

**TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM SERRAGEM DE
MADEIRA**

Sandra Regina da Silva

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM SERRAGEM DE
MADEIRA”**

Sandra Regina da Silva

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
DEES-UFMG - (Orientador)

Prof^a. Dra. Judy Norka Rodo de Mantilla
ETG-UFMG (Co-orientadora)

Prof. Dr. Luís Eustáquio Moreira
DEES-UFMG

Prof. Dr. Khosrow Ghavami
PUC-RIO

Belo Horizonte, 01 de junho de 2005

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

A Deus;

Aos meus familiares, e ao Marcus pelo apoio e paciência;

Ao professor Edgar e à prof^a. Judy pela orientação e incentivo;

Aos amigos que não mediram esforços e muito contribuíram neste trabalho: Renata, Ana Lúcia, Carla, Eliene, Ricardo;

Aos bolsistas do LAEES e do Laboratório de Geotecnia pela ajuda em alguns momentos do trabalho;

Aos funcionários Erik, Frederico, Hidelbrando e Geraldo do LAEES e Paulo do Laboratório de Geotecnia, pelo grande auxílio ao longo do trabalho;

Ao Sr. Benedito de Catas Altas pela experiência partilhada no início do trabalho;

À professora Maria das Graças Gardoni, coordenadora do Laboratório de Geotecnia; ao professor Raul Zanoni e à técnica Rita do Laboratório de Análise por Raios X, do Departamento de Engenharia de Minas;

A todos os professores que contribuíram para a realização deste trabalho;

Aos funcionários do DEES por toda cooperação;

Ao Programa de Usos Múltiplos de Florestas Renováveis da Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – CONECIT, pelo apoio financeiro através da FAPEMIG;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES - pela bolsa de mestrado concedida;

E a todos os que direta ou indiretamente me ajudaram com a sua amizade, incentivando-me e mostrando-me o quanto é importante lutar por um objetivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE GRÁFICOS.....	v
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. O SOLO	10
2.1. A escolha do solo	10
2.2. Caracterização do solo	11
2.3. Técnicas para melhorar solos	12
3. O SOLO-CIMENTO	13
3.1. Vantagens da utilização do solo-cimento	13
3.2. Resistência da mistura solo-cimento	15
3.3. Compactação e prensagem	18
3.4. Tempo e condições de cura da mistura solo-cimento.....	21
3.5. Adição de fibras para melhoria das propriedades.....	25
4. AS FIBRAS E OS RESÍDUOS DE MADEIRA.....	26
4.1. Característica das fibras vegetais.....	27
4.1.1. O Módulo de Elasticidade das fibras.....	30
4.1.2. Comportamento de compósitos matriz-fibras	31
4.1.3. Retardadores de pega.....	34
4.2. Degradação das fibras.....	37
4.3. Vantagens e desvantagens da utilização de fibras	39
4.3.1. Vantagens das fibras.....	39
4.3.2. Desvantagens das fibras vegetais	41
4.4. Compatibilidade matriz-fibras	42
4.5. A mistura solo-cimento-fibras	44
4.6. Tratamento e proteção das fibras.....	45
5. O TIJOLO	49
5.1. Propriedades dos tijolos.....	51
5.2. Processo de fabricação dos tijolos	52

5.3. Características dos tijolos de solo-cimento	53
5.4. Fronteira do conhecimento	55
6. TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RESÍDUOS DE MADEIRA - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	56
7. MATERIAIS.....	58
7.1. Materiais para a mistura solo-cimento-resíduos.....	58
7.1.1. Solo.....	58
7.1.2. Cimento	58
7.1.3. Água	59
7.1.4. Resíduos de madeira.....	59
7.2. Equipamentos e aparelhagem.....	59
7.3. O Sistema de Aquisição de Dados - SAD	62
7.3.1. Conexão e configuração dos canais de entrada do ADS-2000.....	63
7.3.2. Calibração dos aparelhos.....	65
8. METODOLOGIA	67
8.1. Coleta e preparação das amostras de solo	67
8.2. Caracterização dos solos.....	71
8.2.1. Teor de umidade	72
8.2.2. Limites de consistência.....	72
8.2.2.1. Limite de Liquidez	72
8.2.2.2. Limite de Plasticidade	73
8.2.3. Massa específica dos sólidos	73
8.2.4. Análise granulométrica.....	74
8.2.5. Compactação Proctor Normal	74
8.3. Ensaio de compressão nos corpos-de-prova	76
8.3.1. Dimensão dos corpos-de-prova	76
8.3.2. Preparação dos corpos-de-prova.....	78
8.3.3. Dosagem dos corpos-de-prova	78
8.3.4. A moldagem dos corpos-de-prova.....	81
8.3.5. Ensaio de compressão simples	83
8.3.6. Ensaio de compressão diametral.....	85
8.4. Ensaio de compressão simples em tijolos e prismas.....	86
8.4.1. A dimensão do tijolo	86
8.4.2. Dosagem dos tijolos	86
8.4.3. Confeção dos tijolos	88
8.4.4. Ensaio de compressão simples	91
8.5. Ensaio não-destrutivos	92
8.6 Instrumentação dos tijolos	94
9. RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO	95
9.1. Resultados dos ensaios de caracterização dos solos.....	95
9.2. Estudo da pressão de moldagem em corpos-de-prova de solo e solo-cimento	100
9.3. Avaliação da resistência da mistura solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira	104

9.4. Avaliação da velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas longitudinais.....	111
9.5. Análise das relações constitutivas	113
9.6. Análise do Módulo de Elasticidade.....	118
9.7. Análise exploratória experimental dos tijolos	121
10. CONCLUSÃO.....	138
REFERÊNCIAS	142
APÊNDICE A – ENSAIOS EXPEDITOS	155
AP-A1. Introdução	155
AP-A2. Ensaio da caixa	155
AP-A3. Ensaio da fita	156
AP-A4. Ensaio do cordão.....	156
AP-A5. Ensaio de resistência seca	157
AP-A6. Ensaio do bolo	158
AP-A7. Ensaio para determinação da umidade ótima em campo (hand test).....	160
AP-A8. Ensaio para determinação da umidade ótima (teste da bola de solo)	160
Ap-A9. Ensaio do vidro.....	161
APÊNDICE B – EQUIPAMENTOS E APARELHAGEM PARA A CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS.	162
Ap-B1. Introdução	162
Ap-B2. Equipamentos, aparelhagem e utilização.....	162
APÊNDICE C – ANÁLISE DOS SOLOS.....	168
Ap-C1. Introdução	168
Ap-C2. Composição química do Agrofilito	168
Ap-C3. Análise de Difração de Raios X.....	172
APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA	174
Ap-D1. Introdução.....	174
Ap-D2. Ensaios de caracterização dos solos	174
Ap-D3. Ensaios de caracterização da mistura solo-cimento e solo-cimento-resíduos.....	174
APÊNDICE E – REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	186
Ap-E1. Introdução	186
Ap-E2. Ensaios de compressão simples em solos	186
Ap-E3. Ensaios de compressão simples em corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos.....	189
Ap-E4. Ensaios de compressão diametral nos corpos-de-prova.....	196
Ap-E5. Ensaios de compressão simples em tijolos e prismas	198

LISTA DE FIGURAS

1 – A Grande Muralha da China.....	2
2 – Convento San Francisco – Argentina	2
3 – Casas feitas de argila ou adobe na província de Santa Fé - Argentina.....	3
4 – Vila de São Paulo de Piratininga - Brasil	4
5 – Construção em terra batida com mais de 250 anos, São Paulo, Brasil.....	4
6 – Igreja da cidade de Catas Altas - MG, Brasil	50
7 – Residência em construção na região metropolitana de Belo Horizonte – MG onde são utilizados tijolos de solo-cimento.	50
8 – Construção em tijolos de solo-cimento na região metropolitana de Belo Horizonte - MG, Brasil	51
9 – Fluxograma de processo de fabricação de tijolos de solo-cimento	53
10 – Aparelhagem para moldagem de corpos-de-prova.....	60
11 – Prensa de compressão simples para corpos-de-prova de solo	61
12 – Máquina universal com capacidade de 300 kN	61
13 – Aparelhagem para ensaio dos tijolos instrumentados.....	62
14 – Sistema de aquisição de dados ADS-2000	63
15 – Conector de entrada de sinais no ADS-2000.....	64
16 – Configuração para sensores em ponte completa.....	65
17 – Configuração para sensores em $\frac{1}{4}$ de ponte	65
18 – Prensa para ensaios de adensamento	66
19 – Homogeneização dos solos.....	70
20 – Acondicionamento do solo homogeneizado 02.....	71
21 – Acondicionamento dos solos utilizados no trabalho.	71
22 – Curva de compactação.....	76
23 – Dosagem da mistura para corpos-de-prova	79
24 – Dosagem da mistura para corpos-de-prova	80
25 – Instrumentação do “Moldador” de corpos-de-prova.	81
26 – Ensaio de compressão simples em corpos-de-prova de solo.....	84
27 – Ensaio de compressão simples em corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira.....	84

28 – Ensaio de compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos.....	85
29 – Dimensões em milímetros estudadas para os tijolos	86
30 – Misturador de argamassa	87
31 – Dosagem da mistura para tijolos	87
32 – Dosagem da mistura para tijolos	88
33 – Prensa de moldagem de tijolos	89
34 – Confeção do tijolo.....	90
35 – Ensaio de compressão simples	92
36 – Aparelho de ultra-som fabricado pela James.....	92
37 – Posicionamento dos transdutores nos corpos-de-prova.....	93
38 – Posicionamento dos transdutores nos tijolos	93
39 – Posicionamento das rosetas nos tijolos.....	94
40 – Ensaio de compressão simples nos tijolos instrumentados	94
41 – Direções de leitura da onda longitudinal	111
42 – Posição e numeração das rosetas no tijolo.....	122
43 – Ruptura do tijolo – face longitudinal.....	135
44 – Ruptura do tijolo – região do encaixe fêmea	135
45 – Ruptura do tijolo – região do encaixe macho	135
46 – Ruptura no tijolo – solo Homog. 03	136
47 – Ruptura no tijolo – solo Homog. 01	136
48 – Ruptura no prisma	137
49 – Ruptura no prisma	137
Ap-A1 – Ensaio da caixa	155
Ap-A2 – Ensaio da fita	156
Ap-A3– Ensaio do cordão	156
Ap-A4– Ensaio do cordão	157
Ap-A5 – Ensaio de resistência seca.....	157
Ap-A6 – Ensaio do bolo	158
Ap-A7 – Hand test.....	160
Ap-A8 – Determinação da umidade ótima do solo	160
Ap-A9 – Ensaio do vidro.....	161
Ap-B1 – Almofariz e mão de gral	162

Ap-B2 – Peneirador com temporizador.....	163
Ap-B3 – Balanças de precisão.....	163
Ap-B4 – Estufas do Laboratório de Geotecnia.....	164
Ap-B5 – Materiais de uso comum nos ensaios	164
Ap-B6 – Dispensor e bomba de vácuo.....	165
Ap-B7 – Material usado nos ensaios de limites liquidez e de plasticidade.....	165
Ap-B8 – Termômetro, densímetro e cronômetro	166
Ap-B9 – “Vidrarias” usadas nos ensaios.....	166
Ap-B10 – Instrumentos usados no ensaio de compactação.....	167
Ap-B11 – Extrator de corpos-de-prova	167
Ap-B12 – Agitador magnético e conjunto de peneiras	167
Ap-C1 – Compactação do solo no “prato” de ensaio	172
Ap-C2 – Tela de programação do equipamento de Difração de Raios x	173
Ap-E1 – Corpos-de-prova de solo da Faculdade de Farmácia	186
Ap-E2 – Corpos-de-prova de solo homogeneizado 01.....	187
Ap-E3 – Corpos-de-prova de solo homogeneizado 02.....	187
Ap-E4 – Corpos-de-prova de solo da pista de testes da Mecânica.....	188
Ap-E5 – Corpos-de-prova de solo homogeneizado 03.....	189
Ap-E6 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 01 - Proctor Normal.....	189
Ap-E7 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 01 - Tijolo.....	190
Ap-E8 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 03 - Proctor Normal	191
Ap-E9 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 03 - Tijolo.....	191
Ap-E10 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 0,5% resíduos.....	192
Ap-E11 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 1% resíduos.....	192
Ap-E12 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 2% resíduos.....	193
Ap-E13 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 3% resíduos.....	193
Ap-E14 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 3% resíduos.....	194
Ap-E15 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 0,5% resíduos.....	194
Ap-E16 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 1% resíduos.....	195
Ap-E17 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 2% resíduos.....	195

Ap-E18 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 3% resíduos.....	196
Ap-E19 – CP- solo – cimento – 0% de resíduos	196
Ap-E20 – Corpos-de-prova de solo–cimento–resíduos.....	197
Ap-E21 – Geometria dos tijolos utilizados	198
Ap-E22 – Tijolos com diversos teores de resíduos	199
Ap-E23 – Tijolos com prensagem deficitária.....	200
Ap-E24 – Prisma ensaiado à compressão simples.....	201
Ap-E25 – Detalhe dos furos após o ensaio de compressão nos prismas	202

LISTA DE GRÁFICOS

1 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão.....	25
2 – Determinação da curva granulométrica ideal	68
3 – Curvas granulométricas dos solos estudados	97
4 – Avaliação da pressão de moldagem nos solos estudados.....	101
5 – Relação entre resistências médias à compressão em corpos-de-prova de solo, solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira	103
6 – Comparação entre a resistência à compressão simples média nos corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03	105
7 – Comparação entre a resistência à compressão diametral média nos corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03	105
8 – Comparação entre a resistência à compressão média nos tijolos para os solos Homog. 01 e 03	107
9 – Comparação entre a resistência à compressão média nos prismas para os solos Homog. 01 e 03	107
10 – Comparação entres as peças confeccionadas com o solo Homog. 01	108
11 – Comparação entres as peças confeccionadas com o solo Homog. 03	109
12 – Curva tensão-deformação referente a corpos-de-prova confeccionados com solo Homog. 01	114
13 – Curva tensão-deformação referente a corpos-de-prova confeccionados com solo Homog. 03.....	115
14 – Curva tensão-deformação referente a tijolos confeccionados com solo Homog. 01	116
15 – Curva tensão-deformação referente a tijolos confeccionados com solo Homog. 03	116
16 – Curva tensão-deformação referente a prismas confeccionados com solo Homog. 01	117
17 – Curva tensão-deformação referente a prismas confeccionados com solo Homog. 03	117
18 – Módulo de Elasticidade determinado a partir de corpos-de-prova, tijolos e prismas utilizando o solo Homog. 01	118

19 – Módulo de Elasticidade determinado a partir de corpos-de-prova, tijolos e prismas utilizando o solo Homog. 03	119
20 – Análise da tensão em cada roseta para o tijolo fabricado com solo Homog. 01 e 0% de resíduos	124
21 – Análise da tensão em cada roseta para o tijolo fabricado com solo Homog. 01 e 0,5% de resíduos	125
22 – Análise da tensão em cada roseta para o tijolo fabricado com solo Homog. 03 e 0% de resíduos	126
23 – Análise da tensão na roseta R1 - tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos .	127
24 – Análise da tensão na roseta R2 – tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos .	127
25 – Análise da tensão na roseta R3 - tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos .	127
26 – Análise da tensão na roseta R4 – tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos .	128
27 – Análise da tensão na roseta R5 – tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos .	128
28 – Análise da tensão na roseta R1 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos	128
29 – Análise da tensão na roseta R2 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos	129
30 – Análise da tensão na roseta R3 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos	129
31 – Análise da tensão na roseta R4 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos	129
32 – Análise da tensão na roseta R5 – tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos	130
33 – Análise da tensão na roseta R1 – tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos .	130
34 – Análise da tensão na roseta R2 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos .	130
35 – Análise da tensão na roseta R3 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos .	131
36 – Análise da tensão na roseta R4 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos .	131
37 – Análise da tensão na roseta R5 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos .	131

LISTA DE QUADROS

1. Ensaio de caracterização do solo	12
2. Processos de cura do solo-cimento	22
3. Processos de cura do solo-cimento	23
4. Propriedade dos aparelhos conectados à placa de 16 canais do ADS-2000	64
5. Propriedade dos aparelhos conectados à placa de 32 canais do ADS-2000	65
6. Trajetória da ruptura nos tijolos.....	132
Ap-A1. Interpretação dos ensaios expeditos do solo.....	159

