMADZU.

c) Análise térmica

A análise térmica diferencial (DTA) e análise termogravimétrica (TGA) foram realizadas em dois equipamentos (Figura 5.9), (a) um equipamento RB 3000 fabricado pela empresa BP Engenharia e (b) marca Shimadzu TA - 60h, ambos com razão de aquecimento $12,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, em atmosfera de nitrogênio, na temperatura máxima de 1000°C e o padrão utilizado na DTA foi óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado. Para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrerão transformações endotérmicas e exotérmicas e as perdas de massas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEMa/CCT/UFCG).

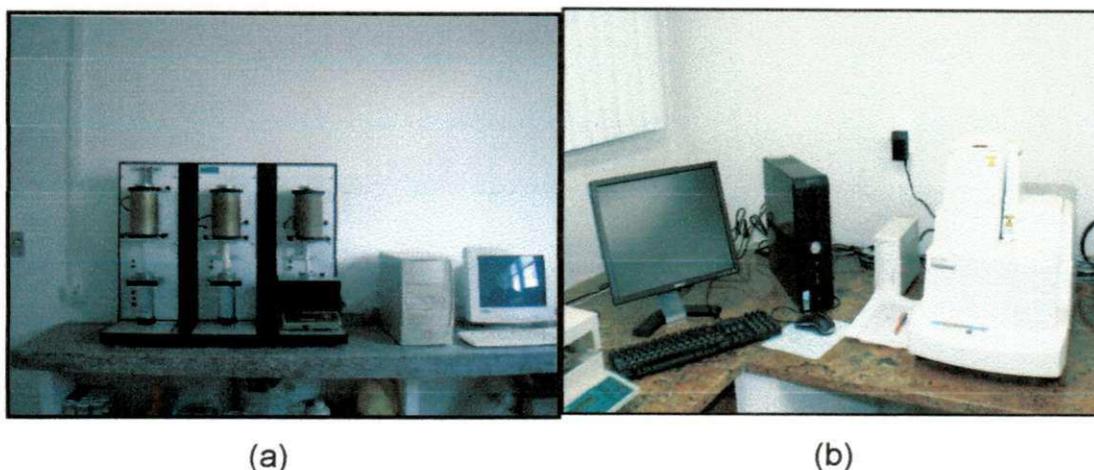


Figura 5.9 – (a) Equipamento RB 3000 e (b) Analisador térmico TA 60h.

5.2.2. Segunda etapa – Estudo das misturas de solo-cimento e casca de arroz

5.2.2.1. Definição da composição da mistura de solo-cimento e casca de arroz

Nos estudos para definição da composição da mistura de solo-cimento e casca de arroz, considerou-se o percentual em relação ao solo seco; em todos os casos a fração menor que 4,76 mm (100% passando na peneira ABNT nº 4).

O estudo das misturas de solo-cimento e casca de arroz foi dividido em dois grupos (A e B) de composições diferentes, onde o grupo A foi feito a substituição do cimento pela casca de arroz e o grupo B foi feita a substituição do solo pela casca de arroz.

a) Incorporação da casca de arroz em substituição ao cimento (Grupo A)

Com a finalidade de maximizar a adição da casca de arroz e diminuir o consumo do cimento nas misturas de solo-cimento e casca de arroz, estudou-se a dosagem em porcentagem em relação à massa do solo seco. Para a realização da pesquisa foram pré-definidos os tratamentos apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Estudo da mistura solo mais a combinação do cimento e casca de arroz (Grupo A).

Traços	Composições
T ₁	90% de solo + 10% de cimento + 0% de casca de arroz
T ₂	90% de solo + 8% de cimento + 2% de casca de arroz
T ₃	90% de solo + 6% de cimento + 4% de casca de arroz

A escolha da combinação de 10% de cimento e casca de arroz foi determinada em função dos autores Milani (2005), Ferreira (2003) e outros mais recomendarem os teores de 4 a 10% de cimento para a estabilização de solos arenosos e argilosos para confecção de componentes construtivos.

b) Incorporação da casca de arroz substituindo o solo (Grupo B).

A casca de arroz foi utilizada para a substituição parcial do solo, sendo adotadas, para estudo de dosagem, as combinações de solo e casca de arroz, as quais foram estabilizadas com 10% de teores de cimento (% em relação à massa seca da mistura solo-casca de arroz). As diferentes misturas de solo-cimento e casca de arroz foram submetidas ao ensaio de compactação de Proctor Normal para a determinação da massa específica aparente seca máxima (M_{max}) e umidade ótima (hot).

A Tabela 5.4 apresenta a composição da mistura de solo-cimento incorporando a casca de arroz em substituição ao solo.

Tabela 5.4 – Mistura cimento mais a combinação do solo e casca de arroz (Grupo B)

Traços	Composições
T ₄	10% de cimento + 90% de solo + 0% de casca de arroz
T ₅	10% de cimento + 88% de solo + 2% de casca de arroz
T ₆	10% de cimento + 86% de solo + 4% de casca de arroz

Para os ensaios, a mistura de solo-cimento e casca de arroz, foi inicialmente feito a mistura do solo com cimento, logo após foi adicionado à casca de arroz, misturando até atingir a homogeneização do material e em seguida a moldagem dos corpos (Figura 5.10).

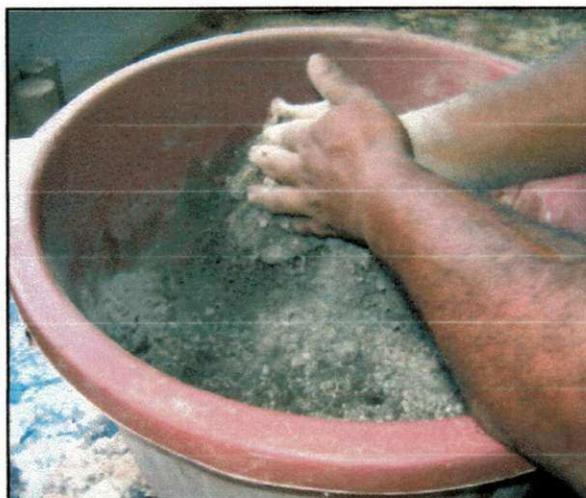


Figura 5.10 – Processo de homogeneização da mistura solo-cimento e casca de arroz.

5.2.2.2. Determinação do teor ótimo de água na mistura

Para a determinação do teor ótimo de umidade (hot) e da massa específica aparente seca máxima (g/Max) das diferentes misturas de solo-cimento e casca de arroz, foram realizados os ensaios de compactação Proctor Normal segundo a norma NBR 12023 (ABNT, 1992), conduzido com três

repetições. As amostras foram previamente secas ao ar até constância de umidade do material.

A Figura 5.11 – Mostra o processo de determinação do teor ótimo de água da mistura de solo-cimento e casca de arroz



Figura 5.11 – Determinação do teor ótimo de água na mistura de Solo-cimento e casca de arroz.

5.2.3. Terceira etapa – Confeção e caracterização físico-mecânica de corpos-de-prova das misturas de solo-cimento e casca de arroz

5.2.3.1. Moldagem e cura dos corpos-de-prova

No desenvolvimento do experimento foi utilizado o solo, o cimento Portland CP II – F – 32 e incorporado a casca de arroz, após a caracterização desses materiais foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, de acordo com as recomendações da norma NBR 12024 (ABNT, 1992). A mistura dos componentes foi feita manualmente de acordo com o estudo da dosagem e quantidade de água determinada nos ensaios de compactação do solo, até a obtenção de homogeneidade do material, que foi colocado em moldes metálicos, previamente untado com óleo mineral desmoldante. A compactação foi feita em três etapas com o auxílio de um soquete simples e uma regularização final da superfície efetuada com uma espátula (Figura 5.12). Após 24 horas foi efetuada a desmoldagem. Os corpos-de-prova foram curados em temperatura ambiente no Laboratório de Reciclagem de Resíduos Sólidos (ResidLab) do

Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (CCT/UFCG) conforme mostra a Figura 5.12.



Figura 5.12 – Processo de moldagem dos corpos-de-prova.



Figura 5.13 – Corpos-de-prova em regime de cura.

Após cura os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios tecnológicos de absorção de água, resistência à compressão simples e durabilidade. O estudo da durabilidade foi determinado através do envelhecimento acelerado, por seis ciclos de molhagem e secagem.

5.2.3.2. Ensaios tecnológicos

Os ensaios tecnológicos dos corpos-de-prova consistem na avaliação dos parâmetros de absorção de água, resistência à compressão simples e a durabilidade através do envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem, conforme determinam as normas da ABNT relacionadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Normas para os ensaios tecnológicos

Ensaios	Corpos-de-prova
Resistência à compressão simples	NBR 12025/92
Absorção de água	NBR 13555/96
Durabilidade por ciclos de molhagem e secagem	NBR 13554/96

a) Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova

A resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de mistura de solo-cimento e solo-cimento incorporado com casca de arroz foi realizada em um equipamento da marca SOLOTEST (Figura 5.14). A tensão de ruptura foi calculada dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova e os resultados obtidos foram expressos em MPa, conforme determina a norma NBR 12025 (ABNT, 1990), empregada para determinação a resistência à compressão simples.

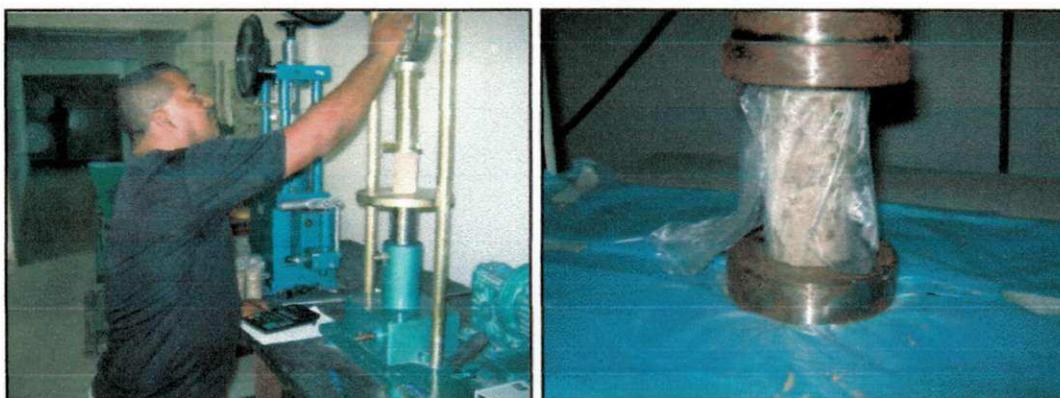


Figura 5.14 – Ensaios de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos.

A resistência à compressão simples média foi definida pela média de 5 (cinco) corpos-de-prova.

b) Ensaio de absorção dos corpos-de-prova

Os ensaios de absorção de água dos corpos-de-prova de obtida de 5 (cinco) repetições realizadas no final de cada período de cura.

Para a mistura de solo-cimento e solo-cimento e casca de arroz, os ensaios foram realizados para cada tempo de cura, obedecendo à norma NBR 13555 (ABNT, 1996).

Após o tempo de cura, os corpos-de-prova cilíndricos foram imersos totalmente em água, durante 24 horas, pesados antes e depois da imersão em água, anotando-se suas massas úmidas. Posteriormente foram secos em estufa com temperatura entre 105°C e 110°C (Figura 5.15) até a constância da massa, para determinação de suas massas secas.



Figura 5.15 – Ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova

Os valores individuais de absorção total de água foram obtidos pela seguinte Equação (5.1):

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} 100 \quad (5.1)$$

Em que:

M_1 – Massa do bloco seco em estufa, g;

M_2 – Massa do bloco saturado, g;

A – Absorção total de água, (%).

c) Ensaio de durabilidade dos corpos-de-prova

c.1) Procedimentos para os ensaios de durabilidade pelo método normatizado

Para a realização do ensaio de durabilidade pelo método normatizado foram moldados 5 (cinco) corpos-de-prova para cada composição, no total de 15 corpos-de-prova.

Após 7 (sete) dias da moldagem, deu-se início ao ensaio de degradação acelerada dos corpos-de-prova por seis ciclos de molhagem e secagem, conforme recomenda a NBR 13.554 (ABNT, 1996) e foi concluído aos 28 dias de idade.

Os corpos-de-prova foram numerados de 1 a 5 e, em seguida imersos em água durante 5 horas, depois foram colocados na estufa com temperatura de 72°C durante 42 horas e após uma hora de retirados da estufa, os corpos-de-prova foram medidos e pesados para determinação do volume e da massa (Figura 5.16), enquanto os corpos-de-prova de números 2 a 5 foram escovados, assim completando um ciclo de 48 horas (Tabela 5.6). Ao final do sexto ciclo foi determinada a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova escovados e não escovados, conforme determina a NBR 13554 (ABNT, 1996).



Figura 5.16 – Ensaio para determinar volume e massa dos corpos-de-prova

Tabela 5.6 - Ensaio de durabilidade pelo método normalizado por molhagem e secagem.

Ensaio de Durabilidade		
CPs	Ensaio	Determinações
1	Não escovado	Variação de volume
	Molhagem (imerso em água por 5 horas)	
	Secagem (estufa de 72 °C por 42 horas)	Perda de massa
2	Escovados	Perda de massa
3	Molhagem (imerso em água por 5 horas)	Resistência à compressão simples
4		
5	Secagem (estufa de 72 °C por 42 horas)	Absorção

CPs – corpos-de-prova.

Para calcular as variações de volume ocorridos no corpo-de-prova n° 1 entre o final da moldagem e os volumes obtidos após cada etapa e expressas em porcentagem do volume inicial utilizou-se a Equação (5.2).

$$V_{v,n} = \frac{(V_i - V_n)}{V_i} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Onde:

$V_{v,n}$ = variação de volume do corpo-de-prova n° 1 em cada etapa, em %.

V_i = volume inicial do corpo-de-prova n° 1 (determinado conforme 4), em cm^3 .

V_n = volume do corpo-de-prova n° 1 em cada etapa (cm^3).

Para calcular as variações de umidade ocorridas no corpo-de-prova n° 1 entre o final da moldagem e as umidades obtidas após cada etapa e expressas em porcentagem da umidade inicial utilizou-se a Equação (5.3).

$$V_{h,n} = \frac{h_i - h_n}{h_i} \cdot 100 \quad (5.3)$$

Onde;

$V_{h,n}$ = variação de umidade do corpo-de-prova n° 1 em cada etapa, em %.

h_i = umidade inicial do corpo-de-prova n° 1 (determinada conforme 1), em %.

h_n = umidade do corpo-de-prova n° 1 em cada etapa, em %.

Para cálculo da perda de massa dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5.

a) A quantidade relativa de água nos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5 após atingir massa constante é igual à de água retida no corpo-de-prova n° 1, foi calculada conforme a Equação (5.4).

$$A = \frac{M_{f(1)} - M_{i(1)}}{M_{i(1)}} \cdot 100 \quad (5.4)$$

Onde:

A = água retida no corpo-de-prova n° 1, em %.

$M_{f(1)}$ = massa seca final do corpo-de-prova n° 1 após atingir massa constante, em g.

$M_{i(1)}$ = massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem do corpo-de-prova n° 1, em g.

b) Para corrigir as massas secas dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5, descontando a água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio e que ficou retida no corpo-de-prova n° 1 a 110°C, utilizou-se a Equação (5.5).

$$M_{fc(2,3,4,5)} = \frac{M_{f(2,3,4,5)}}{A + 1,00} \quad (5.5)$$

Onde:

$M_{fc(2,3,4,5)}$ = massa seca final corrigida dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5, em g.

$M_{f(2,3,4,5)}$ = massa seca final dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5 após atingir massa constante, em g.

A = água retida no corpo-de-prova n° 1, em %.

c) Para calcular a perda de massa dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5 como porcentagem da massa seca inicial, utilizou-se a Equação (5.6)

$$P_{m(2,3,4,5)} = \frac{(M_{i(2,3,4,5)} - M_{fc(2,3,4,5)})}{M_{i(2,3,4,5)}} \cdot 100 \quad (5.6)$$

Onde:

$M_{i(2,3,4,5)}$ = massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5, em g.

$M_{fc(2,3,4,5)}$ = massa seca final corrigida dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5, em g.

$P_{m(2,3,4,5)}$ = perda de massa dos corpos-de-prova n° 2 ao n° 5, em %.

c.2) Composições tipo B: procedimentos para o ensaio de durabilidade sem escovação

O ensaio por molhagem e secagem sem escovação foi realizado na mistura de 10% de cimento mais a combinação de solo e casca de arroz, em três composições diferentes, substituindo o solo pela casca de arroz. Para cada composição foram moldados 105 corpos-de-prova, sendo 35 corpos-de-prova para cada idade. Os experimentos foram realizados nas idades de 28, 60 e 90 dias, no total foram confeccionados 305 corpos-de-prova (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 - Etapas de ensaios de degradação acelerada por molhagem e secagem

Etapas do ensaio de durabilidade												
Idades	28 dias				60 dias				90 dias			
Tempo	5 hs	42 hs			5 hs	42hs			5 hs	42 hs		
Ciclos	Molhagem	Secagem	RCS	Câmara Úmida	Molhagem	Secagem	RCS	Câmara Úmida	Molhagem	Secagem	RCS	Câmara Úmida
		-	-	-	105	-	-	-	70	-	-	-
0	-	-	5	100	-	-	5	65	-	-	5	30
1	30	30	5	70	30	30	5	35	30	30	5	0
2	25	25	5	70	25	25	5	35	25	25	5	0
3	20	20	5	70	20	20	5	35	20	20	5	0
4	15	15	5	70	15	15	5	35	15	15	5	0
5	10	10	5	70	10	10	5	35	10	10	5	0
6	5	5	5	70	5	5	5	35	5	5	5	0

RCS – Resistência à compressão simples.

Para a realização do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem pelo método modificado, fez-se a adaptação e modificação da norma NBR 13554 (ABNT, 1996) eliminando a etapa de escovação e utilizando o ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova ensaiados.

Após a moldagem dos corpos-de-prova, os mesmos ficaram durante 24 horas nos moldes. Após a desmoldagem os corpos-de-prova ficaram em regime de cura durante 28, 60 e 90 dias, em temperatura ambiente e molhados três vezes ao dia para manter sempre a umidade.

Decorrido os períodos de cura, 5 (cinco) corpos-de-prova de cada composição foram rompidos para determinar a resistência à compressão simples correspondente ao ciclo zero e aos demais corpos-de-prova que foram submetidos ao processo de molhagem e secagem em um período de 5 horas de molhagem, 42 horas secagem em estufa com temperatura constante de 72°C e uma hora de intervalo para reiniciar o ciclo seguinte. Sendo que no final de cada ciclo foram retirados 5 (cinco) corpos-de-prova para serem rompidos para determinar a resistência à compressão até o final do sexto ciclo. Este ensaio permitiu a determinação de perda de massa produzida por ciclos de molhamento e secagem de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

Os valores individuais de perda de massa de cada corpo-de-prova foram obtidos pela Equação 5.7.

$$P = \frac{M_i - M_f}{M_i} \cdot 100 \quad (5.7)$$

onde:

P = perda de massa (%);

M_i = massa do corpo-de-prova seco em estufa antes da aplicação dos ciclos de molhamento e secagem (g);

M_f = massa do corpo-de-prova seco em estufa após aplicação dos ciclos de molhamento e secagem (g).

Para interpretação dos resultados obtidos no ensaio de durabilidade, ao final de cada ciclo de molhamento e secagem, foi aplicado o ensaio mecânico de compressão simples. Assim, foram determinados os valores de

resistência à compressão simples para corpos-de-prova após os ciclos, sendo, então, utilizados como critérios de avaliação da durabilidade os seguintes parâmetros: resistência média à compressão simples, aos sete dias, deve ser igual ou superior a 1,0 MPa; variação de volume inferior a 1% e; perda de massa menor ou igual a 10%, conforme recomendações de Neves (1988) citado por MILANI (2008) e a norma NBR 13553 (ABNT, 1996).

5.2.4. Quarta Etapa - Confeção e Caracterização Físico-Mecânica de Blocos de Solo-Cimento e Casca de Arroz

5.2.4.1. Confeção de blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz

Os blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz foram moldados de acordo com a norma NBR 10834 (ABNT, 1994). A mistura dos materiais foi feita manualmente. Utilizou-se o teor de umidade ótima do ensaio de compactação de Proctor Normal, sendo a água adicionada aos poucos até se obter uniformidade de mistura para colocação na fôrma da prensa. Os blocos foram confeccionados com dimensões de 7x12,5x25 cm com a prensa manual, marca SAHARA – Modular (Figura 5.17).

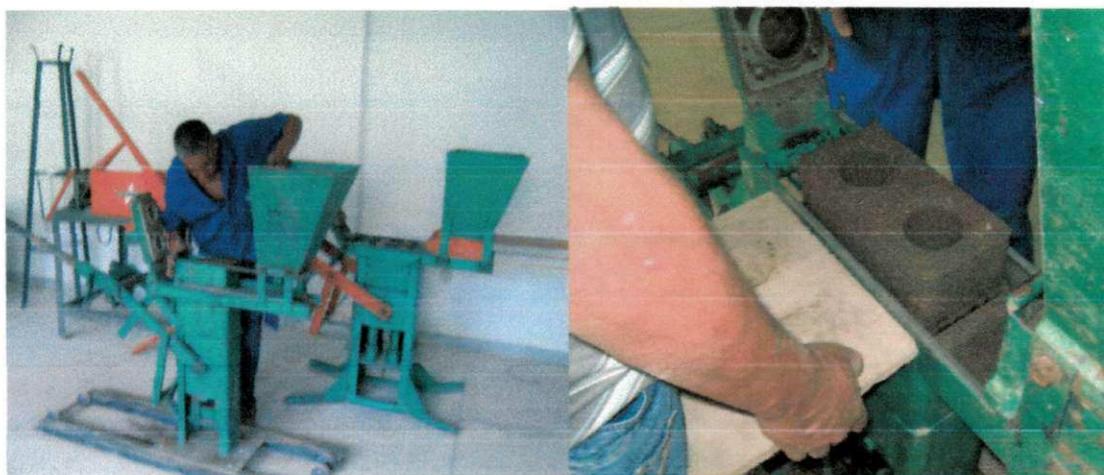


Figura 5.17 – Processo manual de moldagem e desmoldagem dos blocos.

Após a prensagem, os blocos foram colocados em um local protegido do sol e do vento, à temperatura ambiente, no Laboratório de Reciclagem de

Resíduos Sólidos (ResidLab), do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande (CCT/UFCG), para cura durante os períodos de 28, 60 e 90 dias (Figura 5.18) e em seguida foram serrados ao meio, medidos os seus comprimentos, alturas e larguras para o cálculo da área de cada um, em seguida foram submetidos aos ensaios de absorção d'água e durabilidade e resistência à compressão simples, conforme a NBR 10832 (ABNT, 1989).

A Figura 5.18 ilustra os blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz nos períodos de cura e serrados, respectivamente.

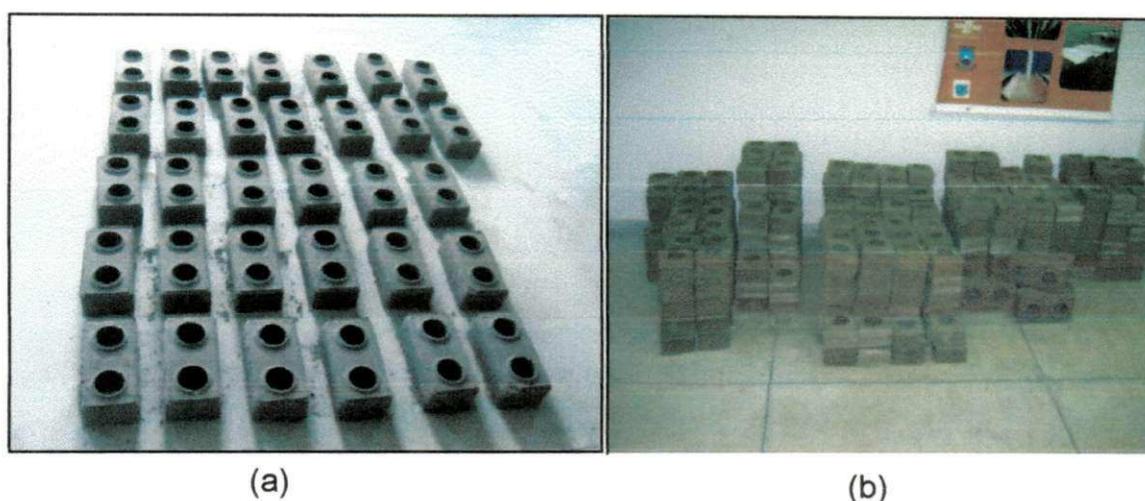


Figura 5.18 – Blocos de solo-cimento e casca de arroz (a) período de cura e (b) serrados para os ensaios tecnológicos.

a) Ensaio de absorção d'água

O ensaio de absorção d'água dos blocos foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 10836 (ABNT, 1994), que normaliza a determinação da absorção de água em bloco vazado de solo-cimento. Os blocos foram levados à estufa, entre 105°C e 110°C, até constância de peso, obtendo-se assim a massa do bloco seco em estufa, em gramas. Em seguida, os blocos foram imersos em água durante 24 horas, após este período, os blocos foram retirados, enxugados superficialmente e novamente pesados, anotando-se sua massa saturada, em gramas. Os valores individuais de absorção d'água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela Equação 5.2 e a absorção média foi determinada pela média aritmética de cinco repetições.

A Figura 5.19 mostra os blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz na estufa durante 24 horas e imersos em água no tanque durante 24 horas.



Figura 5.19 – Blocos de solo-cimento e casca de arroz imersos em água e na estufa com temperatura de (105°C e 110°C).

b) Ensaio de durabilidade

O ensaio de durabilidade foi realizado em 6 (seis) ciclos de molhagem e secagem, utilizando a resistência à compressão simples como indicador de degradação dos blocos; foi realizado com três traços de composições diferentes de solo-cimento e casca de arroz, substituindo parte do solo por casca de arroz. Para cada composição foram moldados 105 blocos, sendo 35 blocos para cada idade. Os experimentos foram realizados nas idades de 28, 60 e 90 dias, no total foram confeccionados 315 blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Confeção de blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

Traços	Períodos de cura (dias)			Totais de blocos
	28	60	90	
T ₁	35	35	35	105
T ₂	35	35	35	105
T ₃	35	35	35	105
				315

Para a realização dos ciclos de molhagem e secagem seguiu-se as especificações da norma NBR 13554 (ABNT, 1996), eliminando a etapa de escovação e utilizando o ensaio de resistência à compressão simples dos blocos ensaiados.

Após os períodos de cura (28, 60 e 90 dias), 5 (cinco) blocos de cada composição foram rompidos para determinar a resistência à compressão simples correspondente ao ciclo zero e os demais blocos foram submetidos ao processo de molhagem e secagem em um período de 5 horas de molhagem, 42 horas de secagem em estufa com temperatura constante de 72°C e uma hora de intervalo para reiniciar o ciclo seguinte. Sendo que no início de cada ciclo, 5 (cinco) blocos foram escolhidos e numerados para determinar a variação de volume, a perda de massa e serem rompidos no final do sexto ciclo para determinar a resistência à compressão.

Para interpretação dos resultados obtidos no ensaio de durabilidade, ao final de cada ciclo de molhamento e secagem, foi aplicado o ensaio mecânico de compressão simples. Assim, foram determinados os valores de resistência à compressão simples para os blocos, após os ciclos, sendo, então, utilizados como critérios de avaliação da durabilidade os seguintes parâmetros: resistência média maior ou igual a 2,0 MPa e individual superior a 1,7 MPa; variação de volume inferior a 1% e; perda de massa menor ou igual a 10%, conforme recomenda a norma NBR 13553 (ABNT, 1996).

A resistência à compressão simples foi determinada de acordo com as metodologias estabelecidas pela norma NBR 10836 (ABNT, 1994) que se refere à determinação da resistência à compressão simples de bloco vazado de solo-cimento e foram realizados em um equipamento da marca Shimadzu AG - IS 100 kN (Figura 5.20).

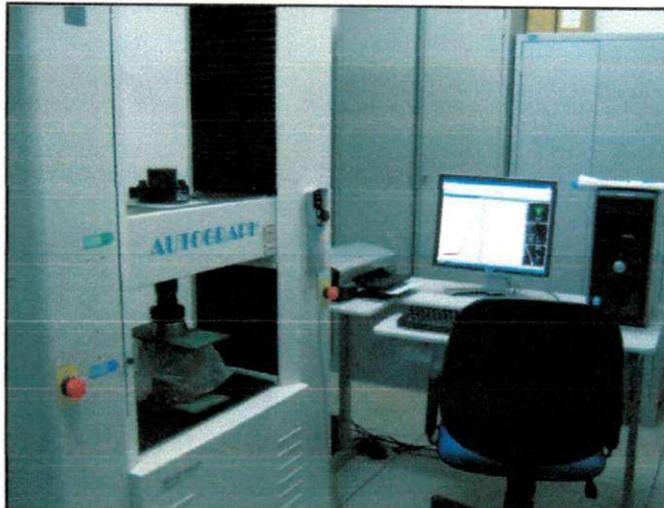


Figura 5.20 – Equipamento AG – IS 100 kN para ensaio de resistência à compressão simples.

A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada bloco, em seguida foi determinada a resistência média em MPa pelas cinco repetições.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização física e mineralógica dos materiais

6.1.1. Caracterização física da casca de arroz

Na Tabela 6.1 estão apresentados os resultados obtidos referentes aos ensaios de massa unitária e absorção de água do material casca de arroz em condição natural.

Tabela 6.1 – Caracterização da casca de arroz (CA).

Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	
Ensaio	Resultados
Média	0,14
Absorção de água (%)	
Tempo	Resultados
12 horas	109,5
24 horas	112,5

Analisando os valores apresentados na Tabela 6.1, verificou-se que a casca de arroz em condição solta e natural, a massa unitária apresentou um valor de 0,14 g/cm³, resultado semelhante aos encontrados por Martinez (2006) e Valenciano (2004), que foram de 0,14 g/cm³, próximo aos valores de 0,12 g/cm³ encontrado por SOUZA (2008) e 0,11 g/cm³ e obtido nos ensaios realizados por Milani (2005), assim, caracterizando a casca de arroz como um material leve e volumoso. Esta característica é decorrente da estrutura física da casca de arroz, por ser oca e côncava, com presença de vazios entre elas.

Com relação à absorção de água da casca de arroz, da Tabela 6.1 observa-se que os valores encontrados foram de 109,5% para 12 horas e de 112,5% para o período de 24 horas. Verificou-se também que a maior parte da água encontra-se aprisionada na superfície côncava da casca de arroz e não no seu interior.

Estes valores se aproximam ao encontrado por Souza (2008), que foi de 114%, em ensaio realizado no período de 24 horas.

6.1.2. Caracterização física do solo

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos ensaios para determinação da massa específica, limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, realizados com solo utilizado para a confecção de blocos de solo-cimento e casca de arroz.

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de limites de Atterberg do solo.

Ensaio	Resultados
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,81
Limite de liquidez (%)	26,5
Limite de plasticidade (%)	15,5
Índice de plasticidade (%)	11,0

6.1.2.1. Massa específica dos sólidos (grãos)

O resultado da massa específica dos grãos do solo determinado no ensaio de caracterização física, apresentado na Tabela 6.2, foi de $2,81 \text{ g}/\text{cm}^3$. Este valor obtido encontra-se dentro do esperado, cuja massa específica dos grãos está entre os valores apresentados pelos solos arenosos e argilosos, comparando com os valores obtidos nos ensaios realizados por Ferreira (2003) para solo arenoso e argiloso $2,650 \text{ g}/\text{cm}^3$ e $2,900 \text{ g}/\text{cm}^3$, respectivamente; Lopes (2002) encontrou $2,665 \text{ g}/\text{cm}^3$ para solo arenoso e; Milani (2005) $2,673 \text{ g}/\text{cm}^3$ e $3,063 \text{ g}/\text{cm}^3$ para solo arenoso e argiloso, respectivamente.

6.1.2.2. Limites de consistência do solo

Os índices físicos do solo estudado (Tabela 6.2) apresentam seguintes resultados: 26,5% para o limite de liquidez e 15,5% para o limite de plasticidade. O índice de plasticidade obtido foi de 11,0% corresponde à diferença numérica entre os valores dos limites de liquidez e de plasticidade. De acordo com as exigências da norma NBR 10832 (ABNT, 1989), o limite de liquidez deve ser $\leq 45\%$ e o índice de plasticidade $\leq 18\%$. Desta forma, os índices físicos do solo estudado mostram que o solo utilizado é adequado para a estabilização com cimento, a sua distribuição granulométrica facilita a interação entre solo, cimento e casca de arroz, a quantidade de finos (argila + silte) confere uma plasticidade à mistura.

Comparando estes resultados com os encontrados por MILANI (2005), que realizou estudos de índices físicos em solo arenoso e argiloso, caracterizou o solo arenoso como Não-Plástico (NP), e o solo argiloso com Limite de Liquidez foi de 43,6%, Limite de Plasticidade de 32,2% e Índice de Plasticidade de 11,4%, porém, solo arenoso foi considerado o mais adequado para confecção de tijolos e blocos por possuir limite de plasticidade menor ou igual a 18% e caracterizou o solo argiloso como um solo plástico, com elevado Índice de Plasticidade (IP). Conforme a autora, quanto maior o índice de plasticidade do solo maior será a dificuldade de estabilização do material, o material estará mais sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo, quando úmido, e de sua retração, quando seco.

Ferreira (2003) nos ensaios preliminares de caracterização aplicados ao solo considerou o solo arenoso com NP e o solo argiloso obteve os valores de 44,67% para Limite de Liquidez, 36,28% para o Limite de Plasticidade e 8,39% para o Índice de Plasticidade.

Ferreira (2003) estudou as características físicas do solo normal e do solo corrigido, obteve os seguintes resultados: para o solo normal encontrou 41,70% para o Limite de Liquidez, 28,00% para o Limite de Plasticidade e 13,70 para o Índice de Plasticidade. Quanto ao solo corrigido os valores foram de 21,10% para o Limite de Liquidez, 16,30% para o Limite de Plasticidade e 4,80% para o Índice de Plasticidade. A princípio, o autor observou que o solo mostrou-se impróprio para o uso em misturas de solo-cimento, por apresentar valores dos limites de consistência e de teor máximo de argila em desacordo com as recomendações da NBR 10832 (ABNT, 1989). Assim sendo, foi realizada correção granulométrica do solo, adicionando areia para adequá-lo às recomendações da ABNT.

Lopes (2002) nos ensaios de caracterização física do solo obteve os índices de 14,65% para limite de liquidez e 11,43% para limite de plasticidade. O solo estudado foi considerado como sendo de baixa plasticidade, característica de solos com alto teor de areia.

Considerando os valores apresentados por Milani (2005), Ferreira (2003) e Lopes (2002), os valores obtidos nesta pesquisa são inferiores aos

valores encontrados pelos autores no solo argiloso e superior ao solo arenoso, mas similares aos valores corridos por (FERREIRA, 2008).