LISTA DE TABELAS

1. Índice de inibição de espécies vegetais	37
2. Frações utilizadas para composição dos novos solos	69
3. Traços utilizados para o estudo	81
4. Resultados dos ensaios de caracterização e compressão simples dos solos	96
5. Resultados dos ensaios de massa específica e granulometria dos solos.....	96
6. Resultados dos ensaios em corpos-de-prova de solo natural e homogeneizado 02.....	98
7. Resultados dos ensaios em corpos-de-prova dos solos homogeneizados 01 e 03.....	99
8. Massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo em solo-cimento	102
9. Pressão de compactação dos corpos-de-prova de solo e solo-cimento (MPa)	102
10. Cálculo do desvio padrão dos GRÁFICOS 6 a 9	106
11. Valores do Módulo de Elasticidade para os diferentes teores de resíduos.....	120
12. Valores do coeficiente de Poisson nos tijolos	122
13. Tensões de utilização nos tijolos	134
Ap-D1. Resultados dos ensaios de caracterização e compressão simples dos solos naturais.....	175
Ap-D2. Resultados dos ensaios de caracterização e compressão simples dos solos homogeneizados	176
Ap-D3. Dados dos corpos-de-prova para ensaio de compressão simples – solo Homog. 01.	177
Ap-D4. Dados dos corpos-de-prova para ensaio de compressão simples – solo Homog. 03	178
Ap-D5. Dados dos tijolos utilizados nos ensaios de compressão simples	179
Ap-D6. Dados dos prismas utilizados nos ensaios de compressão simples – solo Homog. 01	180
Ap-D7. Dados dos prismas utilizados nos ensaios de compressão simples – solo Homog. 03	181
Ap-D8. Velocidades de propagação da onda nos tijolos – solo Homog. 01	182

Ap-D9. Velocidades de propagação da onda nos tijolos – solo Homog. 03	183
Ap-D10. Velocidades de propagação da onda nos tijolos dos prismas – solo Homog. 01	184
Ap-D11. Velocidades de propagação da onda nos tijolos dos prismas – solo Homog. 03	185

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o estudo de tijolos confeccionados com a mistura solo-cimento-resíduos de madeira com o objetivo de determinar a sua resistência em função das características do solo e da dosagem de resíduos. Foram utilizados dois tipos de solos provenientes do campus da UFMG, cimento CPIII E-32-RS e serragem extraída de peças de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. Visando estabelecer limites de resistência, os solos naturais foram corrigidos de forma que fossem obtidos um solo mais arenoso e um solo mais argiloso. Para a determinação da mistura ótima, estudou-se a inclusão de teores de resíduos diferenciados (0%; 0,5%; 1%; 2% e 3%) nos dois solos confeccionados, onde foram avaliados corpos-de-prova, tijolos e prismas. A avaliação das peças confeccionadas foi feita a partir de ensaios de compressão simples e compressão diametral em corpos-de-prova e ensaios de compressão simples em tijolos e prismas. A pressão de moldagem de corpos-de-prova e tijolos foi determinada através do monitoramento de célula de carga e manômetro. Foram estabelecidas relações entre o formato dos corpos-de-prova, tijolos e prismas através de equações. Ensaios não-destrutivos foram realizados paralelamente aos ensaios de compressão, onde determinou-se o tempo de propagação da onda longitudinal em cada peça. A partir da velocidade média de propagação da onda ultra-sônica, da densidade e do teor de resíduo empregado, foi possível encontrar equações para a determinação da resistência à compressão. Obteve-se uma relação entre o módulo de elasticidade da mistura e a resistência à compressão com o teor de resíduos empregado. Definida a mistura ótima e avaliando-se a ruptura dos tijolos ensaiados, três tijolos foram instrumentados com rosetas. A partir da análise experimental de tensões determinou-se o caminho da ruptura, o coeficiente de Poisson e um valor a partir do qual seria atingido um possível limite de utilização. A inclusão de 0,5% de resíduos no solo mais arenoso mostrou ser a melhor dosagem por aumentar a resistência dos tijolos e prismas, diminuir o módulo de elasticidade e também aumentar a ductilidade do compósito. Os resultados experimentais comprovaram a eficiência e o elevado potencial de utilização, tornando o tijolo de solo-cimento-resíduos um promissor concorrente dos tijolos convencionais.

Palavras-chave: solo-cimento, resíduos de madeira, serragem, ensaios não-destrutivos.

ABSTRACT

This work presents the study of bricks made from a soil, cement and wooden residues mixture. Its objective is to determine its strength taking into account the characteristics of the soil and the residues' dosage. Two soil types that originated from UFMG campus, CPIII E-32-RS cement and *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus cloeziana* sawdust were used as components of the bricks studied. To establish strength limits, the natural soil was corrected in way that it was possible to obtain a sandier and clayed one. To determine the optimum mixture, it was necessary to study the inclusion of different residues grades (0%; 0,5%; 1%; 2%; e 3%) at both soils. Specimens were tested using simple compression tests and diametrical compression tests. Prisms and bricks were tested using simple compression tests. The pressure used to cast the bricks was determined through the load cell e manometer monitoring. Relationships between specimens, bricks e prisms shaping were established and equations were written. Non destructive tests were made as well and from those it was possible to determine the propagation time of the longitudinal wave in each sample. Through the average propagation ultrasonic wave speed, density and residue grade used, equations that determine the compressive strength were found. It was also found a relationship between the mixture's Young's module and its compression strength. By the definition of the optimum mixture and the analyses of the rupture tested bricks, three bricks were instrumented with rosettes. Using stress experimental analyses, it was determined the rupture way, the Poisson's coefficient of the brick and a value to a possible use limit. The inclusion of 0,5% residues in a sandier soil was the best dosage to increase the bricks strength and composition's ductility, reducing its Young's module. The experimental results proved the efficiency and high potential usefulness of the soil, cement and wooden residues bricks making them a promising competitor when compared with the conventional ones.

Key-words: soil-cement, wooden residue, sawdust, non-destructive tests

1

INTRODUÇÃO

A terra crua, nome dado por algumas pessoas ao solo, vem sendo utilizada pelo homem há milênios, visando resolver o problema de habitação da humanidade. A mesma está presente em qualquer parte do mundo. É comum encontrar construções históricas que resistem ao tempo, mostrando a influência e comprovando a durabilidade deste material. Vestígios arqueológicos em todo o mundo comprovam a existência de várias cidades da antiguidade construídas com este material dentre as quais Jericó, na Palestina, cidade bíblica erguida há 10000 anos sendo talvez a mais antiga; Catal Hoyuk, na Turquia, Akhet-Aton, no Egito e Chan Chan no Peru. Exemplos de bom emprego desta matéria-prima podem ser encontrados em arcos e domos, construídos em blocos de adobes, na Mesopotâmia (Turquia), Assíria, Egito e na antiga cidade Babilônia, no Iraque (TAVEIRA, 1987 e LOPES, 2002).

A FIG. 1 mostra a Grande Muralha da China, outro exemplo de construção com solo, que foi originalmente construída, há aproximadamente quatro mil anos atrás, utilizando somente terra batida. Posteriormente, foi coberta por pedras e tijolos, o que deu à mesma a aparência de uma grande parede de pedra (MINKE, 2000).

Recentemente, descobriu-se um edifício construído com solo há 3000 anos no Paquistão. A solidez do solo pode ser vista também na mítica Torre de Babel, cujo 7º nível corresponde a 90 m de altura (TAVEIRA, 1987 e LOPES, 2002).



FIGURA 1 – A Grande Muralha da China

Fonte: ABRIL, 2005

Partindo da imaginação e da técnica do passado, algumas casas, prédios, vilas e cidades foram construídas no século XIII. A cidade de Taos foi construída em 1609 no Novo México pelos índios Pueblos. Também no Novo México, porém na cidade de Santa Fé, foi erguido o Palácio dos Governadores. Na cidade de Santa Fé, na Argentina, foi construído o convento de San Francisco (FIG. 2) em 1695 (TAVEIRA, 1987). A FIG. 3 mostra na mesma cidade um exemplo de casa construída em adobe.



FIGURA 2 – Convento San Francisco – Argentina

Fonte: <http://www.zonalitoral.com/litoralur/santafe.htm>

acesso em 11/05/04



FIGURA 3 – Casas feitas de argila ou adobe na província de Santa Fé - Argentina

Fonte: <http://www.c3.lanl.gov/~rocha/santafe.html>

acesso em 11/05/04

Outras construções em solo podem ainda ser encontradas na Califórnia, EUA, onde cidades inteiras foram erguidas. Em 1987, no Irã, Iraque e Iêmen, edifícios construídos há aproximadamente 4 séculos, alguns com mais de 10 andares, podiam ainda ser encontrados (TAVEIRA, 1987).

Estudos sobre a origem das construções com solo no Brasil mostram que os índios não o usavam para construir. Seus abrigos eram estruturas de paus roliços e vedações de palhas e folhagem. Desta forma, pode-se concluir que foram os portugueses que introduziram a utilização de técnicas de construção com terra crua. Os escravos africanos também foram grandes colaboradores, uma vez que utilizavam esta técnica em seu país de origem. Percebe-se ainda que, no século XX em Guiné, casas eram construídas utilizando a técnica de pau-a-pique utilizando enchimento de lama e cobertura de palha (LOPES, 2002).

No Brasil, o processo construtivo através do uso de solo, trazido pelos portugueses, teve presença marcante durante o período colonial. São Paulo adotou intensamente este sistema nas construções feitas no planalto de Piratininga e nos caminhos dos bandeirantes até Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás (TAVEIRA, 1987).



Ivan Washt Rodrigues
Habitações dos moradores de São Paulo onde articulam-se
elementos de origens européia e indígena

FIGURA 4 – Vila de São Paulo de Piratininga - Brasil

Fonte: http://www.multirio.rj.gov.br/historia/modulo01/vila_piratininga.html
acesso em 11/05/04

Alguns pesquisadores acreditam que a técnica de terra batida tenha sido trazida para o Brasil pelos conquistadores espanhóis. A FIG. 5 mostra uma construção, no estado de São Paulo – Brasil, onde a estrutura de sustentação foi construída com terra batida há aproximadamente 250 anos (MINKE, 2000).



FIGURA 5 – Construção em terra batida com mais de 250 anos, São Paulo, Brasil

Fonte: MINKE, 2000

Segundo Taveira (1987) e Lopes (2002), as primeiras construções brasileiras utilizavam os seguintes processos construtivos:

- pau-a-pique: bastante difundido no interior do país. Consistia em uma “paliçada de ramos e paus finos entretecidos e recobertos com camadas de barro alisadas à mão.” Tinha o grande inconveniente de apresentar rachaduras e fendas que abrigavam o “barbeiro”, transmissor da doença de Chagas;
- a taipa de mão, também conhecida como taipa de sopapo, taipa de sebe, barro armado ou pau-a-pique, consiste, no preenchimento de uma malha de madeira (bambu ou taquara na maioria das vezes) - formada por ripas horizontais e verticais, com amarração feita de tiras de couro, cipó, barbante, prego ou arame - com uma pasta de água e solo, podendo ter ou não fibras. Esta pasta de solo é jogada com as mãos dos dois lados da malha ao mesmo tempo, e apertada contra a trama da parede. Após a secagem da primeira camada de barro é aplicado o reboco e posteriormente a pintura;
- torrões: bastante comum no Rio Grande do Sul em que se cortam blocos de camada superior do solo, armada pela trama reticular das gramíneas;
- taipa ou taipa de pilão: inúmeras igrejas e casas de fazendas foram construídas por este sistema que é a socadura da terra entre formas. A tecnologia construtiva de paredes monolíticas de solo-cimento é uma evolução deste sistema;
- adobes: levantamento de paredes através de tijolos fundidos com uma massa plástica de solo no interior de formas de diferentes tipos, que são apoiadas em uma superfície lisa;
- tijuco: empilhamento de cascarões de barro;
- barroca: erguimento de paredes pela superposição de camadas de barro sem a utilização de formas sendo os bordos aparados à faca.

O adobe ou taipa de pilão era normalmente usado em paredes externas e as divisões internas e paredes do piso superior construídas com taipa de mão, devido ao fato de ser ele, uma matéria mais leve (LOPES, 2002).

Um dos grandes projetos brasileiros neste setor foi a construção da Vila Operária de João Monlevade, próximo a Sabará em 1936, de autoria de Lúcio Costa. Naquele ano,

foi erguida também a comunidade de Cajueiro Seco em Pernambuco projetada pelo arquiteto Acácio Gil Borsoi (TAVEIRA, 1987).

Há vários exemplos de uso de solo no Brasil como nas casas de fazendas revestidas por tabatinga (barro branco) nos vales do Paraíba e do Ribeira, no estado de São Paulo; no levantamento de muros, pelo sistema de pau-a-pique, em Salvador, que funcionavam como fortificações contra índios; nas casas da serra do Itapeti, um bairro rural de Mogi das Cruzes em São Paulo, que foram levantadas por taipeiros da região. A presença sólida e marcante do solo na edificação da História do Brasil é retratada ainda em cidades de barro construídas em estados do Nordeste; em Minas Gerais, entre as quais Diamantina e Ouro Preto; além de cidades belas e atraentes como Parati no estado do Rio de Janeiro (TAVEIRA, 1987).

No ano de 1984, em uma exposição em São Paulo foi revelado que 1/3 dos moradores do mundo viviam na época em moradias de terra crua.

O solo-cimento (mistura de solo, cimento e água) foi introduzido no Brasil, em 1936, pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (SEGANTINI e CARVALHO, 2000). Esta utilização partiu da necessidade de redução nos custos das habitações populares.

O emprego do solo-cimento em habitações no Brasil foi iniciado em 1948, com a construção das casas do Vale Florido, na Fazenda Inglesa em Petrópolis, Rio de Janeiro (ABCP, 1985). Desde 1930 eram feitas experiências com solo-cimento no país. No final da década de 50, a mistura de solo e cimento estava totalmente aprovada no Brasil, passando a ser difundida como nova alternativa para baratear construções. A primeira casa construída em solo-cimento no país teve como responsável o Instituto del Cemento Portland Argentino – IPCA, uma vez que a Argentina divulgava a maneira correta de empregar o novo método construtivo (TAVEIRA, 1987).

Desde 1985, construções com solo-cimento têm sido muito utilizadas por prefeituras, autarquias e entidades particulares, que desde então se beneficiam das vantagens técnicas e econômicas oferecidas por esse material (ABCP, 1985).

O solo-cimento, em edificações, pode ser empregado de duas formas: paredes monolíticas e tijolos ou blocos prensados. A técnica do solo-cimento pode ainda ser aplicada em muros, contenções, fundações, passeios, contrapisos, coberturas abobadadas e em lajes mistas. O presente trabalho se concentrará apenas no estudo de tijolos prensados.

A inclusão de elementos de reforço nos solos para melhoria de suas propriedades já era do conhecimento de povos da antiguidade. Isto pode ser confirmado através de algumas construções, ainda existentes nos dias de hoje como as muralhas de Ziggurat de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 a.C.), construída utilizando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Os Incas utilizavam lã de lhama misturada ao solo na construção de estradas resistentes ao tempo. São também conhecidas aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles, antes da construção de aterros nestes solos, no interior do Brasil e em outros países (PALMEIRA, 1992 *apud* MONTARDO, CONSOLI e PRIETTO, 2001).

Visando minimizar a presença de fissuras no material, os egípcios, já na antiguidade, utilizavam fibras vegetais como reforço na fabricação de adobe, considerado matriz frágil (CARVALHO e BERALDO, 2000 *apud* BERALDO *et al.*, 2002).

Existem registros do uso do amianto como reforço já em 2500 a.C. (SWAMY, 1975 *apud* AGOPYAN, 1993) e após o Renascimento onde eram feitos reforços em placas de gesso usando-se sisal ou crina de cavalo. Entretanto, somente após o século XIX tentou-se a produção racional destes compósitos. O cimento-amianto foi, de fato, o primeiro material de construção civil reforçado com fibras produzido em escala industrial, possuindo, apesar dos riscos à saúde, destaque entre os demais materiais de construção. O cimento-amianto foi obtido empiricamente sem um prévio conhecimento do comportamento das fibras na pasta de cimento (AGOPYAN, 1993).

O grande avanço dos materiais reforçados com fibras ocorreu juntamente com o desenvolvimento da Indústria Mecânica, Naval, Aeronáutica e Bélica desde a II Guerra Mundial, apesar de terem sido inicialmente desenvolvidos, produzidos e utilizados na construção civil (AGOPYAN, 1993).

Com a confirmação, na década de 60, de alguns problemas de saúde ocasionados pelo uso do amianto em materiais de construção, ocorreu sua restrição de uso. Devido a isto, nos países desenvolvidos, a engenharia civil voltou a se preocupar com o estudo e desenvolvimento de novos compósitos em substituição aos componentes de cimento-amianto. O desenvolvimento de reforços de materiais com fibras iniciou-se com o vidro, na década de 70, concentrando-se no estudo do cimento-vidro. A seguir, na década de 80, devido a dúvidas quanto à durabilidade de tal fibra, deu-se ênfase ao estudo de fibras metálicas. O alto módulo de elasticidade do polipropileno foi um dos fatores principais para seu avanço ao longo da década de 90 (AGOPYAN, 1993).

O uso de materiais de construção civil à base de cimento reforçado com fibras está aumentando rapidamente, principalmente nos países desenvolvidos. A justificativa para isto está na possibilidade de produção de componentes esbeltos (leves), com bom desempenho mecânico (elevada absorção de energia, frente a esforços dinâmicos, por exemplo), bom isolamento termo-acústico, além da indispensável viabilidade econômica (AGOPYAN, 1991 *apud* SAVASTANO e AGOPYAN, 1998).

Savastano e Agopyan (1998) observaram que no mercado brasileiro, o cimento-amianto ainda aparece como único compósito fibroso à base de matriz cimentícia produzido em larga escala de produção. Devido aos comprovados riscos à saúde humana almeja-se sua substituição. Para isto, vários estudos têm sido desenvolvidos visando a introdução de fibras vegetais em matrizes frágeis. A escória de alto-forno, amplamente produzida no Brasil, resulta em cimentos de baixa alcalinidade, mostrando-se adequada para emprego conjunto com fibras vegetais que não resistem aos álcalis. Os estudos de fibras vegetais como reforço de matrizes frágeis começaram em 1970 na Inglaterra (SAVASTANO e AGOPYAN, 1998). No Brasil porém, o pioneirismo coube ao Centro de Pesquisa e

Desenvolvimento - CEPED, em Camaçari na Bahia a partir de 1980 (JOHN e AGOPYAN, 1993 e SAVASTANO e AGOPYAN, 1998).

De acordo com a revista eletrônica Super Obra (2003/2004) têm sido usadas fibras vegetais de madeiras como pinho e eucalipto, e de não-madeiras, como sisal, bananeira e coco, empregadas principalmente no reforço dos materiais cimentícios. “As fibras são ideais para isso, principalmente nas chamadas primeiras idades, em que esses materiais estão mais sujeitos a quebras”, explica Holmer Savastano Júnior para quem o fato de vivermos em um país tropical ajuda na abundância da matéria-prima. Outros tipos de biomassa também estão sendo estudados para futuro uso como substitutos do cimento Portland convencional, como a escória de alto-forno e cinzas de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar (Super Obra 2003/2004).

O objetivo principal deste trabalho é o estudo experimental de tijolos confeccionados com a mistura solo-cimento e resíduos vegetais (serragem). Na dosagem desta mistura levou-se em consideração resultados obtidos em estudos já desenvolvidos, e a viabilidade de sua execução, considerando o atual cenário brasileiro.

Foi desenvolvida uma metodologia para a confecção dos tijolos, com a classificação dos solos através de ensaios geotécnicos de caracterização, de compactação e de resistência à compressão simples; caracterização da mistura solo-cimento através de ensaios de compactação e de compressão simples em corpos-de-prova e tijolos de solo-cimento e ensaios de compressão diametral em corpos-de-prova desta mistura. Analisou-se também o comportamento dos corpos-de-prova e dos tijolos confeccionados com a mistura solo-cimento-resíduos de madeira. Para uma melhor avaliação das características das peças confeccionadas, foram realizados ensaios não-destrutivos. A combinação dos resultados proporcionou a determinação da melhor dosagem denominada de dosagem ótima.

2

O SOLO

Se tomarmos exclusivamente a finalidade a ser dada neste estudo, o solo pode ser definido como um material não consolidado da camada superficial da terra, facilmente desagregável, contendo minerais diversos sob as formas de areia (pequenas partículas bem resistentes, duras); de silte (partículas mais finas que a areia, geralmente sedimentadas sob a forma de camadas pulverizadas); e de argilas (silicatos hidratados de alumínio, e que constitui o barro) (CEBRACE, 1981). Os solos existentes podem ou não apresentar material orgânico conforme a sua origem e formação; porém, para a aplicação na mistura solo-cimento deve-se dar preferência àqueles em cuja composição tal matéria seja ausente. Em algumas publicações, conforme a região, os solos recebem o nome de terra ou terra crua de forma equivocada, uma vez que o termo técnico correto para referenciar tal matéria-prima é solo.

2.1. A escolha do solo

Apesar da grande diversidade de solos existentes, não é qualquer tipo que pode ser usado em construções com solo-cimento. Por este motivo, é importante fazer a escolha correta quanto à granulometria do tipo de solo a ser usado. É necessário que o solo apresente algumas características básicas, por exemplo, ser facilmente desagregável e que o mesmo mantenha uma proporção de tamanho entre os grãos.

Solos compostos preponderantemente por frações de argila ou silte não são aconselháveis. Apesar de a fração argila ser um componente importante devido às suas propriedades aglomerantes - apresenta uma resistência inicial do material e uma melhoria em sua trabalhabilidade - a mesma pode sofrer fissuras, trincas ou rachaduras depois de seca, em consequência da retração, bem como redução de sua resistência.

A fração argilosa (ou fração fina) existente na composição de um solo é responsável pela trabalhabilidade da mistura antes da prensagem e pela resistência mecânica do tijolo após a conformação. É necessário conhecer-se o argilo-mineral constituinte ou predominante na fração argilosa pois das características e propriedades do argilo-mineral vão depender as propriedades finais do tijolo (SUPERTOR, 198-). Cuidados devem ser tomados principalmente evitando-se aqueles que contenham argilo-minerais do tipo montmorilonitas pois, são altamente expansivos não sendo convenientes para fabricação de tijolos, pois necessitam de muito cimento para a estabilização (BARBOSA e MATTONE, 2002).

Na fração arenosa encontramos uma distribuição granulométrica mais adequada que proporciona uma alta densidade na prensagem da mistura, responsável pelas propriedades mecânicas do tijolo e pela redução ou não do teor de cimento (SUPERTOR, 198-). A areia caracteriza-se por sua boa resistência e, por ser um material inerte, contribui para uma maior estabilidade e resistência finais. Entretanto, os solos com grande predominância de areia exigem mais tempo de espera para que adquiram suficiente resistência e possam suportar bem a compactação de outra camada de solo-cimento. A composição areia e silte melhora a resistência inicial (CEBRACE, 1981).

Segundo Supertor (198-), independente do tipo, o solo deve ser isento de matéria orgânica tal como glicose, lignina e ácido úmico, pois interferem na reação de pega do cimento inibindo-a. Estudos desenvolvidos pelo CEPED (1999), na Bahia, mostraram que os solos mais indicados são aqueles que apresentam as seguintes especificações básicas: teor de areia entre 45 e 90%; teor de silte + argila entre 10 e 55%; teor de argila menor que 20% e limite de liquidez - menor que 45%. A escolha do solo pode ser realizada no próprio canteiro de obra por ensaios simples, práticos, baseados na consistência e plasticidade de amostras (CEBRACE, 1981).

2.2. Caracterização do solo

Para o conhecimento das propriedades de um determinado solo é necessária a execução de ensaios de caracterização. Tais ensaios são padronizados por normas brasileiras e

estrangeiras, sendo executados em laboratório. Porém, muitas vezes a escolha do solo é feita no próprio canteiro da obra através de ensaios expeditos baseados na consistência e plasticidade das amostras. O QUADRO 1 mostra os principais ensaios geotécnicos de caracterização e de compressão simples relacionando-os com os ensaios expeditos. Uma explicação mais detalhada dos ensaios de laboratório será dada posteriormente no capítulo que trata da metodologia utilizada. Os ensaios expeditos encontram-se detalhados no Apêndice A.

QUADRO 1
Ensaio de caracterização do solo

Ensaio de laboratório		Ensaio expedito
Granulometria	-	Ensaio do vidro.
Limite de liquidez	LL	Ensaio do bolo, ensaio da caixa.
Limite de plasticidade	LP	Ensaio do cordão, Ensaio da fita
Compactação	$\rho_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot}	Determinação da umidade ótica, (hand test e teste da bola de solo)
Compressão simples	σ_r	Resistência seca
Teor de umidade	w	-
Massa específica dos grãos	ρ_s	-

Fonte: Elaboração própria a partir de CEPED, 1999.

2.3. Técnicas para melhorar solos

Os solos, apesar da complexidade e grande variedade, podem ser utilizados em obras de engenharia. Porém, durante a execução do projeto é comum ocorrer a não adequação do solo de determinada região ao projeto, tornando-o economicamente inviável. Existe porém, a possibilidade de serem feitas correções no solo visando melhorar suas propriedades adequando-o às exigências do projeto. Segundo Mitchell e Katti (1981) *apud* Montardo, Consoli e Prietto (2001), como técnicas para melhoria do solo, podem ser relacionados os principais métodos: 1) compactação; 2) consolidação por pré-carregamento e/ou drenos verticais; 3) injeção de materiais estabilizantes; 4) estabilização por processos físico-químicos; 5) reforço do solo com a inclusão de elementos resistentes tais como geotêxteis, fibras, grelhas, tiras. Neste trabalho, trataremos da melhoria do solo através do acréscimo de cimento e resíduos de madeira e da compactação, ou prensagem, para a fabricação de tijolos.

3

O SOLO-CIMENTO

Segundo as normas brasileiras, solo-cimento é o produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água em proporções estabelecidas através de dosagem, executada conforme a NBR 12254 (1990). Porém, os conceitos propostos pelos diversos autores de trabalhos nessa área complementam essa definição.

Segundo o CEBRACE (1981) e a ABCP (1985), o solo-cimento é um material de construção constituído pela mistura homogeneizada, compactada e curada de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas à finalidade de uso. Possui boa resistência à compressão, durabilidade e impermeabilidade além de baixa retração volumétrica. A maior parte da mistura é solo sendo que a fração de cimento é muito baixa (5 a 10 % de cimento em peso são suficientes para estabilizar o solo conferindo-lhe as propriedades desejadas). Os solos ideais para esta mistura são aqueles que apresentam uma curva granulométrica bem distribuída, isentos de matéria orgânica, devendo-se ainda evitar os que contenham argilo-minerais do tipo montmorilonitas.

Esta mistura apresentada sob a consistência de uma “farofa” pode ser usada na execução de fundações, contrapisos, paredes monolíticas, tijolos e blocos. Pode ser aplicada ainda na construção de casas, escolas, postos de saúde e outras unidades comunitárias. A boa qualidade e o bom desempenho deste material podem ser comprovados através das obras construídas e dos trabalhos técnicos.

3.1. Vantagens da utilização do solo-cimento

Os materiais são de fácil obtenção, o sistema construtivo é simples, e o investimento em equipamentos é mínimo (CEPED, 1985).

A mistura solo-cimento, de baixo custo e fácil execução oferece resistência e durabilidade tais que permitem seu emprego nas fundações e paredes de edificações simples, quer sob a forma de blocos prensados (tijolos), quer constituindo painéis inteiriços, construídos por processo manual, mediante compactação (CEBRACE, 1981).

Dentre as vantagens na utilização do solo cimento pode-se citar:

- disponibilidade de solo propiciando o uso intensivo de recursos materiais locais – O solo a ser utilizado geralmente está disponível no local da obra ou próximo a ela, dispensando transporte e a utilização de equipamentos sofisticados, o que torna o custo da escavação baixo. Caso o solo não se enquadre no projeto, são permitidas correções na sua granulometria;
- tecnologia simples, de fácil assimilação do processo construtivo, não necessitando por isso, de mão de obra especializada. Podem ser adotados sistemas familiares e comunitários. Essa favorece ainda a formação de cooperativas, possibilitando assim uma independência cultural, econômica e energética.
- apresenta boas condições de conforto térmico e acústico, comparáveis às das construções em alvenaria de tijolos cerâmicos. O desempenho climático apresenta-se favorável para a grande maioria das regiões do planeta. As construções com solo-cimento são muito confortáveis pois a “terra crua” é má condutora de calor. Construções em solo-cimento são também resistentes ao fogo;
- as paredes não oferecem a menor condição para instalação e proliferação de insetos nocivos à saúde levando assim a uma maior higiene do local;
- grande durabilidade e manutenção reduzida pois, por apresentar elevada resistência e boa impermeabilidade, as construções com ele executadas são muito duráveis, resistindo ao longo dos anos ao desgaste e à umidade.
- Nas edificações de solo-cimento dispensa-se o uso de revestimentos tais como chapisco, emboço ou reboco. Isto é devido ao acabamento liso das paredes monolíticas ou à perfeição das faces das peças prensadas. Uma

pintura simples é necessária apenas para aumentar a impermeabilidade das paredes e melhorar o aspecto visual e as condições de conforto e higiene.

- O consumo de energia é menor em construções com solo-cimento tanto na obtenção do material quanto na construção propriamente dita. O fato de não haver necessidade de queima na produção de tijolos reduz consideravelmente o consumo de energia, sobretudo quando são usadas prensas manuais.

A principal desvantagem, no entanto, está na grande variedade de solos existentes o que implica na execução de ensaios para a caracterização dos solos utilizados. Tais ensaios podem ser executados em qualquer laboratório por se tratarem de ensaios simples e rotineiros. Os ensaios necessários à avaliação da mistura solo-cimento são: granulometria, compactação e compressão simples.

3.2. Resistência da mistura solo-cimento

Na década de 80, interessada em difundir a tecnologia dos tijolos de solo-cimento a empresa SUPERTOR, fabricante de máquinas e tecnologia em solo-cimento, divulgou um material em forma de manual sobre o funcionamento e utilização de tal tecnologia.

Neste manual, são apresentados alguns fatores que influenciam nas propriedades de resistência de tijolos fabricados com solo-cimento tais como:

- a) características do solo utilizado;
- b) teor de cimento da mistura;
- c) grau de finura do cimento utilizado;
- d) grau de homogeneização da mistura;
- e) densificação da mistura na prensagem (ou fator de empacotamento da mistura);
- f) tempo e condição de cura da mistura após a prensagem;
- g) aditivos empregados;

a) Características do solo utilizado

A proporção da fração argilosa (ou fração fina) e da fração arenosa influenciam nas características e propriedades de resistência do tijolo.

b) teor de cimento da mistura

Propriedades mecânicas do tijolo de solo-cimento são proporcionais ao teor de cimento da mistura. Frequentemente são adicionados teores de cimento próximos a 8 % em relação ao peso do solo-seco.

c) grau de finura do cimento utilizado

Teor de cimento poderá ser consideravelmente reduzido pela utilização de cimento mais fino que o convencional. Exemplo disso é que 10% em peso de cimento convencional (superfície específica = 2900 cm²/g) apresentam os mesmos resultados que 7 % de cimento de maior finura (superfície específica = 5800 cm²/g).

d) grau de homogeneização da mistura

- 1) relação logarítmica entre a uniformidade da mistura e a resistência mecânica. Quando o cimento e o solo são misturados de forma ineficiente, pequenos aumentos na uniformidade ocasionam pequenos aumentos de resistência. Em amostras bem misturadas, um pequeno aumento na uniformidade levará a grandes aumentos na resistência.
- 2) a resistência do solo-cimento varia diretamente com logaritmo da energia acumulada requerida para a mistura.
- 3) pequenos aumentos na uniformidade da mistura requerem grandes aumentos na energia mecânica requerida para a mistura.

e) densificação da mistura na prensagem (ou fator de empacotamento da mistura)

A compactação (ou prensagem) da mistura é um dos fatores mais importantes na execução de tijolos de solo-cimento. Por isto, maiores detalhes a respeito serão abordados no item 3.3.

f) tempo e condição de cura da mistura após a prensagem

Os procedimentos de cura influenciam no resultado final do tijolo tanto quanto à sua resistência mecânica, quanto às suas características estéticas. No item 3.4 serão abordadas com mais detalhes as condições de cura para a mistura solo-cimento.

g) aditivos empregados

Constatou-se que a resistência mecânica dos corpos-de-prova (CPs) aumentou (2 a 10 vezes) pela adição de sais de sódio os quais formam compostos insolúveis com o cálcio. Aditivos mais benéficos: Soda cáustica, Carbonato de sódio, Sulfito de sódio, Sulfato de sódio, Metassilicato de sódio e Aluminato de sódio. Lítio e Potássio apresentam menor eficiência. Concentração ideal (ótima): varia de 0,5 a 2,5% em volume, ou peso dependendo do solo ou aditivo. Soda cáustica mostra melhores resultados quando aplicada em solos argilosos; já em solos arenosos, melhores resultados podem ser conseguidos utilizando Metassilicato de sódio. Aluminato de sódio e Sulfato de sódio mostraram melhores resultados quando aplicados a siltes (SUPERTOR, 198-).

As informações dadas pela Supertor descrevem amplamente a influência de alguns fatores na resistência da mistura solo-cimento. Porém, vale ressaltar que o tipo de solo utilizado bem como a umidade adotada criam uma faixa de variação desta resistência. O teor de cimento utilizado para estabilizar o solo melhora e aumenta a resistência e a durabilidade do material. A combinação adequada destes fatores otimiza a resistência.