Baseado no exposto e nos índices físicos encontrados nesta pesquisa, pode-se afirmar que o solo caracterizado está de acordo com os pré-requisitos exigidos pela ABCP (1985), conforme cita (FERREIRA, 2003).

6.1.2.3. Análise granulométrica

A Tabela 6.3 apresenta os resultados da análise granulométrica do solo estudado, realizada através do ensaio por peneiramento.

Tabela 6.3 – Análise granulométrica por peneiramento.

Peneiramento					
Peneiras		Material Retido			Que Passa da Amostra Total
Número	(mm)	Peso (g)	Amostra (%)	Acumulada (%)	(%)
10	2,0	12,52	1,27	1,27	98,73
16	1,2	2,73	2,77	4,04	95,96
30	0,6	5,88	5,96	10,00	90,00
40	0,42	4,79	4,85	14,85	85,15
200	0,074	28,00	28,35	43,20	56,80
Distribuição granulométrica (%)					
Ensaio				Resultados	
Pedregulho				1,27	
Areia grossa (0,60 – 2 mm)				8,73	
Areia média (0,20 – 0,60)				4,85	
Areia fina (0,06 – 0,20)				28,35	
Total				43,20	
Porcentagem que passa na peneira n° 200 (0,075 mm)				56,80	

Classificação de acordo com NBR 6502 (ABNT, 1995)

De acordo com a Tabela 6.3, os resultados do ensaio de granulometria obtidos por peneiramento do solo estudado apresentam grãos de pedregulhos (1,27%) e areia grossa (8,73%), os quais segundo SEGANTINI (2000) são extremamente benéficos, por se tratar de materiais inertes que possuem função de enchimento e favorecem a liberação de grande quantidade de cimento para aglomerar os grãos menores. Observa-se também a presença

de um elevado teor de fração fina (56,80% que passou pela malha de 0,075 mm) favorecendo uma resistência inicial propícia a sua compactação.

A curva da distribuição granulométrica realizada por difratometria a laser do solo está ilustrada na Figura 6.1.

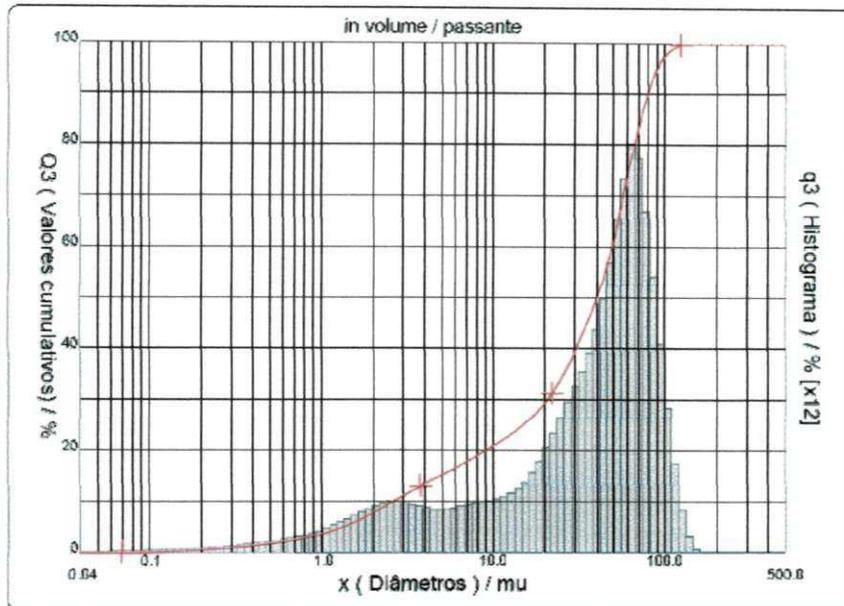


Figura 6.1 – A curva de distribuição granulométrica do solo por difratometria a laser (μm).

A Figura 6.1 apresenta a curva de granulometria do ensaio realizado a laser, na qual se pode observar as proporções acumuladas de argila, silte e areia, respectivamente 9,54% de argila (0,04 a 2,00 μm ou 0,00004 a 0,002 mm), 81,38% de silte (2,00 a 60,00 μm ou 0,002 a 0,060 mm) e 9,08% de areia (60,00 a 150 μm ou 0,060 a 0,150 mm)

Analisando a Figura 6.1, observa-se que a distribuição das partículas com D_{10} correspondente a 2,09 μm , D_{50} até 19,96 μm , D_{90} possui partículas acumuladas até 58,59 μm e diâmetro médio de 25,72 μm , conforme mostra a Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Distribuição do tamanho das partículas do solo

Distribuição em diâmetros (μm)	
Diâmetro	Tamanho
D ₁₀ (%)	2,09
D ₅₀ (%)	19,96
D ₉₀ (%)	58,59
Diâmetro médio (μm)	25,72
Distribuição granulométrica (%)	
Ensaio	Resultado
Fração de argila	9,54
Fração de silte	81,38
Fração de areia	9,08
Total	100

Os ensaios de difratometria a laser foram realizados com a quantidade de material que passou na malha 0,075 (peneira ABNT nº 200), no total de 56,80% do material. No ensaio de difratometria a laser o valor de 56,80% correspondeu a 100% do material, que obteve 9,54% de argila, 81,38% de silte e 9,08% de areia fina. Fazendo-se o rateio dentro da proporcionalidade do material de 56,80%, obteve-se os resultados de 5,42% de argila, 46,22% de silte e 5,16% de areia fina.

Na Tabela 6.5 estão apresentados os percentuais da distribuição granulométrica do solo obtidos através do processo de peneiramento e pela difratometria a laser do solo, de acordo com a norma NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 6.5 – Caracterização físico-mecânicas do solo estudado.

Distribuição granulométrica do solo	
Ensaio	Resultados (%)
Pedregulho	1,27
Areia grossa (0,60 – 2 mm)	8,73
Areia média (0,20 – 0,60)	4,85
Areia fina (0,06 – 0,20)	33,51
Silte (0,002 – 0,06 mm)	46,22
Argila (< 0,002 mm)	5,42
Porcentagem que passa na peneira nº 200 (0,075 mm)	56,80

Classificação de acordo com NBR 6502 (ABNT, 1995)

De acordo com os critérios apontados por MORAIS (2002), o resultado encontrado da areia foi de 47,09%, o qual está dentro do critério da MAC (1975) 40% a 70%; Silte 46,22%, a CEPED (1984) 10% a 55% e; argila 5,42% enquanto que ICPA (1973) 5% a 10%. Diante disso, pode se afirmar que os resultados de distribuição granulométrica do solo estudado são propícios para a sua utilização como material de construção.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 6.5 aos ensaios realizados por Milani e Freire (2006), em solo arenoso e solo argiloso, foram obtidos 72,1% de areia, 18,9% de silte e 8,9% de argila para o solo arenoso e 27,6% de areia, 35,4% de silte e 37,9% de argila. Os resultados mostram que o solo estudado neste trabalho apresenta resultados intermediários aos resultados obtidos nos solos arenosos e argilosos, com isso, trata-se de um solo específico para a sua aplicação na confecção de materiais de construção.

6.1.2.4. Classificação do solo

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de granulometria (Tabela 6.5) e limites de consistência (Tabela 6.2), o solo foi classificado como A₄, de acordo com o sistema da American Association of State highway and Transportation Officials – AASHTO (CARVALHO, 2004), em que o solo apresenta uma predominância de materiais finos (silte ou argila arenosa) e

mais de 35% passando na peneira de abertura de 0,075 milímetros, segundo LIMA (2010) esse tipo de solo é excelente para sub-base em pavimentos.

A Figura 6.2 mostra a classificação trilinear do solo, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 6.5, referente a areia, silte e argila.

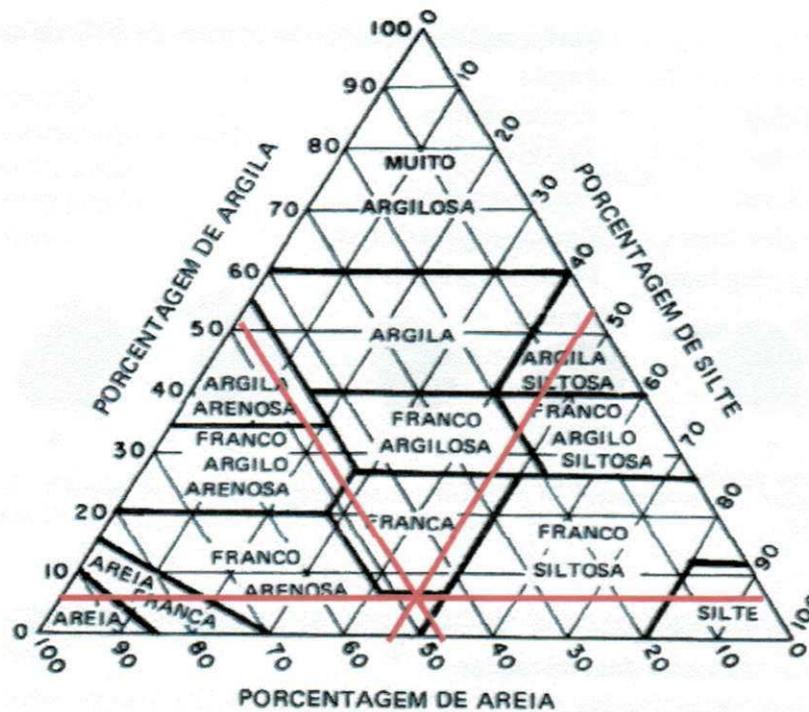


Figura 6.2 – Classificação trilinear do solo estudado

Fonte: Carvalho (2004).

Na Tabela 6.6. estão Apresentadas as classificações do solo de acordo como Sistema de Classificação desenvolvido pela AASHTO, sendo usado como um guia classificação de solos e misturas.

Tabela 6.6 – Classificação do solo

Classificação do solo	
Descrição visual do solo	Silte-Areno Argiloso
Bureau of Public Roads	Franco Arenoso
Classificação AASHTO	A ₄
Classificação USAD	Franco Arenoso

De acordo com os resultados dos ensaios de caracterização física obtidos, o solo em estudo está dentro do padrão exigido pela ABCP (1985) citado por FERREIRA (2003).

A partir das propriedades físico-mecânicas apresentadas pelos solos nos ensaios e de acordo com o sistema da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), Milani (2005) e Ferreira (2003) classificaram o solo arenoso como A_{2-4} , areia siltosa e franco arenoso; e o solo argiloso como A_{7-5} , silte areno-argiloso e franco argiloso.

6.1.2.5. Ensaio de compactação do solo

Os valores da massa específica seca aparente máxima e da umidade ótima de compactação, obtidos pelos ensaios de compactação de Proctor Normal, encontram-se na Tabela 6.7. O valor do teor de umidade encontrado foi de 14,86% e massa específica aparente seca máxima $17,59 \text{ kN/m}^3$, no comportamento da curva de Compactação Proctor Normal do Solo. Os valores obtidos encontram-se dentro dos valores esperados, são aproximados aos encontrados por Milani (2005) e Ferreira (2003), os quais trabalharam, em suas pesquisas, com solos de características similares.

Nos ensaios de compactação de solo, Milani (2005) obteve os valores de massa específica aparente seca máxima na ordem de $18,47 \text{ kN/m}^3$ para o solo arenoso e de $15,72 \text{ kN/m}^3$ para o solo argiloso e a umidade ótima de compactação de 13,50% para o solo arenoso e 26,50% para o solo argiloso, diante desses resultados, afirma que o solo argiloso, por apresentar maior quantidade de finos, apresentou um valor de umidade ótima superior ao valor encontrado para o solo arenoso.

Lopes (2002) afirmou que os parâmetros que mais afetam os resultados de compactação do solo são a energia de compactação, o teor de umidade e a textura do solo. À medida que se aumenta a energia de compactação, aumenta a massa específica aparente seca e reduz-se a umidade ótima. Geralmente, com aumento da energia de compactação, as curvas obtidas pelo ensaio de Proctor são mais pronunciadas, enquanto que são mais achatadas quando a energia de compactação é menor. Um baixo teor de umidade dificulta a compactação do solo, obtendo-se baixos valores de

massa específica aparente e alto volume de vazios. O aumento do teor de umidade lubrifica o solo e o torna mais trabalhável, proporcionando, dessa forma, valores mais altos de massa específica e reduzindo o volume de vazios, até atingir a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótima.

Tabela 6.7 – Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal do solo

Compactação Proctor Normal	
Massa específica aparente seca	
Massa específica aparente seca máxima (kN/m ³)	17,59
Umidade ótima (%)	14,86

Na Tabela 6.7, o ponto de inflexão da curva (14,86%) que determina o teor de umidade ótimo (h_{ot}) que o solo compactado com a energia de ensaio, nesse teor de umidade, apresenta-se a massa específica aparente seca máxima (17,59 KN/cm³), valor que se aproxima dos valores encontrados por MILANI (2005), 18,47 KN/cm³ em solo arenoso e 15,72 KN/cm³ em solo argiloso.

Os valores do resultado do ensaio de determinação da densidade do solo seco estão representados na Figura 6.3.

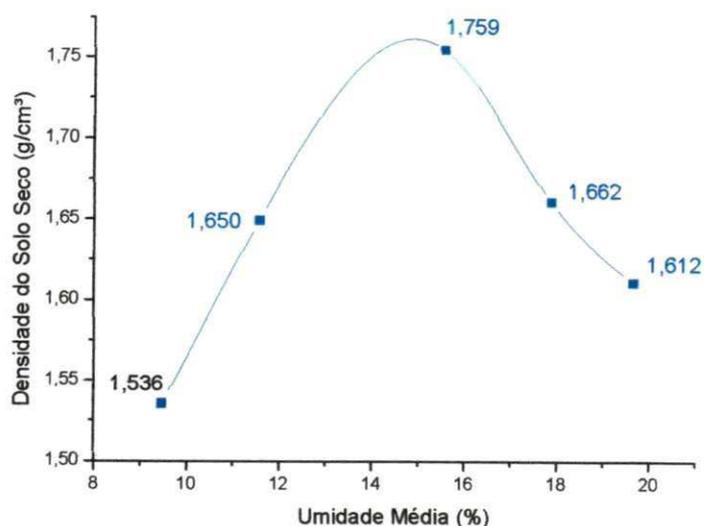


Figura 6.3 - Densidade do solo seco

6.1.2.6. Caracterização mineralógica do solo

a) Análise química

A Tabela 6.8 apresenta a composição química do solo utilizado nos experimentos deste trabalho, verificada por meio de análise de fluorescência de raios X. Observa-se que o solo é constituído por vários materiais cristalinos, basicamente silicatos e óxido de alumínio e ferro.

Tabela 6.8 – Composição química por fluorescência de raios X do solo estudado.

Análise química do solo	
Composição mineralógica	Resultados (%)
Perda ao fogo	9,20
SiO ₂	51,63
Al ₂ O ₃	22,01
Fe ₂ O ₃	6,88
K ₂ O	3,39
CaO	2,78
MgO	2,21
TiO ₂	1,04
Outros óxidos	0,86
Total	100,00

A Tabela 6.8 mostra os percentuais referentes à composição química do solo obtidos através de fluorescência de raios X, 51,63% de silicatos (SiO_2), indica a presença de argilominerais tais como: caulinita, illita e quartzo livre; 22,01% de óxido de alumínio (Al_2O_3) apresenta-se quase totalmente formando argilominerais e 6,88% de óxido de ferro (Fe_2O_3), no total de 80,52%. A sílica livre, o feldspato e o alumínio estão presentes na fração de argila. O quartzo (SiO_2) representa a fração de areia e silte. O óxido de ferro (FeO) dá a coloração escura do solo. Os demais óxidos que se apresentam na composição química do solo, o K_2O , o CaO e MgO correspondem respectivamente a mica, o carbonato de cálcio e o óxido de magnésio presentes nas frações de silte e argila.

b) Difração de raios X

O ensaio de difração de raios X é uma análise instrumental que determina qualitativamente a presença ou não de fase cristalina no material, ou seja, estuda a composição mineralógica. Materiais cristalinos ou com algum caráter cristalino são identificados pela presença de picos no difratograma.

Esse ensaio consiste na utilização de um aparelho (difratômetro) onde há incidência de raios X sobre a amostra do solo. Através desse processo são obtidos os registros gráficos (difratogramas) onde são apresentados os picos que representam as distâncias interplanares entre as bases formadas pelos planos cristalinos do mineral. A figura 6.4 mostra os resultados de difração de raios X do solo.

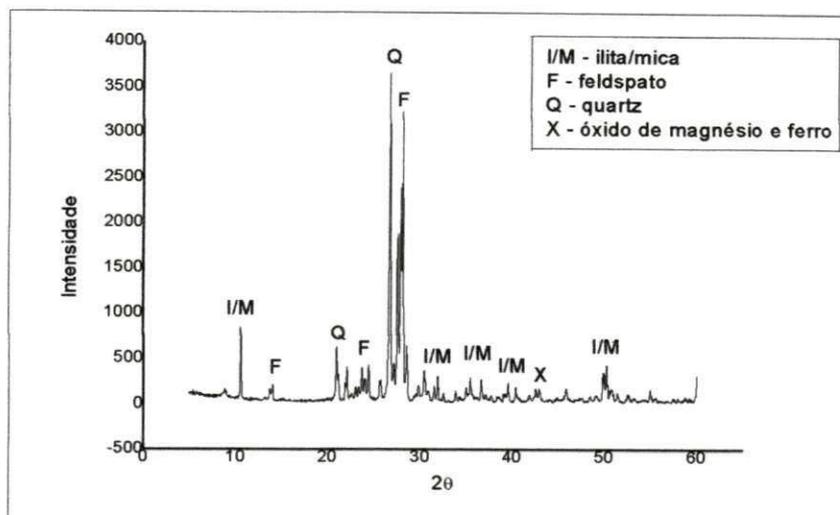


Figura 6.4 – Difratoograma de raios X do solo.

Analisando o difratograma da Figura 6.4, verifica-se que o solo estudado nesta pesquisa apresenta as seguintes fases mineralógicas:

O quartzo (SiO_2) é dominante na fração de areia e em frações mais grosseiras de silte.

Silicatos primários como o feldspato (albita e sanidina) e mica estão presentes no silte e em menores quantidades na fração de argila.

Minerais secundários, a solução sólida de óxidos composto de ferro (FeO) e óxido composto de magnésio, o espinélio (MgO) são predominantes na fração silte de menor diâmetro e na fração argila.

O óxido de ferro (FeO) é um composto químico inorgânico, apresentando-se como um sólido em forma de pó preto.

Também, observa-se a presença da illita e da caulinita na massa da argila.

c) Análises térmicas do solo

Na Figura 6.5, as curvas de Análise Térmica Diferencial (DTA) e Análise Termogravimétrica (TGA) para o solo utilizado na confecção de blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

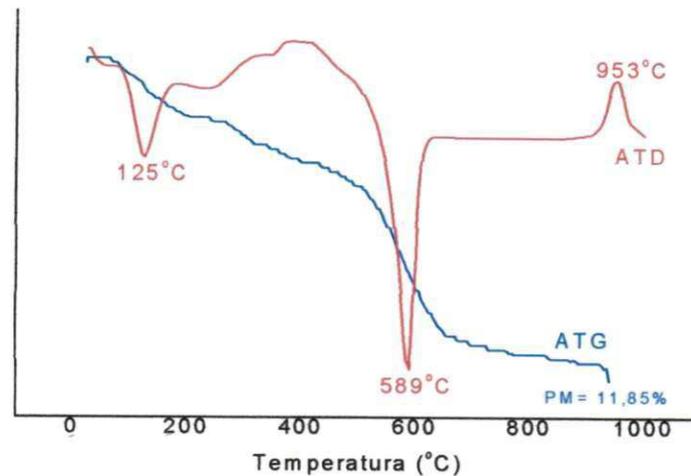


Figura 6.5 – Curvas de análise térmica diferencial (DTA) e análise termogravimétrica (TGA) do solo.

Observando as curvas da Figura 6.5 verifica-se que, na curva de análise térmica diferencial (DTA), o solo apresentou um pico endotérmico na temperatura de 125°C, caracterizado pela perda de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 200°C e 480°C, caracterizado pela oxidação de matéria orgânica; observa-se um pico endotérmico na temperatura de 589°C caracterizando perda de hidroxila e; um pico exotérmico a 953°C que corresponde à nucleação de mulita. Quanto à curva de análise termogravimétrica (TGA), observa-se uma perda de massa total de 11,85%, correspondente a perda de água, matéria orgânica e hidroxila.

6.2. Estudo da dosagem das misturas de solo-cimento e casca de arroz e confecção de corpos-de-prova

6.2.1. Comportamento mecânico dos corpos-de-prova confeccionados com solo mais a com combinação de 10% de cimento e casca de arroz.

Os valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com solo-cimento incorporados com casca de arroz, substituindo parte do cimento, estão representados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento e casca de arroz.

Traços	Absorção de água (%)		Resistência à compressão simples (MPa)		
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	Ganho de RCS (%)
Traço 1 (T ₁) - 90% de solo +10% da combinação (100% de cimento + 0% de casca de arroz)	18,64	18,27	1,87	2,16	15,51
Traço 2 (T ₂) - 90% de solo +10% da combinação (80% de cimento + 20% de casca de arroz)	19,47	19,18	0,90	1,59	76,66
Traço 3 (T ₃) - 90% de solo +10% da combinação (60% de cimento + 40% de casca de arroz)	21,53	21,17	0,43	0,83	93,02

Analisando os resultados da Tabela 6.9, observou-se que o aumento do teor de casca de arroz incorporado ao solo-cimento reduziu a resistência à compressão simples. Esse comportamento segundo Walker (1995) citado por Ferreira e Oliveira (2007) pode ser explicado principalmente pelo desenvolvimento de pressão de água nos poros e à liquefação dos minerais de argila não estabilizados na matriz compactada.

Na Tabela 6.9, observou-se que o desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos foi sempre maior aos 28 dias em relação aos 7 (sete) dias de cura, sendo que os valores de resistência à compressão simples tiveram um aumento significativo quanto aos valores ganhos de resistência à compressão simples em relação aos ensaios realizados nos traços T₁, T₂ e T₃, respectivamente, 15,51%, 76,66% e 93,02%. Esse aumento de resistência à compressão simples ocorrido nos traços de solo-cimento incorporados com casca de arroz indica a formação de compostos cimentante ao decorrer do tempo, que melhoram as propriedades mecânicas dos materiais (MILANI, 2005).

Sendo que os solos finos o mecanismo de estabilização do solo 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 (MILANI, 2008).

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.

Observando a Figura 6.6, os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão simples, os valores encontrados nos traço T₂ e T₃, aos 28 dias, apresentaram resultados não satisfatórios, conforme determina a norma NBR 10834 (ABNT, 1994), que define resistência à compressão simples igual ou superior a 2,0 MPa para blocos de solo-cimento.

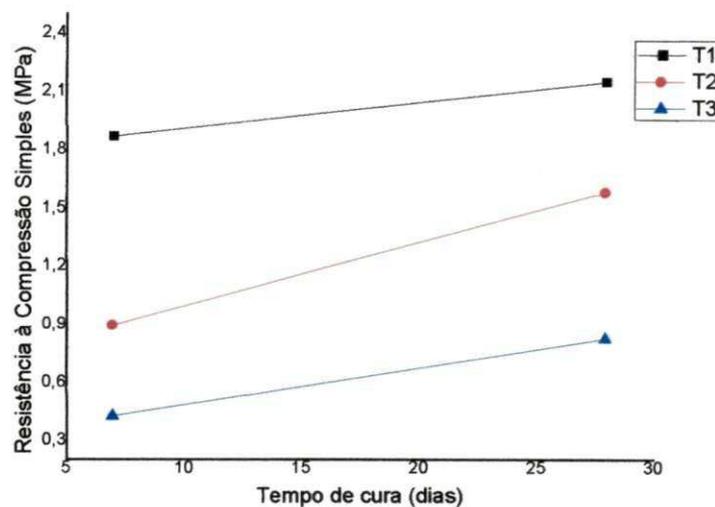


Figura 6.6 – Resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova cilíndricos nos períodos de 7 e 28 dias.

Comparando os resultados de resistência à compressão simples do material de solo-cimento e casca de arroz obtidos nos experimentos em corpos-de-prova cilíndricos, observou-se que os valores estão na faixa intermediária entre os valores encontrados por Ferreira (2003) e Milani (2005) em solos arenosos e solos argilosos. Sendo que os valores encontrados por Ferreira (2003), em solos adicionados 10% de cimento Portland, a resistência à compressão simples, no solo arenoso obteve 2,09 MPa aos 7 (sete) dias, 2,74 MPa aos 28 dias e 4,50 MPa aos 56 dias e no argiloso foram obtidos aos 7 dias 0,67 MPa, aos 28 dias 1,07 MPa e aos 56 dias 1,10 MPa. Milani (2005) adicionou 10% de cimento em solo arenoso e solo argiloso, em 7 (sete) dias de cura, obteve 2,35 MPa e 0,65 MPa para solo arenoso e solo argiloso respectivamente; para a mistura de 90% de solo mais 10% da combinação

(cimento 80% e casca de arroz 20%) encontrou 1,69 MPa para solo arenoso e 0,43 MPa para solo argiloso; para mistura de 90% de solo mais a combinação de 10% (cimento 60% e casca de arroz 40%), encontrou o valor de 0,59 MPa para solo arenoso e 0,37 MPa para solo argiloso.

A Figura 6.7 ilustra as rupturas apresentadas nos corpos-de-prova após serem submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples.

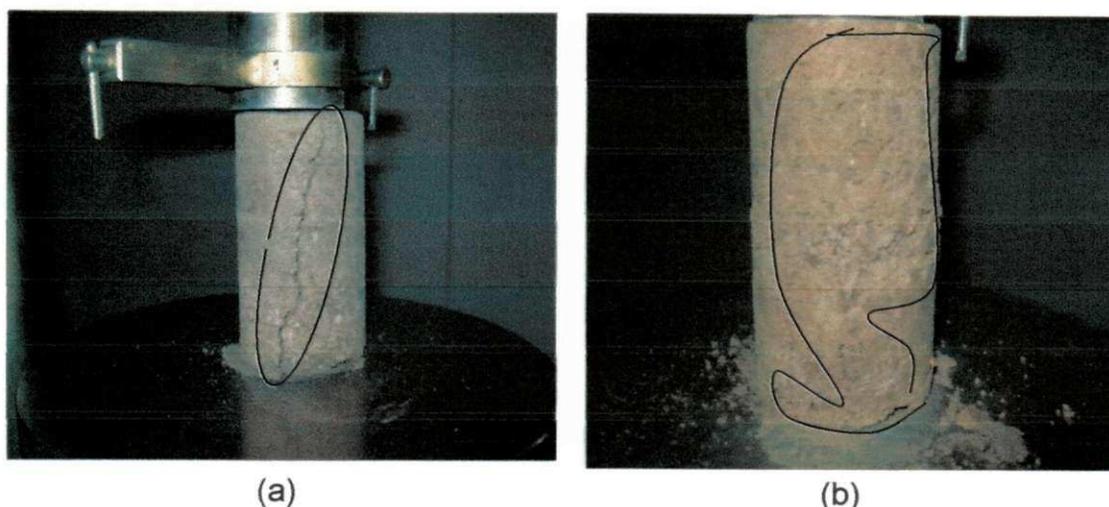


Figura 6.7 – Após ensaio de resistência à compressão simples: (a) corpo-de-prova convencional de solo-cimento e (b) corpo-de-prova alternativo de solo-cimento e casca de arroz

Analisando a Figura 6.7, observou-se que durante a execução dos ensaios de resistência à compressão simples, os corpos-de-prova alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, na sua composição, sofreram maiores deformações. Esse fato segundo Milani (2005) é justificado devido a casca de arroz ter conferido ao material de solo-cimento ductibilidade, por atuar como preenchimento e possuir a capacidade de absorver energia.

6.2.2. Resultados dos ensaios de absorção de água

6.2.2.1. Corpos-de-prova confeccionados com solo e a combinação de 10% de cimento e casca de arroz.

Avaliando os valores de absorção de água dos corpos-de-prova apresentados na Tabela 6.8, comparando os valores obtidos aos 7 (sete) dias de cura com valores obtidos aos 28 dias de cura, verificou-se uma redução no

percentual de absorção de água em todos os traços, em consequência do tempo de cura e em função da redução do tamanho de poros capilares. De acordo com Oliveira (2004) esse comportamento está coerente, porque a tendência natural do processo de hidratação é decorrente do aumento do tempo de cura em que as partículas de cimento Portland preenchem os poros e reduz os vazios que repercutem na redução da absorção de água.

Figura 6.8 ilustra os valores de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com diferentes misturas de solo-cimento incorporados com casca de arroz nos períodos de cura de 7 (sete) dias e 28 dias.

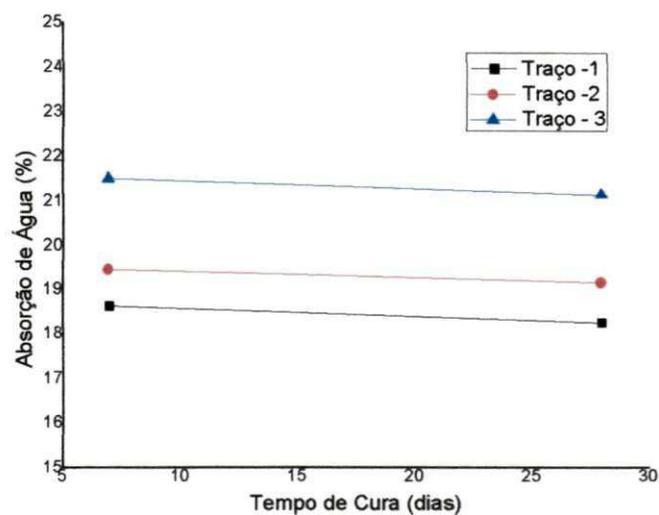


Figura 6.8 – Absorção de água dos corpos-de-prova de cada tratamento, em 7 e 28 dias.

Analisando os valores de absorção de água obtidos nos ensaios com corpos-de-prova, observa-se que os maiores valores foram alcançados nas composições com menores percentuais de cimento e maiores percentuais de casca de arroz, enquanto que os maiores valores foram registrados pelos corpos-de-prova com maiores percentuais de casca de arroz. Esse fato ocorre em consequência do aumento na porosidade do material, fato observado por Milani (2005), em que os valores de absorção de água tendem a aumentar conforme o acréscimo da quantidade de casca de arroz incorporado a mistura, o mesmo proporcionando um aumento na porosidade do material.

Comparando os valores de absorção de água dos corpos-de-prova de solo-cimento aos valores encontrados por Ferreira (2003), em solos adicionados 10% de cimento Portland, a absorção de água em ensaios realizados aos 7 (sete) dias, o solo arenoso apresentou 11% e o solo argiloso 27,80%.

De acordo com os parâmetros determinados pela norma NBR 13553 (ABNT, 1996), a absorção de água deve ser igual ou menor que 20%, os traços T₁ e T₂ estão dentro desse parâmetro, por apresentar aos 28 dias de cura, respectivamente 18,27% e 19,18%, já o traço T₃ apresentou 21,17%, ficando fora dos parâmetros determinados pelas normas da ABNT.

6.2.2.2. Corpos-de-prova confeccionados com solo-cimento e casca de arroz substituindo percentuais do solo.

A Tabela 6.10 apresenta os resultados de absorção de água dos corpos-de-prova confeccionados com solo-cimento e casca de arroz para o período de cura de 28, 60 e 90 dias.

Tabela 6.10 – Absorção de água dos corpos-de-prova incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Traços	Absorção de água (%)			
	28 dias	60 dias	90 dias	Índices de variação de 28 a 90 dias
Traço 4 (T ₄) – 90% de solo +10% de cimento + 0% de casca de arroz.	17,38	16,94	15,41	11,33
Traço 5 (T ₅) - 88% de solo +10% de cimento + 2% de casca de arroz.	17,79	17,34	16,79	5,79
Traço 6 (T ₆) - 86% de solo +10% de cimento + 4% de casca de arroz.	18,84	18,12	17,82	5,41

Analisando os resultados dos ensaios de absorção de água apresentado na Tabela 6.10, verifica-se que houve um decréscimo nos valores em função do tempo, sendo que os corpos-de-prova cilíndricos alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz apresentaram menor índice de variação de absorção de água, enquanto que os corpos-de-prova

convencionais sem adição de casca de arroz apresentaram maior índice. Isso ocorreu devido os poros capilares sofrerem reduções no seu tamanho e com isso ocorreu redução nos valores de absorção de água a cada período de cura.

Na Tabela 6.10 e na Figura 6.9, pode-se observar que, quanto maior o percentual de teor de casca de arroz utilizado na confecção dos corpos-de-prova, maior foi a absorção de água.

O menor valor de absorção de água foi observado no traço T₄ (solo-cimento) com o valor de 15,41% aos 90 dias de cura, fato ocorrido, devido a ausência do resíduo casca de arroz. Os valores mais elevados ocorreram no traço T₆ com maior quantidade de casca de arroz adicionada ao solo-cimento (4%), apresentando os valores aos 28, 60 e 90 dias, de 18,84%, 18,12 e 17,82%, respectivamente. Os valores de absorção de água tenderam a aumentar conforme o acréscimo da quantidade de casca de arroz incorporada à mistura de solo-cimento, pois a mesma proporcionou aumentos na porosidade do material. Milani (2005) em estudo realizado com mistura de solo-cimento e casca de arroz observou que quanto menor a massa específica seca, maior será a capacidade de absorção de água. Esta relação pode ser explicada pela falta de interação entre o sistema solo-cimento-casca de arroz, mostrando que maiores volumes de vazios estão incorporados ao sistema quanto maior for a adição da casca de arroz.

A Figura 6.9, ilustra os resultados de absorção de água encontrados nos ensaios realizados com os corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz, referente aos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

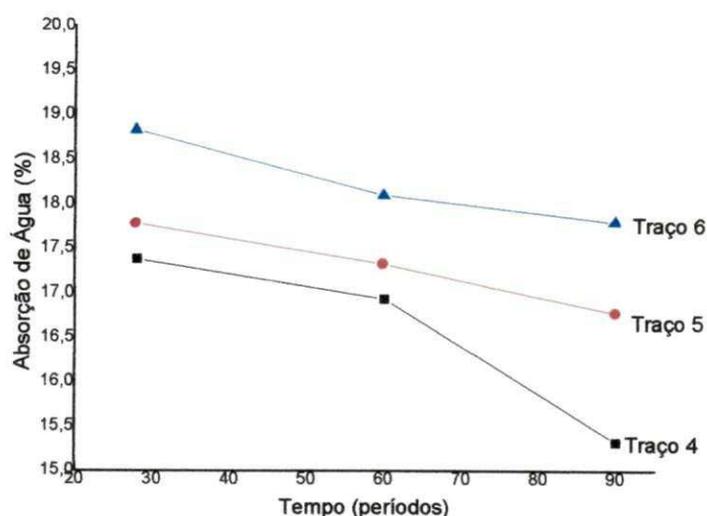


Figura 6.9 – Absorção de água para os corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz

6.2.2.3. Blocos de solo-cimento e casca de arroz.

A Tabela 6.11 apresenta os resultados de absorção de água dos blocos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz em função dos períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Tabela 6.11 – Capacidade de absorção de água dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, aos 28, 60 e 90 dias.