Como já se sabe, solos que apresentam uma maior proporção de areia em sua composição, na maioria das vezes, levarão a maior resistência do solo-cimento. Deve-se ainda considerar concomitantemente a influência de outros fatores como: os limites de consistência, a distribuição granulométrica e os tipos de argilo-minerais.

Uma boa homogeneização da mistura é fundamental. O cimento deve ser adicionado ao solo seco e misturado até que se consiga coloração uniforme (CEBRACE, 1981). Somente após esta homogeneização acrescenta-se a água em sua devida quantidade.

A resistência é crescente de forma proporcional ao teor de cimento utilizado; porém, deve-se limitar a um teor ideal que confira ao tijolo ou bloco curado a resistência requerida, sem elevação desnecessária do custo do produto final (ABCP, 1985).

Ensaio efetuados em corpos-de-prova de solo-cimento evidenciaram ganhos de resistência em função do tempo de cura. Esse comportamento está associado à interação dos argilo-minerais e o cimento que, segundo vários autores, são reações pouco conhecidas. Parece haver um certo consenso de que o endurecimento e o ganho de resistência da mistura ao longo do tempo esteja associado em grande parte às reações entre os argilo-minerais e a cal liberada na hidratação do cimento (SEGANTINI e CARVALHO, 1994).

Segundo Ceratti e Casanova (1988), para se estudar o ganho de resistência do solo estabilizado com cimento deve-se estudar cuidadosamente:

- gênese, composição e propriedades do solo;
- física e química dos solos;
- conhecimento do cimento como ligante;
- mecânica estrutural;

3.3. Compactação e prensagem

A compactação, segundo Mitchell e Kati (1981) *apud* Montardo, Consoli e Prietto (2001) é um dos métodos utilizados para melhoria dos solos. O CEPED (1985) afirma ainda que o controle da compactação é um dos requisitos básicos para a confecção de peças utilizando a mistura solo-cimento. Esta compactação pode ser feita através de soquetes em laboratório ou prensagem do solo. Deve-se ainda tomar cuidado com os cantos dos tijolos onde a compactação pode não ser muito eficiente.

Um parâmetro de controle da compactação no campo, em obras geotécnicas, é o chamado Grau de Compactação, onde tem-se a razão entre a massa específica aparente seca obtida no campo, ou no caso do trabalho entre o corpo-de-prova cilíndrico que será moldado para ensaios de resistência e a massa específica aparente seca máxima obtida no laboratório através do ensaio de compactação - $G_c = \frac{\rho_{d,cp}}{\rho_{d,máx}} \times 100$. Valores do grau de compactação superiores a 95 % não só asseguram as melhores qualidades do material, como também garantem o melhor acabamento. Regiões menos compactadas serão pontos enfraquecidos em paredes executadas com tijolos de solo-cimento,

podendo também se soltar em placas. O controle da compactação dos tijolos é, neste sentido, de fundamental importância para a boa aparência da parede (CEPED, 1999).

O cimento é um componente estabilizador e tem função de ligante, o que melhora as qualidades da mistura. A umidade ideal (ótima) depende do tipo solo utilizado, sendo portanto necessário ensaiá-lo para determinar a umidade ótima para que se consiga a maior massa específica (CEBRACE, 1981).

Segundo Barbosa e Mattone (2002), a porcentagem de água e a quantidade de material a serem utilizadas na prensa são determinadas a partir de um processo de otimização feito com base na máxima densidade seca. Normalmente essa umidade não é exatamente aquela obtida no ensaio de compactação Proctor Normal. Nele, a partir de uma compressão dinâmica, são obtidos a densidade seca máxima e a umidade a ser adotada. Na prensa, a compactação é praticamente estática, não havendo nenhum impedimento quanto a este diferencial. Caso a umidade ótima do Proctor Normal seja conhecida, é a partir dela que se iniciará a determinação da umidade da mistura.

Taveira (1987) não recomenda a produção de quantidade exagerada de massa, uma vez que o seu limite máximo de durabilidade para aproveitamento na compactação é de 24 horas. Caso as misturas sejam utilizadas algum tempo após o preparo, é necessário revolvê-las energeticamente com as pás para homogeneizar a umidade.

Segundo a bibliografia consultada e as normas pesquisadas, a moldagem do corpo-de-prova a ser utilizado para ensaio de compressão simples deve respeitar os parâmetros do corpo-de-prova do ensaio de compactação Proctor Normal. Desta forma, admite-se que as peças construídas possuirão resistência e densidade otimizadas. Respeitando-se também estes parâmetros na execução dos tijolos, os mesmos apresentarão resultados satisfatórios.

Segantini e Carvalho (2000-b) mostram que as propriedades mecânicas dos solos, de maneira geral, apresentam melhorias significativas quando este é misturado com cimento e submetido a processos de compactação.

Quanto maior a densidade da mistura pelo efeito de prensagem, maior a resistência mecânica do tijolo. Dos fatores que dependem do processo de produção, a força de compactação é o mais importante. Quanto maior a pressão de compactação, menor a quantidade de cimento requerido para que a mistura após prensada desenvolva altas resistências (SUPERTOR, 198-).

Machado, Lima e Almeida (1998) compararam os resultados de seus estudos e concluíram que a adição de fibra de polipropileno à mistura solo-cimento influenciou os parâmetros de resistência provocando um aumento de coesão e uma redução do ângulo de atrito interno. No estudo de várias energias de compactação, determinou-se que o efeito de ancoragem introduzido na mistura solo-cimento pela adição de fibra torna-se mais evidente para uma menor energia.

Silva e Akasaki (2002) estudaram a compactação em misturas com resíduos vegetais (casca de arroz, pó de serra – Eucalipto, bagaço de cana) e concluíram que a determinação da quantidade de resíduo a ser utilizada foi influenciada pelos ensaios de compactação, uma vez que ocorreu a redução da massa específica aparente seca máxima com o aumento da quantidade de resíduos.

Existem no mercado diversos tipos de prensa com diversas pressões de compactação. Algumas moldam mais de um tijolo de cada vez. Esta característica que inicialmente aparenta ser uma vantagem, no que diz respeito à resistência do tijolo é desvantagem. Ao compactar (prensar) mais de um tijolo, a pressão de compactação é reduzida pois ocorre o aumento da área de atuação da força aplicada. Segundo Barbosa e Mattone (2002) pressões de compactação baixas necessitam de taxas de cimento elevadas para atender as resistências necessárias. Sabendo-se que a resistência do tijolo está intimamente ligada à compactação, quanto maior a compactação imposta pela prensa, mais resistente será o tijolo. O controle da pressão de compactação pode, portanto, melhorar as características do tijolo.

3.4. Tempo e condições de cura da mistura solo-cimento

A NBR 12024 (1992) especifica que após a moldagem, os corpos-de-prova de solo-cimento devem ser colocados em câmara úmida à temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar não inferior a 95 %. Especifica ainda que para fins exclusivos de dosagem de solo-cimento, o período de cura deve ser, obrigatoriamente de sete dias. Porém, outras idades de cura podem ser consideradas para controle de obra, pesquisas, ensaios especiais e outros.

Segundo Cebrace (1981) e Taveira (1987), a hidratação do solo-cimento nos primeiros dias após a moldagem é fundamental. Em caso de secagem rápida, pode ocorrer uma redução na resistência de aproximadamente 40 %, o que torna a cura um processo indispensável. A cura mal feita pode influir também no acabamento final, podendo as superfícies de solo-cimento apresentar um esfarelamento superficial tornando-as vulneráveis às intempéries e à qualquer ação mais rigorosa.

Um processo mais simples e eficiente de cura consiste de algumas molhagens diárias, por um período mínimo de 7 dias. Este processo mantém a umidade dos tijolos, garantindo a ausência de trincas e a qualidade final desejada.

A interrupção da hidratação do cimento por insuficiência de água provocará queda nas qualidades finais dos tijolos (SUPERTOR, 198-).

Existem no entanto, algumas opções de cura baseadas na experiência popular. Nos QUADROS 2 e 3 são descritos alguns processos de cura utilizados na prática bem como o tempo destinado para a hidratação do cimento em cada um dos trabalhos desenvolvidos.

QUADRO 2
Processos de cura do solo-cimento

Processo de cura adotado	Fonte:
Molhagens diárias durante 15 dias.	CEBRACE, 1981
Molhagens sucessivas para manter os tijolos úmidos durante 7 dias.	ABCP, 1985
A cura deve ser iniciada 12 horas após a execução das peças, molhando-se bem, três vezes ao dia, durante 8 dias.	CEPED, 1985
Execução de 2 a 4 molhagens diárias durante um mínimo de 15 dias após a conclusão do serviço de compactação.	TAVEIRA, 1987
Os tijolos deverão ser submetidos a um período de cura nunca inferior a 8 dias. Nos 4 primeiros dias após a prensagem, molhar os tijolos pelo menos 2 vezes ao dia para prover água suficiente para a reação de hidratação do cimento. A interrupção da hidratação do cimento por insuficiência de água provocará queda nas qualidades finais dos tijolos.	SUPERTOR (198-)
Umedecimento constante nos três primeiros dias e nos sete dias subseqüentes com três seções diárias de umedecimento.	SEGANTINI e CARVALHO, 1994
Armazenamento e cura em ambiente com temperatura e umidade controladas ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $90\pm 5\%$ respectivamente) por um período de 7 dias.	PRIETTO, SCHNAID e CONSOLI, 1997
Cura por imersão em água, durante 7 dias e ao ar (ambiente do laboratório) até a data dos ensaios.	SAVASTANO e AGOPYAN, 1998
Cura normal (corpos-de-prova em câmara úmida durante 7 dias, seguida de cura ao ar livre até a idade do ensaio) e cura a vapor (submeteu-se os corpos-de-prova após a moldagem à um aquecimento até 60°C em ambiente com umidade relativa de 95% por um período de 8 horas. Os CPs foram desmoldados e após uma hora de resfriamento, os mesmos foram colocados em câmara úmida até completarem sete dias, permanecendo ao ar livre até a data de realização do ensaio de compressão).	BERALDO e PIMENTEL, 1999
A cura foi feita em uma câmara com temperatura e umidade controlada durante 3 dias.	MONTARDO, CONSOLI e PRIETTO, 2001
Para os corpos-de-prova foram utilizados 7 dias de cura e 7 dias de secagem em laboratório à temperatura ambiente. Para a fabricação de telhas usou-se apenas a cura úmida.	PIMENTEL e BERALDO, 2001

QUADRO 3
Processos de cura do solo-cimento

Processo de cura adotado	Fonte:
Os painéis obtidos a partir da mistura de cimento e partículas de <i>Eucalyptus grandis</i> foram curados no laboratório durante 28 dias.	BERALDO e CARVALHO, 2001
Os corpos-de-prova foram medidos, pesados e introduzidos em sacos plásticos onde ocorreu a cura úmida (durante 7 dias). Após este período os mesmos foram secos ao ar livre. Durante a armazenagem foram efetuadas pesagens diárias para avaliar a umidade dos mesmos ao longo do período de armazenamento, admitindo-se que na 1ª semana de cura (saco plástico) não haveria diminuição na massa dos CPs.	BERALDO <i>et al.</i> , 2002
Executando-se a cura por vaporização em uma câmara logo após a prensagem, os painéis de cimento e madeira de Eucalipto foram expostos a uma temperatura de 60° C por períodos de 3, 10 e 24 dias. A cura à vapor proporciona um efeito benéfico nas propriedades módulo de elasticidade na flexão e compressão paralela enquanto que para o módulo de ruptura na flexão e ligação interna, não provocam elevação da resistência e nem redução no tempo de maturação.	LATORRACA e SILVA, 2003
Foram utilizados três tipos de cura: cura ao ar livre, cura em saco plástico e cura em câmara úmida.	BERALDO, 2003

Ceratti e Casanova (1988), no trabalho por eles desenvolvido, afirmaram ainda que o período mínimo para completar a interação solo-cimento variou de 3 a 7 dias alcançando 15 dias em solos de plasticidade elevada.

Um fator importante a ser considerado é o armazenamento das peças. As mesmas deverão, após a prensagem e desmoldagem, ser empilhadas sobre um piso plano à sombra ou em local coberto e protegido. Depois de curado, o tijolo ou bloco de solo-cimento possui alta resistência à compressão simples e baixa absorção (ABCP, 1985).

Em alguns casos a proteção das peças é recomendada. O CEBRACE (1981) e a ABCP (1985) citam a necessidade de uma pintura de proteção para aumentar a impermeabilidade das paredes, melhorando o aspecto visual e as condições de conforto e higiene. O CEPED (1985) recomenda ainda pintar (pelo menos externamente) as

paredes de solo-cimento com tintas à base de pó mineral (Supercimentol, Conservado “P”, etc.). Essas tintas proporcionam aderência e impermeabilização excelentes, sendo necessário para sua aplicação, molhar antes a parede.

O tipo de cura exerce grande influência nas características compósito cimento-partículas de Pinus. Embora o tipo de cura utilizada tenha influenciado a resistência à compressão, não se tornou evidente o benefício da utilização da cura úmida. A maior parte dos materiais tem seu desempenho prejudicado quando é ensaiado em condições de umidade elevada (BERALDO, 2003).

Conhecendo os diversos tipos de cura utilizados para a confecção de tijolos de solo-cimento, o CEPED (1999) realizou alguns ensaios, desenvolvendo assim, um gráfico (GRAF. 1) relacionando a resistência à compressão simples em corpos-de-prova submetidos à algumas condições de cura. Tais estudos comprovaram ainda haver uma redução na resistência da ordem de 40% quando não se usa qualquer processo que evite uma secagem rápida. Esta secagem rápida ocasiona a formação de trincas e, no caso da não ocorrência de um processo sistemático de molhagem, pode ocorrer ainda um “esfarelamento” superficial, tornando a peça de solo-cimento, vulnerável a qualquer ação mais rigorosa de chuvas e ventos. Se a rigidez da mistura for muito elevada e se as condições de cura forem inadequadas ocorre a formação de trincas transversais de retração na camada cimentada (SPECH *et al.*, 2002).

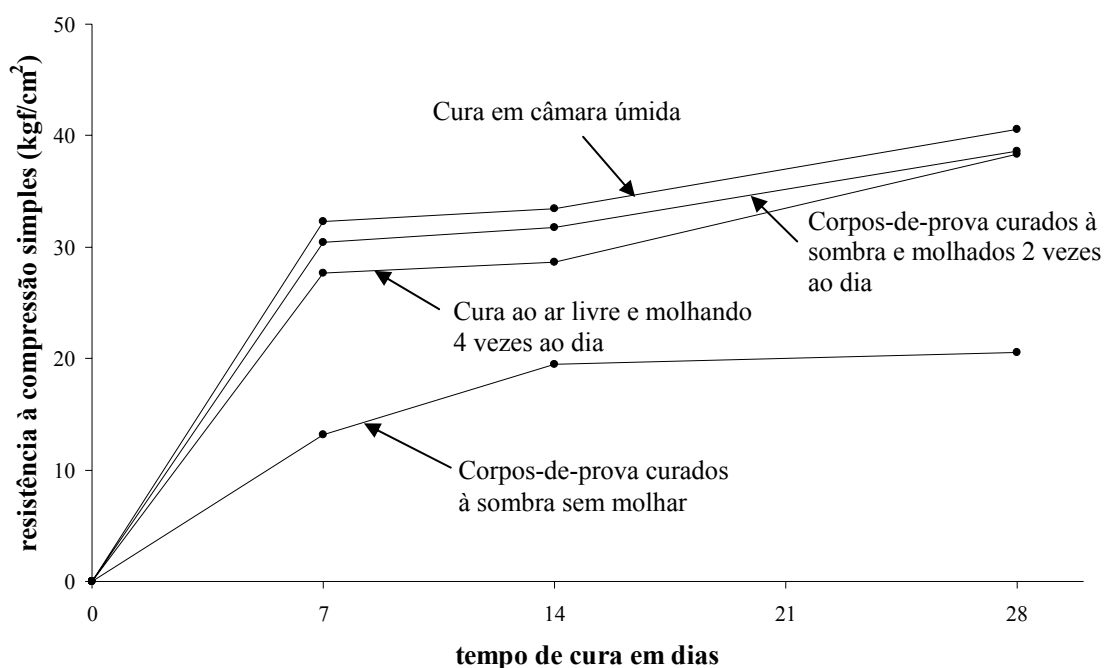


GRÁFICO 1 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão
 Fonte: reproduzido a partir de CEPED, 1999.

3.5. Adição de fibras para melhoria das propriedades

A mistura de pedaços de palha ou fibras, por exemplo, reduz acentuadamente o efeito de retração quando da secagem do material úmido. A utilização de produtos tais como óleos de origem vegetal ou animal, ou emulsões asfálticas tem a finalidade de aumentar significativamente a impermeabilidade, melhorando as condições de durabilidade (TAVEIRA, 1987).