Traços	Absorção de água (%)		
	28 dias	60 dias	90 dias
	%%	%%	%%
Traço 1 (T ₁)	12,71	11,75	10,98
Traço 2 (T ₂)	14,02	13,92	12,85
Traço 3 (T ₃)	16,27	15,58	14,66

Analisando os resultados de absorção de água obtidos nos ensaios realizados com blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, ao longo dos períodos de cura, observou-se decréscimos em relação ao tempo de cura e ao aumento de resistência à compressão simples.

Conforme mostra a Tabela 6.11, o traço T₁ apresentou os menores valores médios de absorção de água, esses resultados é devido à ausência de

casca de arroz na mistura. Os valores médios mais altos foram apresentados pelo traço T₃, na mistura de 10% de cimento mais a combinação de 90% (86% de solo e 4% de casca de arroz), esse comportamento deve está relacionado à maior porosidade dos blocos alternativos incorporados com casca de arroz, devido à presença de vazios no material.

Em termos de absorção de água, comparando os resultados aos valores encontrados nos ensaios realizados por Ferreira (2003) em tijolos de solo-cimento confeccionados a partir da mistura de solo arenoso com adição de 10% de cimento, obteve um valor médio de 13,53% em 7 (sete) dias de idade; enquanto que na mistura de solo argiloso com 10% de cimento o autor encontrou 25,21% de absorção de água. Assim sendo, os valores médios de absorção de água apresentados pelas diferentes misturas de solo-cimento incorporado com casca de arroz nestes ensaios estão relativamente dentro do padrão encontrado por esse autor e pelos critérios adotados pela norma NBR 10834 (ABNT, 1994) que determina a média de absorção de água para blocos vazados de solo-cimento sem função estrutural igual ou inferior a 20% e que a absorção de água individual seja igual ou inferior a 22%.

Os blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz nos ensaios de absorção de água apresentaram resultados inferiores aos valores encontrados nos corpos-de-prova com as mesmas combinações de cimento e casca de arroz. Segundo Milani (2008), os corpos-de-prova de modo geral apresentam-se mais densos que os tijolos e conseqüentemente com menos vazios internos, o que pode levar a diminuição de absorção de água, pois há menos vazios para serem preenchidos.

A Figura 6.10 apresenta os resultados de absorção de água dos Blocos convencionais e alternativos.

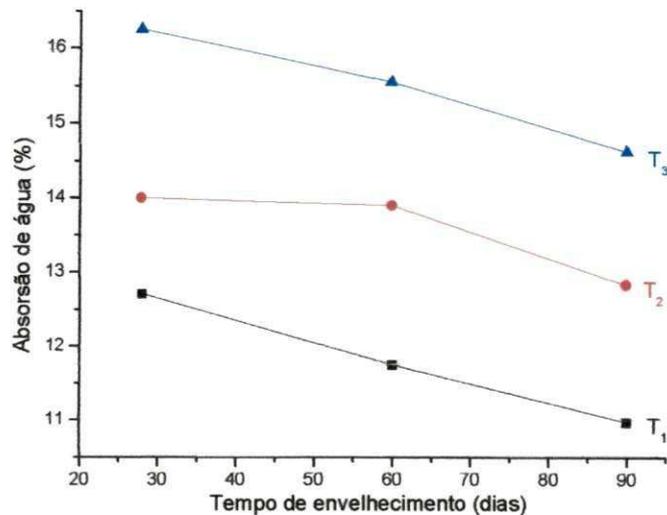


Figura 6.10 – Absorção de água dos blocos convencionais e alternativos.

Quando se analisa a Figura 6.10, considerando as idades dentro de cada traço, todos os traços sofreram decréscimos significativos nos valores de capacidade de absorção de água após os 60 dias de idade, todos os traços tendem a estabilização, visto que a capacidade de absorção de água entre eles diminui em consequência do tempo de cura.

6.2.3. Resultados dos ensaios de durabilidade

6.2.3.1. Ensaios de resistência à compressão simples

a) Corpos-de-prova (CPs) cilíndricos confeccionados com 90% solo mais a combinação de 10% de cimento e casca de arroz, após 28 dias de cura.

Ensaios de durabilidade realizados pelo processo de degradação acelerada por ciclos de molhagem e secagem pelo método normatizado pela NBR 13554 (ABNT, 1996).

A Tabela 6.12 apresenta os valores de resistência à compressão simples obtidos dos corpos-de-prova submetidos aos ciclos de molhagem e secagem, para as amostras submetidas à escovação e as amostras não submetidas à escovação, no final do sexto ciclo, para as misturas de solo-cimento com incorporação de 0%, 2% e 4% de casca de arroz.

Tabela 6.12 – Ensaio de resistência à compressão simples realizados ao final dos seis ciclos de molhagem e secagem dos corpos-de-prova após 7 (sete) dias de cura.

Ensaio de resistência à compressão simples				
Ensaio	CPs	Resultados (MPa)		
		T₁	T₂	T₃
Corpos-de-prova não escovados	1	2,13	1,36	0,49
Corpos-de-prova escovados	2 a 5	1,33	0,89	0,29

Analisando os valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova apresentados na Tabela 6.12, observou-se que as amostras submetidas à escovação sofreram maiores desgastes em relação às amostras que não foram submetidas ao processo de escovação. Com o processo de escovação nos corpos-de-prova ocorreu uma grande perda de massa e conseqüentemente a redução progressiva de resistência à compressão simples. Esses resultados concordam com as afirmações de Lima (2010) quando comparados com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova submetidos à escovação e os que não sofreram escovação, observou-se um decréscimo de resistência nos corpos-de-prova escovados.

A Figura 6.11 ilustra os valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz, traço T₄, obtidos nos ensaios de molhagem e secagem durante 6 (seis) ciclos.

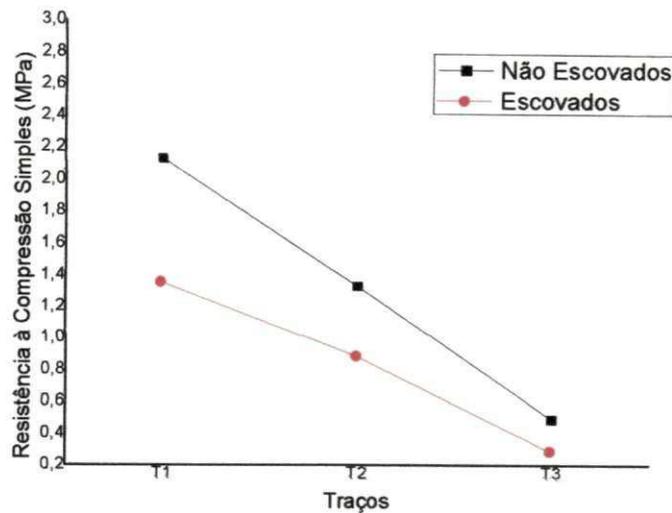


Figura 6.11 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento e casca de arroz.

Observando os valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos ilustrados na figura 6.11, notou-se que, com a redução dos teores da casca de arroz e o acréscimo de cimento elevou os resultados em termo de resistência, devido o processo de estabilização do cimento melhorar as características físico-mecânicas da mistura.

Em relação ao processo de escovação dos corpos-de-prova ocorreu uma queda brusca nos valores de resistência, em decorrência dos desgastes acelerados sofridos pelas amostras no decorrer do processo de molhagem e secagem.

b) Ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz substituindo parte solo, através de envelhecidos em condições de molhagem e secagem.

Os ensaios de durabilidade realizados nos corpos-de-prova das misturas de solo-cimento incorporando casca de arroz substituindo percentuais do solo, pelo processo de envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem e sem escovação.

A Tabela 6.13 apresenta os resultados de durabilidade dos corpos-de-prova convencionais e alternativos incorporados com casca de arroz, submetidos ao tratamento de molhagem e secagem.

Após a aplicação do ensaio de durabilidade nos tratamentos através de ciclos de molhagem e secagem nos corpos-de-prova, nos períodos de 28, 60 e 90 dias de cura, obteve-se resultados referentes à resistência à compressão simples, variação de volume e perda de massa, esses resultados estão apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.13 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples realizados nos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz sem escovação.

Idades	Ciclos	RCS (MPa)		
		T ₄	T ₅	T ₆
28 dias	0	2,48	2,22	2,17
	1	2,59	2,31	2,10
	2	2,73	2,56	2,20
	3	2,95	2,66	2,21
	4	2,95	2,38	2,09
	5	3,00	2,37	1,97
	6	2,96	2,32	2,03
60 dias	0	2,60	2,35	2,28
	1	3,00	2,42	2,32
	2	3,11	2,47	2,34
	3	3,21	2,48	2,38
	4	3,18	2,39	2,33
	5	2,85	2,35	2,25
	6	2,87	2,37	2,33
90 dias	0	2,83	2,59	2,52
	1	2,87	2,66	2,59
	2	2,89	2,83	2,73
	3	2,91	2,98	2,93
	4	2,90	3,00	2,97
	5	2,86	2,94	2,96
	6	2,81	2,85	2,87

Observando o comportamento dos corpos-de-prova submetidos aos ciclos de molhagem e secagem (Tabela 6.13), na idade de 28 dias, o traço T₄ (solo-cimento) até o quinto ciclo ganhou resistência à compressão simples e em seguida houve um decréscimo na sua mistura evidenciando o envelhecimento. Os Traços T₅ e T₆ (solo-cimento e casca de arroz) ganharam resistência à compressão simples até o terceiro ciclo, a partir do quarto ciclo começaram a perder resistências em consequência do processo de envelhecimento. No final do sexto ciclo de molhagem e secagem, após os 28 dias de cura, os traços T₄ e T₅ apresentaram ganhos de resistência à

compressão simples, respectivamente 16,22% e 4,31%, isso comparando o ciclo zero (T_4 2,48 MPa e T_5 2,22 MPa) com o sexto ciclo (T_4 2,96 MPa e T_5 2,32 MPa). Enquanto que o traço T_6 , no final do sexto ciclo da primeira etapa apresentou perda de resistência à compressão simples de 6,45%.

Aos 60 dias de idade, conforme mostra a (Tabela 6.13), a tendência do comportamento dos corpos-de-prova durante os ciclos de molhagem e secagem, as misturas de solo e cimento apresentaram os maiores valores de resistência à compressão simples e os tratamentos com maior percentual de casca de arroz apresentaram os menores valores de resistência à compressão simples. Quanto ao tempo de cura, ocorreram aumentos de resistência à compressão em todos os tratamentos, mas os corpos-de-prova cilíndricos começaram a perderem resistências a partir do quarto ciclo de molhagem e secagem. Os corpos-de-prova no sexto ciclo de molhagem e secagem apresentaram ganhos de resistência à compressão simples em relação ao ciclo inicial. Os traços T_4 , T_5 e T_6 obtiveram ganho de resistência à compressão simples de 9,41%, 0,84% e 2,15%, respectivamente.

Aos 90 dias de idade, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de durabilidade em 6 (seis) ciclos de molhagem e secagem (Tabela 6.13), observou-se que os corpos-de-prova, nesta idade, ganharam resistência à compressão simples em relação aos ensaios realizados nas idades de 28 e 60 dias. Quanto ao comportamento das amostras nos ensaios de molhagem e secagem realizados após os 90 dias de cura, todas as combinações ganharam resistência à compressão simples até o quarto ciclo e a partir do quinto ciclo começaram a perder resistências. No final de sexto ciclo de molhagem e secagem o traço T_4 (90% de solo mais 10% de cimento) perdeu resistência à compressão simples de 0,71% em relação ao ciclo zero (inicial), enquanto que os traços com adição de arroz, T_5 e T_6 , ganharam resistência à compressão simples de 9,12% e 12,19%, respectivamente.

A Figura 6.12 representa os resultados encontrados da resistência à compressão simples nos corpos-de-prova convencionais de solo-cimento, traço T_4 , nos ensaios de molhagem e secagem no período de 28, 60 e 90 dias de cura.

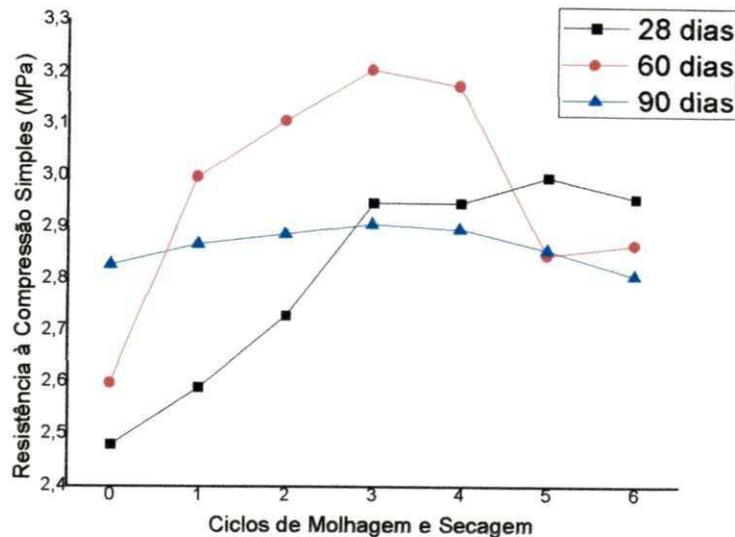


Figura 6.12 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova convencionais de solo-cimento.

A Figura 6.13 ilustra os resultados de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz, traço T₅, obtidos nos ensaios de molhagem e secagem aos 28, 60 e 90 dias de cura.

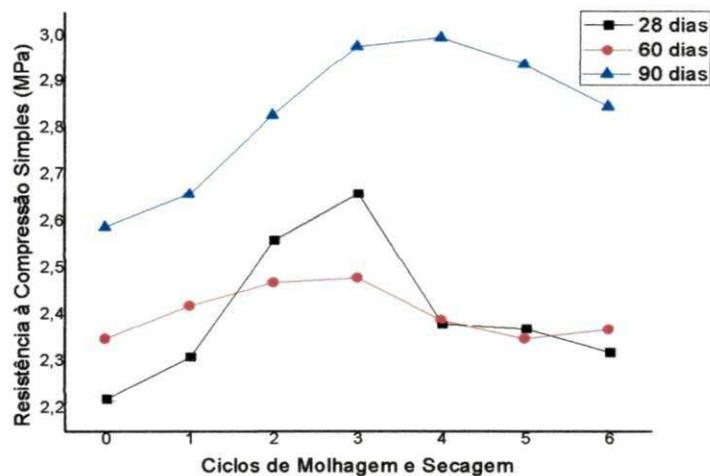


Figura 6.13 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova Alternativos de solo-cimento incorporado com 2% de casca de arroz.

A Figura 6.14 mostra os resultados de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova alternativos de solo-cimento incorporados com

4% de casca de arroz, traço T₆, obtidos nos ensaios de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura.

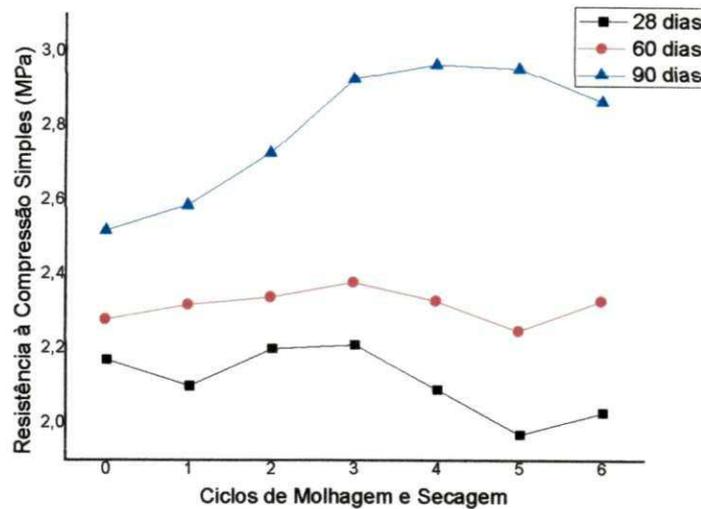


Figura 6.14 – Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz.

Observando o comportamento dos resultados de resistência à compressão simples obtidos nos ensaios de durabilidade pelo processo de molhagem e secagem em 6 (seis) ciclos, para cada idade, nas composições representadas nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14. Comparando os resultados obtidos no ciclo inicial após os 28 dias de curas dos corpos-de-prova com os resultados obtidos no ciclo final após os 90 dias de cura, os traços T₄, T₅ e T₆ obtiveram ganho de resistência à compressão simples de 11,74%, 22,10% e 24,39%, respectivamente. Esse desempenho mecânico dos corpos-de-prova alternativos incorporados com casca de arroz comparado durante o processo de envelhecimento por ciclos de molhagem e secagem, conforme Milani (2005), indica a formação, ao longo do tempo, de compostos cimentantes que melhoram as propriedades mecânicas das mesmas.

De modo geral, independente de idades e de ciclos de molhagem e secagem, os corpos-de-prova apresentaram valores de resistência à compressão simples maiores que 2,0 MPa, com exceção do traço T₆, que no quinto ciclo apresentou 1,97 MPa. Valores superiores a 3,0 MPa foram alcançados apenas pelo traço T₄, após os 60 dias de cura, nos ciclos de

molhagem e secagem 2, 3 e 4, conforme mostra a Tabela 6.10. Os corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, após os 90 dias de cura, nos 4 (quatro) últimos ciclos de molhagem e secagem apresentaram valores superiores aos corpos-de-prova de solo-cimento sem adição de casca de arroz. Esses valores obtidos para resistência à compressão simples dos corpos-de-prova estão de acordo com o disposto na norma NBR 10834 (ABNT, 1994), que estabelece como mínimo o valor de 2,0 MPa, nenhum valor inferior a 1,7 MPa.

A Figura 6.15 mostra os tipos de fissuras apresentados nos corpos-de-prova após a aplicação dos ensaios de resistência à compressão simples.



Figura 6.15 – Tipos de fissuras apresentados pelos corpos-de-prova após ensaios de compressão simples.

Observou-se, durante os ensaios de resistência à compressão simples, que os corpos-de-prova cilíndricos apresentaram diferentes tipos de fissuras, sendo que os corpos-de-prova com composição de solo-cimento e casca de arroz geralmente apresentaram fissuras lineares, identificada como sendo um tipo de fendimento (splitting) que pode denotar um material apresentando defeitos internos, provavelmente decorrentes da incompatibilidade química entre a casca de arroz e o cimento. Os corpos-de-prova com adição de casca de arroz sofreram grandes deformações com a aplicação de cargas, enquanto que os corpos-de-prova confeccionados com solo e cimento, geralmente apresentaram ruptura do tipo de cisalhamento em forma de cunha (wedge shearing). Tanto os corpos-de-prova de solo e cimento como os com adição de casca de arroz apresentaram também rupturas do tipo de esmagamento (crushing) com deformação perceptível na direção transversal à carga aplicada ao corpo-de-prova (Figura 6.15).

c) Ensaios de resistência à compressão simples de blocos envelhecidos em condições de molhagem e secagem.

Após a realização dos ensaios de durabilidade nos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, com a aplicação de ciclos de molhagem e secagem, obteve-se os resultados de perda de massa, variação de volume e resistência à compressão simples, os quais estão apresentados nas Tabelas 6.14, 6.17 e 6.19.

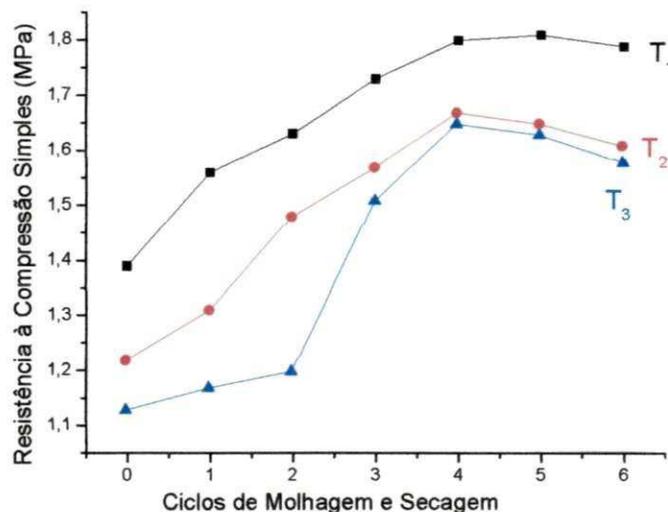
Tabela 6.14 - Valores de resistência à compressão simples (MPa) dos blocos envelhecidos pelo processo de molhagem e secagem.

28 dias							
Traços	Ciclos						
	0	1	2	3	4	5	6
T ₁	1,39	1,56	1,63	1,73	1,80	1,81	1,79
T ₂	1,22	1,31	1,48	1,57	1,67	1,65	1,61
T ₃	1,13	1,17	1,20	1,51	1,65	1,63	1,58
60 dias							
Traço	Ciclos						
	0	1	2	3	4	5	6
T ₁	1,71	1,78	1,83	1,95	2,08	2,21	2,15
T ₂	1,51	1,65	1,68	1,57	1,83	1,82	1,77
T ₃	1,43	1,52	1,48	1,59	1,68	1,69	1,65
90 dias							
Traço	Ciclos						
	0	1	2	3	4	5	6
T ₁	1,90	1,89	1,96	2,11	2,19	2,31	2,25
T ₂	1,69	1,73	1,71	1,85	1,96	2,04	2,00
T ₃	1,58	1,69	1,72	1,81	1,89	1,75	1,73

Quanto aos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples, aos 28, 56 e 90 dias, realizados com blocos confeccionados com solo-cimento e diferentes teores de casca de arroz, mostrados na Tabela 6.14, observou-se que, os blocos de solo-cimento com maiores percentuais de casca de arroz apresentaram, ao longo dos períodos de cura, menores valores de resistência à compressão simples, comparados aos blocos de solo-cimento sem adição de casca de arroz. Como também,

verificou-se que os blocos, nos ensaios de durabilidade, aos quintos ciclos de molhagem e secagem, apresentaram valores maiores de resistência à compressão simples do que nos demais ciclos. Enquanto que aos sextos ciclos sofreram diminuição de resistência à compressão simples. Evidentemente, esta redução deveu-se ao fato da perda de massa durante o processo de molhagem e secagem dos blocos.

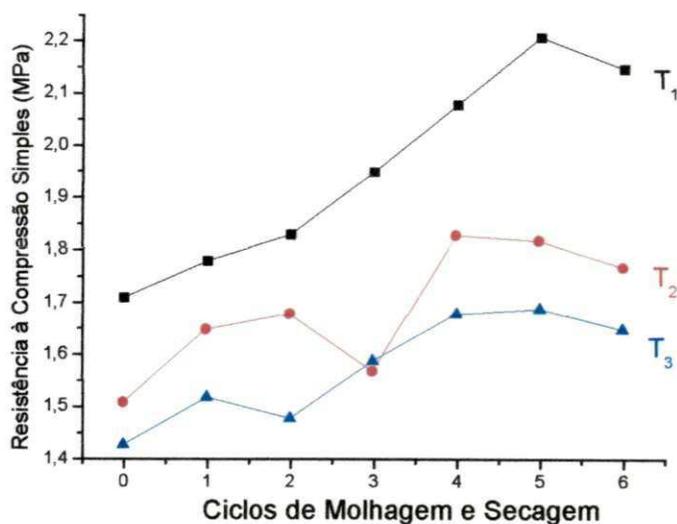
As Figuras 6.16, 6.17 e 6.18 ilustram os valores de resistência à compressão simples, obtidos durante os ensaios de durabilidade realizados com os blocos de solo-cimento e casca de arroz em diferentes combinações.



A Figura 6.16 – Resistência à compressão simples, após os 28 dias de cura.

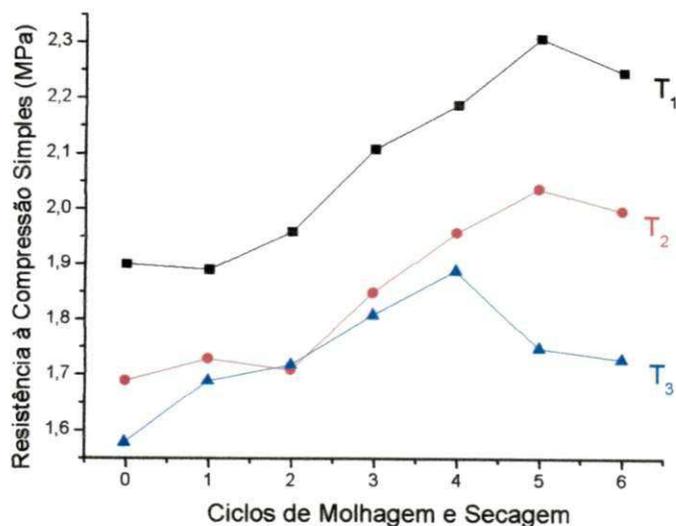
Na Figura 6.16 estão apresentados os valores de resistência à compressão simples, obtidos com os blocos convencionais e alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz através dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura. Verificou-se que os blocos convencionais de solo-cimento, durante os ciclos de molhagem e secagem, obtiveram valores superiores aos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, sendo que o valor máximo apresentado foi de 1,81 MPa, no quinto ciclo de molhagem e secagem. Em relação aos blocos alternativos, os que apresentaram valores inferiores foram os incorporados com 4% de casca de

arroz, o valor mínimo foi de 1,13 MPa, após os 28 dias de cura, no início dos ciclos de molhagem e secagem.



A Figura 6.17 – Resistência à compressão simples, após os 60 dias de cura.

Observando os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade, durante os 6 (seis) ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura, apresentados na Figura 6.17, pode-se verificar que ocorreram aumentos de resistência à compressão simples nos blocos convencionais de solo-cimento até o quinto ciclo e uma redução no sexto ciclo. Já o traço T₂, blocos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz, apresentou um crescimento de resistência à compressão simples até o segundo ciclo, no terceiro ciclo ocorreu uma queda de resistência; no quarto ciclo houve um aumento e a partir do quinto ciclo ocorreu uma redução dos valores obtidos nos ensaios de molhagem e secagem. No traço T₃, houve uma redução de resistência à compressão simples no segundo ciclo, um aumento do terceiro ao quinto ciclo e uma redução no sexto ciclo.



A Figura 6.18 – Resistência à compressão simples, após os 90 dias de cura.

A Figura 6.18 apresenta os resultados de resistência à compressão simples, obtidos nos ensaios de durabilidade através dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura. Verificando os resultados apresentados pelos blocos convencionais de solo-cimento (traço T₁), observou-se que o valor máximo foi de 2,31 MPa, no quinto ciclo. Os blocos alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, traço T₂ apresentou um valor máximo de 2,04 MPa no quinto ciclo, o traço T₃, um valor máximo de 1,89 MPa no quarto ciclo de molhagem e secagem, enquanto, que no segundo ciclo o traço T₃ apresentou um valor de resistência à compressão simples superior ao valor apresentado pelo traço T₂.

Analisando a Tabela 6.14 e as Figuras 6.16, 6.17, e 6.18, observou-se que os valores de resistência à compressão simples encontrados nos blocos de solo-cimento e casca de arroz, durante os ensaios de durabilidade, sofreram acréscimos em decorrência do tempo de cura, da degradação do material, devido o processo de molhagem e secagem e da redução dos valores de absorção de água.

Visualizando as Figuras 6.16, 6.17 e 6.18, percebe-se que os blocos em que foram adicionados maiores quantidades de casca de arroz, quanto a resistência à compressão simples, apresentaram desempenhos inferiores aos blocos que foram adicionados menores quantidades de casca de arroz. Mas,

considerando que a adição da casca de arroz seja utilizada na produção de blocos de solo-cimento incorporados com esse resíduo, os blocos com a adição de 2% foram os que promoveram melhores resultados em termos de resistência à compressão simples.

A Figura 6.19 mostra os tipos de rupturas apresentadas nos blocos de solo-cimento e casca de arroz após a realização dos ensaios de resistência à compressão simples.

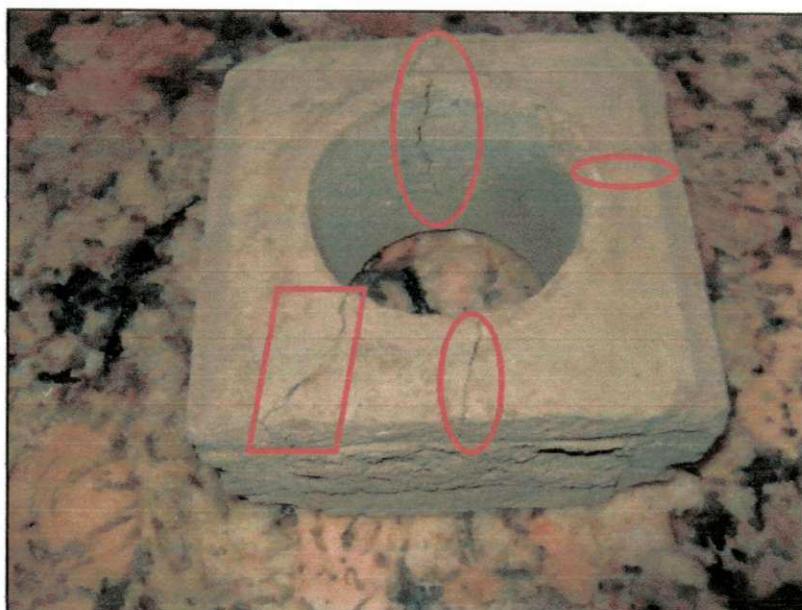


Figura 6.19 – Área de concentração de tensão nos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

Os resultados de resistência à compressão simples (Figura 6.19) mostraram comportamentos diferentes entre os blocos e os corpos-de-prova, os blocos apresentaram valores inferiores em relação aos valores apresentados pelos corpos-de-prova, o que pode ser explicado pelo fato dos blocos serem vazados e com isso as forças de tensão se concentraram nas suas bordas, conforme afirma Lima, (2010). Tendo em vista as diferentes relações diâmetro/altura entre os corpos-de-prova e os blocos e a geometria dos blocos e dos corpos-de-prova, os estados de tensões a que os corpos-de-prova e os tijolos foram submetidos são diferentes; todavia, esses ensaios são normatizados e, portanto, permitem comparações.

Quando comparados os resultados encontrados no presente trabalho com os resultados das pesquisas realizadas por Milani (2005), os valores de resistência à compressão simples dos tijolos de solo-cimento aos 7 (sete), 28 e 60 dias, nas misturas de solo arenoso mais 8% da combinação de cimento e casca de arroz e nas misturas com solo argiloso e 18% da combinação de cimento e casca de arroz, os valores apresentados por Milani (2005) são superiores aos valores encontrados nesta pesquisa, nos blocos vazados de solo-cimento com misturas de solo mais 10% da combinação cimento e casca de arroz. Salienta-se que Milani (2005) trabalhou com tijolos maciços, portanto no ensaio de resistência à compressão simples, as forças de tensão foram distribuídas de forma iguais sobre a superfície dos tijolos, enquanto que as forças de tensão aplicadas nos blocos vazados se concentram nas laterais, devido à existência de furos no centro dos blocos.

A Figura 6.20 mostra os tipos de rupturas apresentadas nos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, após a realização dos ensaios de resistência à compressão simples.



Figura 6.20 - Rupturas apresentas pelos blocos após ensaios de compressão simples.

As rupturas observadas na Figura 6.20 foram identificadas como sendo um tipo de fendilhamento (splitting) que pode denotar um material apresentando defeitos internos, provavelmente decorrentes da sua forma geométrica, por se tratar de blocos vazados com furos na parte central.

6.2.3.2. Ensaio de variação de volume pelo processo de degradação acelerada por molhagem e secagem.

a) Ensaio de variação de volume dos corpos-de-prova (CPs) cilíndricos confeccionados com solo mais a combinação de cimento e casca de arroz, após 28 dias de cura.

A Tabela 6.15 apresenta os índices de variação de volume encontrados nos ensaios de 6 (seis) ciclos de molhagem e secagem dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

Tabela – 6.15 – Valores percentuais de variação de volume dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz.

Varição de volume (%)			
Ciclos	Traço 1	Traço 2	Traço 3
1	0,70	0,90	1,42
2	0,92	2,14	4,10
3	1,82	3,88	5,89
4	2,74	4,89	6,85
5	3,86	5,91	7,74
6	5,58	7,51	8,95

Analisando os valores percentuais de variação de volume apresentados na Tabela 6.15, observou-se que no decorrer do processo de molhagem e secagem, os resultados apresentaram um comportamento progressivo a cada ciclo realizado, verificando-se aumento nos percentuais de variação de volume para cada traço.

A Figura 6.21 mostra os resultados obtidos nos ensaios de variação de volume dos corpos-de-prova cilíndricos, para cada combinação de solo-cimento e casca de arroz, por cada ciclo de molhagem e secagem.

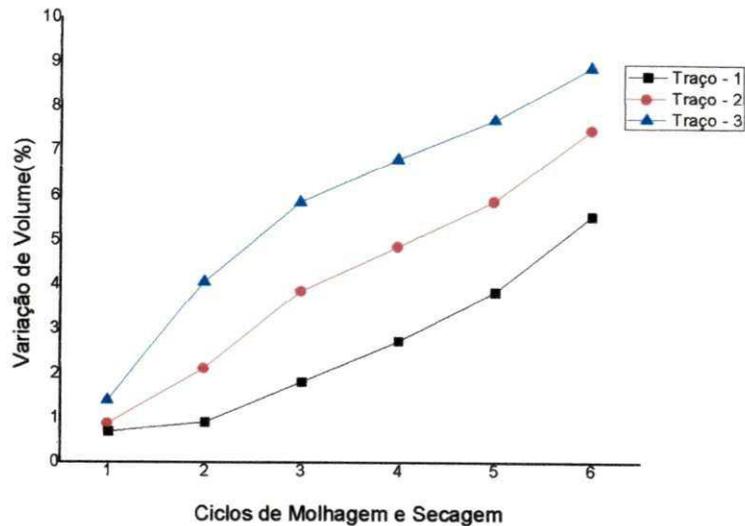


Figura 6.21 – Valores percentuais de variação de volume dos corpos-de-prova de solo-cimento e casca de arroz.

Analisando os resultados apresentados na figura 6.21, verificou-se que quanto a variação de volume dos traços T_1 (composição de 90% de solo mais 10% de cimento), T_2 (composição de 90% de solo mais 8% de cimento e 2% de casca de arroz), T_3 (90% de solo mais 6% de cimento e 4% de casca de arroz) apresentaram, no final do sexto ciclo de molhagem e secagem, índices superiores ao limite máximo determinado pela norma NBR 13553 (ABNT, 1996) que define 1% para solo-cimento.