A inserção de determinados tipos de fibra em solos altera a rigidez, a resistência e o comportamento pós-pico dos mesmos. Por outro lado, a adição de cimento ao solo, embora aumente a resistência e a rigidez do material, torna o mesmo extremamente frágil, efeito esse que pode ser atenuado na presença de fibras (VIEIRA *et al.*, 2002).

4

AS FIBRAS E OS RESÍDUOS DE MADEIRA

Com o desenvolvimento da economia brasileira, noticia-se cada vez mais o desmatamento ocorrido nas florestas nativas do País. Numa tentativa de sanar os danos causados por este desmatamento, espécies vegetais exóticas têm sido utilizadas para o reflorestamento. Espécies como o *Eucalyptus* - usado de forma intensa para geração de energia, sob forma de carvão, e na produção de celulose - e o Pinus - empregado na produção de resina, em mobiliários e caixotaria leve, sendo ainda utilizado também na fabricação de lápis - têm sido muitíssimo usadas. Originalmente, as árvores de *Eucalyptus* foram trazidas para o Brasil provenientes da Austrália.

O processamento mecânico da madeira gera uma grande quantidade de resíduos que muitas vezes, não possuem uma destinação adequada. Eles são em geral queimados provocando poluição do ar e desperdício de energia. Sabe-se ainda que materiais que utilizam a fibra de amianto em sua constituição não são aconselháveis, por ser este mineral cancerígeno.

A idéia da inserção de resíduos vegetais em matrizes frágeis, parte da observação da quantidade de resíduo disponível, da destinação dada ao mesmo e da necessidade de desenvolvimento de materiais mais saudáveis. Deve-se ainda considerar o fato de que a madeira é uma matéria-prima renovável e apresenta muitas propriedades vantajosas tais como a disponibilidade e resistência mecânica (BERALDO e CARVALHO, 2001). Apesar disso ainda é pouco utilizado na produção em escala industrial, estando as pesquisas nessa área em crescente desenvolvimento.

A melhoria ou alteração das propriedades mecânicas dos solos reforçados com fibra depende das características das fibras (resistência à tração, módulo de elasticidade, comprimento, teor e rugosidade), do solo (grau de cimentação, forma e granulometria das partículas, índice de vazios, etc.) da tensão de confinamento e modo de carregamento (SPECHT *et al.*, 2002).

4.1. Característica das fibras vegetais

As fibras vegetais são feixes constituídos por um grande número de células individuais compostas de microfibrilas ricas em celulose, um polímero vegetal. As diversas células que compõem a fibra encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular composta de substâncias amorfas como hemicelulose, pectina e principalmente lignina (70% em média) (SAVASTANO e AGOPYAN, 1998). Destas substâncias, a lignina é facilmente decomposta em meios alcalino e aquoso, onde sofre um processo de lixiviação (JOHN e AGOPYAN, 1993). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade denominada lacuna, responsável pela sua elevada capacidade de absorver água.

A caracterização das fibras é feita a partir de propriedades físicas e mecânicas das mesmas tais como dimensões, volume de vazios e absorção d'água, resistência à tração e módulo de elasticidade. A relação entre comprimento e diâmetro das fibras é fator determinante na transferência de esforços para a matriz - na qual as mesmas estão inseridas - contribuindo também para ancoragem das fibras, devido a seu aspecto fibrilado e a sua superfície irregular. Os vazios influenciam na alta absorção já nos primeiros instantes de imersão atuando negativamente na relação água/aglomerante da matriz, intumescimento, e posterior retração. Por outro lado, o elevado volume de vazios contribui para a redução no peso, para uma maior absorção acústica e para uma menor condutibilidade térmica dos componentes obtidos (SAVASTANO e AGOPYAN, 1998).

As fibras vegetais, tais como como, sisal, papel jornal, bambu, juta, malva e piaçava, apresentam variações dimensionais maiores que as das matrizes de cimento. Isto ocorre devido a mudanças no teor de umidade. Desta forma, ciclos de molhagem e secagem tendem a introduzir tensões que vão, progressivamente, destruindo a ligação matriz-

fibra, reduzindo assim a ductilidade do material. Esta destruição é indício da existência de uma incompatibilidade física (JOHN e AGOPYAN, 1993).

A função principal das fibras é a de ser reforço mecânico da matriz na qual estão inseridas. Normalmente, o seu volume em relação ao volume da matriz é bem menor, mesmo para fibras com resistência mecânica inferior ao da matriz. Na construção civil, as matrizes mais empregadas são as frágeis (rompem-se sem deformação plástica) tais como as pastas, argamassas e concretos de aglomerantes minerais (AGOPYAN, 1993).

Para matrizes frágeis reforçadas com fibras de baixo módulo de elasticidade, em que o arrancamento da fibra predomina sobre a ruptura, tem-se a aderência fibra-matriz como principal fator de influência sobre a tenacidade do compósito (SAVASTANO e AGOPYAN, 1998). Segundo Montado, Consoli e Prietto (2001), tenacidade é a propriedade do material que representa a energia que se consome ao se deformar.

Em compósitos à base de cimento, a maior aderência fibra-matriz é conseguida por meio do melhor desempenho da zona de transição, fazendo com que as duas fases (fibra e matriz) trabalhem em conjunto efetivamente. A melhor adesão se consegue pela redução da porosidade e pela menor concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) nas proximidades da fibra. No caso das fibras vegetais, a elevada porosidade favorece a formação de grandes cristais de portlandita, os quais não se formam na superfície da fibra, mas sim no interior da zona de transição. Os descolamentos das fibras são freqüentes e ocorrem em decorrência de sua variação dimensional, ao perder a água absorvida durante a mistura do compósito. Esses descolamentos constituem fator adicional, para prejuízo da aderência fibra-matriz (SAVASTANO e AGOPYAN, 1998).

A composição natural da madeira engloba diversas substâncias químicas que não fazem parte da estrutura dos tecidos vegetais, mas que participam ativamente de seu metabolismo. Estas substâncias são extraíveis com relativa facilidade da madeira e por isso são genericamente chamadas de extrativos (FONSECA *et al.*, 2002).

A inclusão de fibras no composto influencia nas propriedades mecânicas do compósito dependendo das propriedades mecânicas da fibra e da matriz. Fibras relativamente rígidas exercem efeito mais pronunciado na resistência de ruptura. As fibras relativamente flexíveis exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último. A cimentação, representada pela porcentagem de cimento, aumenta a resistência de ruptura, a rigidez inicial, a resistência última, a capacidade de absorção de energia de deformação e confere características de fragilidade ao compósito.

Fibras quando adicionadas ao solo, seja ele cimentado ou não, alteram de forma marcante e definitiva as suas propriedades de resistência e deformabilidade (MONTADO, CONSOLI e PRIETTO, 2001). A adição de fibras ao solo melhorado com cimento resultará em um material compósito mais resistente e mais dúctil minimizando os problemas descritos anteriormente, pois as fibras (por exemplo de polipropileno) aumentam a resistência e a ductilidade do material (SPECHT *et al.*, 2002).

As fibras definitivamente proporcionam um aumento de resistência e ductilidade do material. O comportamento do compósito é basicamente governado pelo teor e pelas propriedades mecânicas e geométricas das fibras. O aumento na resistência é uma função direta do teor de fibra até um determinado patamar, além do qual o reforço torna-se menos efetivo (GRAY e AL REFEAI, 1986 *apud* SPECHT *et al.*, 2002).

Em resumo, conforme Carvalho e Beraldo (2000) *apud* Beraldo *et al.* (2002) pode-se afirmar que as fibras vegetais, tais como resíduos de serraria, são utilizadas até hoje como reforço, pois possuem características particulares tais como: disponibilidade de uma matéria-prima renovável e de baixo custo, modificação das propriedades da matriz (após a fissuração), leveza do material e isolamento termo-acústico. Segundo Montardo, Consoli e Prietto (2001), pode-se afirmar ainda que, de modo geral, as fibras aumentam a resistência à compressão e a resistência à tração do solo cimentado, porém os maiores benefícios estão relacionados ao melhor desempenho do compósito pós-fissuração da matriz cimentada, como a diminuição da fragilidade e maior capacidade de absorção de

energia de deformação, propriedades estas que podem ser traduzidas em maior resistência ao impacto e à fadiga (MONTADO, CONSOLI e PRIETTO, 2001).

4.1.1. O Módulo de Elasticidade das fibras

Após um estudo do módulo de elasticidade em fibras de poliéster, polipropileno e vidro, as mesmas foram classificadas por McGown, Andrawes e Alhasani (1978) *apud* Montado, Consoli e Prietto (2001) em extensíveis e não extensíveis. Segundo eles, os reforços extensíveis possuem um módulo de elasticidade (MOE) relativamente menor que o da matriz e nestes casos os elementos de reforço não se rompem, não sendo portanto a resistência última deles importante. Em reforços deste tipo, ocorre ainda ganho de resistência, aumento da ductilidade e redução na perda pós-pico. Já nos reforços não-extensíveis (ou inextensíveis), o módulo de elasticidade é maior que o da matriz, podendo ou não se romper os elementos dependendo de sua resistência última. Neste caso, ocorre um ganho de resistência mas pode ocorrer uma ruptura catastrófica caso o reforço se rompa. Quanto maior o módulo de elasticidade do reforço mais fácil será arrancar as fibras e mais fácil também ocorrerem rupturas catastróficas.

Segundo Hannant (1994) *apud* Montardo, Consoli e Prietto (2001), o módulo de deformação do compósito não difere muito do módulo da matriz, pois apesar de o módulo de elasticidade de algumas fibras (por exemplo vidro e poliéster) ser geralmente menor que cinco vezes o da matriz cimentada, a porcentagem de fibras colocada na mistura é baixa.

Specht *et al.* (2002), no estudo por eles desenvolvido, afirmaram que as fibras de polipropileno aumentaram a ductilidade do compósito. Notou-se que as fibras extensíveis são mais eficientes na melhoria das características pós-ruptura do compósito. As fibras inextensíveis são mais efetivas na redução da deformabilidade e no aumento de resistência de pico. O efeito da inclusão de fibras mostrou-se mais evidente para maiores comprimentos ocorrendo variação distinta do módulo de elasticidade dependendo do reforço usado.

Specht *et al.* (2002) definem ainda como sendo fibras inextensíveis, aquelas cujos elementos de reforço têm deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço sob as mesmas condições de tensão, podendo os elementos de reforço romper-se dependendo da sua resistência à tração. Já os reforços extensíveis (Fibras ply-soil) são aqueles cujos elementos de reforço não se rompem. A deformação de ruptura do elemento de reforço é maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço.

4.1.2. Comportamento de compósitos matriz-fibra

Segundo Agopyan (1993), existem três tipos de compósitos fibra-matriz:

- Matriz frágil com reforço de fibras de vidro, aço, amianto e alguns tipos de plásticos. Esta matriz frágil pode se apresentar sob a forma de pastas, argamassas, concretos e plásticos com estrutura cristalina ou ligações cruzadas. Neste tipo de compósito, a matriz tem seu módulo aumentado pelo efeito das fibras. Submetidos a esforços de tração, matriz e fibras deformam-se em conjunto até o rompimento da primeira. Após o rompimento da matriz, a carga é totalmente transferida para as fibras que continuam a se deformar até que ocorra sua ruptura e conseqüentemente a ruptura do compósito.
- Matriz frágil (como no caso anterior) reforçada com fibras de módulo de elasticidade similar ou até inferior ao da matriz, tais como fibras plásticas comuns e fibras vegetais. Estas fibras possuem baixo módulo de elasticidade, não ocorrendo alteração nas propriedades da matriz antes de sua ruptura. Após a ruptura, no entanto, estando as fibras em quantidade suficiente, o compósito adquire propriedades dúcteis, podendo as fibras suportar as cargas aplicadas. Este tipo de compósito é utilizado geralmente quando não se está buscando um aumento na resistência estática da matriz, mas, um aumento na ductilidade e conseqüentemente na tenacidade do compósito.
- Matriz dúctil, caracterizada por plásticos e metais, reforçada com fibras de módulo de elasticidade geralmente superior ao da matriz (vidro, aramida, etc). Estes plásticos têm as suas resistências mecânicas e seu módulo de elasticidade aumentados consideravelmente ao serem combinados com tais fibras. A matriz

ao se deformar transmite esforços às fibras, que por terem alto módulo suportam cargas elevadas reduzindo a ductilidade da matriz.

Quanto ao comportamento de compósitos solo-fibra, Montardo, Consoli e Prietto (2001) e Spech *et al.* (2002) afirmam que o mesmo é governado pelo teor, pelas propriedades mecânicas e geométricas das fibras e ainda pela orientação destas em relação ao plano de ruptura.

Alguns autores (Gray e Ohashi, 1983, Mc Gown *et al.*, 1988; Benson e Khire, 1994; Maher e Ho, 1993; Ranjan e Charan, 1996; Morel e Gourc, 1997 *apud* Montardo, Consoli e Prietto, 2001; Gray e Al-Refeai, 1986 *apud* Montardo, Consoli e Prietto, 2001 e Spech *et al.*, 2002) perceberam em seus trabalhos a existência de um valor limite para o aumento da resistência com o acréscimo do teor e o comprimento da fibra. Além deste limite o reforço torna-se ineficaz. Gray e Al-Refeai (1986) *apud* Montardo, Consoli e Prietto (2001) e Spech *et al.* (2002) complementam ainda que até este valor limite de tensão, a ruptura ocorre com o deslizamento da fibra. Para tensões maiores que esta tem-se uma ruptura registrada pela resistência à tração da fibra. Considerando esta tensão limite, vem a necessidade de uma dosagem adequada.

Consoli, Prietto e Ulbrich (1998) *apud* Montardo, Consoli e Prietto (2001) mostraram que o modo de ruptura também é influenciado pelo teor e pelo comprimento das fibras. Com o aumento destes, o solo torna-se mais dúctil. Este fato mostra-se mais evidente em solos frágeis. Quando possível, aconselha-se que as fibras estejam orientadas na direção das deformações de tração para maximizar a contribuição do reforço. Gray e Al-Refeai (1986) e Gray e Maher (1989) *apud* Montardo, Consoli e Prietto (2001) afirmam ainda que fibras distribuídas aleatoriamente mantêm a resistência isotrópica não sendo observados planos potenciais de fragilidade.

Segundo Agopyan (1993), as principais propriedades dos compósitos alteradas com a inclusão de fibras são as seguintes:

- Comportamento à compressão: A adição de fibras à matriz nem sempre acarreta em um aumento na resistência à compressão da mesma. O aumento de porosidade do material ocasionado pela adição das fibras pode até mesmo

diminuir tal resistência. As fibras tendem a se agrupar em feixes, situação esta que pode introduzir mais vazios à matriz, ou dificultar até mesmo o adensamento pela alteração da consistência da mistura. No entanto, apesar de apresentar uma resistência às vezes inferior a da matriz, o comportamento pós-fissuração da matriz mostra-se bem diferente, sendo mais marcante após o material atingir a carga máxima;

- Comportamento à tração: A inclusão de fibras na matriz pode ocasionar o aumento do seu módulo de elasticidade e da sua resistência à tração. Com a introdução das fibras a ductilidade sempre aumenta possibilitando a afirmação de que os materiais fibrosos são mais tenazes que as matrizes, ocorrendo desta forma a absorção de muita energia até a ruptura. Tal energia é dissipada pela matriz e pelas fibras, ao se deformarem. Na ocorrência de fratura múltipla, a energia também é dissipada para a formação das superfícies de ruptura, pela separação da junta fibra-matriz e pelo atrito no escorregamento das fibras dentro da matriz. A combinação entre as matrizes frágeis e fibras de alto módulo colabora para uma sensível elevação da resistência à tração;
- Comportamento à flexão: Os valores do módulo de ruptura baseados na teoria da elasticidade, não são similares aos da resistência à tração dos materiais fibrosos, uma vez que o comportamento do compósito na região de tração é diferente daquele da região de compressão. A posição da linha neutra não é bem definida mudando continuamente após a fissuração da matriz. Como a linha neutra não passa pelo centróide da seção, a altura das peças influi no comportamento do material à flexão;
- Comportamento ao impacto: Com a inclusão das fibras, a resistência ao impacto apresenta um aumento considerável, sendo a tenacidade bastante elevada mesmo nos estágios finais de fissuração. Das propriedades mecânicas, esta é a que apresenta o maior aumento. Isto é devido à grande quantidade de energia que é absorvida na ruptura da junta fibra-matriz, e durante o arrancamento das fibras. Como a junta não é contínua, a energia pode ser também dissipada pela vibração das fibras.