Observou-se nos ensaios, que à proporção que foi diminuído o teor de cimento e aumentado o teor de casca de arroz, os índices de variação de volume cresceram, isto se justifica pelas características físicas que apresenta a casca de arroz.

b) Ensaio de variação de volume dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz substituindo percentuais do solo, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

Tabela 6.16 – Índices de variação de volumes dos corpos-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Traços	Variação de volume (%)		
	28 dias	60 dias	90 dias
	%%	%%	%%
Traço 4 (T ₄)	0,23	0,32	0,37
Traço 5 (T ₅)	0,32	0,52	0,68
Traço 6 (T ₆)	0,37	0,54	0,69

A Figura 6.22 ilustra os índices de variação de volume dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

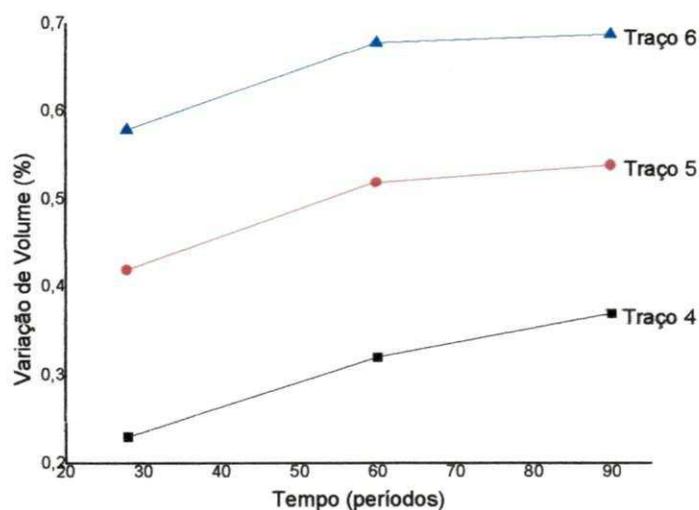


Figura 6.22 – Valores percentuais de variação de volume dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

Analisando os valores percentuais de variação de volume representados na Figura 6.22, observou-se que os índices de variação

volumétrica aumentaram progressivamente ao longo dos ensaios de molhagem e secagem, nas idades de 28, 60 e 90 dias. Os menores índices de variação de volume ocorreram nas misturas de (90% de solo mais 10% de cimento), enquanto que as maiores percentuais de variações ocorreram nas misturas com adição de casca de arroz, principalmente no traço T₃ (86% de solo mais 10% de cimento e 4% de casca de arroz).

Os valores percentuais encontrados de variação de volume nos ensaios de durabilidade pelo processo de molhagem e secagem foram inferiores ao limite máximo determinado pela norma NBR 13553 (ABNT, 1996) que define 1% para solo A₄, em paredes monolíticas.

c) Ensaios de variação de volume dos blocos de solo-cimento e casca de arroz substituindo percentuais do solo.

A Tabela 6.17 mostra os índices de variação de volumes obtidos mediante medições realizadas após cada período de cura, no início e final dos ciclos de molhagem e secagem dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, para cada traço estudado.

Tabela 6.17 – Índices de variação de volumes dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Traços	Variação de volume (%)		
	28 dias	60 dias	90 dias
	%%	%%	%%
Traço 1 (T ₁)	0,18	0,27	0,31
Traço 2 (T ₂)	0,39	0,45	0,49
Traço 3 (T ₃)	0,52	0,58	0,63

Na Figura 6.23 estão representados os valores percentuais de variação de volume mostrados na Tabela 6.17, para blocos de solo-cimento convencionais e alternativos adicionados com casca de arroz, resultantes do processo de durabilidade realizado por ciclos de molhagem e secagem nos blocos de solo-cimento e casca de arroz, após 28, 60 e 90 dias de cura. Verifica-se que a cada ciclo realizado ocorreu acréscimos nos índices de

variação de volume em todas as composições estudadas, em consequência da perda de massa dos blocos no processo de degradação acelerada. À proporção que aumentou o percentual de casca de arroz os índices de variação de volume foram maiores. Ao final de cada ciclo, observou-se que os blocos apresentaram valores percentuais de variação de volume satisfatórios, comparado com o valor máximo de 1%, determinado pela norma NBR 13553 (ABNT, 1996) para solo A₄.

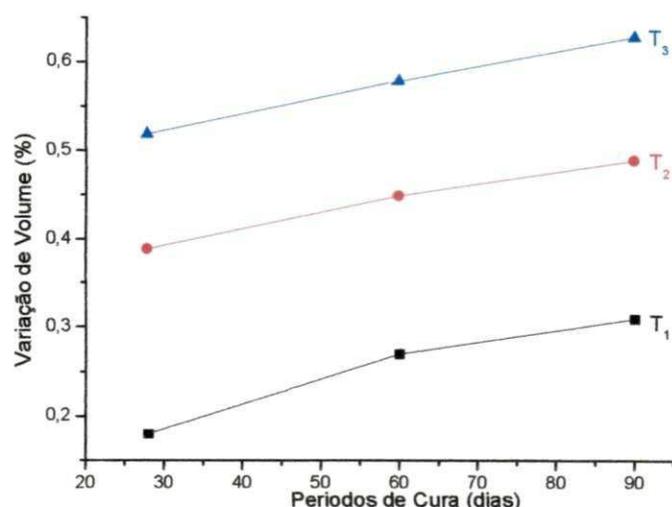


Figura 6.23 – Valores percentuais de variação de volume dos blocos de solo-cimento convencionais e alternativos.

6.2.3.3. Ensaio de perda de massa pelo processo de degradação acelerada por molhagem e secagem.

a) Perda de massa Corpos-de-prova (CPs) cilíndricos confeccionados com solo mais a combinação de cimento e casca de arroz, após 28 dias de cura.

Na figura 6.24, verifica-se os valores percentuais da perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, submetidos aos ciclos de molhamento e secagem, na idade de 7 (sete) dias, apresentaram valores médios respectivamente de 5,26%, 11,29% a 23,84%.

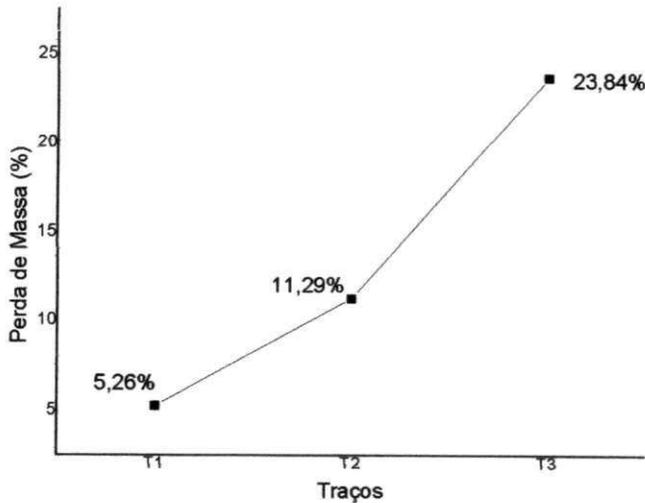


Figura 6.24 – Valores percentuais de perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz.

Analisando os valores percentuais representados na Figura 6.24, observou-se que a perda de massa dos corpos-de-prova obtidos no ensaio de molhagem e secagem, de acordo com os parâmetros determinados pela norma da NBR 13553 (ABNT, 1996), que define 10% para o solo A₄, os traços T₂ e T₃ apresentaram valores superiores a 10%, devido ao desgaste dos corpos-de-prova sofrido pelo processo de escovação.

Observando a Figura 6.24, os corpos-de-prova apresentaram aumentos de perda de massa à medida que foi substituída parte do cimento por casca de arroz na composição de solo-cimento.

Quanto ao comportamento dos corpos-de-prova durante os ciclos de molhamento e secagem, não foi observada qualquer trinca na sua superfície, nem mesmo nas suas arestas, mas alguns grãos do material se desprenderam ao longo do ensaio.

b) Perda de massa de corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz substituindo percentuais do solo, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

Tabela 6.18 – Índices de perda de massa dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Traços	Perda de massa (%)		
	28 dias	60 dias	90 dias
	%%	%%	%%
Traço 4 (T ₄)	4,30	5,24	6,31
Traço 5 (T ₅)	4,50	5,43	6,37
Traço 6 (T ₆)	4,26	5,48	6,58

Na Figura 6.25 estão representados os índices da perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e casca de arroz.

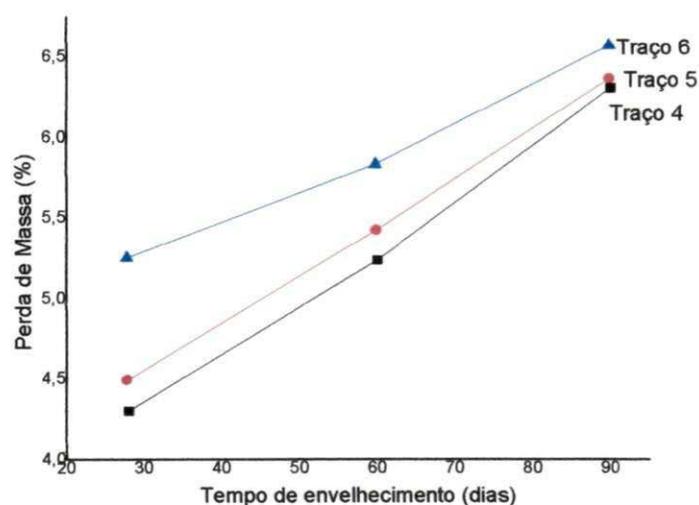


Figura 6.25 – Valores percentuais de perda de massa dos corpos-de-prova de solo-cimento incorporados com casca de arroz.

Verificando-se os valores percentuais de perda de massa explícitos na Figura 6.25, pode-se observar aumento de perda de massa com o

acréscimo do teor de casca de arroz incorporado à mistura de solo-cimento, como também aumento ao longo dos ensaios de molhagem e secagem. Os menores índices apresentados foram nas misturas de (90% de solo mais 10% de cimento) foi de 4,30% ao final do sexto ciclo, após 28 dias de cura e, os maiores foram obtidos nas misturas de (86% de solo mais 10% de cimento com a incorporação de 4% de casca de arroz) que foi de 6,58% ao final do sexto ciclo, após 90 dias de cura. Os resultados de perda de massa encontrados nos ensaios estão de acordo com os parâmetros determinados pela norma da NBR 13553 (ABNT, 1996), que define 10% para o solo A₄.

c) Perda de massa dos blocos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

Os resultados ilustrados na Tabela 6.19 e representados na Figura 6.56 revelam que os blocos de solo-cimento e casca de arroz resistiram aos ciclos de ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, realizados após o final de cada período de cura, mas à proporção que se aumentou o percentual da casca de arroz os valores percentuais de perda de massa cresceram em função da redução da resistência das composições.

Tabela 6.19 – Índices de perda de massa dos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz para períodos de cura de 28, 60 e 90 dias.

Traços	Perda de massa (%)		
	28 dias	60 dias	90 dias
	%%	%%	%%
Traço 1 (T ₁)	2,13	2,81	3,93
Traço 2 (T ₂)	3,80	4,06	5,56
Traço 3 (T ₃)	3,98	5,01	5,96

No entanto, durante os ensaios de degradação acelerada, observou-se que a casca de arroz foi o que elevou a perda de massa dos blocos (Tabela 6.19), faz-se necessário destacar que a estrutura da casca de arroz apresenta

grandes vazios entre si e a interação entre o solo-cimento e a casca de arroz se torna lenta e com porosidade.

Analisando o comportamento das curvas ilustradas na Figura 6.26, observou-se que, em consequência do aumento dos índices de variação de volume e do processo de molhagem e secagem sucessivamente, ocorreram acréscimos na perda de massa nos blocos de solo-cimento e casca de arroz. Os menores valores percentuais de perda de massa ocorreram nos blocos de solo-cimento sem adição de casca de arroz e os maiores valores aconteceram nos blocos com adição de casca de arroz, sendo que os valores percentuais de perda de massa apresentados pelos blocos de solo-cimento com adição de casca de arroz foram satisfatórios, de acordo com a determinação da norma NBR 13553 (ABNT, 1996) que determina a perda de massa para solo A_4 , para paredes monolíticas, o limite máximo estabelecido é de 10%.

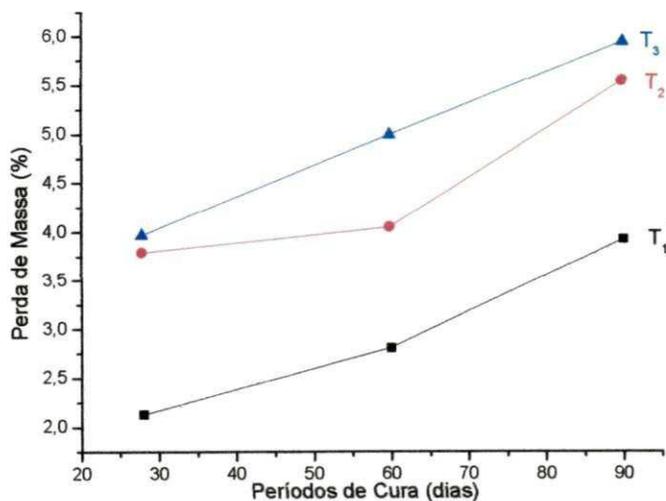


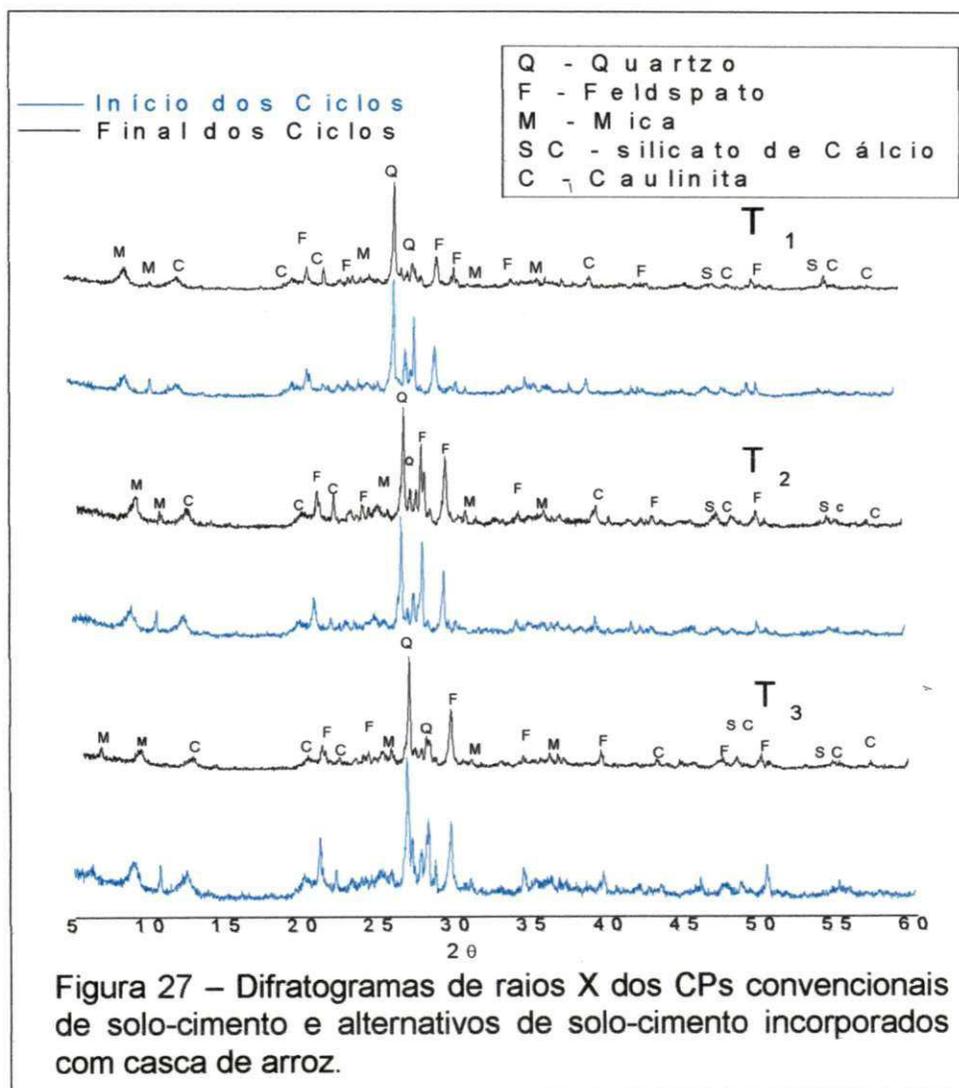
Figura 6.26 – Valores percentuais de perda de massa ocorrida durante os ensaios de durabilidade, após os ciclos de molhagem e secagem.

6.2.4. Caracterização dos constituintes antes e após os ensaios de durabilidade.

6.2.4.1. Análise de difração de raios – X

a) Corpos-de-prova confeccionados com solo mais a combinação de cimento e casca de arroz.

A Figura 6.27 apresenta as curvas de DRX para as amostras dos traços T₁, T₂ e T₃ utilizados na confecção de corpos-de-prova convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.



Nos difratogramas de raios X da Figura 6.27, observou-se nos corpos-de-prova convencionais de solo-cimento, sem adição de casca de arroz e alternativos com adição de 2% e 4% de casca de arroz, após 28 dias de cura, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, a presença de quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,32 Å e 3,22 Å, feldspato alcalino (Na, Ca) $(\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_8$, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,03 Å e 3,19 Å, feldspato ortoclásio (Na, K) $(\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_8$, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,23 Å e 3,17 Å, Caulinita $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4$, caracterizada pela distância interplanar de 7,12 Å, mica moscovita (K, Na) $\text{Al}_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$, caracterizada pela distância interplanar de 10,04 Å, mica biotita (Ca, Na)₂ (Fe₂, Mg)₅ (Si, Al)₈ O₂₂ (OH)₂, caracterizada pela distância interplanar de 9,98 Å e silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), caracterizado pela distância interplanar de 2,61 Å e 1,81 Å.

Observando na Figura 6.27, que os espectros de raios X dos corpos-de-prova convencionais e alternativos de solo-cimento incorporados com 2% e 4% de casca de arroz, após 28 dias de cura, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, apresentaram picos mais elevados para os silicatos, no caso do quartzo (SiO_2) e dos feldspatos alcalinos (NaCa)(SiAl)₄ O₈ e feldspatos potássios (NaK) Al₂ (SiAl)₄ O₁₀ (OH)₂. Nota-se que os picos referentes ao quartzo e aos feldspatos sofreram reduções no final dos ciclos de molhagem e secagem.

b) Corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz substituindo percentuais do solo, após os períodos de 28 e 90 dias de cura.

A Figura 6.28 apresenta as curvas de DRX para as amostras dos traços T₄, T₅ e T₆ utilizadas na confecção de corpos-de-prova convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, ao início dos ciclos de molhagem e secagem após 28 dias de cura e ao final dos ciclos de molhagem e secagem realizados após 90 dias de cura.

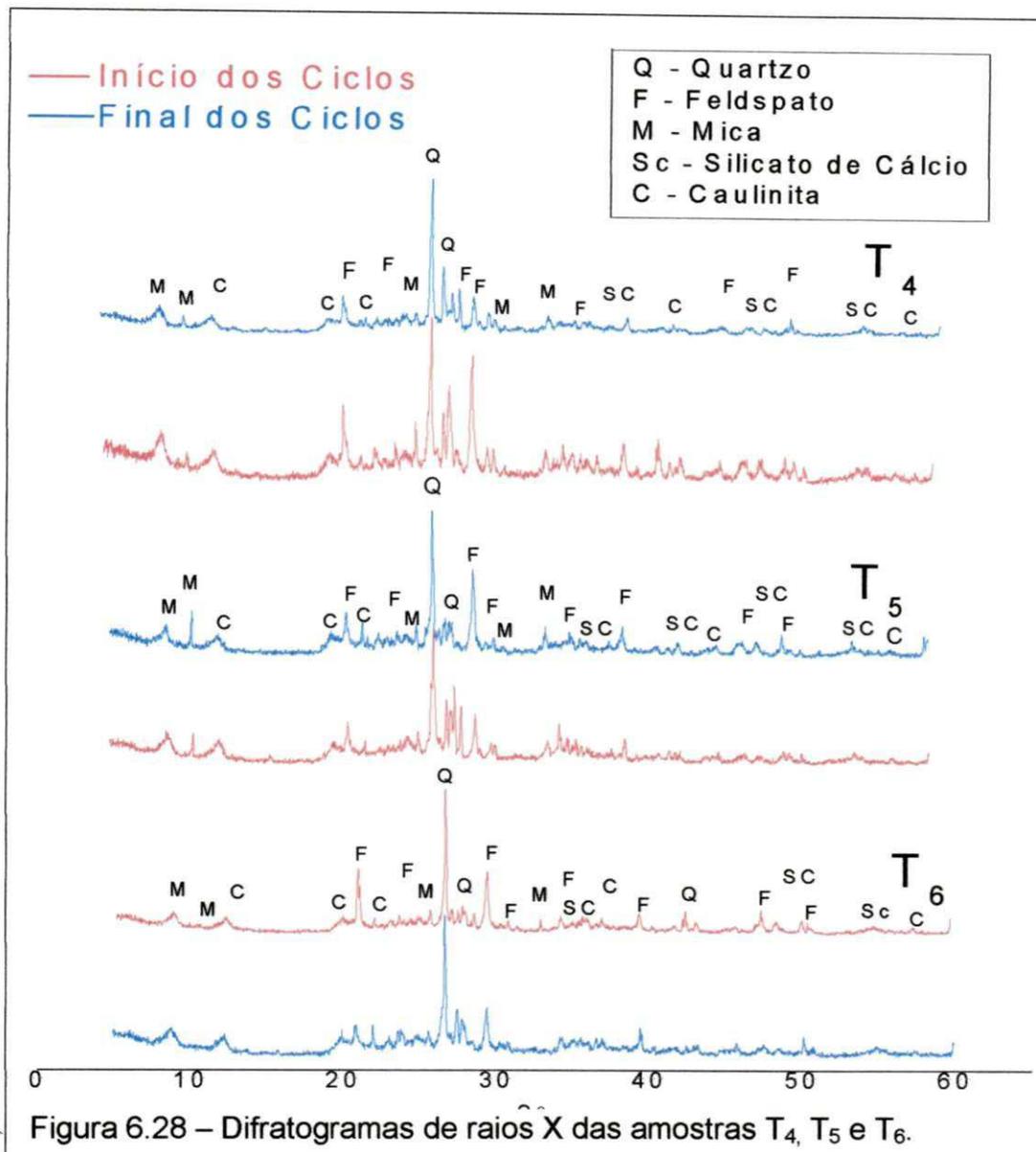


Figura 6.28 – Difratoogramas de raios X das amostras T₄, T₅ e T₆.

Observando os difratogramas de raios X da Figura 6.28, referente aos traços T₄, T₅ e T₆ verificou-se nos corpos-de-prova convencionais de solo-cimento e alternativos incorporados com 2% e 4% de casca de arroz, a presença de quartzo (SiO₂), caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å, feldspato alcalino (Na, Ca) (Si, Al)₄ O₈, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,03 Å e 3,19 Å, feldspato ortoclásio (Na, K) (Si₃Al) O₈, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,24 Å e 3,20 Å, Caulinita (Al₂Si₂O₅) (OH)₄, caracterizada pela distância interplanar de 7,28 Å, mica moscovita (K, Na) Al₂ (Si, Al)₄ O₁₀ (OH)₂, caracterizada pela distância interplanar de 10,15 Å, mica biotita (Ca, Na)₂ (Fe₂, Mg)₅ (Si, Al)₈ O₂₂ (OH)₂,

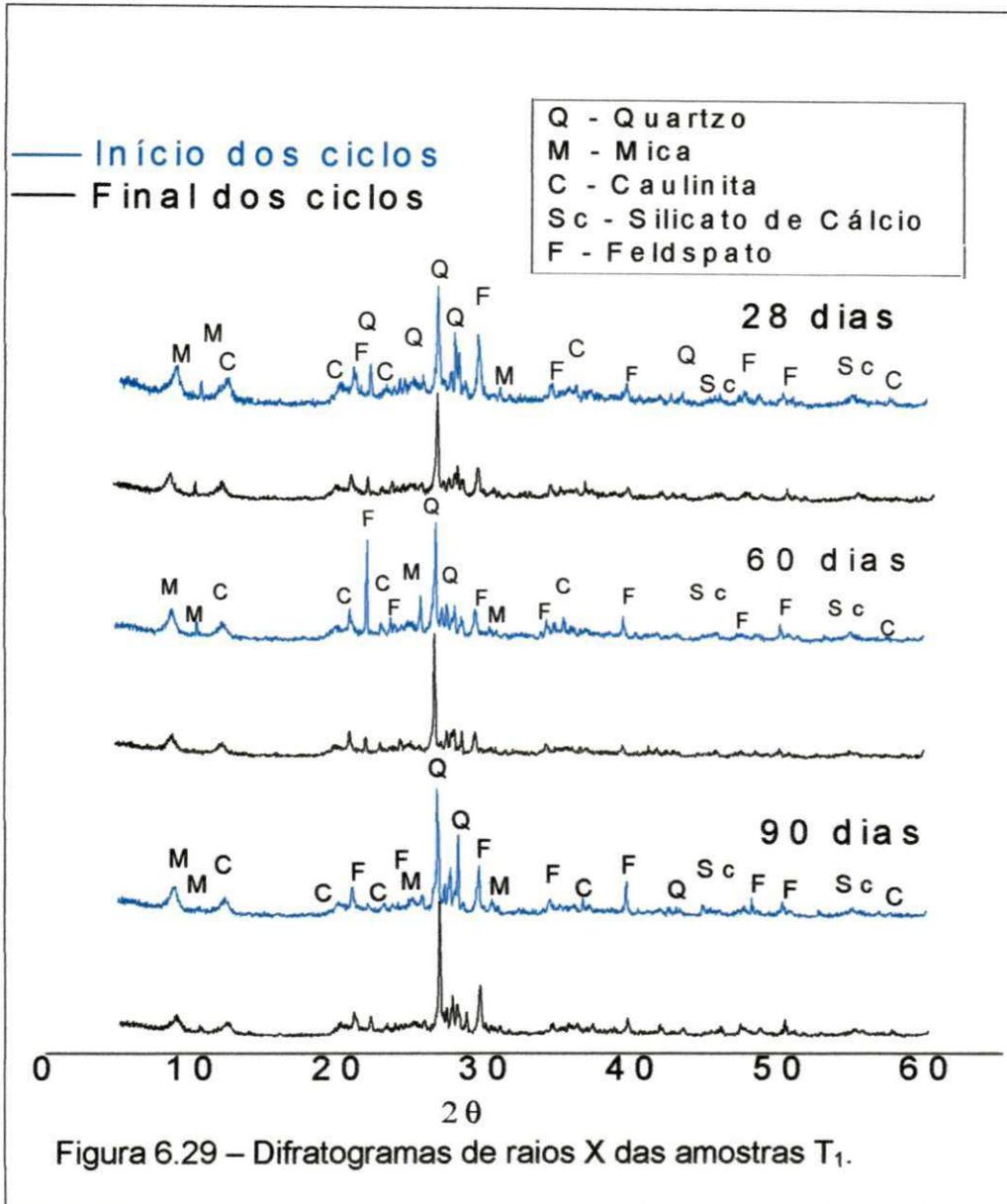
caracterizada pela distância interplanar de 9,98 Å, calcita (CaCO_3), caracterizada pela distância interplanar de 3,03 Å e 2,15 Å e silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), caracterizado pela distância interplanar de 2,61 Å e 1,81 Å.

Nos difratogramas de raios X apresentados na figura 6.28, para amostra referente ao traço T_4 para confecção de corpos-de-prova convencionais de solo-cimento e para os traços T_5 e T_6 para confecção de corpos-de-prova alternativos de solo-cimento incorporados com 2% e 4% de casca de arroz, através de picos, observou-se a presença de quartzo ou dióxido de silício (SiO_2), albita ou feldspato alcalino (Na, Ca) $(\text{Si, Al})_4 \text{O}_8$, sandinita ou feldspato ortoclásio (Na, K) $(\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_8$, Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) $(\text{OH})_4$, biotita ou mica preta e ilita (Ca, Na)₂ $(\text{Fe}_2, \text{Mg})_5$ $(\text{Si, Al})_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$, presença de óxido de ferro (FeO), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio e óxido de magnésio (MgO), moscovita ou mica branca (K, Na) $\text{Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$, silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e Calcita (CaCO_3).

Analisando os resultados apresentados nos difratogramas de raios X, nota-se que os picos referentes ao quartzo (SiO_2) são mais evidentes devido o quartzo está presente em todos os materiais em grandes proporções; a presença dos picos de feldspatos, mica e caulinita deve se a presença de dióxido de silício, óxido de magnésio, óxido de alumínio, óxido de ferro, óxido de cálcio, óxido de sódio e óxido de potássio que fazem parte das composições do solo e do cimento. Comparando o aumento dos picos hidratados ou a redução dos picos anidros nas condições dos ensaios, verificou-se que os picos referentes aos óxidos são os mais presentes nos difratogramas, enquanto que os picos referentes aos dióxidos de silícios são mais elevados.

c) Blocos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

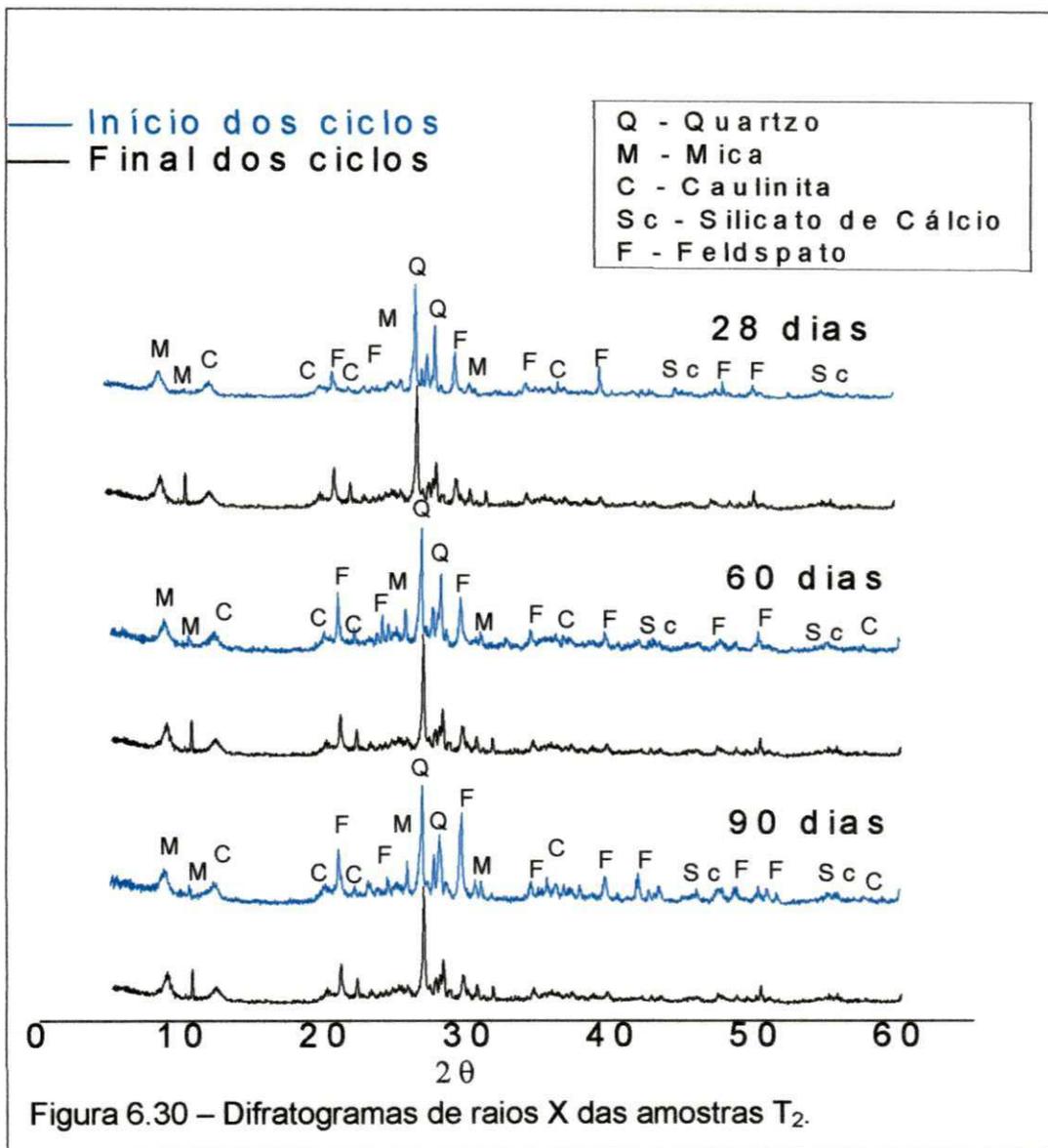
A Figura 6.29 – mostra as curvas de DRX para as amostras do traço T_1 dos blocos convencionais de solo-cimento, aos 28, 60 e 90 dias de cura, início e final dos ciclos de molhagem e secagem.



No difratograma de raios X da Figura 6.29, observou-se, após os 28, 60 e 90 dias de cura, ao início e ao final dos ciclos de molhagem e secagem, nos blocos convencionais de solo-cimento, a presença de quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,32 Å e 3,22 Å, feldspato sódico $(\text{Na, Ca}) (\text{Si, Al})_4 \text{O}_8$, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,03 Å e 3,19 Å, feldspato potássico $(\text{Na, K}) (\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_8$, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,23 Å e 3,17 Å, Caulinita $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4$, caracterizada pela distância interplanar de 7,12 Å, mica moscovita $(\text{K, Na}) \text{Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$, caracterizada pela distância interplanar de 10,04 Å, mica biotita $(\text{Ca, Na})_2 (\text{Fe}_2, \text{Mg})_5 (\text{Si, Al})_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$, caracterizada pela distância interplanar de 9,98 Å e

silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), caracterizado pela distância interplanar de 2,61 Å e 1,81 Å.