4.1.3. Retardadores de pega

Alguns tipos de fibras vegetais têm sua utilização restringida na construção civil devido a grande quantidade de açúcar presente em sua composição. Segundo Agopyan (1991) *apud* John e Agopyan (1993), o açúcar existente nos vegetais interfere na hidratação dos aglomerantes. A dificuldade de remoção deste açúcar em algumas fibras inviabiliza sua utilização.

Além dos açúcares, outras substâncias presentes na estrutura dos tecidos vegetais, tais como os fenóis e ácidos, podem retardar e em alguns casos impedir a pega do cimento, sendo necessária a utilização de algum processo de compatibilização da madeira com a matriz de cimento, para que ocorra a menor influência possível no processo de hidratação do cimento (SAVASTANO, WARDEN e COUTTS, 2000 *apud* FONSECA *et al.*, 2002).

Os açúcares retardam a pega ou a hidratação do cimento, aumentando o tempo de cura (LATORRACA, 2000 *apud* LATORRACA e SILVA, 2003). Beraldo (2003) concorda com estes autores afirmando que os açúcares e demais extrativos solúveis em água são considerados retardadores de pega do cimento.

Segundo Beraldo e Carvalho (2000), o teor de açúcares livres sofre alterações durante o ano, por isso, a época de corte da árvore pode influenciar no que diz respeito à pega do cimento. O estudo destes, baseou-se em experimentos feitos por Fischer *et al.* (1974) *apud* Beraldo e Carvalho (2000) no qual constataram em testes realizados para diferentes alturas de árvores que a presença de açúcares se eleva nos meses de abril (primavera) sendo mais baixos em agosto (verão). Observou-se ainda que a frutose praticamente desaparece na primavera. Biblis & Lo (1968) *apud* Beraldo e Carvalho (2000) observaram que o tempo de pega de mistura alburno cimento foi mais longo quando as árvores foram cortadas na primavera.

Além disso, Beraldo (2003) afirma ainda que a região donde se efetuou a amostragem das partículas de madeira, em relação à altura da árvore (base, meio e topo), pode também afetar significativamente o comportamento do compósito, por apresentar

diferentes concentrações de açúcares. A idade da árvore também é fator diferenciador da porcentagem de açúcar na fibra vegetal.

Hachmi e Campbell (1989) *apud* Latorraca e Albuquerque (2002) confirmam a influência dos açúcares existentes na madeira de eucalipto na interação inibitória de madeira-cimento. “Esta camada inibitória reduz a velocidade de reação do cimento. Extrativos não polares tais como terpenos, resinas e gordura podem também reduzir a resistência dos painéis”.

Sabendo-se da influência dos açúcares presentes nos vegetais na pega do cimento, deve-se fazer uma escolha mais apurada da época de abate das espécies. O fato de se cortar a árvore em determinadas épocas ocasionará em um aumento ou redução no teor de açúcares. As épocas utilizadas comumente são: verão (dezembro) e inverno (julho), sendo que para algumas espécies como o *Eucalyptus grandis*, o corte e uso no inverno mostrou-se mais aconselhável para a utilização conjunta com o cimento CP V ARI e o corte e uso no verão para tipos de cimento como CP II E 32 (BERALDO e CARVALHO, 2000 e BERALDO e CARVALHO, 2001).

Segundo Neville (1997) *apud* Latorraca e Albuquerque (2002), “a ação de retardadores de pega e endurecimento do cimento pode ser explicada pelo fato de que eles modifiquem o crescimento dos cristais ou sua morfologia, sendo absorvidos sobre a camada de cimento hidratado que se forma rapidamente, tornando lento o crescimento dos núcleos dos cristais de hidróxido de cálcio”.

Savastano e Agopyan (1998) afirmam que deve-se tomar cuidado com a mucilagem¹ que pode recobrir a fibra. Essa pode atuar como retardador de pega de aglomerantes cimentícios.

¹ Propriedade da fibra de reter a água; substância gelatinosa de estrutura complexa, que reage com a água, aumentando de volume e formando uma solução viscosa, presente em diversas plantas, especialmente nos tecidos das suculentas e no invólucro de muitas sementes, com a função de reter a água.
Fonte: HOUAISS, 2001.

A presença de fitomassa sobretudo em sua forma natural acarreta importantes alterações no pH da mistura podendo retardar ou inviabilizar totalmente a pega do cimento (BERALDO e CARVALHO, 2000). A presença de fitomassa, moderada ou altamente inibitória, faz com que o tempo da pega da pasta cimento Portland seja prolongado.

O grau de inibição depende, de forma acentuada, da cinética das reações desenvolvidas no seio da mistura. Se a velocidade de formação dos silicatos for superior àquela da saída para a superfície da madeira dos extrativos solúveis, ocorrerá a pega. Caso contrário, constata-se, geralmente, a fragilidade da matriz, traduzida pela limitada resistência do compósito em compressão simples (BERALDO, 2003).

Alguns autores analisaram algumas espécies de fibras vegetais que serão apresentadas a seguir:

- As fibras de coco possuem maior durabilidade em ambientes alcalinos que as fibras de sisal. Possuem ainda um efeito retardador de pega e endurecimento maior que o das fibras de sisal (JOHN e AGOPYAN, 1993);
- A madeira de conífera ainda é mais utilizada por apresentar propriedades mais adequadas, principalmente a química, que pode restringir o uso de várias espécies devido à presença de substâncias principalmente açúcares que retardam a pega ou hidratação do cimento aumentando o tempo de cura e prejudicando as propriedades dos painéis (LATORRACA, 2000 *apud* LATORRACA e SILVA, 2003);
- Exercem um efeito inibidor diferenciado a casca, cerne e alburno de uma árvore, assim como, diferentes proporções entre eles (WEATHERWAX e TARKOW, 1964 *apud* BERALDO, 2003).

Latorraca e Silva (2003) propuseram em seu estudo em painéis de cimento-eucalipto, um parâmetro de aptidão das espécies vegetais chamado índice de inibição. A aptidão da madeira foi determinada através da interação química deste material com o cimento, ou seja, através da temperatura de hidratação (estudo da evolução) do compósito, a chamada termometria. A partir da teoria de que o cimento em contato com a água se hidrata e reage liberando calor, foi acompanhada a liberação de energia, sendo a

temperatura na reação utilizada como parâmetro para se determinar índices de inibição de pega. A TAB. 1 apresenta algumas espécies e o índice de inibição determinado.

TABELA 1
Índice de inibição de espécies vegetais

Espécie	Índice de inibição
<i>Clitoria fairchildiana</i>	70,43
<i>Pinus Taeda</i>	11,30
<i>E. pellita</i>	10,87
<i>E. citriodora</i>	9,57
<i>E. urophylla</i>	6,96
<i>E. robusta</i>	6,09

Fonte: LATORRACA e SILVA (2003)

Diversas formas têm sido buscadas para eliminar ou pelo menos minimizar o efeito deletério das fibras vegetais em matrizes cimentícias. O uso de aceleradores de pega é um exemplo mais clássico. Fonseca *et al.* (2002) utilizaram aditivos à base de Cloreto de cálcio. Os autores perceberam um aumento na resistência à compressão e uma maior facilidade de homogeneização da mistura com a adição do cloreto. Mesmo em condições favoráveis à pega do cimento, é ainda importante analisar o desenvolvimento da resistência do compósito ao longo do tempo. Sendo assim, a cura torna-se então um importante instrumento para o aumento na resistência mecânica do compósito, uma vez que operações de cura podem tornar mais eficiente a formação dos silicatos.

4.2. Degradação das fibras

A serragem (um importante resíduo do processamento da madeira) pode também substituir o agregado mineral na produção de materiais baseados em cimento. Entretanto, algumas vezes, compósitos fabricados a partir de partículas de madeira e cimento Portland apresentam problemas pelo fato de algumas madeiras serem muito inibitórias à reação do cimento (HACHMI & MOSLEMI, 1989; CARVALHO & BERALDO, 2000 *apud* BERALDO e CARVALHO, 2001).

Dois fatores são determinantes em compósitos formados por matrizes frágeis e fibras vegetais: o ataque alcalino às fibras e a incompatibilidade física que pode ocorrer entre fibras e matrizes (JOHN e AGOPYAN, 1993).

Como foi dito anteriormente quando caracterizamos as fibras vegetais, as mesmas são compostas principalmente por celulose e lignina que é facilmente decomposta em meio alcalino e aquoso. John e Agopyan (1993) afirmaram que a destruição da lignina rompe a ligação entre as células fibrosas de celulose, destruindo o arranjo espacial das paredes das fibras. Quando expostas à solução aquosa saturada com hidróxido de cálcio (pH ~ 12), perdem a resistência mecânica e reduzem o seu alongamento na ruptura. A quantidade de lignina é diferente em cada tipo de fibra, daí a degradação de determinadas fibras ocorrer mais rapidamente em umas que em outras. A estrutura da fibra (mais compacta ou menos compacta) aliada à quantidade de lignina pode ocasionar uma degradação mais ou menos lenta quando da ação de fungos e microorganismos.

A capacidade de reforço das fibras individuais (células) pode ser reduzida por causa da decomposição química da lignina e da hemicelulose presentes na lamela intercelular. Isto faz com que tais fibras vegetais sofram uma grande influência das intempéries e da alcalinidade do meio a que as mesmas estão expostas.

Em compósitos constituídos de matriz de cimento Portland e fibras vegetais pode ocorrer a perda da resistência mecânica quando os mesmos são expostos à umidade excessiva. A lignina, presente nos vegetais, é facilmente decomposta em meio alcalino o que reduz a durabilidade do compósito (LATORRACA e SILVA, 2003).

A elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz cimento Portland ($\text{pH} > 13$) é uma das principais causas da rápida degradação quando se considera o ataque alcalino das fibras. A região da matriz em torno da fibra (zona de transição) é caracterizada por porosidades elevadas, permitindo acúmulo de água, e pela presença de quantidades elevadas de hidróxido de cálcio, propiciando elevada alcalinidade (SAVASTANO e AGOPYAN, 1992 *apud* AGOPYAN e JOHN, 1993).

A elevação da temperatura ambiente provoca uma sensível aceleração na velocidade de degradação. John e Agopyan (1993) e Savastano e Agopyan (1998) apresentaram as seguintes soluções para controlar a degradação das fibras:

- emprego de matrizes de baixa alcalinidade, cuja água do poro possua pH inferior ao do cimento Portland comum ($\text{pH} < 9$), como o gesso e cimentos especiais;
- redução da alcalinidade por carbonatação acelerada da matriz;
- proteção das fibras com polímeros, hidro-repelentes como resinas, óleos e asfaltos ou ainda agentes bloqueadores da reação de decomposição das fibras como silicatos e sulfatos de sódio ou magnésio;
- impermeabilização da matriz;
- emprego dos compósitos em locais permanentemente secos.

Algumas destas soluções apresentam elevado custo reduzindo assim uma das vantagens das fibras vegetais (JOHN e AGOPYAN, 1993).

Um maior envolvimento da fibra vegetal pelos produtos de hidratação pode reduzir a degradação. Maior acréscimo de cimento (teores mais elevados) reduz o aparecimento de fungos, pois neste caso o envolvimento da fibra será maior (FONSECA *et al.*, 2002).

4.3. Vantagens e desvantagens da utilização de fibras

4.3.1. Vantagens das fibras

As vantagens ocasionadas pela utilização da fibras em matrizes frágeis favorecem a produção de componentes esbeltos (leves) com bom desempenho mecânico (elevada absorção de energia, por exemplo quando solicitado a esforços dinâmicos), bom isolamento termo-acústico, além da indispensável viabilidade econômica (AGOPYAN, 1991 *apud* SAVASTANO e AGOPYAN 1998).

Propriedades mecânicas tais como resistência à tração, à flexão e ao impacto são melhoradas com a adição de fibras em matrizes frágeis. Seu comportamento também é alterado após a fissuração, pois ao invés de ocorrer ruptura súbita do material após o início da fissuração da matriz, ocorre uma deformação plástica considerável, mais adequada à construção civil (AGOPYAN, 1993).

O compósito à base de cimento-madeira de eucalipto é o único material estrutural que é altamente resistente ao fogo, à decomposição e ao ataque de insetos (HACHMI e

CAMPBELL, 1989 *apud* LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002 e LATORRACA e SILVA, 2003) e muito estável (DINWOODIE, 1978 *apud* LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002). Possui excelentes propriedades de isolante térmico e acústico, além da fácil trabalhabilidade (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002). Apresenta ainda uma excelente resistência a fungos e boa aderência a diferentes substratos. A porcentagem de madeira na mistura influencia diretamente estas características - 55% de madeira apresentam degradação por fungos no material, efeito não observado em dosagens de 20% ou menos de massa (FONSECA *et al.*, 2002).

Segundo Montardo, Consoli e Prietto (2001), as fibras não impedem a formação das fissuras, porém, controlam a propagação das mesmas ao longo da massa cimentada, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração. A adição de fibras é capaz de causar um aumento, como já citado, da resistência mecânica, da resistência à fadiga, da resistência às cargas de impacto e dinâmicas, da ductilidade e da tenacidade.

Este compósito proporciona materiais alternativos com boa performance e custo relativamente baixo. O solo tratado com cimento sofre um aumento de rigidez em relação ao solo natural.

A inclusão de fibras de polipropileno aumenta o módulo de elasticidade, a resistência e a energia de deformação minimizando ainda o efeito da ruptura frágil. Em geral, as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito. Este fato leva a um aumento nas áreas sob as curvas tensão x deformação. Esta propriedade é comumente referida como tenacidade e representa o trabalho da fratura ou a capacidade de absorção de energia do compósito. Fibras com maior capacidade de alongamento resultam em melhores resultados que as fibras com módulos muito elevados (TAYLOR, 1994 *apud* SPECHT *et al.*, 2002).

É importante destacar que para a utilização, a fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataque de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana, além de apresentar características físicas e mecânicas adequadas (SPECHT *et al.*, 2002).

Resumidamente, pode-se considerar, de acordo com Beraldo e Pimentel (1999) e Beraldo e Carvalho (2000) que as principais vantagens no uso do CBVC (compósitos biomassa vegetal – cimento) são:

- disponibilidade de matéria-prima renovável em grandes quantidades;
- baixa massa específica;
- bom isolamento termo-acústico;
- impermeabilidade;
- boa resistência à agentes degradantes;
- resistência mecânica – sua resistência à compressão é inferior à de outros concretos leves, mas a relação entre tração e compressão passa de 1/10 no concreto convencional para $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ no CBVC (BERALDO, 1997 *apud* BERALDO e PIMENTEL, 1999). Apresenta boa resistência à impactos;
- pode ser serrado, furado e parafusado; possui facilidade de moldagem, transporte e corte;
- apresentam grandes possibilidades de utilização considerando-se sua versatilidade e seu baixo custo (HOLDERNESS, 1999 *apud* BERALDO e PIMENTEL, 1999).

4.3.2. Desvantagens das fibras vegetais

A principal desvantagem mostrada por Beraldo e Pimentel (1999) e por Beraldo e Carvalho (2000) está na incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento. A constituição química da biomassa devido à presença de açúcares, resinas, fenóis e amido, pode afetar de forma adversa a hidratação do cimento. Outras desvantagens observadas no compósito CBVC são:

- instabilidade dimensional, uma vez que se observou uma variação dimensional entre as condições seco em estufa e saturado da ordem de 5 mm/m, enquanto em concretos leves esta variação é da ordem de 0,45 mm/m (PIMIENTA *et al.*, 1994 *apud* PIMENTEL e BERALDO, 1999);
- tempo de início de pega muito longo, o que diminui a produtividade no canteiro de obras;

- durabilidade reduzida da biomassa vegetal na matriz: as partículas vegetais, ao longo do tempo e sob a influência do meio alcalino, se desintegram, gerando espaços vazios e, conseqüentemente, diminuindo a resistência mecânica do material;
- presença de eflorescências.

Estas desvantagens no entanto, não inviabilizam a utilização de determinado resíduo. É possível minimizar ou até mesmo evitar os efeitos da incompatibilidade física através de tratamentos físico-químicos aplicados sobre as partículas vegetais. Tais tratamentos serão descritos posteriormente.

4.4. Compatibilidade matriz-fibra

As coníferas têm sido a espécie de madeira mais utilizada em combinações cimento-biomassa vegetal por apresentarem propriedades, principalmente químicas, que as tornam mais compatíveis a uma combinação com o cimento, não causando inibição da pega e endurecimento do mesmo. A incompatibilidade de várias espécies com o cimento pode restringir o emprego desse compósito. Isto é devido à presença de algumas substâncias químicas na madeira, principalmente as presentes nos extrativos, que retardam a pega do cimento. O aumento no tempo de cura pode inviabilizar a utilização de determinada espécie de madeira uma vez que afeta os custos de produção e prejudicando as propriedades finais da chapa (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002).

Segundo Beraldo e Carvalho (2000), a maioria das espécies vegetais tem se mostrado inadequada para uso direto com o cimento Portland. Baseando-se neste fato, alguns procedimentos que busquem a adequação da fitomassa à matriz devem ser adotados tais como uma escolha mais apurada da época de abate das espécies e uma melhora nas condições de estocagem das peças de madeira. Determinadas condições de estocagem podem favorecer a ação de microorganismos sobre a fitomassa, culminando com a diminuição do caráter inibitório de certas espécies vegetais em presença do cimento. A proteção durante a estocagem faz-se então necessária.

Algumas técnicas para proporcionar a compatibilidade entre a madeira e o cimento, minimizando assim o efeito deletério sobre a matriz, foram citadas por Simatupang *et al.* (1988) *apud* Beraldo e Carvalho (2000), por Latorraca e Albuquerque (2002) e por Beraldo *et al.* (2002), sendo aqui reproduzidas:

- maturação da madeira ou das partículas;
- imobilização das substâncias químicas, através do recobrimento por uma película protetora (oleosa ou salina);
- extração de componentes inibidores (por exemplo através da imersão das partículas em água fria ou quente);
- extração dessas substâncias pela ação de soluções aquosas (efeito da temperatura, duração do tratamento e pH);
- secagem em fornos;
- utilização de cimento de pega rápida (por exemplo CP V) ou adição de produtos químicos aceleradores da pega pelo cimento;
- tratamentos de carbonatação acelerada;
- utilização de cimento aluminoso (pouco disponível no Brasil);
- recomendam-se ainda a utilização de matrizes nas quais o pH seja diminuído, de forma que se consiga aumentar a durabilidade do compósito (JOHN e AGOPYAN, 1993).

A injeção de CO₂ (dióxido de carbono) durante a prensagem e a modificação do cimento são outras técnicas também desenvolvidas para reduzir o tempo de endurecimento do cimento tornando a consolidação do painel muito mais rápida (SIMATUPANG *et al.*, 1991; SOUZA, 1994; MOLESMI, 1998) *apud* (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002).

Latorraca e Albuquerque (2002) afirmaram que a adesão entre a madeira e o cimento pode ser física, química ou através de uma combinação de ambas:

- químico – ocorre por pontes de hidrogênio. Madeira e cimento possuem alta mobilidade que diminui com o tempo;
- químico e físico – o cimento cristaliza, desenvolve uma matriz que envolve a madeira;

- físico – ocorre pelo entrelaçamento interfacial. O desenvolvimento da adesão entre o cimento e a madeira continua por muitos anos.

Existem ainda aqueles que atribuem a adesão entre duas superfícies sólidas a existência de forças de Van der Waals. Estudos mostram ainda a grande influência dos açúcares existentes na madeira na interação inibitória de madeira-cimento (HACHMI e CAMPBELL, 1989 *apud* LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002). “Esta camada inibitória reduz a velocidade de reação do cimento. Extrativos não polares tais como terpenos, resinas e gorduras podem também reduzir a resistência dos painéis” (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002).

Estudos feitos com algumas espécies de eucalipto têm demonstrado resultados interessantes com uma vantagem que, dentro de alguns limites a casca não representa uma inconveniência, sendo assim uma alternativa viável (LATORRACA e SILVA, 2003). O *Pinus*, por ser uma conífera, provavelmente apresente um bom comportamento em presença do cimento. No entanto, outros fatores como a época de corte da árvore e a região donde se efetuou a amostragem das partículas, em relação à altura da árvore (base, meio e topo), podem afetar significativamente o comportamento do compósito, por apresentarem diferentes concentrações de açúcares (BERALDO, 2003).

4.5. A mistura solo-cimento-fibras

O teor de água deve ser baixo, pois a mistura deve estar quase seca. A pouca umidade garante uma compactação mais eficiente e uma melhor resistência final do material. O cimento é um componente estabilizador que melhora essas qualidades. A umidade depende do solo a ser utilizado, sendo, portanto, necessário realizar o ensaio de compactação para determinar a umidade ótima correspondente à massa específica máxima do material (CEBRACE, 1981).

A homogeneização da mistura deve ser feita em solo seco tomando-se os seguintes cuidados em sua estocagem: cobertura do material com proteção impermeável, conservação de estoque seco de solo, utilização de solos arenosos, pois estes facilitam a

secagem (CEBRACE, 1981). Do grau de homogeneização dependerá a resistência mecânica do tijolo (GOMES, 1980).

A mistura dos componentes segue a seguinte ordem: solo seco, cimento, água e fibras nas devidas proporções. Os componentes devem ser misturados até produzirem uma amostra homogênea (MONTARDO, CONSOLI E PRIETTO, 2001 e VIEIRA *et al.*, 2002). Esta seqüência é apropriada, pois permite que o cimento seja misturado com o solo seco garantindo melhor homogeneização da matriz. A adição das fibras deve ser feita somente após a água ter sido acrescentada. Esta é uma técnica adequada para evitar a segregação das fibras que ocorre se a matriz estiver seca (VIEIRA *et al.*, 2002). A mistura deve ser feita de forma que sua homogeneização seja percebida visualmente.

Fernandes *et al.* (2002) fizeram uma seqüência de mistura diferente. Como o resíduo utilizado foi o alcatrão obtido da carbonização da madeira de *Eucalyptus cloeziana*, a seqüência da mistura usada foi a seguinte: primeiro misturou-se o alcatrão ao solo seco depois adicionou-se água até o teor de umidade previamente conhecido. A mistura foi passada na peneira # 4,8 mm até atingir o grau de homogeneização desejado.

Segundo Gomes (1980) a quantidade de água na mistura deverá ser suficiente para:

- desenvolver plasticidade (liga) do solo, para que na conformação dos tijolos não ocorram trincas, quebra de cantos e aderência excessiva nas paredes da matriz de conformação;
- reagir com o cimento.

As propriedades citadas anteriormente nos levam a perceber a necessidade de execução de uma dosagem prévia visando evitar alguns inconvenientes a fim de otimizar a mistura. Esta dosagem, portanto é baseada no ensaio de compactação onde se determina a umidade ótima e a massa específica seca.

4.6. Tratamento e proteção das fibras

A combinação entre fibras vegetais e cimento pode não ser aconselhável devido à possível degradação das fibras e conseqüentemente do compósito. Faz-se então

necessário algum tipo de tratamento ou proteção das fibras. Também, segundo Filho, Barbosa e Ghavami (1990), para que ocorra uma boa ligação entre o solo e as fibras vegetais algum tipo de material impermeabilizante deve ser usado.

A presença das fibras aumenta a porosidade do compósito que possui ainda um baixo teor de hidróxido de cálcio livre. Isto ocasiona a rápida carbonatação do compósito, reduzindo mais ainda a alcalinidade da matriz. A proteção das fibras ocorre devido a este processo (JOHN e AGOPYAN, 1993). Processos de carbonatação artificial mostram-se portanto aconselháveis para a proteção das fibras.

Segundo Agopyan e John (1992) *apud* John e Agopyan (1993), o cimento desenvolvido durante a sua fase inicial de hidratação forma etringita, produto que é decomposto em gipsita durante a carbonatação da pasta. Um ensaio acelerado de carbonatação mostrou que esta decomposição fez com que ocorresse a estabilização da resistência mecânica do cimento após 28 dias de cura.

Segundo Beraldo (2003), a carbonatação artificial é uma alternativa adotada para contrabalançar os efeitos da presença de uma biomassa vegetal incompatível com o cimento. Baseia-se na intensa reação que ocorre entre o anidrido carbônico e a cal liberada durante a hidratação dos constituintes do cimento. A intensidade desta reação química depende de uma série de fatores: da porosidade do material, da concentração de anidrido carbônico, da umidade relativa do meio ambiente, das dimensões da peça, dentre outros.

Um dos possíveis tratamentos das fibras consiste na lavagem da fitomassa através da imersão das partículas vegetais em soluções aquosas. Esta lavagem permite eliminar parcialmente as substâncias nocivas à pega do cimento. A eficiência do tratamento depende, igualmente, da duração e temperatura do mesmo, assim como do pH da solução. Deve-se no entanto evitar tratamentos severos, pois podem acarretar alterações consideráveis na fitomassa, podendo até mesmo causar um aumento da incompatibilidade química com o cimento (BERALDO e CARVALHO, 2000).

Ainda para melhorar a compatibilização entre o cimento e a madeira, Fonseca *et al.* (2002) sugerem que sejam feitos os seguintes tratamentos:

- tratamentos químicos através da impregnação da madeira por material quimicamente idêntico ou similar aos extrativos, com a finalidade de dificultar o acesso da água de amassamento ao interior da madeira. Também pode se impregnar a madeira com epóxi;
- tratamentos físicos feitos através da compressão do resíduo para maior estabilidade dimensional, maior compacidade e maior massa específica. A lavagem com água ou outros solventes como descrita no parágrafo anterior, é um tipo de tratamento físico. Pode-se ainda fazer a aceleração da pega através da aditivação da mistura de cimento com aditivos modificadores de pega visando minimizar os efeitos extrativos da madeira. Há ainda a mineralização através da submersão da madeira em uma solução salina para a liberação de extrativos e absorção de íons da solução que posteriormente irão cristalizar no interior da fibra. Este método apesar de produzir excelentes resultados, diminui a maleabilidade das fibras tornando-as mais frágeis.

A escolha do mesmo deve ser feita baseando-se no uso da peça a ser fabricada ou da disponibilidade tecnológica.

Visando a melhor homogeneização da mistura, melhor trabalhabilidade, maior resistência, alguns produtos químicos são adicionados aos compósitos biomassa vegetal-cimento. Além dos aditivos para a matriz, tais como retardadores, aceleradores e plastificantes, são utilizados, as vezes, agentes dispersantes das fibras. Estes últimos são substâncias tensoativas que permitem uma mistura mais fácil das fibras na matriz (AGOPYAN, 1993).

Filho, Barbosa e Ghavami (1990) estudando a inclusão de sisal e coco em blocos de adobe perceberam alterações significativas quanto à absorção das fibras quando as mesmas foram tratadas com repelentes como o piche (um tipo de betume) e um líquido produzido pela Cia Industrial de Plásticos – CIPLA. A maior ou menor penetração do

repelente na fibra influencia em sua impermeabilização e conseqüentemente na variação dimensional causada pela absorção.

Testes com aditivos químicos e aditivos minerais têm sido realizados. Aceleradores de pega como Cloreto de cálcio, Sulfato de alumínio e Silicato de sódio têm sido testados. Segundo Latorraca e Silva (2003), os aditivos minerais têm sido testados com o objetivo de elevar os valores absolutos das propriedades mecânicas e reduzir a absorção e o inchamento durante a exposição do compósito à elevadas condições de umidade relativa. Beraldo e Pimentel (1999) estudando compósitos de partículas de *Pinus caribaea* sugerem a utilização de impermeabilizantes, como por exemplo Neutrol, para criar sobre as partículas de madeira uma camada impermeável que impeça a água de solubilizar os extrativos da madeira, os quais são nocivos à hidratação do cimento. Segundo os autores ainda, em presença de aceleradores, o cimento tende a hidratar-se mais rapidamente, não havendo tempo para que ocorra a migração dos extrativos da madeira para a superfície da mesma que afetariam negativamente a hidratação do cimento.

5

O TIJOLO

O estudo de tijolos utilizando matérias-primas alternativas como o solo-cimento surge como solução para o problema habitacional de países em desenvolvimento. Porém, a utilização de solo compactado como elemento de construção, não é uma idéia recente. Desde a antiguidade, construções em barro socado e adobe já eram utilizadas, tendo sua qualidade em termos de resistência mecânica, resistência às intempéries e à erosão, isolamento termo-acústico comprovadas.

Apesar de a idéia da utilização da “terra” compactada ser antiga, a forma comprimida por equipamentos somente se deu com a criação da primeira prensa manual na década de 50 (BARBOSA e MATTONE, 2002).

Utilizando matéria-prima comum e abundante e misturando-a com cimento em proporções que variam de 5 a 10% em relação ao volume (ou massa) do solo, pode-se fabricar tijolos de elevada resistência mecânica (até 100 kgf/cm²), baixa capacidade de absorção de água (em torno de 15%), elevada resistência às intempéries e à erosão e alto poder de isolamento termo-acústico (GOMES, 1980).

Em regiões próximas como Catas Altas podem ser encontradas algumas construções antigas, de aproximadamente 200 anos, onde foi utilizado o solo na forma de tijolos como material de construção (FIG. 6).



FIGURA 6 – Igreja da cidade de Catas Altas - MG, Brasil

Construções mais atuais mostram que a técnica de solo melhorado com cimento (solo-cimento) tem crescido cada vez mais, sendo usada não somente em construções populares, como também em habitações de diferentes classes sociais para empregos diversos (FIG. 7 e 8).



FIGURA 7 – Residência em construção na região metropolitana de Belo Horizonte – MG onde são utilizados tijolos de solo-cimento.



FIGURA 8 – Construção em tijolos de solo-cimento na região metropolitana de Belo Horizonte - MG, Brasil

5.1. Propriedades dos tijolos

O tijolo é um produto estrutural obtido a partir das mais variadas matérias-primas, geralmente de origem inorgânica, e possíveis de serem submetidas a um processo de endurecimento (SUPERTOR, 198-). Estes processos de endurecimento podem ser divididos em:

- Físico (térmico) – solidificação de massa fundida. Endurecimento provocado por abaixamento de temperatura de um líquido ou massa fundida;
- Físico-químico – (termo-químico) – endurecimento provocado por reações químicas que se realizam a elevadas temperaturas. Sinterização - Tijolo de sílica Cal;
- Químico – Endurecimento provocado por reações químicas geralmente irreversíveis. Polimerização, desidratação, hidratação.

Os processos físicos ou térmicos não apresentam interesse industrial para produção de elementos estruturais para construção civil. Os produtos cerâmicos são provenientes de processos termo-químicos. O processo químico de endurecimento é bastante antigo, porém não tradicional no Brasil.

As matérias-primas utilizadas para a fabricação de elementos estruturais pelo processo de endurecimento químico são basicamente:

- solo: elemento de carga, responsável pela maior quantidade de volume de produto, e pela resistência mecânica do mesmo logo após sua confecção;
- cimento, cal, gesso, resíduo de carbureto ou todo composto químico que desenvolva pega quando hidratado: elemento responsável pelo endurecimento, o qual é submetido a um tratamento químico, e que após o início desse tratamento torna-se responsável pelas propriedades finais do produto acabado;
- água: tem como finalidade conferir plasticidade e resistência mecânica suficientes ao elemento de carga para que a mistura possa ser conformada e manuseada antes do endurecimento e ser um reagente que toma parte no processo, juntamente com o elemento endurecedor; elemento de ligação. A água deve ser potável, isenta de matéria orgânica em suspensão e sais que interfiram na reação de endurecimento (SUPERTOR, 198-; GOMES, 1980).

5.2. Processos de fabricação dos tijolos

O processo de fabricação dos tijolos consiste na homogeneização, prensagem e endurecimento das matérias-primas anteriormente descritas, previamente determinadas quantitativamente.

Para esta utilização, os solos considerados ideais são os areno-siltosos, os areno-argilosos, os silto-arenosos e os silto-argilosos, sendo que a quantidade de areia deve ser aproximadamente maior ou igual à quantidade de finos (silte e argila). Solos conhecidos popularmente como saibro, piçarra, as terras vermelhas e amarela são de boa qualidade, podendo, na maioria das vezes, serem utilizados. O solo deve ser isento de matéria orgânica, devendo-se, portanto, evitar o uso de solos pretos ou cinza-escuros por serem prejudiciais às propriedades do produto final, os tijolos. Torrões, pedregulhos e raízes devem ser retirados do solo uma vez que reduzem as qualidades do tijolo. O peneiramento torna-se então imprescindível para que tal condição seja cumprida.

O processo de fabricação do tijolo pode ser resumido no fluxograma mostrado na FIG. 9.