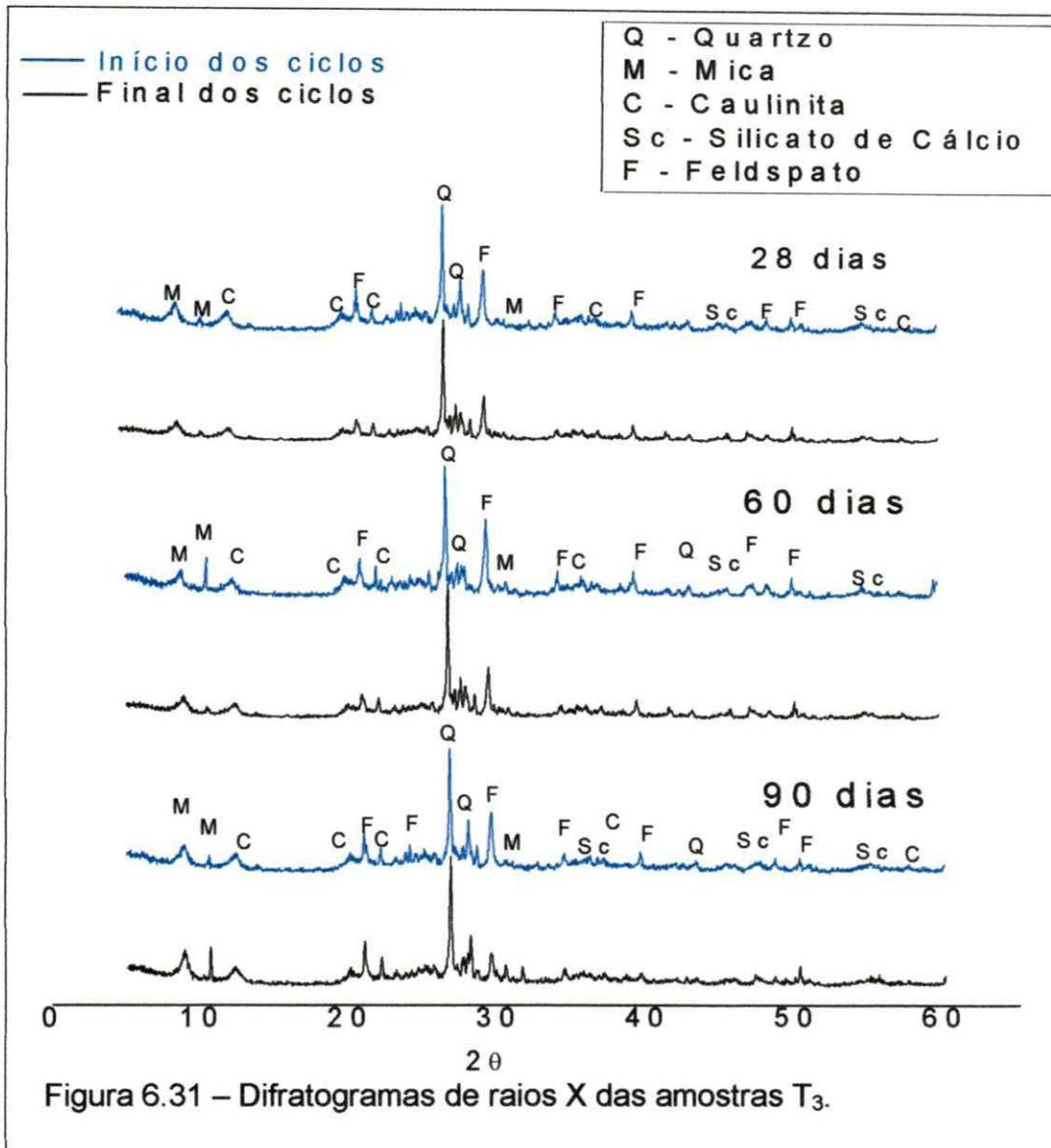
Figura 6.30 – apresenta as curvas de DRX para as amostras do traço T₂ dos blocos confeccionados com solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz, aos 28, 60 e 90 dias de cura, início e final de cada ciclo de molhagem e secagem.



Observando os difratogramas de raios X apresentados na Figura 6.30, observou-se, após os 28, 60 e 90 dias de cura, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, nos blocos alternativos de solo-cimento incorporados

com 2% de casca de arroz a presença de quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,36 Å, feldspato alcalino (Na, Ca) $(\text{Si, Al})_4 \text{O}_8$, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,03 Å e 3,19 Å, feldspato ortoclásio (Na, K) $(\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_8$, caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,24 Å e 3,20 Å, Caulinita $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4$, caracterizada pela distância interplanar de 7,8 Å, mica moscovita (K, Na) $\text{Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$, caracterizada pela distância interplanar de 10,04 Å, mica biotita $(\text{Ca, Na})_2 (\text{Fe}_2, \text{Mg})_5 (\text{Si, Al})_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$, caracterizada pela distância interplanar de 9,98 Å, calcita (CaCO_3), caracterizada pela distância interplanar de 3,03 Å e 2,28 Å e silicato de cálcio hidratado $(\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$, caracterizado pela distância interplanar de 2,62 Å e 1,81 Å.

A Figura 6.31 – ilustra as curvas de DRX para as amostras do traço T₃ dos blocos confeccionados com solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz, aos 28, 60 e 90 dias de cura, início e final dos ciclos de molhagem e secagem.



Na Figura 6.31 – estão apresentados os difratogramas dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz utilizados nesta pesquisa. Observando-se os difratogramas, verificou-se, após 28, 60 e 90 dias de cura, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, a presença de quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de 3,36 Å, feldspato sódico ($(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_8$), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,03 Å e 3,19 Å, feldspato potássico ($(\text{Na}, \text{K}) (\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_8$), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,24 Å e 3,20 Å, Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$), caracterizada pela distância interplanar de 7,8 Å, mica moscovita ($(\text{K}, \text{Na}) \text{Al}_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$), caracterizada pela distância

interplanar de 10,04 Å, mica biotita $(Ca, Na)_2 (Fe_2, Mg)_5 (Si, Al)_8 O_{22} (OH)_2$, caracterizada pela distância interplanar de 9,98 Å, calcita $(CaCO_3)$, caracterizada pela distância interplanar de 3,03 Å e 2,28 Å e silicato de cálcio hidratado $(Ca_2SiO_4.H_2O)$, caracterizado pela distância interplanar de 2,62 Å e 1,81 Å.

Observou-se que, em geral, todos os traços após o final de cada ciclo de molhagem e secagem sofreram perda na composição mineralógica, principalmente nos minerais de quartzo e de feldspato. Verificou-se também, que todos os traços após o final de cada ciclo de molhagem e secagem apresentaram perdas na composição mineralógica, principalmente nos minerais de quartzo e de feldspato. Observa-se que alguns picos correspondentes a caulinita e silicatos de cálcio hidratados desapareceram no final dos ciclos de molhagem e secagem, decorrente das reações químicas ocorridas durante o processo de envelhecimento acelerado entre os carbonatos e as substâncias hidratadas. Comparando os resultados obtidos no início do processo de molhagem e secagem aos resultados apresentados no final do processo, verificou-se que ocorreu uma redução nos picos representados pelos silicatos de alumínio nos blocos submetidos ao processo de envelhecimento acelerado. Também, pode-se observar que os picos referentes aos feldspatos são intensos nos ciclos iniciais de molhagem e secagem e reduzem-se nos ciclos finais, caracterizados por um efeito de hidratação de cálcio e potássio. Analisando as Figuras 6.29, 6.30 e 6.31, é possível observar que as amostras correspondentes aos traços T_1 , T_2 e T_3 apresentaram as mesmas fases mineralógicas.

Nos difratogramas de raios X dos blocos convencionais e alternativos de solo-cimento incorporados com 2% e 4% de casca de arroz, curados por períodos de 28, 60 e 90 dias, seguido do envelhecimento acelerado em 6 (seis) ciclos de molhagem e secagem após cada período de cura, observou-se a presença de hidróxido de cálcio $(Ca(OH)_2)$ e calcita $(CaCO_3)$, provavelmente proveniente do cimento Portland. Comparando os resultados aqui encontrados com os resultados obtidos por Souza (2008), no estudo de argamassa com casca de arroz, são similares.

6.2.4.2. Análise térmica diferencial (DTA)

a) Corpos-de-prova (CPs) cilíndricos confeccionados com solo mais a combinação de cimento e casca de arroz, após 28 dias de cura.

A Figura 6.32 apresenta as curvas DTA dos CPs cilíndricos convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, referente aos traços T₁, T₂ e T₃, após 28 dias de cura, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, respectivamente.

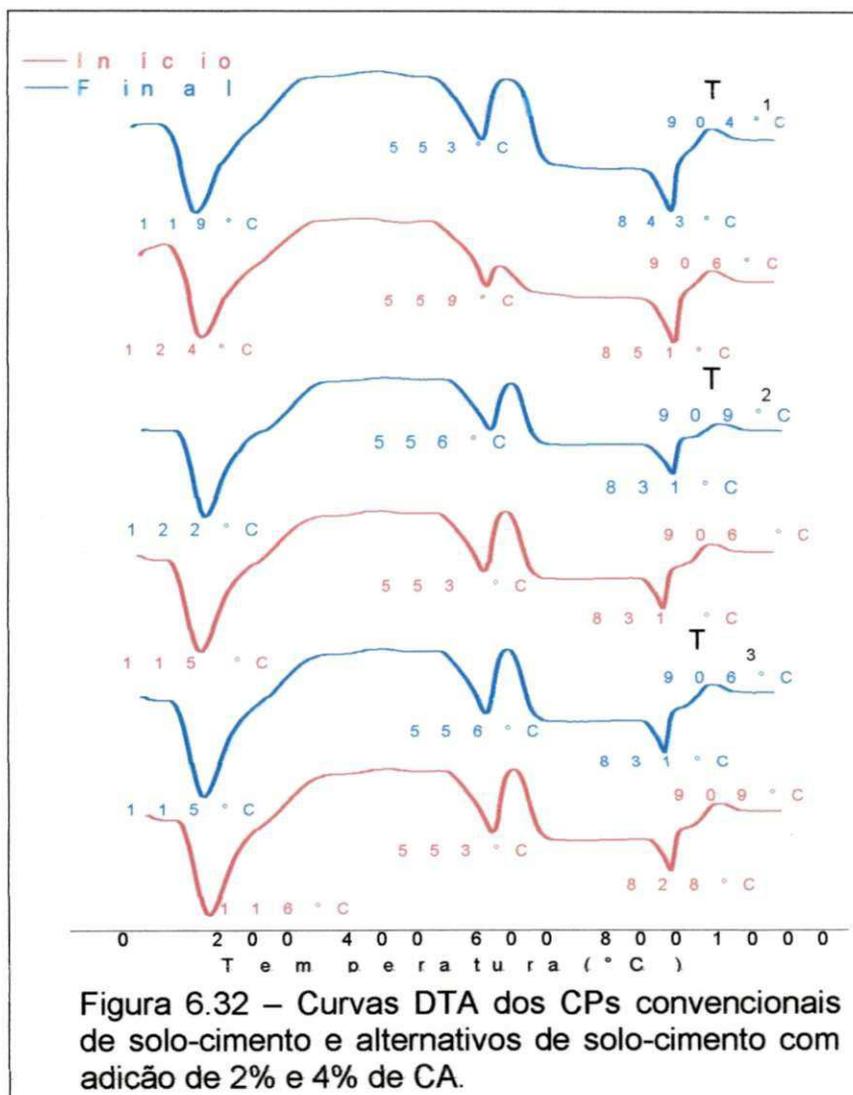


Figura 6.32 – Curvas DTA dos CPs convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento com adição de 2% e 4% de CA.

Analisando no termograma a curva DTA do traço T₁, início dos ciclos de molhagem e secagem, na figura 6.32, observou-se a presença de um pico

endotérmico na temperatura máxima de 124°C, caracterizando perda de água livre e adsorvida; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 295°C e 474°C, caracterizou perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 559°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 851°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

Observando a curva DTA referente ao traço T_1 , apresentada na Figura 6.32, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se um pico endotérmico na temperatura de 119°C que caracterizou a perda de água livre e adsorvida; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 283°C e 477°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 843°C caracterizou a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 909°C que corresponde à nucleação de mulita.

Na Figura 6.32, analisando a curva DTA do traço T_2 , início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se um pico endotérmico a temperatura de 115°C, caracterizado pela perda de água livre e adsorvida; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 292°C e 483°C, caracterizou perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 831°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; pico exotérmico a 907°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando a curva DTA referente ao traço T_2 , final dos ciclos de molhagem e secagem, apresentada na Figura 6.32, observou-se pico endotérmico à temperatura de 122°C, caracterizado pela perda de água livre e adsorvida; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 298°C e 495°C, caracterizando perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 556°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 831°C indica a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 909°C que corresponde à nucleação de mulita.

A Figura 6.32, analisando a curva DTA do traço T₃, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se pico endotérmico a temperatura de 116°C, caracterizado pela perda de água livre e adsorvida; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 298°C e 486°C, caracterizou perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 828°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO₃); pico exotérmico a 909°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando a curva DTA referente ao traço T₃, final dos ciclos de molhagem e secagem, apresentada na Figura 6.32, observou-se a presença de pico endotérmico à temperatura de 115°C, caracterizando perda de água livre e adsorvida; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 301°C e 483°C, caracterizando perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 556°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 831°C indica a presença de carbonato de cálcio (CaCO₃); pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

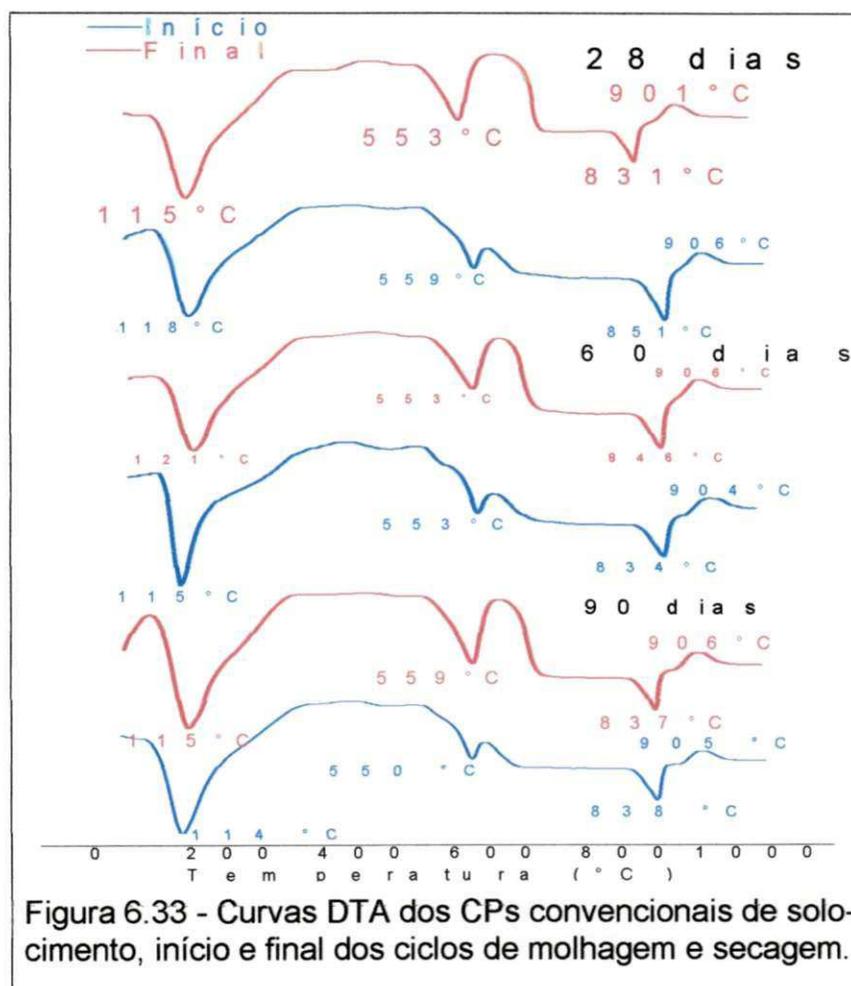
Conforme mostra a Figura de 6.32, os estudos das curvas DTA que foram realizados como corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento, convencionais e alternativos incorporados com 2% e 4% de casca de arroz, curados nos períodos de 7 (sete) e 28 dias, envelhecidos após os períodos de cura pelo processo de molhagem e secagem durante 6 (seis) ciclos.

Analisando as curvas DTA, dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento convencionais sem adição de casca de arroz e alternativos com 2% e 4% de casca de arroz, no início e no final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se a presença de picos endotérmicos entre as temperaturas de 115 °C e 124 °C, referente à presença de água livre ou adsorvida na superfície dos corpos-de-prova, conforme Souza Santos (1989). Verificou-se nos corpos-de-prova convencionais e alternativos a presença de bandas exotérmicas entre as temperaturas de 283 °C e 495 °C, caracterizando a presença de matéria orgânica; picos endotérmicos na faixa de temperaturas entre 553 °C e 559 °C, referente à perda de hidroxilas e a transformação do quartzo α para β; picos endotérmicos nas temperaturas entre 828 °C e 851 °C, referente à decomposição de carbonato de cálcio ou calcita (CaCO₃), sendo os corpos-de-

prova convencionais sem adição de casca de arroz, essa decomposição ocorreu nas temperaturas entre 843 °C e 851 °C, enquanto que os corpos-de-prova alternativos com adição de casca de arroz esse processo ocorreu em temperaturas menores, na faixa de 828 °C e 831 °C; picos exotérmicos na temperatura de 909 °C, referente à nucleação de mulita. Comparando estes resultados com os resultados obtidos por Souza (2008), no estudo de argamassa com adição de casca de arroz, verificou-se que são similares.

b) Corpos-de-prova (CPs) confeccionados com solo-cimento e casca de arroz substituindo percentuais do solo, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

Na Figura 6.33, estão apresentadas as curvas DTA para os CPs convencionais de solo-cimento, após 28, 60 e 90 dias de cura, início e final dos ciclos de molhagem e secagem.



A Figura 6.33 mostra a curva DTA, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, que apresentou um pico endotérmico na temperatura de 118°C, a qual está em fase líquida preenchendo os capilares dos materiais, o que caracterizou a presença de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de 298°C e 483°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; um pico endotérmico aos 559°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 851°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

A Figura 6.33 ilustra a curva DTA, após 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, que apresentou pico endotérmico na temperatura de 115°C, o que caracterizou a presença de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de 286°C e 483°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico aos 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 831°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 901°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando o termograma na Figura 6.33, observou-se que a curva DTA, após 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, apresentou um pico endotérmico na temperatura máxima de 115°C, caracterizando água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 356°C e 498°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 834°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 904°C que corresponde à nucleação de mulita.

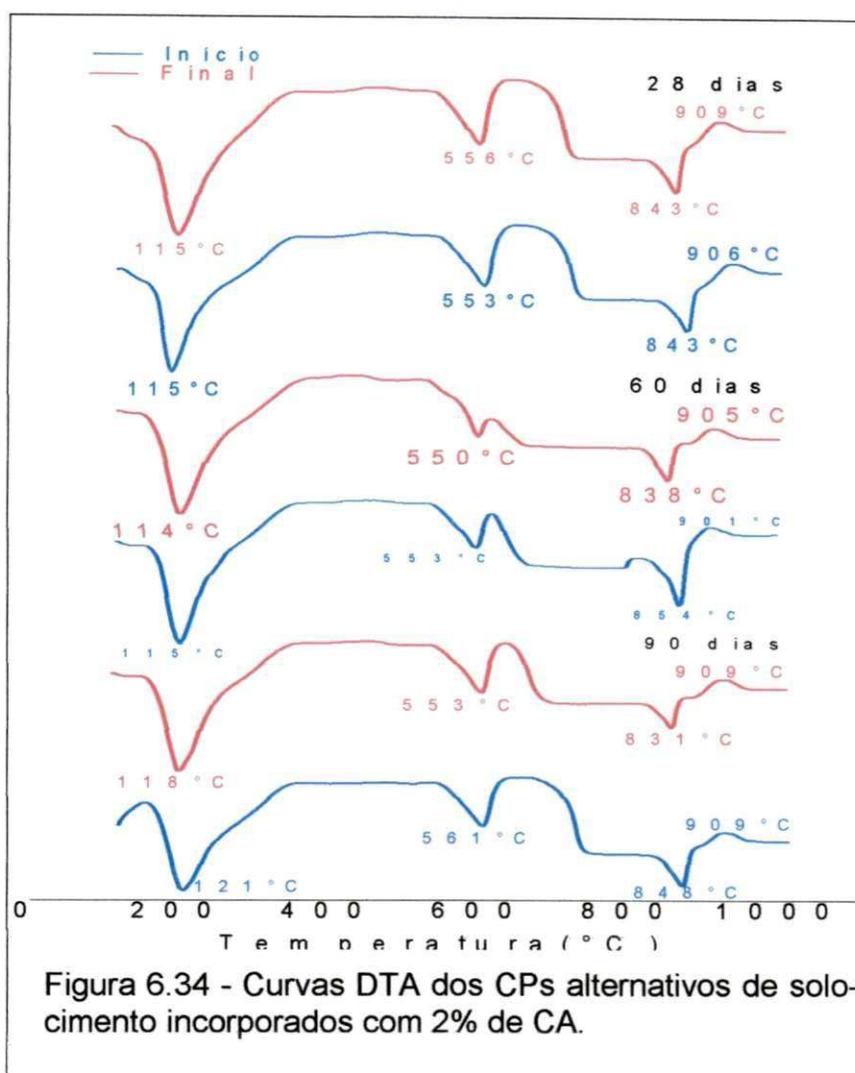
Na Figura 6.33, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem observou-se na curva DTA a presença de um pico endotérmico na temperatura máxima de 121°C, caracterizando água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 276°C e 479°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 846°C

caracterizado pela decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

Na Figura 6.33, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se na curva DTA, um pico endotérmico na temperatura máxima de 114°C , caracterizando água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 399°C e 479°C , caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 550°C , caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 838°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 905°C que corresponde à nucleação de mulita.

Na Figura 6.33, observou-se na curva DTA, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, um pico endotérmico na temperatura máxima de 115°C , caracterizando água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 277°C e 483°C , caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 559°C , caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 837°C caracterizado pela decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

Na Figura 6.34, estão apresentadas as curvas DTA para os CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz (CA), início e final dos ciclos de molhagem e secagem aos 28, 60 e 90 dias de cura.



Analisando a curva DTA na Figura 6.34, aos 28 dias, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se um pico endotérmico na temperatura máxima de 115°C, caracterizando água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 277°C e 495°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 843°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

Na Figura 6.34, aos 28 dias, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se que a curva DTA, apresentou um pico endotérmico na temperatura máxima de 115°C, caracterizando água livre; uma banda

exotérmica no intervalo de temperatura entre 281°C e 483°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 556°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 843°C caracterizado pela decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 909°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando-se a curva DTA na Figura 6.34, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se as seguintes transformações térmicas: um pico endotérmico com máximo em 115°C caracterizado pela perda de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 283°C e 489°C, que caracterizou perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 553°C característica da presença de hidroxilas; pico endotérmico na temperatura de 854°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; pico exotérmico a 901°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando-se a curva DTA na Figura 6.34, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se as seguintes transformações térmicas: um pico endotérmico com máximo em 114°C caracterizando perda de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 312°C e 480°C, que caracterizou perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 550°C característica da presença de hidroxilas; pico endotérmico na temperatura de 838°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; pico exotérmico a 905°C que corresponde à nucleação de mulita.

Observando a curva DTA na Figura 6.34, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se um pico endotérmico com máximo em 121°C caracterizando a perda de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 354°C e 540°C, que caracterizou perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 561°C caracterizando a presença de hidroxilas; pico endotérmico na temperatura de 848°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 909°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando-se a curva DTA na Figura 6.34, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se as seguintes transformações térmicas: um pico endotérmico com máximo em 118°C caracterizando a perda de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 357°C e 537°C, que caracterizou perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 553°C caracterizando a presença de hidroxilas; pico endotérmico na temperatura de 831°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; pico exotérmico a 909°C que corresponde à nucleação de mulita.

Na Figura 6.35, estão apresentadas as curvas DTA para os CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz (CA), início e final dos ciclos de molhagem e secagem aos 28, 60 e 90 dias de cura.

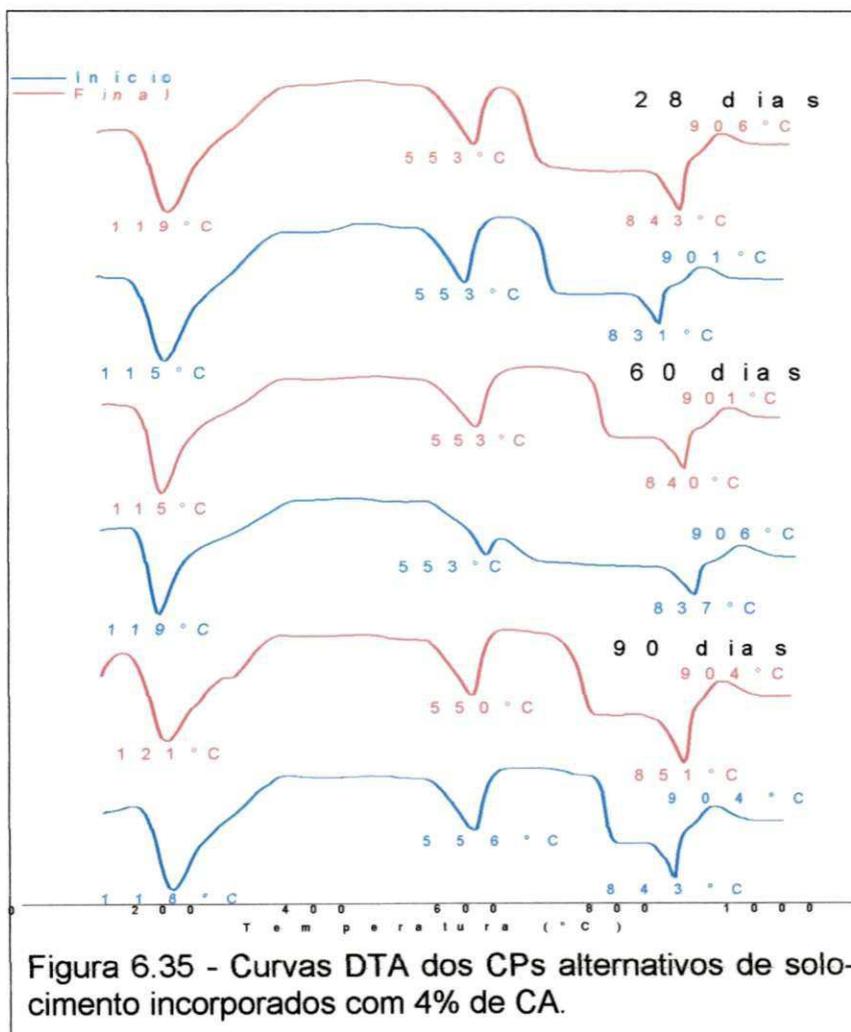


Figura 6.35 - Curvas DTA dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA.

Observando a curva DTA apresentada na Figura 6.35, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se que o termograma apresenta pico endotérmico a temperatura de 115°C que caracterizou a perda de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 283°C e 483°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 831°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 901°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando a curva DTA apresentada na Figura 6.35, aos 28 dias, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se um pico endotérmico à temperatura de 119°C, caracterizado pela presença de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 275°C e 483°C, caracterizando perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 553°C, caracterizando perda de hidroxila; pico endotérmico na temperatura de 843°C indica a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisou-se a curva DTA ilustrada na Figura 6.35, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, foram observadas as seguintes transformações térmicas: um pico endotérmico com máximo em 119°C caracterizando a perda de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 306°C e 489°C, que caracteriza perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 553°C indicando a presença de hidroxilas; pico endotérmico na temperatura de 837°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; pico exotérmico a 906°C que corresponde à nucleação de mulita.

Na curva DTA representada na Figura 6.35, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se as seguintes transformações térmicas: um pico endotérmico com máximo em 115°C caracterizando a presença de água livre; banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 277°C e 480°C, que caracterizou perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 553°C indicando a presença de hidroxilas; um

pico endotérmico com máximo em 840°C característica da decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; e um pico exotérmico com máximo em 901°C da nucleação da mulita.

Observando a curva DTA apresentada na Figura 6.35, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se um pico endotérmico com máximo em 118°C caracterizado pela presença de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 283°C e 486°C, que caracterizou perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 556°C caracterizando a presença de hidroxilas; pico endotérmico na temperatura de 843°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente proveniente do cimento Portland; pico exotérmico a 904°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando-se a curva DTA ilustrada na Figura 6.35, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, foram observadas as seguintes transformações térmicas: um pico endotérmico com máximo em 121°C caracterizando a presença de água livre; uma banda exotérmica no intervalo de temperatura entre 346°C e 537°C, que caracterizou perda de matéria orgânica; um pico endotérmico com máximo em 550°C caracterizado pela presença de hidroxilas; pico endotérmico na temperatura de 851°C, caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3); pico exotérmico a 904°C que corresponde à nucleação de mulita.

Analisando os comportamentos das curvas DTA realizadas no início e no final do processo de molhagem e secagem. Nas curvas DTA, observou-se que todos os corpos-de-prova convencionais e alternativos, durante os ensaios de envelhecimento, apresentaram picos endotérmicos na temperatura máxima entre 110°C e 120°C caracterizando a eliminação de água livre em fase líquida; entre as temperaturas de 270°C e 480°C, a presença de matéria orgânica; picos endotérmicos nas temperaturas aproximadas de 560°C caracterizam a presença de hidroxilas, ou seja, a transformação de quartzo α em quartzo β e a desidroxilação da caulinita e da mica; nas temperaturas máximas de 850°C, ocorreram picos endotérmicos relacionados à presença de carbonatos de cálcio ou de calcita, que segundo Souza (2008), o carbonato de cálcio pode alterar o comportamento mecânico dos corpos-de-prova e; nas temperaturas em torno de 910°C ocorreu a nucleação de mulitas.

c) Blocos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

A Figura 6.36 ilustra as curvas DTA dos blocos convencionais de solo-cimento, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente.

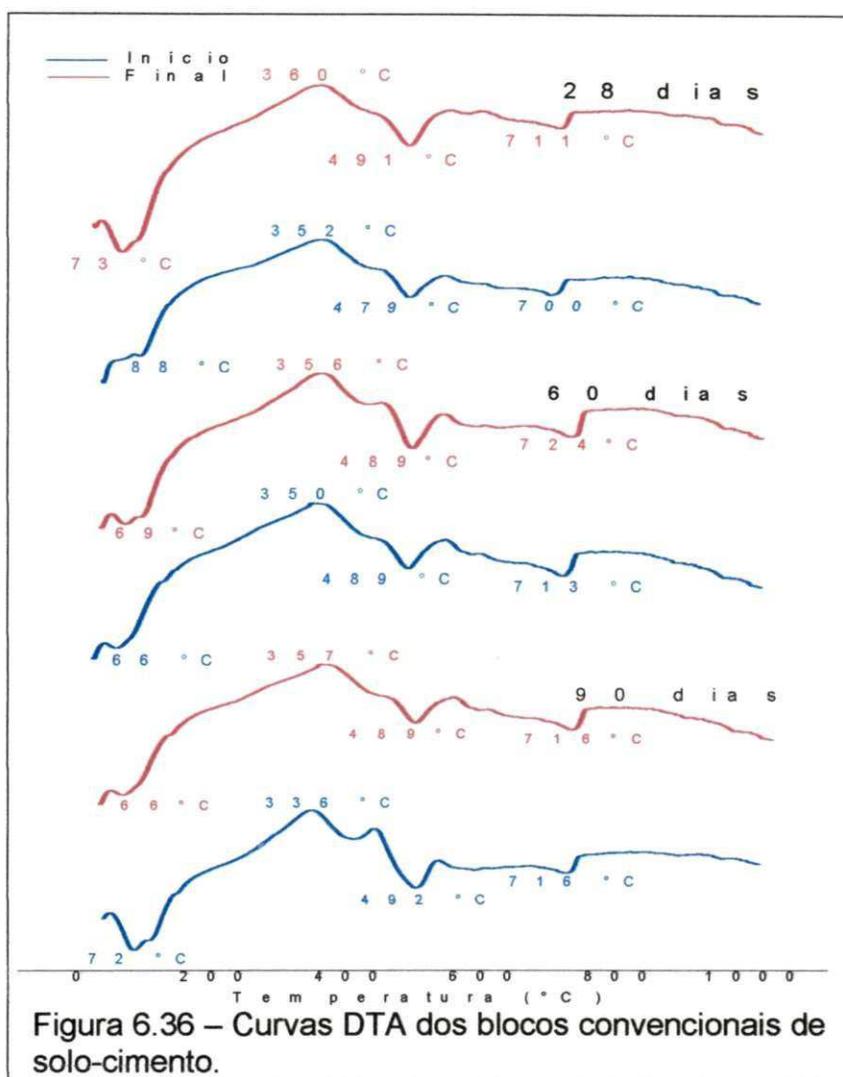


Figura 6.36 – Curvas DTA dos blocos convencionais de solo-cimento.

Analisando a curva DTA na Figura 6.36, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 88°C, caracterizando a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 352°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 479°C, correspondente a presença de

brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico de pequena intensidade a 700°C , caracterizado pela presença do carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.36, aos 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se na curva DTA um pico endotérmico de pequena intensidade em torno de 73°C , o que caracterizou a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 360°C , caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de intensidade muito pequena a 491°C correspondente presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), respectivamente, verificou-se também um pico endotérmico na temperatura máxima de 711°C , correspondente à presença de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Analisando o termograma na Figura 6.36, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se na curva DTA a presença de um pico endotérmico na temperatura máxima de 66°C , caracterizando água livre; um pico exotérmico na temperatura de 350°C , caracterizando a perda de matéria orgânica; um pico endotérmico na temperatura de 489°C , caracterizando a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico na temperatura de 713°C caracteriza a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3).

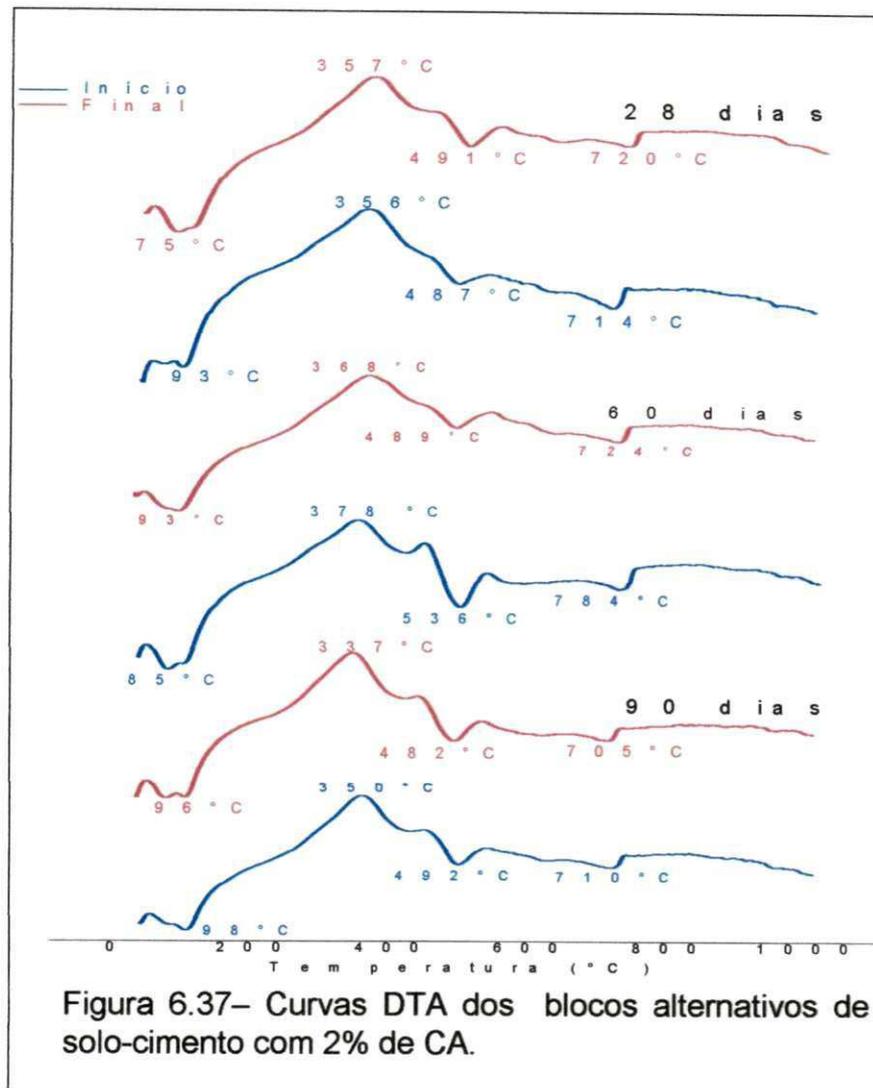
Na Figura 6.36, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se que a curva DTA apresentou um pico endotérmico na temperatura máxima de 69°C , caracterizando água livre; um pico exotérmico na temperatura de 356°C , caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 489°C , caracterizando a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico na temperatura de 724°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Observando a curva DTA na Figura 6.36, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a presença de um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 72°C , caracterizando a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 336°C , caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de

pequena intensidade na temperatura de 492°C, correspondente a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico de pequena intensidade a 716°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.36, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se na curva DTA um pico endotérmico de pequena intensidade em torno de 66°C, o que caracterizou a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 357°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de intensidade muito pequena a 489°C correspondente a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), respectivamente, observou-se um pico endotérmico de pequena intensidade a 716°C, correspondente à presença de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.37, são apresentadas as curvas DTA dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente.



Analisando a curva DTA na Figura 6.37, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 93°C, referente à perda de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 356°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 487°C, correspondente a presença de brucita ($Mg(OH)_2$) e portlandita ($Ca(OH)_2$) respectivamente; pico endotérmico na temperatura máxima de 714°C, referente à presença do carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

Na Figura 6.37, aos 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se que a curva DTA apresentou um pico endotérmico de pequena intensidade em torno de 75°C, o que caracterizou a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 357°C, caracterizando a

presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de intensidade muito pequena a 491°C correspondente presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), respectivamente, observou-se um pico endotérmico de pequena intensidade a 720°C, correspondente à presença de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.37, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se que a curva DTA apresentou um pico endotérmico na temperatura máxima de 85°C, caracterizando a perda de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 378°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 536°C, caracterizando a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico na temperatura de 784°C caracteriza a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3).

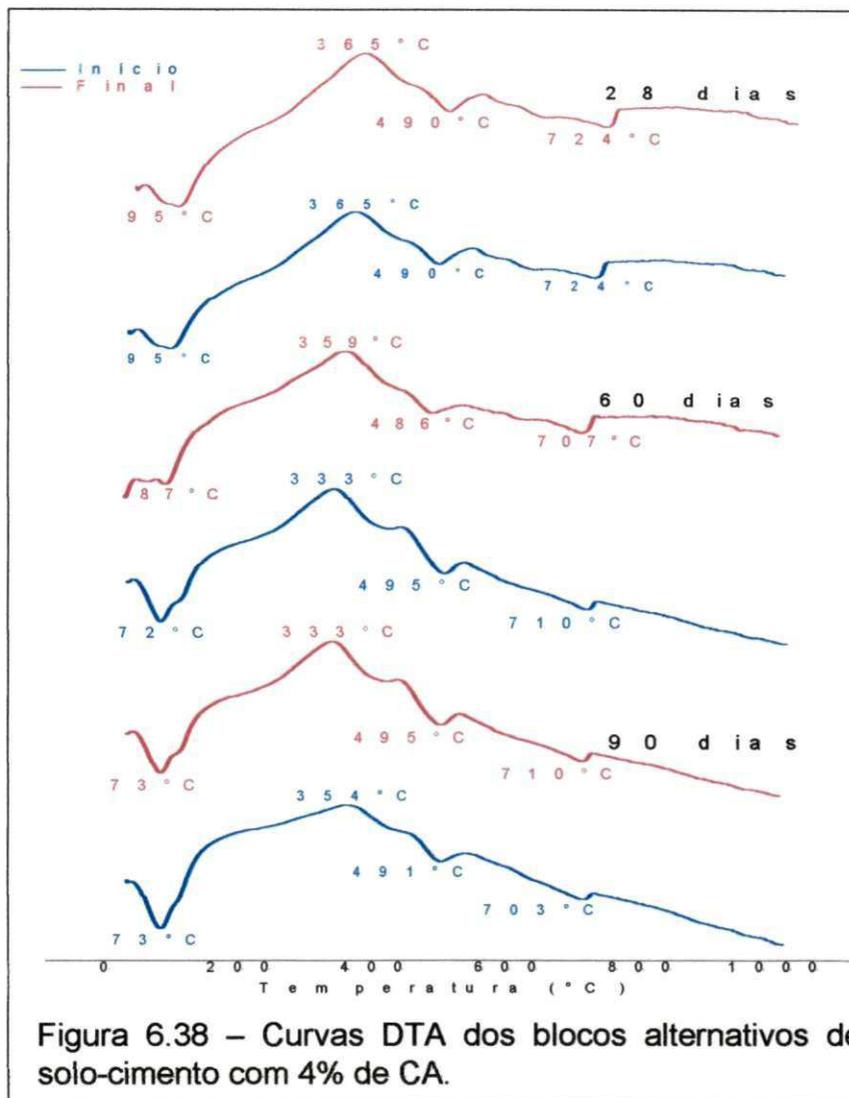
Na Figura 6.37, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se na curva DTA um pico endotérmico na temperatura máxima de 93°C, caracterizando água livre; um pico exotérmico na temperatura de 368°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; um pico endotérmico na temperatura de 489°C, caracterizando a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico na temperatura de 724°C caracteriza a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Observando a curva DTA na Figura 6.37, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 98°C, caracterizando a perda de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 350°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 492°C, correspondente a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico de pequena intensidade a 710°C, correspondente à presença do carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.37, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se na curva de DTA a presença de um pico endotérmico de pequena intensidade em torno de 96°C, o que caracterizou a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 337°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de

intensidade muito pequena a 482°C correspondente presença de brucita ($Mg(OH)_2$) e portlandita ($Ca(OH)_2$), respectivamente, observou-se um picos endotérmico na temperatura máxima de 705°C, correspondente à presença de carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

A Figura 6.38 ilustra as curvas DTA dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura, respectivamente.



Observando a curva DTA na Figura 6.38, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 95°C, caracterizando a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 365°C,

caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 490°C, correspondente a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico de pequena intensidade a 724°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.38, aos 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se que a curva de DTA a presença de um pico endotérmico de pequena intensidade em torno de 95°C, o que caracteriza a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 365°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de intensidade muito pequena a 490°C correspondente a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), respectivamente, observou-se um pico endotérmico na temperatura máxima de 724°C, correspondente à presença de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.38, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se que a curva DTA apresentou um pico endotérmico na temperatura máxima de 72°C, caracterizando a perda de água livre; um pico exotérmico na temperatura de 333°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 495°C, caracterizando a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; um pico endotérmico na temperatura de 710°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.38, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se na curva DTA, um pico endotérmico na temperatura máxima de 87°C, caracterizando perda de água livre; um pico exotérmico na temperatura de 359°C, caracterizando a perda de matéria orgânica; pico endotérmico na temperatura de 486°C, caracterizando a presença de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e portlandia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) respectivamente; pico endotérmico na temperatura de 707°C caracterizando a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Analisando a curva DTA na Figura 6.38, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 73°C, caracterizando a presença de

água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 354°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de pequena intensidade na temperatura de 491°C, correspondente a presença de brucita ($Mg(OH)_2$) e portlandita ($Ca(OH)_2$) respectivamente; pico endotérmico na temperatura máxima de 703°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

Na Figura 6.38, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se na curva DTA a presença de um pico endotérmico de pequena intensidade em torno de 73°C, o que caracterizou a presença de água livre; um pico exotérmico na temperatura máxima de 333°C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico de intensidade muito pequena a 495°C correspondente a presença de brucita ($Mg(OH)_2$) e portlandita ($Ca(OH)_2$), respectivamente, observou-se um pico endotérmico de pequena intensidade a 710°C, correspondente à presença de carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

Analisando as curvas DTA referente aos ensaios realizados com blocos convencionais e alternativos de solo-cimento com e sem casca de arroz, verificou-se que durante os períodos de cura e os ciclos de molhagem e secagem, os gráficos apresentaram picos endotérmicos de pequena intensidade entre as temperaturas 66 °C e 98 °C, caracterizando a perda de água livre, sendo que os picos de temperaturas mais elevadas foram observados no início dos ciclos de molhagem e secagem. As análises apresentaram picos exotérmicos de pequenas intensidades ou bandas exotérmicas nas temperaturas entre 333 °C e 378 °C, referente à perda de matéria orgânica. Segundo SOUZA SANTOS (1989) em ilitas provenientes de sedimentos ou folhelhos, geralmente, contêm associados matéria orgânica (cuja combustão produz pico exotérmico entre 200 °C e 400 °C. Foram apresentados picos endotérmicos de pequenas intensidade na faixa de temperaturas de 479 °C a 536 °C, caracterizando a presença de brucita ($Mg(OH)_2$) e de portlandita ($Ca(OH)_2$) e; picos endotérmicos de pequenas intensidades entre as temperaturas de 700 °C a 784 °C, correspondente à presença do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) provavelmente proveniente do cimento Portland em forma de adição (filler calcário) e da carbonatação da amostra durante a preparação para o ensaio.

6.2.4.3. Análises termogravimétrica (TGA) e termogravimétrica derivada (DTGA)

a) Corpos-de-prova (CPs) cilíndricos confeccionados com solo mais a combinação de cimento e casca de arroz, após 28 dias de cura.

Na Figura 6.39, estão ilustradas as curvas TGA/DTGA para os CPs convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento incorporados com 2% e 4% de casca de arroz (CA), início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

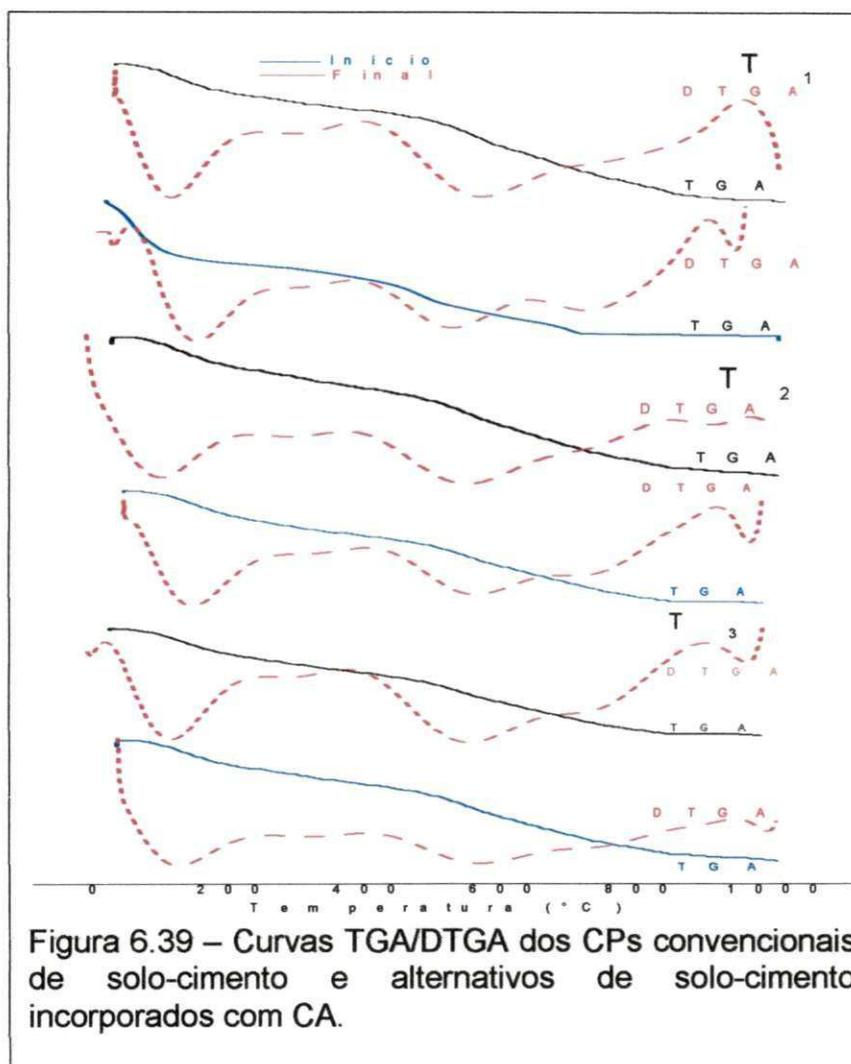


Figura 6.39 – Curvas TGA/DTGA dos CPs convencionais de solo-cimento e alternativos de solo-cimento incorporados com CA.

A Tabela 6.20 apresenta os dados de decomposição térmica dos CPs convencionais de solo-cimento, curados por períodos de 28 dias e submetidos aos ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 6.20 – Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	28 - 253	110	5,54
	2	253 - 388	309	1,93
	3	388 - 579	528	5,28
	4	639 - 789	727	2,89
Final	1	34 - 220	109	4,62
	2	220 - 385	301	1,98
	3	385 - 580	556	5,79
	4	580 - 783	744	3,18

Analisando as curvas de TGA/DTGA da Figura 6.39 e os dados da curva de TGA apresentados na Tabela 6.20, referente ao traço T₁, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 5,54%, nas temperaturas entre 28°C e 253°C, com máxima de perda de massa na temperatura de 110°C, que pode ser atribuída à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa 1,93%, entre as temperaturas de 253°C a 388°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 309°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,28%, na faixa de temperaturas de 388°C a 579°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 528°C, devido à de hidroxilas da portlandita (Ca(OH)₂); perda de massa de 2,89%, entre as temperaturas de 639°C a 789°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 727°C, devido à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃). A perda de massa total foi de 15,64%.

Observando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.39 e dados da curva de TGA apresentados na Tabela 6.20, referente ao traço T₁, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 4,62%, na faixa de temperaturas entre 34°C e 220°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 109°C, devido à evaporação de água livre e adsorvida;

perda de massa de 1,98%, entre as temperaturas de 220°C a 383°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 301°C, devido à perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,79%, nas temperaturas de 385°C a 580°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 556°C, oriunda da desidroxilação da mica; perda de massa de 3,18%, entre as temperaturas de 580°C a 783°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 744°C, conseqüente da decomposição do carbonato de CaCO₃. A perda de massa total foi de 15,57%.

A Tabela 6.21 mostra os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 28 dias.

Tabela 6.21 – Dados de decomposição térmica de CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperatura (°C)	Temperatura de pico(°C)	Perda de massa (%)
Início	1	29 - 237	121	6,33
	2	237 - 382	318	2,55
	3	382 - 605	556	4,79
	4	605 - 789	660	2,75
Final	1	31 - 223	95	6,17
	2	223 - 388	286	2,80
	3	388 - 593	538	4,54
	4	593 - 789	733	3,00

Nas curvas de TGA/DTGA referente ao traço T₂ ilustradas na Figura 6.39, e os dados da curva de apresentados na Tabela 6.21, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 6,33%, entre as temperaturas de 29°C a 237°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 121°C, conseqüente da evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,55%, entre a faixa de temperaturas de 237°C e 382°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 318°C, referente à perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,79%, nas temperaturas de 382°C a 605°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 556°C, devido à

desidroxilação da mica; perda de massa de 2,75%, na faixa de temperaturas de 605°C a 789°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 660°C, devido à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total foi de 16,42%.

Observando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.39 e os dados apresentados na Tabela 6.21, referente ao traço T₂, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 6,37%, entre a faixa de temperaturas de 31°C a 223°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 95°C, conseqüente da evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,80%, nas temperaturas de 223°C a 388°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 286°C, referente à perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,54%, nas temperaturas de 388°C a 593°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 538°C, devido à desidroxilação da mica; perda de massa de 3,00%, entre as temperaturas de 593°C a 789°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 733°C, devido à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total foi de 16,51%.

A Tabela 6.22 mostra os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 28 dias.

Tabela 6.22 - Dados de decomposição térmica de CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de composição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de picos (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	28 - 237	115	7,97
	2	237 - 387	309	2,95
	3	387 - 575	539	4,12
	4	575 - 802u	736	2,83
Final	1	27 - 234	109	7,52
	2	234 - 385	298	3,05
	3	385 - 603	561	4,22
	4	603 - 792	733	3,18

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.39 e os dados da curva de TGA apresentados na Tabela 6.22 referente ao traço T₃, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 7,97%, na faixa de temperaturas de 28°C a 237°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 115°C, que pode ser atribuída à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,95%, entre as temperaturas de 237°C a 387°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 309°C, devido à perda de matéria orgânica, perda de massa de 4,12%, nas temperaturas de 387°C a 575°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 539°C, oriunda da desidroxilação da mica; perda de massa de 2,83%, na faixa de temperaturas de 603°C e 792°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 736°C, referente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total foi de 17,87%.

Nas curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.39 e os dados da curva de TGA apresentados na Tabela 6.22, referente ao traço T₃, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se uma perda de massa de 7,52%, entre as temperaturas de 27°C a 234°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 109°C, devido à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 3,05%, na faixa de temperaturas de 234°C a 385°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 298°C, referente à decomposição de matéria orgânica; perda de massa de 4,22%, na faixa de temperaturas de 385°C a 603°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 561°C, devido à perda de hidroxilas; perda de massa de 3,18%, entre as temperaturas de 603°C a 792°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 733°C, correspondente a descarbonatação do CaCO₃. A perda de massa total foi de 17,97%.

Analisando as curvas de análise termogravimétrica (TGA) e Termogravimétrica Derivada (DTGA) apresentadas na Figura 6.39, foram verificado perda de massa, água livre e adsorvida, entre as temperaturas de 27°C e 253°C; matéria orgânica, entre temperaturas de 220°C e 388°C; desidroxilação da mica, nas temperaturas entre 382°C e 605°C, decomposição do carbonato de cálcio, no intervalo de temperatura entre 575°C e 802°C; nas temperaturas entre 802 e 1.000 °C ocorre a nucleação de mulita através da

sintetização em altas temperaturas dos óxidos como SiO_2 e Al_2O_3 (CAVALCANTI, *et al.*, 2006).

Nos valores apresentados nas curvas de TGA na Tabelas 6.20, 6.21 e 6.22 e ilustradas na Figura 6.39 observou-se que as perdas de matéria orgânica foram sempre superiores nos finais dos ensaios de durabilidade.

Nas curvas de análise termogravimétrica (TGA), no final dos ensaios de durabilidade, todos os traços estudados apresentaram percentuais de perda de massa superiores aos percentuais encontrados no início do processo de molhagem e secagem, exceto os CPs convencionais de solo-cimento sem adição de CA. Observou-se também que, as composições com adição de casca de arroz apresentaram maiores percentuais de perda de massa em relação às composições sem a incorporação da casca de arroz, após os períodos de cura e durante o processo de envelhecimento acelerado.

b) Corpos-de-prova (CPs) cilíndricos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz substituindo percentuais do solo, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

Na Figura 6.40, estão apresentadas as curvas TGA/DTGA para os CPs convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura.

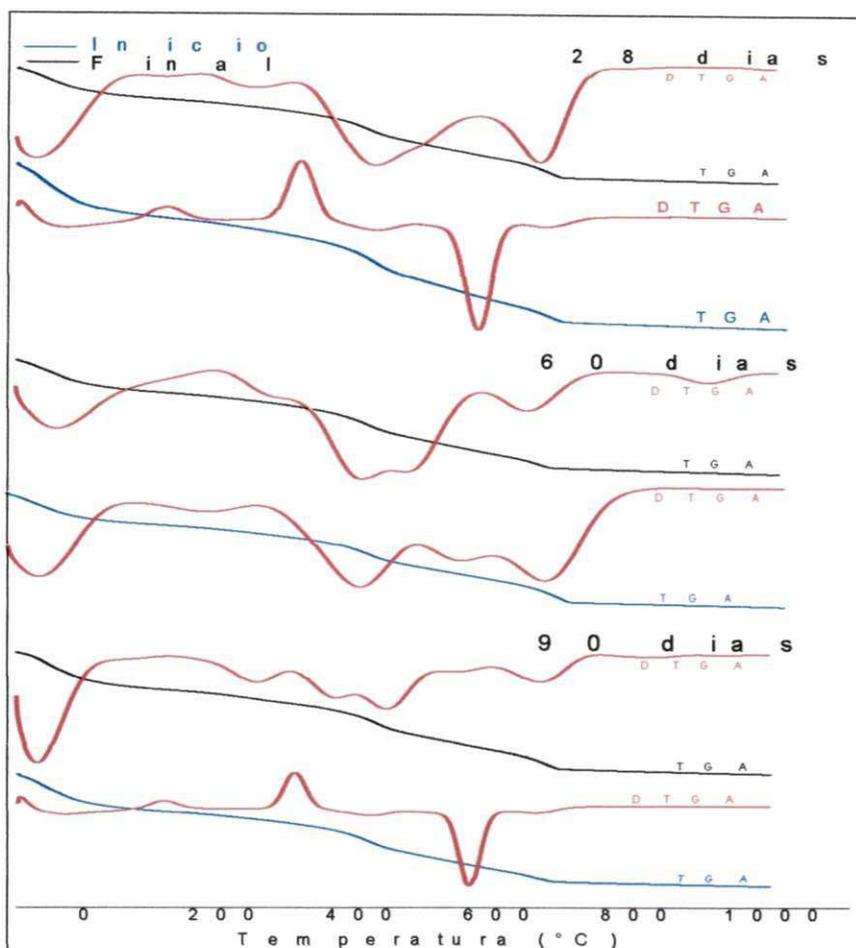


Figura 6.40 - Curvas TGA/DTGA dos CPs convencionais de solo-cimento.

Os dados de decomposição térmica dos CPs convencionais de solo-cimento, curados por períodos de 28 dias, estão apresentados na Tabela 6.23.

Tabela 6.23 – Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	28 - 219	112	5,38
	2	219 - 388	306	1,97
	3	388 - 605	561	5,61
	4	605 - 799	702	2,89
Final	1	31 - 237	112	5,48
	2	237 - 376	301	1,99
	3	376 - 634	547	5,33
	4	634 - 805	747	2,81

Analisando as curvas TGA/DTGA da Figura 6.40 e dados da curva de TGA da Tabela 6.23, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se a perda de massa de 5,38%, entre as temperaturas de 28°C a 219°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 112°C, correspondente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 1,97%, nas temperaturas de 219°C a 388°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 306°C, referente à perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,61%, entre a faixa de temperaturas de 388°C a 605°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 561°C, devido à desidroxilação da mica; perda de massa de 2,89%, na faixa de temperaturas de 605°C a 799°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 702°C, devido à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,81%.

Nas curvas TGA/DTGA representadas na Figura 6.40, e dados da curva de TGA da Tabela 6.23, após 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se perda de massa de 5,48%, entre as temperaturas de 31°C a 237°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 112°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 1,99%, no intervalo de temperaturas entre 237°C e 376°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 301°C, devido à perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,33%, na faixa de temperaturas entre 376°C e 634°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 547°C, oriunda da perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,81%, nas temperaturas de 634°C a 805°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 747°C, conseqüente da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,61%.

A Tabela 6.24 apresenta os dados de decomposição térmica dos CPs convencionais de solo-cimento, curados por períodos de 60 dias.

Tabela 6.24 – Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	25 - 228	112	5,35
	2	228 - 399	311	2,01
	3	399 - 609	557	5,49
	4	609 - 803	743	2,91
Final	1	31 - 243	110	4,95
	2	243 - 405	305	2,03
	3	405 - 602	441	5,48
	4	602 - 806	734	2,95

Analisando as curvas de TGA/DTGA da Figura 6.40 e dados da curva de TGA da Tabela 6.24, após 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 5,35%, no intervalo de temperaturas entre 25°C e 228°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 112°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,01%, na faixa de temperaturas de 228°C a 399°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 311°C, oriunda da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,49%, entre as temperaturas de 399°C a 609°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 557°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,91%, nas temperaturas de 609°C a 803°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 743°C, conseqüente da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,76%.

Nas curvas TGA/DTGA ilustrada na Figura 6.40 e dados da curva de TGA da Tabela 6.24, após 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se perda de massa de 4,95%, na faixa de temperaturas entre 31°C e 243°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 110°C, devido à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,03%, nas temperaturas de 243°C a 405°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 305°C, referente à perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,48%, no intervalo de temperaturas entre 405°C e 602°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 441°C, conseqüente à perda de

hidroxilas da mica; perda de massa de 2,95%, nas temperaturas de 602°C a 806°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 734°C, oriunda da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,41%.

Na Tabela 6.25 estão apresentados os dados de decomposição térmica dos CPs convencionais de solo-cimento, curados por períodos de 90 dias.

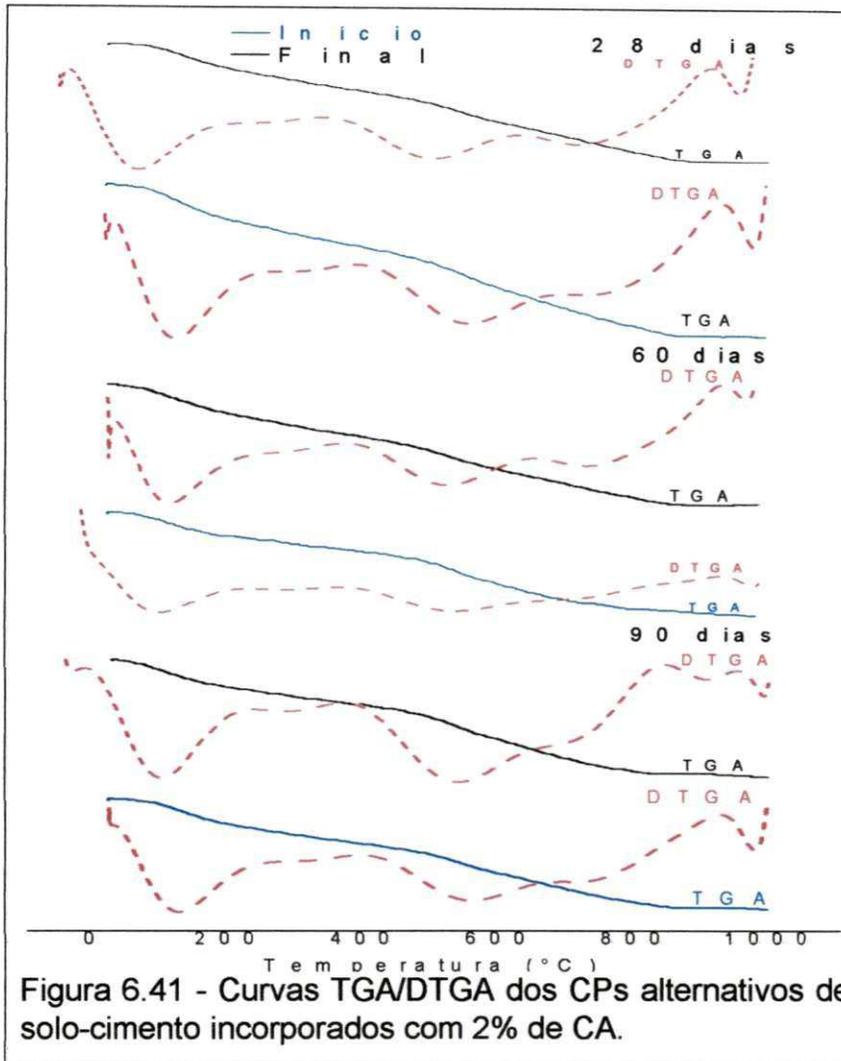
Tabela 6.25 – Dados de decomposição térmica de CPs convencionais, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após dias 90 de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	31 - 214	120	4,97
	2	214 - 382	322	2,02
	3	382 - 608	558	5,35
	4	608 - 801	715	3,07
Final	1	30 - 245	115	4,87
	2	245 - 391	304	2,12
	3	391 - 599	561	4,97
	4	599 - 798	727	2,95

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.40 e dados da curva de TGA da Tabela 6.25, após 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 4,97%, entre as temperaturas de 31°C e 214°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 120°C, oriunda da evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,02%, no intervalo de temperaturas entre 214°C e 382°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 322°C, referente à perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,35%, nas temperaturas de 382°C a 608°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 558°C, devido à desidroxilação da mica; perda de massa de 3,03, na faixa de temperaturas entre 608°C e 801°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 715°C, conseqüente da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,47%.

Observando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.40 e dados da curva de TGA da Tabela 6.25, após 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 4,87%, entre as temperaturas de 30°C a 245°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 115°C, referente à evaporação de matéria orgânica; perda de massa de 2,12%, no intervalo de temperaturas entre 245°C e 391°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 304°C, devido à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 4,97%, nas temperaturas de 391°C a 599°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 561°C, conseqüente da perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,95%, na faixa de temperaturas de 599°C a 798°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 727°C, oriunda da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,91%.

Na Figura 6.4,1 estão ilustradas as curvas TGA/DTGA para os CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz (CA), início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura.



A Tabela 6.26 mostra os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 28 dias.

Tabela 6.26 – Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	30 - 245	115	7,25
	2	245 - 391	304	2,53
	3	391 - 606	561	4,33
	4	606 - 798	727	1,99
Final	1	32 - 245	117	5,97
	2	245 - 404	311	2,57
	3	404 - 604	553	5,03
	4	604 - 803	729	2,45

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.41 e dados da curva de TGA da Tabela 6.26, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 7,25%, nas temperaturas entre 30°C e 245°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 115°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,53%, no intervalo de temperaturas entre 245°C e 391°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 304°C, devido à perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,33%, na faixa de temperaturas de 391°C a 606°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 561°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 1,99%, nas temperaturas de 606°C a 798°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 727°C, conseqüente da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,10%.

Analisando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.41 e dados da curva de TGA da Tabela 6.26, aos 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se perda de massa de 5,97%, entre as temperaturas de 32°C e 245°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 117°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,57%, no intervalo de temperaturas entre 245°C e 404°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 311°C, oriunda da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,03%, na faixa de temperaturas entre

404°C e 604°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 553°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,45%, nas temperaturas de 604°C a 803°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 729°C, conseqüente da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,02%.

A Tabela 6.27 mostra os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 60 dias.

Tabela 6.27 – Dados de decomposição térmica de CPs alternativos com adição de 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	25 - 214	109	6,53
	2	214 - 385	292	2,58
	3	385 - 602	541	4,31
	4	602 - 799	730	2,61
Final	1	31 - 225	113	5,49
	2	225 - 388	301	2,61
	3	388 - 599	539	4,23
	4	599 - 800	744	3,64

Analisando as curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.41 e dados da curva de TGA da Tabela 6.27, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se a perda de massa de 6,53%, no intervalo de temperaturas entre 25°C e 214°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 109°C; referente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,58%, entre as temperaturas de 214°C, a 385°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 292°C, oriunda da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,31%, na faixa de temperaturas de 385°C a 602°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 541°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,61%, nas temperaturas de 602°C a 799°C, com a máxima de perda de massa na

temperatura de 730°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,03%.

Observando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.41 e dados da curva de TGA da Tabela 6.27, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 5,49%, entre as temperaturas de 31°C a 225°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 113°C, correspondente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,61%, no intervalo de temperaturas entre 225°C e 388°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 301°C, devido à perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,23%, na faixa de temperaturas entre 388°C e 599°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 539°C, referente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 3,64%, nas temperaturas de 599°C a 800°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 744°C, conseqüente da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,97%.

Na Tabela 6.28 estão apresentados os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 90 dias.

Tabela 6.28 – Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.

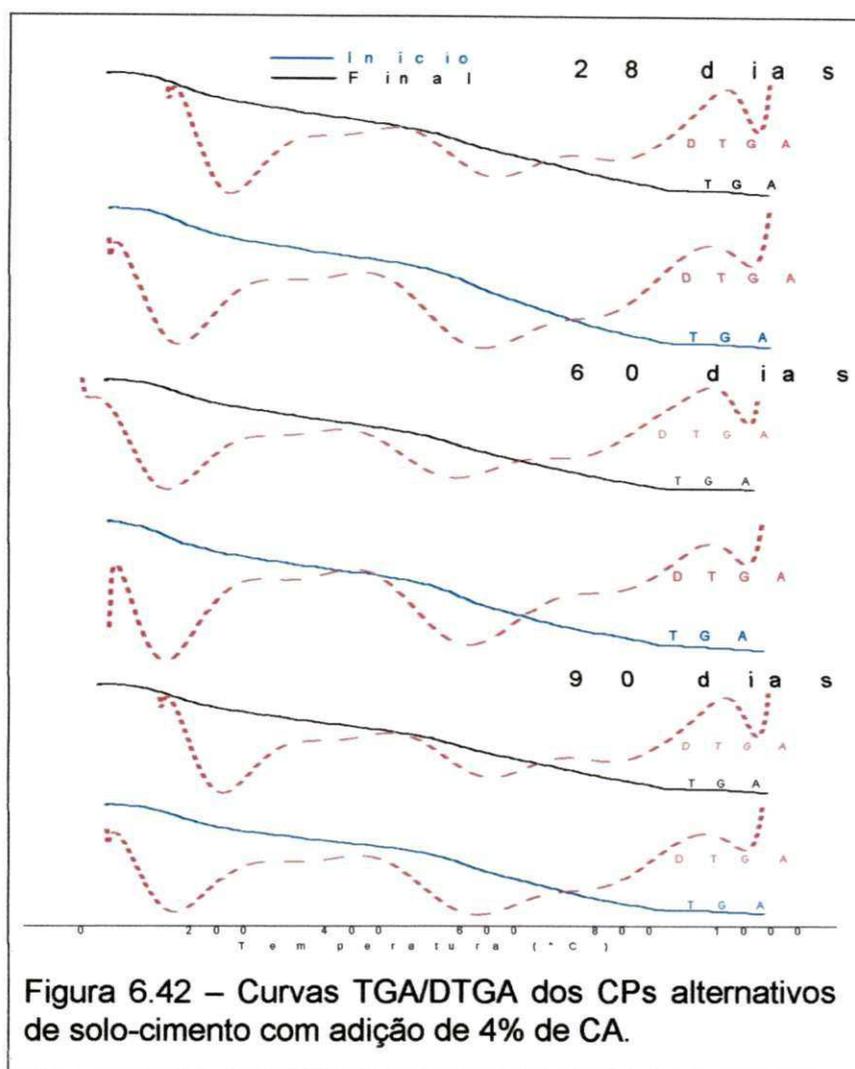
Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	28 - 231	119	7,49
	2	231 - 402	309	2,58
	3	402 - 604	550	3,85
	4	604 - 799	724	2,07
Final	1	31 - 243	117	5,32
	2	243 - 396	318	2,68
	3	396 - 602	553	4,88
	4	602 - 799	735	3,64

Nas curvas de TGA/DTGA mostradas na Figura 6.41, e dados da curva de TGA da Tabela 6.28, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de

molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 7,49%, no intervalo de temperaturas entre 28°C e 231°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 119°C, conseqüente da evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,58%, entre as temperaturas de 231°C a 402°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 309°C, devido à perda de matéria orgânica; perda de massa de 3,85%, na faixa de temperaturas entre 402°C e 604°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 550°C, referente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,07%, nas temperaturas de 604°C a 799°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 724°C, referente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,99%.

Observando as curvas TGA/DTGA apresentadas na Figura 6.41 e dados da curva de TGA da Tabela 6.28, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 5,32%, na faixa de temperaturas entre 31°C e 243°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 117°C, referente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,68%, entre as temperaturas de 243°C a 396°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 318°C, oriunda da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,88%, no intervalo de temperaturas entre 396°C e 602°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 553°C, referente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 3,64%, nas temperaturas de 602°C a 799°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 735°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,97%.

Na Figura 6.42, ilustra as curvas TGA/DTGA para os CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz (CA), início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura.



Os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 28 dias, estão apresentados na Tabela 6.29.

Tabela 6.29 – Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	31 – 246	112	5,59
	2	246 - 399	315	2,63
	3	399 - 596	573	4,58
	4	596 -788	736	3,70
Final	1	32 - 277	115	5,29
	2	277 - 396	351	2,65
	3	396 - 601	574	5,81
	4	601 - 798	725	2,53

Observando as curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.42 e dados da curva de TGA da Tabela 6.29, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 5,59%, entre as temperaturas de 31°C a 246°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 112°C, devido à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,63%, na faixa de temperaturas entre 246°C e 399°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 315°C, correspondente a perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,58%, no intervalo de temperaturas entre 399°C e 596°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 573°C, referente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 3,70%, nas temperaturas de 596°C a 788°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 736°C, oriunda da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,50%.

Nas curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.42 e dados da curva de TGA da Tabela 6.29, aos 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 5,29%, no intervalo de temperaturas entre 32°C e 277°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 115°C, correspondente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,65%, entre as temperaturas de 277°C a 396°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 351°C, oriunda da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,81%, na faixa de temperaturas de 396°C a 601°C, com a

máxima de perda de massa na temperatura de 574°C, referente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,53%, nas temperaturas de 601°C a 798°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 725°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,28%.

Na Tabela 6.30 estão apresentados os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 60 dias.

Tabela 6.30 – Dados de decomposição térmica de CPs alternativos incorporados com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	28 - 243	109	5,98
	2	243 - 399	298	2,64
	3	399 - 593	561	4,13
	4	593 - 802	718	2,41
Final	1	25 - 243	110	5,35
	2	243 - 388	298	2,68
	3	3878 - 599	557	5,15
	4	599 - 799	720	2,89

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.42 e dados da curva de TGA da Tabela 6.30, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 5,98%, no intervalo de temperaturas entre 28°C e 243°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 109°C, devido à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,64%, entre as temperaturas de 243°C a 399°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 298°C, correspondente a perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,13%, na faixa de temperaturas entre 399°C e 593°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 561°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,41%, nas temperaturas de 593°C a 802°C, com a máxima de perda de massa na

temperatura de 718°C, oriunda da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,16%.

Nas curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.42 e dados da curva de TGA da Tabela 6.30, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se perda de massa de 5,35%, na faixa de temperaturas de 25°C a 243°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 110°C, referente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,68%, entre as temperaturas de 243°C a 388°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 298°C, oriunda da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,15%, no intervalo de temperaturas entre 388°C e 599°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 557°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,89%, nas temperaturas de 599°C a 799°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 720°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,07%.

A Tabela 6.31 mostra os dados de decomposição térmica dos CPs alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de casca de arroz (CA), curados por períodos de 90 dias.

Tabela 6.31 – Dados de decomposição térmica de CPs alternativos com 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	25 - 231	105	6,49
	2	231 - 399	289	2,69
	3	399 - 605	558	4,22
	4	605 - 794	738	2,83
Final	1	34 - 266	109	5,81
	2	266 - 385	289	2,98
	3	385 - 599	559	4,93
	4	599 - 802	743	2,63

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.42 e dados da curva de TGA da Tabela 6.31, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 6,49%, entre as

temperaturas de 25°C a 231°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 105°C, correspondente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,69%, na faixa de temperaturas entre 231°C e 399°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 289°C, referente à perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,22%, no intervalo de temperaturas entre 399°C e 605°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 558°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,83%, nas temperaturas de 605°C a 794°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 738°C, oriunda da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,23%.

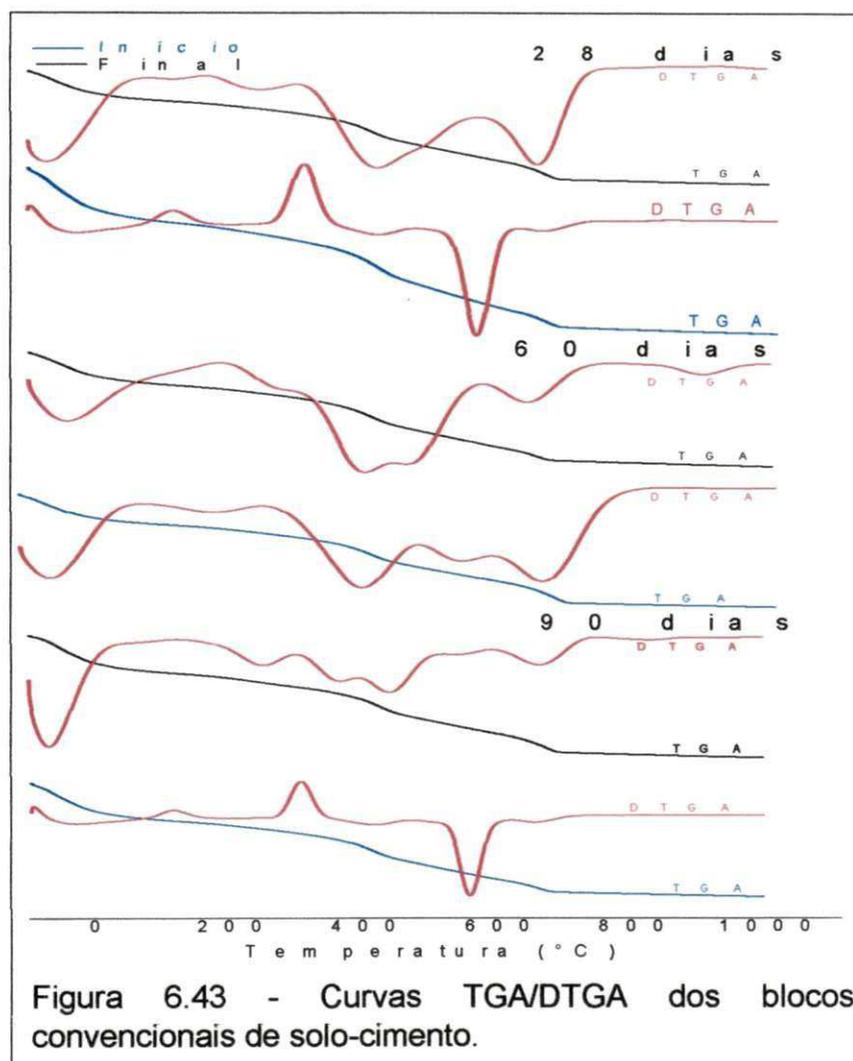
Observando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.42 e dados da curva de TGA da Tabela 6.31, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 5,81%, intervalo de temperaturas entre 34°C e 266°C, com o máximo de 109°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,98%, na faixa de temperaturas de 266°C a 385°C, com o máximo de 289°C, correspondente a perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,93%, nas temperaturas de 385°C a 599°C, com o máximo de 559°C, devido à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,63%, no intervalo de temperaturas entre 599°C e 802°C, com o máximo de 743°C, correspondente à descarbonização de cálcio (CaCO_3). A perda de massa total é em torno de 16,35%.

De acordo com as análises das curvas de TGA dos CPs convencionais e alternativos de solo-cimento e casca de arroz apresentadas nas Tabelas 6.29, 6.30 e 6.31 e na Figura 6.42, observou-se a presença de quatro faixas de decomposição térmica e foram feitas as seguintes observações: no final de cada ensaio de durabilidade os CPs, de forma geral, apresentaram valores de perda de matéria orgânica superiores aos valores obtidos nos inícios dos ensaios; os CPs com adição de casca de arroz apresentaram resultados de perda de matéria orgânica superiores aos resultados obtidos nos blocos convencionais de solo-cimento sem adição da casca de arroz; aos 90 dias de cura, a perda de matéria orgânica dos CPs, em geral, foram maiores do que os períodos de 28 e 60 dias e; no final dos ciclos de molhagem e secagem, os valores totais de perda de massa dos CPs

convencionais e alternativos foram superiores aos valores obtidos no início dos ciclos.

c) Blocos confeccionados com solo-cimento e casca de arroz, após os períodos de 28, 60 e 90 dias de cura.

A Figura 6.43 ilustra as curvas TGA/DTGA dos blocos convencionais de solo-cimento, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura.



A Tabela 6.32 mostra os dados de decomposição térmica dos blocos convencionais de solo-cimento, curados por períodos de 28 dias.

Tabela 6.32 – Dados de decomposição térmica de blocos convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	32 - 230	76	5,48
	2	230 - 391	321	1,80
	3	391 - 543	467	4,27
	4	661 - 735	695	1,62
Final	1	30 - 218	74	4,62
	2	218 - 387	318	1,98
	3	388 - 543	467	4,82
	4	650 - 743	697	2,91

Nas curvas TGA/DTGA representadas na Figura 6.43 e dados da curva de TGA da Tabela 6.32, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se a perda de massa de 5,48%, na faixa de temperaturas de 32°C a 230°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 76°C, que pode ser atribuída à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 1,80%, na faixa de temperaturas entre 230°C e 391°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 321°C, conseqüente da decomposição de matéria orgânica; perda de massa de 4,27%, entre as temperaturas de 391°C e 543°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 467°C, devido à desidroxilação da mica; perda de massa de 1,62%, no intervalo de temperaturas entre 661°C e 735°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 695°C, devido à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 13,17%.

Analisando as curvas TGA/DTGA da Figura 6.43 e dados da curva de TGA da Tabela 6.32, aos 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se a perda de massa de 4,62%, entre as temperaturas de 30°C e 218°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 74°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 1,98%, nas temperaturas de 218°C a 387°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 318°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,82 na faixa de temperaturas entre 388°C e 543°C, com a máxima

de perda de massa na temperatura de 467°C, referente à desidroxilação da mica; perda de massa de 2,91%, entre as temperaturas de 650°C a 743°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 697°C, devido à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 14,33%.

Na Tabela 6.33 estão os dados de decomposição térmica dos blocos convencionais de solo-cimento, curados por períodos de 60 dias.

Tabela 6.33 – Dados de decomposição térmica de blocos convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	31 - 227	76	4,87
	2	227 - 386	320	1,85
	3	386 - 554	465	4,8
	4	645 - 756	701	3,36
Final	1	30 - 223	78	4,90
	2	223 - 386	318	2,00
	3	386 - 537	461	4,76
	4	645 - 730	684	1,98

Observando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.43 e dados da curva de TGA da Tabela 6.33, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 4,87%, na faixa de temperaturas de 31°C a 227°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 76°C, que pode ser atribuída à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 1,85%, nas temperaturas de 227°C a 386°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 320°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,80%, na faixa de temperaturas entre 386°C e 554°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 465°C, referente à desidroxilação da mica; perda de massa de 3,36%, nas temperaturas de 645°C a 756°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 701°C, oriunda da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 14,88%.

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.43 e dados da curva de TGA da Tabela 6.33, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 4,90%, entre as temperaturas de 30°C a 223°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 78°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,00%, nas temperaturas de 223°C a 386°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 318°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,76%, entre as temperaturas de 386°C a 537°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 461°C, devido à desidroxilação da mica; perda de massa de 1,98%, na faixa de temperaturas entre 645°C a 730°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 684°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 13,64%.

Os dados de decomposição térmica dos blocos convencionais de solo-cimento, curados por períodos de 90 dias, estão apresentados na Tabela 6.34.

Tabela 6.34 – Dados de decomposição térmica de blocos convencionais de solo-cimento, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.

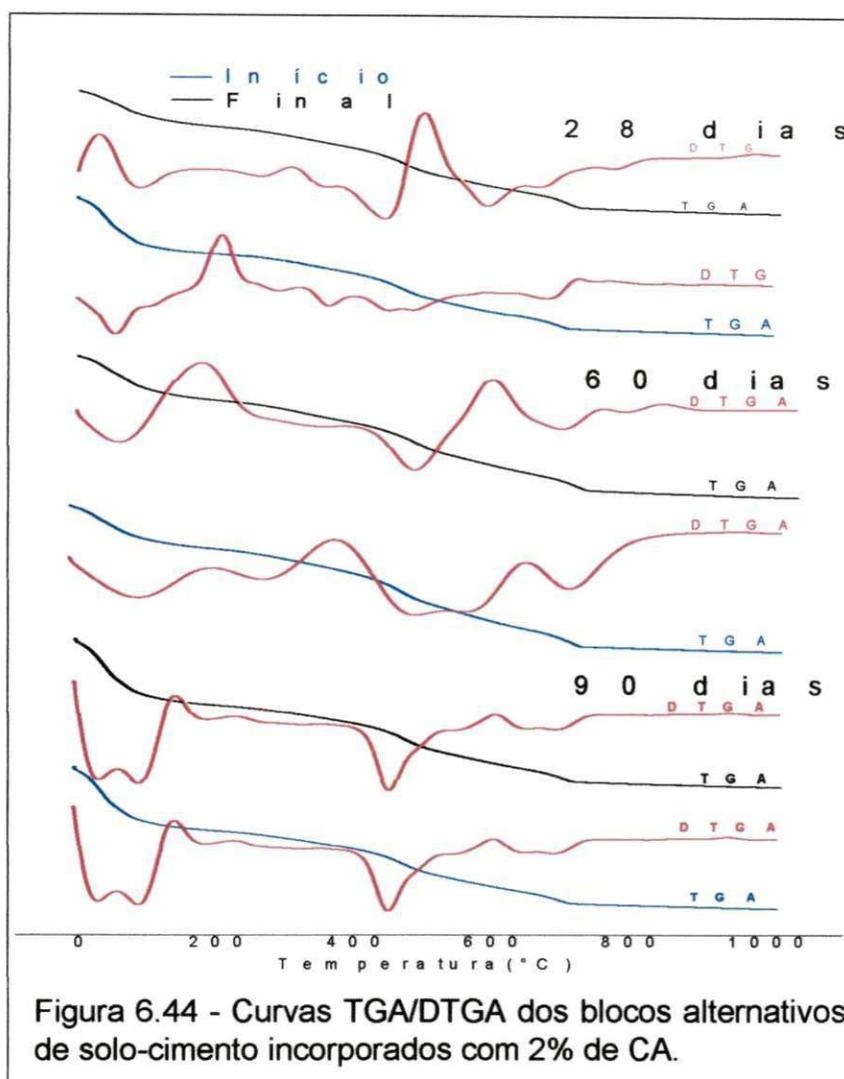
Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	27 - 229	75	5,23
	2	229 - 380	305	1,87
	3	380 - 551	467	4,82
	4	638 - 748	670	3,30
Final	1	27 - 232	77	5,57
	2	232 - 393	297	2,07
	3	393 - 596	475	5,58
	4	648 - 740	697	2,71

Nas curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.43 e dados da curva de TGA da Tabela 6.34, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se pequena perda de massa de 5,23%, entre as temperaturas de 27°C a 229°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 75°C, referente à evaporação de água livre e adsorvida; perda

de massa de 1,87%, na faixa de temperaturas entre 229°C a 380°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 305°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,82%, entre as temperaturas de 380°C a 551°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 467°C, devido à desidroxilação da mica; perda de massa de 3,30%, nas temperaturas de 638°C a 748°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 670°C, conseqüente da decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,22%.

Analisando as curvas de TGA/DTGA da Figura 6.43 e dados da curva de TGA da Tabela 6.34, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 5,57%, entre as temperaturas de 27°C a 232°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 77°C, conseqüente da evaporação de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,07%, na faixa de temperaturas de 232°C a 393°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 297°C, que pode ser atribuída à decomposição de matéria orgânica; perda de massa de 5,58%, no intervalo de temperaturas entre 393°C e 596°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 475°C, referente à desidroxilação da mica; perda de massa de 2,71%, entre as temperaturas de 648°C a 740°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 697°C, devido à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,93%.

Na Figura 6.44, estão apresentadas as curvas TGA/DTGA dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA, ao início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após os 28, 60 e 90 dias de cura.



A Tabela 6.35 mostra os dados de decomposição térmica dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 2% de CA, curados por períodos de 28 dias.

Tabela 6.35 – Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 2% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	25 - 218	70	7,7
	2	218 - 411	286	2,53
	3	411 - 546	469	4,00
	4	641 - 735	686	1,86
Final	1	31 - 229	86	5,40
	2	229 - 384	314	2,57
	3	384 - 557	463	5,19
	4	649 - 749	696	2,41

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.44 e dados da curva de TGA da Tabela 6.35, e na Tabela 6.34, aos 28 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 7,70%, nas temperaturas de 25°C e 218°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 70°C, correspondente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,53%, entre as temperaturas de 218°C a 411°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 286°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,00%, nas temperaturas de 411°C a 546°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 469°C, correspondente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 1,86%, na faixa de temperaturas entre 641°C e 735°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 686°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,09%.

Analisando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.44 e dados da curva de TGA da Tabela 6.35, aos 28 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se perda de massa de 5,40%, entre a faixa de temperaturas de 31°C a 229°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 86°C, correspondente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,57%, entre as temperaturas de 229°C a 384°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 314°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,19%, nas temperaturas de 384°C a

393°C a 540°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 460°C, correspondente à desidroxilação da mica; perda de massa de 2,54%, na faixa de temperaturas de 651°C a 741°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 695°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 15,02%.

Na Tabela 6.39 estão apresentados os dados de decomposição térmica dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA, curados por períodos de 60 dias.

Tabela 6.39 – Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 60 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)	Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	25 - 220	75	6,10
	2	219 - 386	301	2,68
	3	386 - 577	462	5,33
	4	645 - 740	691	2,20
Final	1	31 - 205	73	4,80
	2	205 - 384	302	3,56
	3	384 - 542	452	5,29
	4	640 - 736	690	2,97

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.45 e dados da curva de TGA da Tabela 6.39, aos 60 dias de cura, início dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 6,10%, entre as temperaturas de 25°C a 220°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 75°C, correspondente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,68%, na faixa de temperaturas de 219°C a 386°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 301°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,33%, entre as temperaturas de 386°C a 577°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 462°C, correspondente à desidroxilação da mica; perda de massa de 2,20%, na faixa de temperaturas de 645°C a 740°C, com a máxima de perda de massa na

temperatura de 691°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,31%.

Nas curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.45 e dados da curva de TGA da Tabela 6.39, aos 60 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, observou-se perda de massa de 4,80%, entre as temperaturas de 31°C a 205°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 73°C, que pode ser atribuída à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 3,56%, entre as temperaturas de 205°C a 384°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 302°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 5,29%, nas temperaturas de 384°C a 542°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 452°C, correspondente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 2,97%, entre temperaturas de 640°C a 736°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 690°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,62%.

Os dados de decomposição térmica dos blocos alternativos de solo-cimento incorporados com 4% de CA, curados por períodos de 90 dias, estão apresentados na Tabela 6.40.

Tabela 6.40 – Dados de decomposição térmica de blocos alternativos de solo-cimento e 4% de CA, início e final dos ciclos de molhagem e secagem, após 90 dias de cura.

Amostra	Etapas de decomposição	Faixas de temperaturas (°C)		Temperatura de pico (°C)	Perda de massa (%)
Início	1	25	218	70	7,7
	2	218	411	286	2,53
	3	411	546	469	4,00
	4	641	735	686	1,86
Final	1	25	223	72	7,70
	2	223	402	292	3,07
	3	402	566	474	4,93
	4	643	734	688	2,18

Nas curvas de TGA/DTGA representadas na Figura 6.45 e dados da curva de TGA da Tabela 6.40, aos 90 dias de cura, início dos ciclos de

molhagem e secagem, verificou-se a perda de massa de 7,70%, entre as temperaturas de 25°C a 218°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 70°C, correspondente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 2,53%, nas temperaturas de 218°C a 411°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 286°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,00%, na faixa de temperaturas de 411°C a 546°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 469°C, correspondente à perda de hidroxilas da mica; perda de massa de 1,86%, nas temperaturas de 641°C a 735°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 686°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 16,09%.

Observando as curvas TGA/DTGA ilustradas na Figura 6.45 e dados da curva de TGA da Tabela 6.40, aos 90 dias de cura, final dos ciclos de molhagem e secagem, verificou-se perda de massa de 7,70%, entre as temperaturas de 25°C a 223°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 72°C, correspondente à perda de água livre e adsorvida; perda de massa de 3,07%, nas temperaturas de 223°C a 402°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 292°C, conseqüente da perda de matéria orgânica; perda de massa de 4,93%, na faixa de temperaturas de 402°C a 566°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 474°C, correspondente à desidroxilação da mica; perda de massa de 2,18%, entre a faixa de temperaturas de 643°C a 734°C, com a máxima de perda de massa na temperatura de 688°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio. A perda de massa total é em torno de 17,88%.

Conforme os dados de decomposição térmica dos blocos mostrados nas Tabelas 6.32 a 6.40 e as curvas de TGA e DTGA ilustradas na Figura 6.45, os valores de decomposição da matéria orgânica apresentados no final dos ensaios de molhagem e secagem foram superiores aos valores obtidos no início do processo, como também, os valores de perda de massa total dos blocos alternativos de solo-cimento com adição de casca de arroz foram maiores do que os apresentados pelos blocos convencionais de solo-cimento sem adição de casca de arroz.

7. CONCLUSÕES

Após análises e interpretações dos resultados, chegou-se as seguintes conclusões:

- os corpos-de-prova cilíndricos convencionais confeccionados e alternativos (incorporados com 2% e 4% de casca de arroz), com casca de arroz, apresentaram valores de resistência à compressão simples superiores comparados aos corpos-de-prova confeccionados com 90% de solo mais a combinação de 10% de cimento e casca de arroz;

- considerando os materiais utilizados, a metodologia e os resultados obtidos nos ensaios preliminares dos corpos-de-prova, para produção de blocos optou-se pela combinação do solo substituído pelo teor de 2% e 4% de casca de arroz estabilizado com 10% de cimento Portland, por apresentar valores satisfatórios de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade;

- nos ensaios de durabilidade aplicados durante os ciclos de molhagem e secagem nos blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, verificou-se que os valores de perda de massa e variação de volume aumentaram em consequência do aumento do teor de casca de arroz, entretanto, estiveram dentro dos limites preconizados pela norma NBR 13553 (ABNT, 1996);

- a degradabilidade só foi percebida a partir do quinto ciclo de molhagem e secagem, sendo que até o quarto ciclo de cada etapa verificou-se um incremento de resistência à compressão simples;

- nos ensaios de caracterização, os resultados de DRX confirmaram os resultados obtidos nos ensaios de térmica diferencial e termogravimetria, não foi possível identificar surgimentos de novas fases cristalinas, mas observou-se perda de massa final dos ciclos de molhagem e secagem;

- de acordo com o comportamento mecânico os blocos alternativos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, a melhor combinação encontrada neste trabalho para a fabricação de blocos, foi o traço T₂, 10% de cimento mais a combinação solo e casca de arroz (88% de solo e 2% de casca de arroz);

- o material utilizado na produção desses blocos mostrou-se promissor como material alternativo para construção civil, uma vez que racionaliza o uso do solo e minimiza o descarte da casca de arroz em condições e locais inadequados.

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para prosseguimento deste trabalho recomenda-se a realização de uma pesquisa aprofundada sobre os aspectos técnicos da durabilidade, velocidade de onda ultra-sônica e propriedades termofísicas dos blocos de solo-cimento e casca de arroz;

- Fazer uma avaliação do envelhecimento natural de blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz e comparar com o processo de envelhecimento acelerado;

-Avaliar a durabilidade de corpos-de-prova e blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz através de câmara climatizada em diversas condições de temperaturas e umidade relativa e;

- Construir protótipos em alvenaria utilizando blocos de solo-cimento incorporados com casca de arroz, para verificar as condições de construção e o estudo sobre o conforto térmico e acústico.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502**. Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6508** - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

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

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

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

_____. **NBR 7182** - Análise de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 7251** - Agregado em Estado Solto –Determinação da Massa Unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 10004** - Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10832** - Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 10834** – Bloco Vazado de Solo-Cimento sem Função Estrutural. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 10836** – Bloco Vazado de Solo-Cimento sem Função Estrutural – Determinação da Resistência à Compressão e da Absorção de Água. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 11578** - Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12023** – Solo-cimento: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12024** – Solo-Cimento – Moldagem e cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12025** - Ensaio de Compressão Simples de Corpo-de-Prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 13553** – Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 13554** - Ensaio de Durabilidade por Molhamento e Secagem. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 13555** - Determinação da Absorção d'Água. Rio de Janeiro, 1996.

AKASAKI, J. L.; SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; BARBOSA, M. B. **Influência da Adição de cinza de Casca de Arroz nos Tempos de Pega e Retração por Secagem**. Foz de Ilha Solteira/SP: UNESP, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensa manual**. – São Paulo, 1985.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DAS EMPRESAS INOVADORAS - ANPEL. **Pirelli desenvolve pneu obtido de casca de arroz**. São Paulo: 18 de fevereiro de 2010.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R. **Estudos com terra Crua**. In: Seminário Ibero Americano de Construção com Terra. Salvador/BA: Anais. Projeto Proterra – CD-ROM, 2002.

CAMPOS, I. M. **Solo-cimento, Solução para Economia e Sustentabilidade.** Fórum Mundial da construção. IBDA – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento de Arquitetura, 2008 - <http://www.forumdaconstrucao.com.br>

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** Rio de Janeiro: [s.n.], 1983.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos.** 2ª ed. Campina Grande/PB: Editora Gráfica Marcone, 2004. EMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 15 a 19 de novembro de 2006.

CAVALCANTI, D. G. L.; SANTANA, C. N. L.; LIMA, S. J. G.; NEVES, A. G.; LIRA, H. L. **Identificação de Mulita através de Caracterização Microestrutural de Composições Formadas pela Sintetização de Resíduos de Caulim, Ball Clay e Alumina.** Foz do Iguaçu/PR: 17º CB

CRISTELO, Nuno M. C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal.** Dissertação de Mestrado. Braga/PT: Universidade do Minho, 2001.

DELGADO, M. C. J.; GUERRERO, I. C. **The Selection of Soils for Unstabilised Earth Building: a normative review.** Construction and Building Materials. N. 21, 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.

DELLA, V. P. **Processamento e Caracterização de sílica ativa Obtida a Partir de Cinzas de Casca de Arroz.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis-SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte alternativa de Sílica**. Cerâmica Industrial, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Ministério da Agricultura, pecuária e abastecimento. (Pesquisa realizada em 2008). www.cnpaf.embrapa.br/arroz/historia.

FARIAS FILHO, J. de. **Estudo da Durabilidade de Argamassas Alternativas Produzidas de Resíduos de Construção e Granito**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Campina Grande/PB: Universidade Federal de Campina Grande – Centro de Ciências e Tecnologia, 2007.

FÁVARO, S. L.; LOPES, M. S.; CAMPESE, G.; RADOVANOVIC, E. **Preparação de Compósitos de Polietileno Pós-Consumo com Cascas de Arroz e Estudo de suas Propriedades Físico-Químicas e Morfológicas**. Foz do Iguaçu/PR: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006.

FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-panéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. Tese (Doutorado em construção Rural e Ambientação) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

FERREIRA, Carlos S. **Desenvolvimento do processo de obtenção de filme polimérico a partir da cinza da casca de arroz**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis/SC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

FERREIRA, R. C.; SILVA, E. M.; FREIRE, W. J. **Tijolos prensados de solo-cimento em alvenaria aparente auto-portante no “Conjunto Nossa Morada”**, Goiânia-GO. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3, 2003, São Carlos-SP. Anais... São Paulo: [s.n.] CD-ROM.

FERREIRA, R. C.; OLIVEIRA, M. F. **Incorporação de resíduos vegetais e seus efeitos sobre o desempenho físico-mecânico de solo-cimento.** In: Congresso Latino-Americano y Del Caribe de Ingenieria Agrícola, 7., 2006, Chillán. Proceedings...Ciudad Del México: ALIA, 2006. 1 CD-ROM.

FERREIRA, R. C.; OLIVEIRA, M. F. **Incorporação de resíduos vegetais e seus efeitos sobre o desempenho físico-mecânico de solo-cimento para fins de construção rural.** Pesq. Agropec 37(4): 204-213. Goiânia-Go: UFG, dezembro de 2007. www.agro.ufg.br/pat

FERREIRA, R. C.; FALEIRO, H. T; FREIRE, W. J. **Desempenho Físico-Mecânico de Solo Argiloso Estabilizado com Cal e Silicato de Sódio Visando aplicação em Construção Rural.** Campinas/SP: Revista de Pesquisa Agropecuária Tropical, 35 (3), 2005.

FRANÇA, F. C. **Estabilização Química de Solos para Fins Rodoviários: estudo de caso com produto "RBI GRADE 81".** Tese de Doutorado. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2003.

FREITAS, Elaine de Souza. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil.** 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Rio de Janeiro. 2005.

HWANG, C. L., CHANDRA, S. **The use of rice husk ash in concrete.** In: Chandra, S. (ed), Waste materials used in concrete manufacturing, New Delhi: Standard Publishers Distributors, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (Pesquisa realizada em 2008) – www.ibge.gov.br

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (Pesquisa realizada em abril de 2011) – www.ibge.gov.br

ISAIA, G. C. **Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões sobre o tema.** In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. **Anais...** São José dos Campos: ANTAC, 2001.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T. A. **Durabilidade de Compósitos de Cimentos e Fibras Vegetais.** III Seminário Internacional Durabilidade de Materiais, Componentes e Estruturas. PCC-USP São Paulo, Julho/1997

JOHN, V. M.; SATO, N. M. N.; AGOPYAN, V.; SJÖSTRÖM, C. **Durabilidade e sustentabilidade: desafios para a construção civil brasileira.** In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. **Anais...** São José dos Campos: ANTAC, 2001.

KLEIN, D. L.; KLEIN, G. M. B.; LIMA, R. C. A. **Sistemas Construtivos Inovadores: Procedimentos de Avaliação.** Porto Alegre - RS: II Seminário de Patologia das Edificações: "Novos Materiais e Tecnologias Emergentes". 18 a 19 de novembro de 2004.

KRISHNARAO, R.; SUBRAHMANYAN, J.; JAGADISH, K. T. **Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash.** Journal of the European Ceramic Society, 21. 2001. Disponível no site: www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc >. Acesso em: 12 de maio- 2008.

LEIRIAS, H. S.; FERREIRA, H. C.; CONCIANI, W. **Estudo da influência da cinza da casca de arroz na massa de argila para produção de blocos cerâmicos de 8 furos.** I Seminário Mato-Grossense de Habitação de Interesse Social. Anais. Cuiabá/MT, 2005.

LIMA, R. C. O. **Estudo da Durabilidade de Paredes Monolíticas e Tijolos de Solo-Cimento incorporados com resíduos de Granito.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Campina Grande/PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

LIMA, T. V.; ALEXANDRE, J. **Influência do Tipo de solo na produção de blocos scológicos (solo-cimento).** In: Conferência Brasileira sobre Materiais

e Tecnologias Não-Convencionais na construção Ecológica e Sustentável. Salvador-BA: Anais. ABMTENC. CD-ROM. NOCMAT, 2006.

LOPES, W.G.R. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 165 p., 2002.

MACHADO, C. C.; SANT'ANA, G. L.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; ALMEIDA, A.; OLIVEIRA, T. **Durabilidade de Solos Estabilizados Quimicamente com Vistas à Aplicação em Estradas Florestais**. Viçosa/PB: Revista Árvore v. 30, n.6, 2006.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. **Gestão Energética, Econômica e Ambiental do Resíduo Casca de Arroz em Pequenas e Médias Agroindústrias de Arroz**. XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 06 a 08 de novembro de 2006.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação**. Juiz de Fora/MG: Faculdade de Engenharia – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2010.

MARTINEZ, R. G. **Placas Pré-Moldadas de Argamassa Armada e Casca de Arroz**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2003.

MARTINEZ, R. G.; FERREIRA, H. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; NOGUEIRA, J. S. **Placa de argamassa composta com casca de arroz para painéis de fechamento vertical em habitações populares**. I Seminário Mato-Grossense de Habitação de Interesse Social. Cuiabá/MT, 2005.

MARTINEZ, R. G. **Placas Pré-Moldadas de Argamassa Armada e Casca de Arroz**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande/PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

MATEUS, E. **Efeitos do Envelhecimento Acelerado e do Dano Mecânico Induzido no Desempenho e Durabilidade de Alguns Geossintético.** Tese de Doutorado. Publicação GTD – 010A / 02. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2002.

MELLACE, R. F.; ALDERETE, C. F.; ARIAS, L. E. **Centro regional de investigaciones de tierra cruda.** In: SEMINÁRIO IBERO AMERICANO DE CONSTRUÇÃO COM TERRA, 1.,2002, Salvador. **Anais...**Salvador: Projeto PROTERRA. Cd-rom.

MILANI, A. P. S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de cal adicionado de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambientação) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MILANI, A. P. S. **Avaliação Física, Mecânica e Térmica do Material Solo-Cimento-Cinza de Casca de Arroz e seu Desempenho como Parede Monolítica.** Tese de Doutorado. Campinas/SP: UNICAMP, 2008.

MILANI, A. P. S. E FREIRE, W. J. **Características Físicas e Mecânicas de misturas de Solo, Cimento e Casca de arroz.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n.1, p.1-10, 2006.

MITSUUCHI, T. M. *et al.* **Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz (CCA) Obtida Através de um Processo de Combustão não controlada.** Mendoza/Argentina: XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. Facultad de Ingenieria – Universidad Nacional de Cuyo, 17 a 21 de mayo de 2004.

MORAIS, A. S. **Estudo das Características de Resistência do Solo-Cimento Plástico e Aplicação em Estacas Moldadas In Loco.** Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira/SP: Universidade Estadual Paulista, 2002.

MUSSATTO, S. I.; ROBERTO, I. C.; **Produção Biotecnológica de Xilitol a Partir da Palha de Arroz.** Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento - nº 28- setembro/outubro 2002.

NEVILLE, A. **Consideration of durability of concrete structures: past, present and future.** Materials and Structures. New York, v.34, n. 236, p. 114-118, 2001.

OLIVEIRA, **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Blocos de Concreto Produzidos com a Utilização de Entulho da Construção Civil.** Campina Grande/PB: Tese de Doutorado – Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal de Campina Grande, 2004.

PEROZZI, Mariana. **Brasil pode gerar 200 megawatts de energia com a casca de arroz.** Site: www.arroz.agr.br (Pesquisado em 20/08/2009).

PIMENTEL, L. L.; BERALDO, A. L.; SAVASTANO JR, H. **Durabilidade de Compósito Biomassa Vegetal-Cimento Modificado por Polímero.** Joticabal/SP: Rev. Eng. Agrícola - v. 26, n 2, maio/agosto de 2006.

POSSAN, E.; VENQUIARUTO, S. D.; MOLIN, D. C. C. **Adição de Cinza de Casca de Arroz no concreto: benefícios de durabilidade.** ENTECA – VI Encontro de Tecnologia da Engenharia Civil e Arquitetura, 2007.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento de Cinza de Casca de Arroz residual com vista à Produção de Cimento Composto e/ou Pozolânico.** Porto Alegre/RS: Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

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/RS: Coletânea Habitar/ANTAC, 2003.

RODRIGUES, M. S. **Caracterização de Cinza Residual da Queima de Casca de Arroz para a Produção de Argamassa**. Campinas/SP: Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, 2008.

ROJAS, J. W. J.; CONSOLIK, N. C.; HEINECK, K. S. **Durabilidad de un Suelo Contaminado y Tratado con Cemento Portland**. Revista Ingenieria de Construccion. Vol. 23, n.3, decembre de 2008.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira (SP)**. (Tese de Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000.

SILVA, A. C. **Estudo da Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras de Celulose**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Civil, 2002.

SILVA, S. R. **Tijolos de Solo-Cimento Reforçado com Serragem de Madeira**. 219 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SOUZA, J. **Estudo da durabilidade de blocos utilizando cinza e casca de arroz**. Campina Grande/PB: Doutorado em Engenharia de Processos – UFCG, 2006.

_____ **Estudo da durabilidade de agarmassas e blocos de concreto para alvenaria não estrutural utilizando cinzas e casca de arroz**. Campina Grande/PB: Doutorado em Engenharia de Processos – UFCG, 2008.

SOUZA, H. A.; OLIVEIRA, I. S; ROCHA, R. **Sistema de controle de temperatura e umidade para um ambiente construído**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica – Cusco, 23 a 25 de Outubro 2007.

SOUZA, S. M. T.; BARBOSA, N. P. **Estabilização Granulométrica de Solo para a Confecção de Tijolos Prensados de Terra Crua.** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Salvador/BA: **Anais.** [s. n]. 2000. 1 CD-ROM.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas.** 2ª Ed. São Paulo: Editora Edgard, 1989. Vol. 1.

TOJAL, J. H. V. **Termorregulação de Eqüinos em uma construção Rural feita com Blocos Vazados de Argamassa de Cimento, Areia e Casca de Arroz.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. Campinas/SP: Faculdade de Engenharia Agrícola de Universidade Estadual de Campinas, 2002.

VALENCIANO, M. DEL C. M. **Durabilidade de Compósitos Cimentícios com Materiais Lignocelulósicos.** Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas/SP: Universidade Estadual de Campinas, 2004.

VALENCIANO, M. DEL C. & FREIRE, W. J. **Características Físicas e Mecânicas de Misturas de Solo, Cimento e Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar.** Jaboticabal/SP: Revista de Eng. Agrícola, v. 24 nº 3, set/dez de 2004.

VISCONTE, L. L. Y. **Rejeitos Agrícolas em composições Poliméricas: cinza da casca de arroz.** Rio de Janeiro: IMA|UFRJ, 2003.

ZAHRANI, M. M.; MASLEHUDDIN, M.; DULAIJAN, S. U.; IBRAHIM, M. **Mechanical properties and durability characteristics of polymer and cement-based repair materials.** Cement & Concrete Composites, v. 25, in press, 2003.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. **Efeito da Adição de Cinza da Casca de Arroz em Misturas Cimento-Casca de Arroz.** Jaboticabal/SP: Revista de Engenharia Agrícola, v.28, n.2, p.217-226, abr./jun. 2008.

ANEXOS



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



Ref da amostra : Gelmires_Solo01
 Type produit : Argila
 Client : UFCG
 Comentários : Calibrado
 Líquido : Água
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Romualdo
 Empresa : UFCG
 Localização : Campina Grande - PB
 Data : 02/07/2009 Hora : 08:27:24
 Índice med. : 1305

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 173
 Diâmetro a 10% : 2.09 mu
 Diâmetro a 50% : ~~19.96~~ mu
 Diâmetro a 90% : 58.59 mu
 Diâmetro médio : 25.72 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/3
 SOP : Argila

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.21	0.61	0.83	1.71	2.88	3.53	3.75	3.90	4.09	4.37
q3	0.05	0.05	0.04	0.09	0.20	0.16	0.07	0.06	0.09	0.15
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	4.70	5.06	5.44	5.84	6.26	6.69	7.61	8.56	9.54	10.53
q3	0.19	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.48	0.56	0.65	0.72
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	11.51	12.47	13.41	14.31	15.19	16.03	16.84	17.62	18.38	19.47
q3	0.78	0.83	0.88	0.91	0.95	0.96	0.98	1.00	1.03	1.05
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	20.51	21.83	22.78	23.70	24.87	26.27	27.60	28.86	30.05	31.19
q3	1.07	1.10	1.13	1.16	1.18	1.22	1.25	1.27	1.28	1.31
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	32.27	34.32	36.23	38.03	39.73	41.34	42.89	44.39	45.84	47.27
q3	1.31	1.35	1.39	1.44	1.48	1.51	1.56	1.62	1.66	1.74
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	48.67	50.05	51.41	52.76	54.10	56.74	60.54	62.96	65.26	67.48
q3	1.80	1.87	1.94	2.02	2.09	2.20	2.33	2.44	2.48	2.54
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	69.62	71.68	73.70	76.65	78.58	83.32	85.91	88.25	90.92	92.61
q3	2.60	2.65	2.74	2.83	2.95	3.13	3.09	2.95	2.69	2.41
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	94.06	95.98	97.13	98.19	98.93	99.42	99.70	99.87	100.00	100.00
q3	2.17	1.83	1.46	1.14	0.85	0.60	0.36	0.23	0.08	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

1 - Corpos-de-prova de solo-cimento, substituindo parte do cimento por casca de arroz.

Amostra	Etapas de Decomposição	Faixas de Temperaturas (°C)	Temperatura de Pico (°C)	Perda de Massa (%)
ISC	1	28 - 253	110	5,54
	2	253 - 388	309	1,93
	3	388 - 579	528	5,28
	4	639 - 789	727	2,89
FSC	1	34 - 220	109	4,62
	2	220 - 385	301	1,98
	3	385 - 580	556	5,79
	4	580 - 783	744	3,18
ISCCA-2	1	29 - 237	121	6,33
	2	237 - 382	318	2,55
	3	382 - 605	556	4,79
	4	605 - 789	660	2,75
FSCC-2	1	31 - 223	95	6,17
	2	223 - 388	286	2,80
	3	388 - 593	538	4,54
	4	593 - 789	733	3,00
ISCCA-4	1	28 - 237	115	7,97
	2	237 - 387	309	2,95
	3	387 - 575	539	4,12
	4	575 - 802 _u	736	2,83
FSCCA-4	1	27 - 234	109	7,52
	2	234 - 385	298	3,05
	3	385 - 603	561	4,22
	4	603 - 792	733	3,18

2. Corpos-de-prova de solo-cimento, substituindo parte do solo por casca de arroz

Amostra	Etapas de Decomposição	Faixas de Temperaturas (°C)	Temperatura de Pico (°C)	Perda de Massa (%)
ISC-28	1	28 - 219	112	5,38
	2	219 - 388	306	1,97
	3	388 - 605	561	5,61
	4	605 - 799	702	2,89
FSC-28	1	31 - 237	112	5,48
	2	237 - 376	301	1,99
	3	376 - 634	547	5,33
	4	634 - 805	747	2,81
ISC-60	1	25 - 228	112	5,35
	2	228 - 399	311	2,01
	3	399 - 609	557	5,49
	4	609 - 803	743	2,91
FCS-60	1	31 - 243	110	4,95
	2	243 - 405	305	2,03
	3	405 - 602	441	5,48
	4	602 - 806	734	2,95
ICS-90	1	31 - 214	120	4,97
	2	214 - 382	322	2,02
	3	382 - 608	558	5,35
	4	608 - 801	715	3,07
FCS-90	1	30 - 245	115	4,87
	2	245 - 391	304	2,12
	3	391 - 599	561	4,97
	4	599 - 798	727	2,95
ICA2-28	1	30 - 245	115	7,25
	2	245 - 391	304	2,53
	3	391 - 606	561	4,33
	4	606 - 798	727	1,99
FCA2-28	1	32 - 245	117	5,97
	2	245 - 404	311	2,57
	3	404 - 604	553	5,03
	4	604 - 803	729	2,45
ICA2-60	1	25 - 214	109	6,53
	2	214 - 385	292	2,58
	3	385 - 602	541	4,31
	4	602 - 799	730	2,61
FCA2-60	1	31 - 225	113	5,49
	2	225 - 388	301	2,61
	3	388 - 599	539	4,23
	4	599 - 800	744	3,64

ICA2-90	1	28 - 231	119	7,49
	2	231 - 402	309	2,58
	3	402 - 604	550	3,85
	4	604 - 799	724	2,07
FCA2-90	1	31 - 243	117	5,32
	2	243 - 396	318	2,68
	3	396 - 602	553	4,88
	4	602 - 799	735	3,64
ICA4-28	1	31 - 246	112	5,59
	2	246 - 399	315	2,63
	3	399 - 596	573	4,58
	4	596 - 788	736	3,70
FCA4-28	1	32 - 277	115	5,29
	2	277 - 396	351	2,65
	3	396 - 601	574	5,81
	4	601 - 798	725	2,53
ICA4-60	1	28 - 243	109	5,98
	2	243 - 399	298	2,64
	3	399 - 593	561	4,13
	4	593 - 802	718	2,41
FCA4-60	1	25 - 243	110	5,35
	2	243 - 388	298	2,68
	3	388 - 599	557	5,15
	4	599 - 799	720	2,89
ICA4-90	1	25 - 231	105	6,49
	2	231 - 399	289	2,69
	3	399 - 605	558	4,22
	4	605 - 794	738	2,83
FCA4-90	1	34 - 266	109	5,81
	2	266 - 385	289	2,98
	3	385 - 599	559	4,93
	4	599 - 802	743	2,63

3. Blocos de solo-cimento casca de arroz, análise térmica

Amostras	Eventos	T _{inicial} (°C)	T _{final} (°C)	T _{pico} (°C)	Δmassa(%)
BCA 2	1	25	223	72	7,7
	2	223	402	292	3,07
	3	402	566	474	4,93
	4	643	734	688	2,18
BSC	1	23	208	65	8,8
	2	208	410	330	2,57
	3	410	536	469	3,95
	4	645	735	688	1,72
CA4 Augusto	1	25	218	70	7,7
	2	218	411	286	2,53
	3	411	546	469	4,0
	4	641	735	686	1,86
FACA 4	1	27	229	75	5,23
	2	229	380	305	1,87
	3	380	551	467	4,82
	4	638	748	670	3,3
FBCA 2	1	30	218	74	4,62
	2	218	387	318	1,98
	3	388	543	467	4,82
	4	650	743	697	2,91
FCA 2	1	31	229	86	5,4
	2	229	384	314	2,57
	3	384	557	463	5,19
	4	649	749	696	2,41
FCA 4	1	28	222	80	5,4
	2	222	393	324	2,58
	3	393	540	460	4,5
	4	651	741	695	2,54
FCSC	1	31	227	76	4,87
	2	227	386	320	1,85
	3	386	554	465	4,8
	4	645	756	701	3,36
FFSC	1	30	223	78	4,9
	2	223	386	318	2,0
	3	386	537	461	4,76
	4	645	730	684	1,98
FSC	1	29	211	80	5,22
	2	211	390	303	2,6
	3	390	544	464	4,88
	4	653	741	700	2,18
FSC Augusto	1	30	208	77	5,73
	2	208	393	301	2,53
	3	393	550	462	4,22
	4	651	758	700	2,69
ICCA 2	1	25	221	80	5,88
	2	221	385	301	2,58
	3	385	554	462	5,01
	4	658	734	692	1,89
ICMaug	1	31	205	73	4,8
	2	205	384	302	3,56

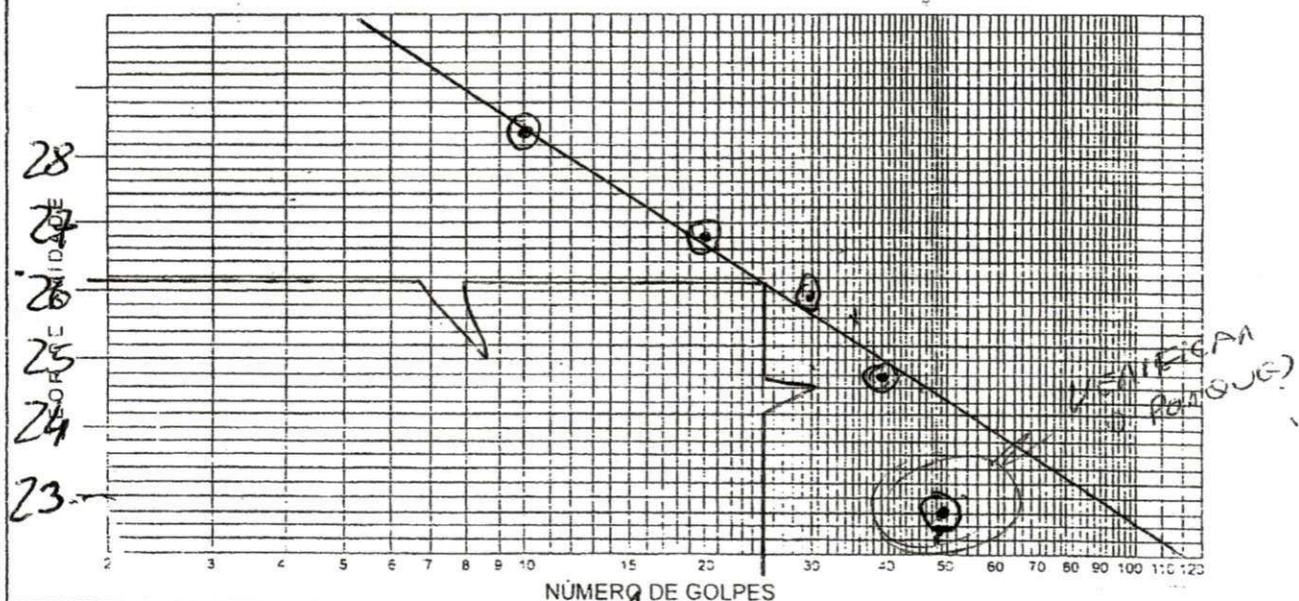
	3	384	542	452	5,29
	4	640	736	690	2,97
IEAC 2	1	25	220	75	6,1
	2	219	386	301	2,68
	3	386	577	462	5,33
	4	645	740	691	2,20
IEAC 4	1	27	232	77	5,57
	2	232	393	297	2,07
	3	393	596	475	5,58
	4	648	740	697	2,71
IFSC	1	32	230	76	5,48
	2	230	391	321	1,80
	3	391	543	467	4,27
	4	661	735	695	1,62
CA2	1	25	218	70	7,7
	2	218	411	286	2,53
	3	411	546	469	4,0
	4	641	735	686	1,86
IFCA 2	1	31	229	86	5,4
	2	229	384	314	2,57
	3	384	557	463	5,19
	4	649	749	696	2,41



ENSAIOS DE PLASTICIDADE

Identificação da Amostra:

LIMITE DE LIQUIDEZ						
1	CÁPSULA Nº	1	2	3	4	5
2	Nº DE GOLPES	10	20	30	40	50
3	PESO BRUTO ÚMIDO	16,93	15,61	14,63	13,19	15,75
4	PESO BRUTO SECO	15,27	14,31	13,55	12,41	14,37
5	TARA DA CÁPSULA	9,42	9,46	9,38	9,33	9,45
6	PESO DA ÁGUA	1,66	1,30	1,08	0,78	1,13
7	PESO DO SOLO SECO	5,85	4,85	4,17	3,08	4,92
8	UMIDADE	28,4	26,8	25,9	25,0	23,0



INÍCIO: 13/05 OPERAÇÃO: [Signature] VISTO: _____
 TÉRMINO: 14/05 CÁLCULO: [Signature] RESULTADO:
 LL = 26,8 %
 IP = 11,3 %

LIMITE DE PLASTICIDADE						
1	CÁPSULA Nº	6	7	8	9	10
2	PESO BRUTO ÚMIDO	10,46	10,34	10,20	10,45	11,70
3	PESO BRUTO SECO	10,30	10,19	10,08	10,31	10,20
4	TARA DA CÁPSULA	9,40	9,30	9,31	9,39	9,32
5	PESO DA ÁGUA	0,16	0,15	0,12	0,14	1,50
6	PESO DO SOLO SECO	0,90	0,89	0,77	0,92	0,88
7	UMIDADE	17,7	16,8	15,9	15,2	15,5

INÍCIO: _____ OPERAÇÃO: [Signature] VISTO: _____
 TÉRMINO: _____ CÁLCULO: [Signature] RESULTADO:
 LP = 15,5 %
 IP = 11,3 %

ATECEL
Área de Geotecnia

GRANULOMETRIA

Endereço:	Obra:
Reicho:	Registro:
Estaca ou Km:	Amostra:
Interessado: SR AUGUSTO	Data: 13/05

Análise Granulométrica por Peneiramento

AMOSTRA TOTAL SECA		UMIDADE BIGROSCÓPIA		RESUMO DA GRANULOMETRIA (MANUAL DO DNER)	
Amostra total úmida	1.000 g	Cápsula nº	.....g	Pedregulho: acima de 2,0 mm	1,27 %
Retida nº 10	12,52 g	Solo úmido	.....g	Areia grossa: 2,0 - 0,42 mm%
Passando nº 10 úmida	987,48 g	Cápsula e solo úmido	.....g	Areia fina: 0,42 - 0,074 mm%
Água	.....g	Cápsula e solo seco	.....g	Sile+Argila: abaixo de 0,074 mm	56,8 %
Passando nº 10 seco	970,0 g	Água	.....g	TOTAL:%
Amostra total seca	982,5 g	Umidade higroscópica - h	2,61 g		
		Fator de correção = $\frac{100}{100+h}$	0,974		

PENEIRAMENTO

Peneira	Material Retido			% que Passa da Amostra Total	Peneira (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol.					76,2
2 pol.					50,8
1 1/2 pol.					38,1
1 pol.					25,4
3/4 pol.					19,1
1/2 pol.					12,7
3/8 pol.					9,5
Nº 4					4,8
Nº 8					2,4
Nº 10	12,52	1,27	1,27	98,7	2,0
Nº 16	2,73	2,77	4,04	95,0	1,2
Nº 30	5,88	5,96	10,0	90,0	0,6
Nº 40	4,79	4,85	14,85	85,2	0,42
Nº 50					0,30
Nº 80					0,18
Nº 100					0,15
Nº 200	28,00	28,95	43,2	56,8	0,074

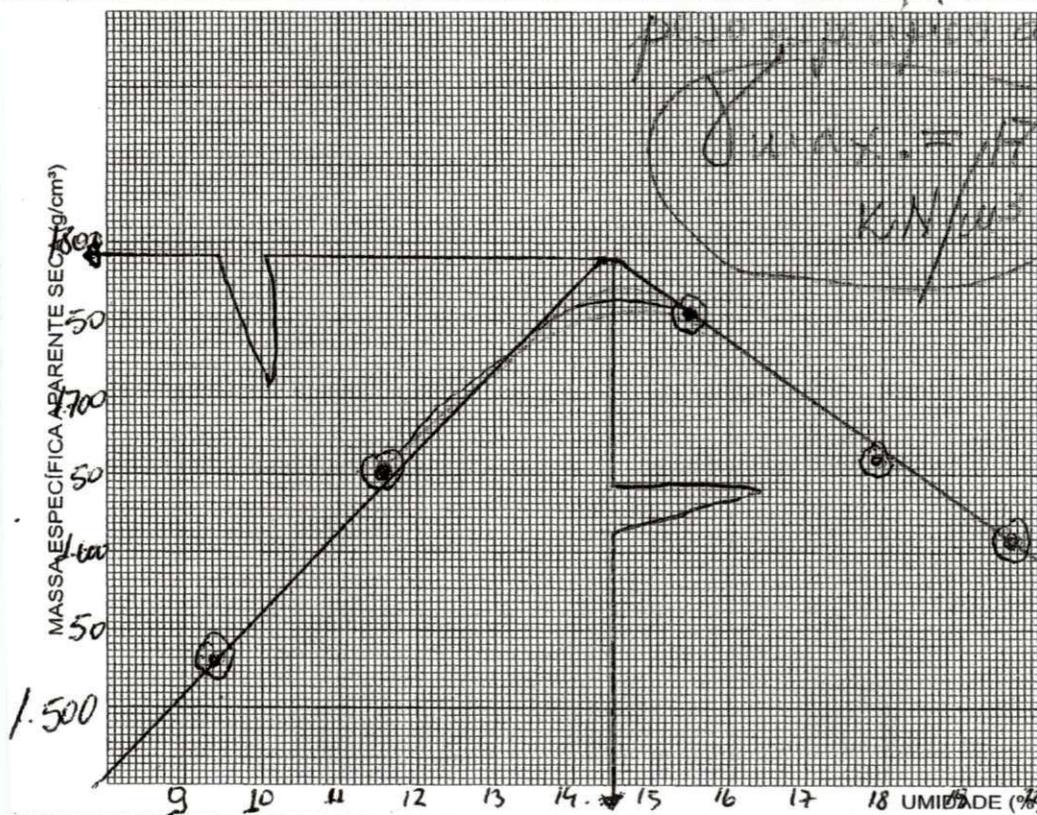
Observações:

Operador:	Visto:
-----------	--------

VIA / TRECHO	INTERESSADO	REGISTRO Nº
ROCED. SL-JAZ -AT. ETC.	SR. AUGUSTO LOCALIZ.: FURO - EST. - LADO DOUTORADO	1856
CLASSIFICAÇÃO VISUAL DO SOLO:		% máx = 17,95 h _α = 14,6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE HIGROSCÓPICA				MOLDE Nº	01	GOLPES / CAMADA
ÁPSULA Nº				VOLUME DO MOLDE	1004,80 cm ³	26
ESO BRUTO ÚMIDO (g)				PESO DO MOLDE	2.360 g	
ESO BRUTO SECO (g)				PESO DO SOQUETE		Nº DE CAMADAS
ARA DA CÁPSULA (g)				DESPESA DO DISCO		03
ESO DA ÁGUA (g)				ESPAÇADOR		
ESO DO SOLO SECO (g)						
UMIDADE (g)						
UMIDADE MÉDIA (g)						

Z	PESO BRUTO ÚMIDO	PESO DO SOLO ÚMIDO	DENSIDADE DO SOLO ÚMIDO	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE						UMIDADE MÉDIA	DENSIDADE DO SOLO SECO
				CÁPSULA Nº	PESO BRUTO ÚMIDO	PESO BRUTO SECO	PESO DA CÁPSULA	PESO DA ÁGUA	PESO DO SOLO SECO			UMIDADE
	g	g	g/cm ³		g	g	g	g	g	%	g/cm ³
	4.050	1690	1682	1	56,55	53,13	17,30	3,42	35,83	9,5	1,536
	4.210	1850	1841	2	67,83	62,58	17,30	5,24	42,29	11,6	1,650
	4.400	2040	2030	3	80,55	80,70	18,40	9,80	62,60	15,6	1,756
	4.330	1970	1960	4	72,90	63,46	10,67	9,45	52,78	17,9	1,662
	4.300	1940	1930	5	73,9	63,45	10,30	10,45	53,15	19,7	1,612



INÍCIO: 18/05

TÉRMINO: 19/05

OPERADOR: [Signature]

CÁLCULO: [Signature]

VISTO: [Signature]

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES
SÍTIO LEONILTON
CANAVERAS PARAIBA

ATECEL
LABORATÓRIO DE SOLOS

ABNT - NBR

COMPACTAÇÃO

Ref da amostra	: Gelmires_Solo01	Ultrasom	: 60	s
Type produit	: Argila	Concentração	: 173	
Client	: UFCG	Diâmetro a 10%	: 2.09	mu
Comentários	: Calibrado	Diâmetro a 50%	: 19.96	mu
Líquido	: Água	Diâmetro a 90%	: 58.59	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 25.72	mu
Operador	: Romualdo	Fraunhofer		
Empresa	: UFCG	Densidade/Fator		
Localização	: Campina Grande - PB	Superfície específica		
Data : 02/07/2009	Hora : 08:27:24	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 1305	Medida./Limp.	: 60/60/3	
		SOP	: Argila	

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

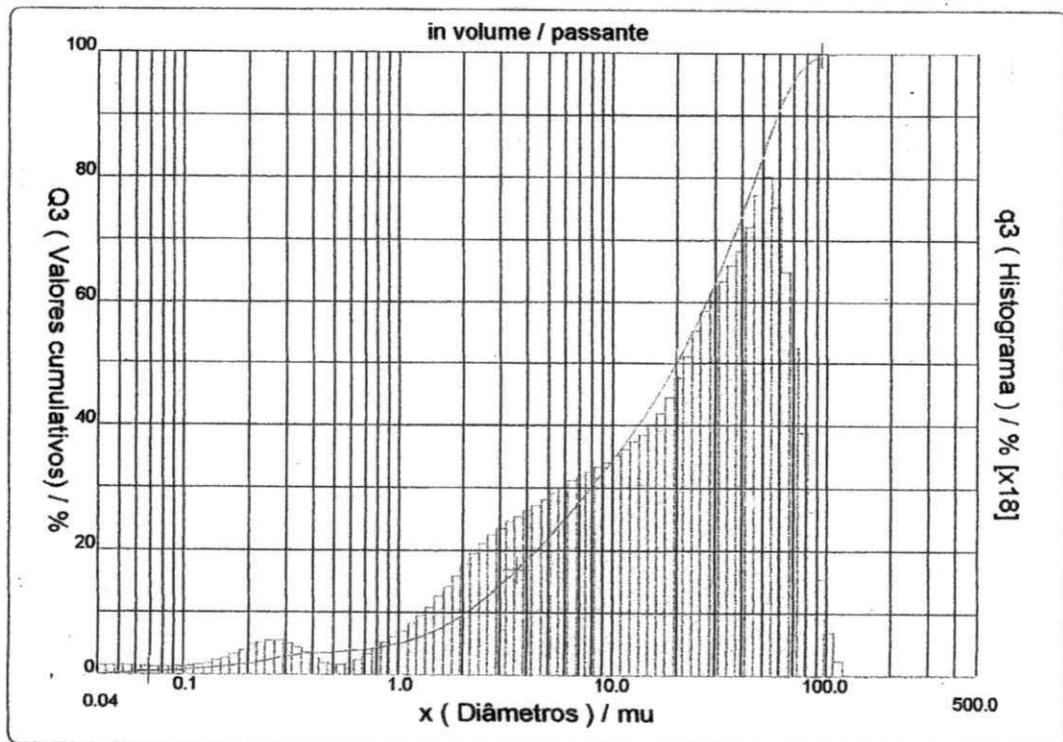
x	0.04	0.07	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
Q3	0.21	0.61	0.83	2.34	3.75	4.22	5.06	9.54	14.31	18.38

x	5.00	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	65.00	85.00	100.0	150.0
Q3	21.83	34.32	50.05	62.96	73.70	83.32	93.60	98.93	99.87	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	25.00	40.00	75.00	85.00	100.0
Q3	6.04	13.16	41.30	51.93	112.00



RESISTENCIA A COMPRESSAO SIMPLES - CORPOS-DE-PROVA DE SOLO-CIMENTO ALTERNATIVOS COM 2% DE CASCA DE ARROZ

Experimento	Ciclos	Idade (dias)	Data		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	Média (MPa)	Σx^2	$(\Sigma x)^2$	σ^2
			Moldagem	Ensaio									
T - 5	0	28	03.3.2010	31.3.2010	2,2300	2,1900	2,2400	2,1800	2,2600	2,2200	24,6466	123,2100	0,0009
T - 5	1	28	"	"	2,3500	2,2800	2,3300	2,2900	2,3000	2,3100	26,6839	133,4025	0,0007
T - 5	2	28	"	"	2,5800	2,5500	2,5700	2,5400	2,5600	2,5600	32,7690	163,8400	0,0002
T - 5	3	28	"	"	2,6900	2,6300	2,7000	2,6500	2,6300	2,6600	35,3824	176,8900	0,0009
T - 5	4	28	"	"	2,4300	2,3500	2,4000	2,3400	2,3800	2,3800	28,3274	141,6100	0,0011
T - 5	5	28	"	"	2,4200	2,3300	2,3900	2,3300	2,3800	2,3700	28,0907	140,4225	0,0012
T - 5	6	28	"	"	2,3600	2,2900	2,3300	2,3000	2,3200	2,3200	26,9150	134,5600	0,0006
T - 5	0	60	26.2.2010	27.4.2010	2,3100	2,3700	2,2900	2,3900	2,3900	2,3500	27,6213	138,0625	0,0018
T - 5	1	60	"	"	2,4700	2,4000	2,4500	2,4100	2,3700	2,4200	29,2884	146,4100	0,0013
T - 5	2	60	"	"	2,4400	2,4900	2,4500	2,4900	2,4800	2,4700	30,5067	152,5225	0,0004
T - 5	3	60	"	"	2,5300	2,4500	2,4900	2,4600	2,4700	2,4800	30,7560	153,7600	0,0008
T - 5	4	60	"	"	2,3600	2,4100	2,3500	2,4200	2,4100	2,3900	28,5647	142,8025	0,0008
T - 5	5	60	"	"	2,3900	2,3300	2,3800	2,3100	2,3400	2,3500	27,6171	138,0625	0,0009
T - 5	6	60	"	"	2,3300	2,3900	2,3300	2,4000	2,4000	2,3700	28,0899	140,4225	0,0011
T - 5	0	90	23.2.2010	21.5.2010	2,63	2,54	2,6100	2,5700	2,6000	2,5900	33,5455	167,7025	0,0010
T - 5	1	90	"	"	2,6200	2,6900	2,6300	2,6700	2,6900	2,6600	35,3824	176,8900	0,0009
T - 5	2	90	"	"	2,8700	2,7900	2,8500	2,8100	2,8300	2,8300	40,0485	200,2225	0,0008
T - 5	3	90	"	"	2,9500	3,0100	2,9600	2,9900	2,9900	2,9800	44,4044	222,0100	0,0005
T - 5	4	90	"	"	3,0500	2,9800	2,9900	3,0300	2,9500	3,0000	45,0064	225,0000	0,0013
T - 5	5	90	"	"	2,8900	2,9700	2,9100	2,9900	2,9400	2,9400	43,2248	216,0900	0,0014
T - 5	6	90	"	o - casca de	2,9100	2,8100	2,8700	2,8200	2,8400	2,8500	40,6191	203,0625	0,0013

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - CORPOS-DE-PROVA DE SOLO-CIMENTO ALTERNATIVOS COM 4% DE CASCA DE ARROZ

Experimento	Ciclos	Idade (dias)	Data		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	Média (MPa)	Σx^2	$(\Sigma x)^2$	σ^2
			Moldagem	Ensaio									
T - 6	0	28	04.3.2010	01.4.2010	2,0900	2,0800	2,2100	2,1900	2,2800	2,1700	23,5731	117,7225	0,0057
T - 6	1	28	"	"	2,0500	2,0700	2,1500	2,1100	2,1200	2,1000	22,0564	110,2500	0,0013
T - 6	2	28	"	"	2,1100	2,1700	2,2500	2,2100	2,2600	2,2000	24,2152	121,0000	0,0030
T - 6	3	28	"	"	2,1700	2,1900	2,2300	2,2200	2,2400	2,2100	24,4239	122,1025	0,0007
T - 6	4	28	"	"	2,0300	2,0700	2,1300	2,1000	2,1200	2,0900	21,8471	109,2025	0,0013
T - 6	5	28	"	"	2,0500	2,0600	2,1100	2,0400	1,5900	1,9700	19,5879	97,0225	0,0367
T - 6	6	28	"	"	1,9900	2,0500	2,0400	2,0900	1,9800	2,0300	20,6127	103,0225	0,0016
T - 6	0	60	01.3.2010	30.4.2010	2,3500	2,1900	2,2700	2,2900	2,3000	2,2800	26,0056	129,9600	0,0027
T - 6	1	60	"	"	2,3700	2,3100	2,3300	2,2800	2,3100	2,3200	26,9164	134,5600	0,0009
T - 6	2	60	"	"	2,3900	2,2900	2,3600	2,3700	2,29	2,3400	27,3868	136,8900	0,0018
T - 6	3	60	"	"	2,4100	2,3500	2,3100	2,4200	2,4100	2,3800	28,3312	141,6100	0,0018
T - 6	4	60	"	"	2,3900	2,3200	2,2800	2,3700	2,2900	2,3300	27,1539	135,7225	0,0019
T - 6	5	60	"	"	2,2900	2,2100	2,1900	2,3100	2,2500	2,2500	25,3229	126,5625	0,0021
T - 6	6	60	"	"	2,3100	2,3500	2,3700	2,2700	2,3500	2,3300	27,1509	135,7225	0,0013
T - 6	0	90	24.2.2010	24.5.2010	2,47	2,55	2,5800	2,5100	2,4900	2,5200	31,7600	158,7600	0,0016
T - 6	1	90	"	"	2,5300	2,6900	2,5700	2,6000	2,5600	2,5900	33,5555	167,7025	0,0030
T - 6	2	90	"	"	2,6900	2,7500	2,7700	2,7400	2,7000	2,7300	37,2691	186,3225	0,0009
T - 6	3	90	"	"	2,8800	2,9900	2,9700	2,8900	2,9200	2,9300	42,9339	214,6225	0,0019
T - 6	4	90	"	"	2,9200	3,0100	2,9300	2,9700	3,0200	2,9700	44,1127	220,5225	0,0016
T - 6	5	90	"	"	2,9900	3,0100	2,9400	2,9300	2,9300	2,9600	43,8136	219,0400	0,0011
T - 6	6	90	"	"	2,9100	2,8500	2,8300	2,8800	2,8800	2,8700	41,1883	205,9225	0,0008