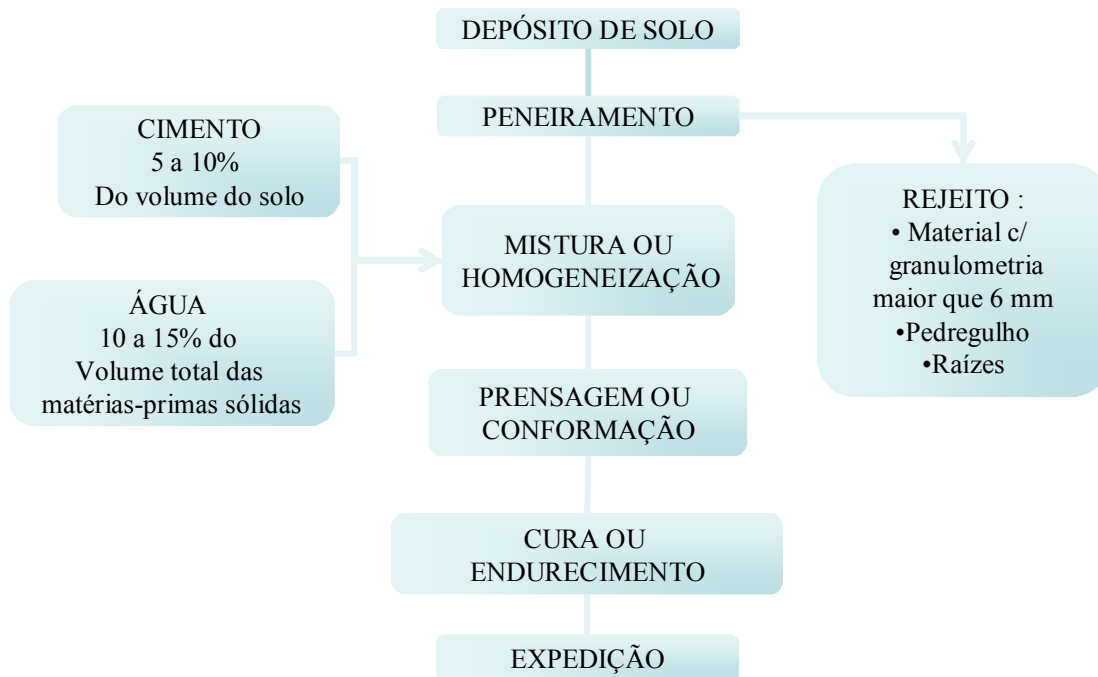


FIGURA 9 – Fluxograma de processo de fabricação de tijolos de solo-cimento
Fonte: GOMES, 1980

No capítulo 3 foram citadas algumas formas de cura para peças executadas utilizando o solo-cimento como matéria-prima. Gomes (1980) sugere que ao se executar tijolos de solo-cimento, após a prensagem dos mesmos, deve-se dispô-los sobre um piso plano à sombra e mantê-los úmidos por um período mínimo de 3 dias. Em regiões de clima muito seco ou em épocas do ano de elevadas temperaturas, é importante que se faça irrigação dos tijolos com água 2 ou 3 vezes ao dia ou quando aparecerem indícios de secagem nos mesmos. Após este período, a secagem dos tijolos poderá ocorrer em 3 ou 4 dias tornando-os assim totalmente secos e prontos para uso.

5.3. Características dos tijolos de solo-cimento

Para se obter um tijolo ideal onde a resistência seja otimizada, é necessário que o mesmo seja construído respeitando-se parâmetros pré-determinados pelo ensaio de compactação no solo e no solo-cimento. Vale a pena ressaltar, então, que a otimização do tijolo é feita baseando-se na equivalência entre a compactação Proctor Normal e a prensagem dos tijolos.

Tijolos de solo-cimento prensados com a máxima densidade aparente seca e umidade ótima, quando comparados com os similares de barro queimado apresentam as seguintes características:

- maior resistência mecânica – 70 a 80 kgf/cm² no ensaio de compressão;
- menor capacidade de absorção de água – em média 15%;
- maior padronização de formas e dimensões;
- maior beleza (GOMES, 1980).

Em função da menor capacidade de absorção de água deve-se usar uma argamassa de assentamento mais seca que a utilizada para assentamento dos tijolos de barro queimado.

O custo final pode ser reduzido através de uma maior padronização de dimensões e formas, não havendo necessidade neste caso de correção de defeitos e imperfeições. A camada de assentamento pode ser reduzida de 20 mm, usual em tijolos de barro cozido, para 7 mm; bem como a camada de revestimento pode ter uma redução de até 50%. O poder de isolamento térmico e acústico de uma parede de tijolos de solo-cimento é igual ao de uma parede de concreto de mesma espessura e tijolos solo-cimento são totalmente incombustíveis (GOMES, 1980). Em alguns casos, pode-se chegar a espessuras de argamassa de assentamento de 3 mm e a não utilização de revestimento (BARBOSA e MATTONE, 2002; BARBOSA *et al.*, 2003).

O uso incorreto desta tecnologia pode ocasionar em construções com condições inadequadas tais como frestas e fissuras, onde, roedores e insetos se abrigam, colocando em risco a saúde de seus moradores. Porém, quando a tecnologia é bem aplicada, observa-se construções com qualidade e resistência satisfatórias.

Obras construídas com tijolos intertravados apresentam rápida, fácil e econômica execução (LOPES, 2002).

Sugere-se que a seqüência de mistura dos componentes formadores do tijolo seja solo, cimento, água e fibra. Assim, respeitando-se os parâmetros de otimização bem como a seqüência executiva é possível fazer tijolos com altas resistências e processos construtivos de fácil execução.

5.4. Fronteira do conhecimento

A técnica de construção com solo, solo-cimento com ou sem resíduos vegetais em geral, apesar de antiga ainda necessita de estudos, uma vez que até hoje, ainda são utilizados ensaios expeditos para a avaliação do material. Devido à durabilidade mostrada pelas antigas construções existentes, percebe-se a boa resistência deste, porém, existe a necessidade de otimização da mesma. Esta otimização pode ser conseguida aliando-se conhecimentos de engenharia de geotecnia, estrutural, de materiais, etc., onde seriam aproveitados os melhores conceitos fornecidos por cada uma delas.

Do estudo dos compósitos vem a utilização de matérias-primas como o solo, o cimento e as fibras, sejam estas de vidro, aço, polipropileno ou vegetais. O estudo deste último grupo mostra-se crescente com a utilização do coco, sisal, piaçava, malva, algodão, polpa de celulose de diferentes coníferas, rami, banana, malva, etc. Visando o aproveitamento de materiais rejeitados, têm sido estudados também alguns tipos de rejeitos provenientes de serrarias, fábricas e indústrias em geral.

A utilização de materiais recicláveis ou de origem natural torna-se cada vez mais crescente, pois existe um mercado abundantemente promissor sem que ocorra a destruição do meio ambiente, cuja proteção é atualmente bastante discutida.

A avaliação não-destrutiva de peças confeccionadas com a mistura solo-cimento merece consideração, apesar de pouco se ter estudado a respeito até hoje. Porém, conhecendo-se os bons resultados de tal avaliação, em diversos tipos de materiais tais como concreto, madeira, aço, etc., faz-se necessário sua utilização também para o solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira.

6

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RESÍDUOS DE MADEIRA - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Existe hoje uma grande preocupação de parte da população e de alguns governantes quanto ao desequilíbrio ambiental. Várias são as fontes causadoras, porém, entre estas está a indústria da construção civil, que por ser altamente poluidora e grande consumidora de recursos energéticos, causa fortes impactos ambientais.

Outra preocupação está também no crescimento populacional acelerado em oposição à carência de financiamentos habitacionais para a população de baixa renda, acentuando assim a crise no quadro habitacional brasileiro.

A tentativa de solução dos problemas acima citados incentiva a busca de métodos alternativos de construção tais como a utilização de materiais rejeitados, resíduos de forma geral, ou até mesmo a retomada de técnicas milenares esquecidas.

A construção de habitações em solo-cimento tem sido empregada por vários países em desenvolvimento. Porém, a seleção inadequada das áreas de empréstimo de solos e a ausência de um controle rigoroso na fabricação tornam lento o desenvolvimento desta técnica no Brasil.

A utilização desta matéria-prima apresenta algumas vantagens tais como disponibilidade, propriedades térmicas elevadas, bom controle de umidade do ambiente, geração mínima de poluição e baixo consumo energético no seu processo de fabricação.

Quanto à introdução de resíduos de madeira em matrizes frágeis, podem existir também alguns pontos positivos que somados às vantagens apresentadas para os tijolos de solo-cimento, tendem a melhorar ainda mais as propriedades dos tijolos.

Em vista do histórico apresentado, o objetivo principal deste estudo é a produção de tijolos intertravados utilizando como matéria-prima solo, cimento e resíduos de madeira, abundantemente disponíveis, para a criação de um produto de baixo custo com resistência adequada.

Para isto, os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- definir uma faixa granulométrica utilizando dois solos que contemplem a maioria dos solos utilizados na prática, caracterizando-os física e mecanicamente através de ensaios de laboratório;
- determinar as características do solo visando a otimização e melhoria da resistência do produto final;
- estudar a relação entre a pressão de moldagem das prensas convencionais de tijolos e a pressão correspondente à compactação Proctor Normal.
- estudar a resistência de corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e prismas confeccionados com solo-cimento;
- estudar a influência da inclusão de resíduos de madeira na resistência;
- estudar o comportamento do tijolo quanto às tensões atuantes no mesmo por meio de uma avaliação experimental de tensões;
- avaliar as propriedades mecânicas dos corpos-de-prova cilíndricos e tijolos através de ensaios não-destrutivos via ultra-som.

Para que os objetivos específicos acima descritos possam ser atingidos, serão testados os seguintes corpos-de-prova: cilíndricos, tijolos e prismas. No desenvolvimento do trabalho, o termo corpo-de-prova se referirá somente aos corpos-de-prova cilíndricos, sendo os corpos-de-prova tijolos e prismas tratados apenas por tijolos e prismas.

7

MATERIAIS

Neste capítulo serão mostrados os materiais utilizados para a composição e avaliação dos tijolos propostos neste trabalho. Serão abordadas ainda algumas considerações a respeito destes materiais.

7.1. Materiais para a mistura solo-cimento-resíduos

7.1.1. Solo

Para a composição dos solos estudados foram utilizados os seguintes materiais:

- aproximadamente 600 kg de solo proveniente da área de empréstimo da obra de construção da Faculdade de Farmácia no Campus da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG);
- cerca de 850 kg de solo proveniente de um talude da antiga pista de testes do projeto Mini Baja da Engenharia Mecânica no campus da UFMG. Nesta área estão sendo construídas as futuras instalações da Escola de Engenharia da UFMG;
- aproximadamente 750 kg de areia média a fina comprada em depósito de materiais de construção no centro de Belo Horizonte;
- 12 sacos de agrofilito (240 kg aproximadamente) também comprados em depósito de materiais de construção.

As curvas granulométricas dos solos acima podem ser vistas no capítulo 9.

7.1.2. Cimento

Utilizou-se o cimento Portland de alto forno para uso geral do tipo CP III-32-RS, por ser este disponível na região.

7.1.3. Água

Como foi utilizada água destilada para os ensaios de laboratório, visando manter o mesmo parâmetro, utilizou-se também água destilada para os tijolos. A água destilada utilizada em todo o trabalho foi produzida no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG.

7.1.4. Resíduos de madeira

Para o estudo dos resíduos foram coletadas sobras de peças de madeira, denominadas de serragem, de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. Esta serragem foi peneirada para que somente fossem utilizados os resíduos contidos entre as peneiras # 4 (4,75 mm) e # 10 (2,0 mm).

Visando a “impermeabilização” dos resíduos, fez-se uma solução de Sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$ e água (1% de Sulfato em relação à água utilizada). O resíduo foi colocado nesta solução por aproximadamente 20 minutos. Em seguida, foi levado à estufa (aproximadamente 60°C) até sua secagem total. Esta “impermeabilização” ou proteção da fibra com Sulfato de alumínio, segundo Oliveira (1989) *apud* Savastano e Agopyan (1998) pode auxiliar no controle da degradação das mesmas.

7.2. Equipamentos e aparelhagem

Nos ensaios de caracterização geotécnica dos solos foram utilizados os equipamentos e aparelhagem especificados pelas normas da ABNT. Uma descrição mais detalhada incluindo sua utilização encontra-se no Apêndice B.

Na moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios de compressão simples utilizou-se o moldador da FIG. 10-b. Este moldador foi instrumentado (FIG. 10-a) utilizando-se um transdutor de deslocamentos (DT) fabricado pela Kyowa, modelo 100A (FIG. 10-d) e uma célula de carga com capacidade de 10 kN (FIG. 10-e). O cilindro utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova bem como a régua de controle da altura de cada camada podem também ser vistos na FIG. 10-c.

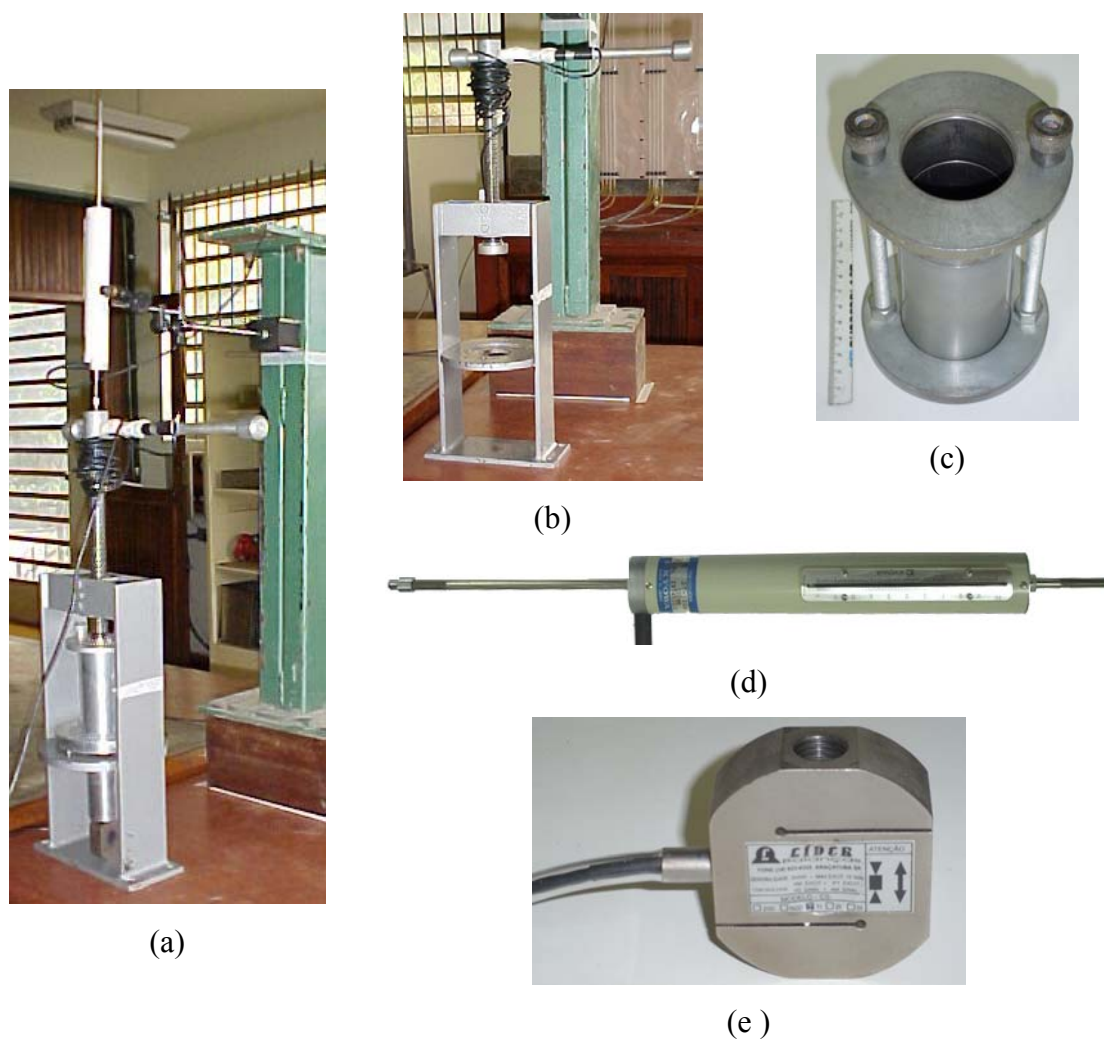


FIGURA 10 – Aparelhagem para moldagem de corpos-de-prova
 (a) moldador instrumentado (b) moldador (c) cilindro e régua (d) DT-100A
 (e) célula de carga de 10 kN

A FIG. 11-a mostra a prensa utilizada para a execução dos ensaios de compressão simples (ou compressão não confinada) dos corpos-de-prova de solo. Esta prensa possui um anel dinamométrico com capacidade de 2 kN (FIG. 11-b) para determinação do carregamento; um relógio comparador com capacidade de 10 mm para determinação do deslocamento do pistão (FIG. 11-c). Possui também um mecanismo para controle da velocidade de aplicação do carregamento.



(a) Prensa de compressão



(b) Anel dinamométrico – capacidade de 200 kgf e rótula



(c) Relógio comparador

FIGURA 11 – Prensa de compressão simples para corpos-de-prova de solo
Laboratório de Geotecnia – Escola de Engenharia – UFMG

Para os ensaios de compressão simples e compressão diametral em corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduo foi usada a máquina universal da marca EMIC, modelo DL 30000, com capacidade de 300 kN mostrada na FIG. 12. Esta máquina possui controle automático de carregamento e de deslocamento.

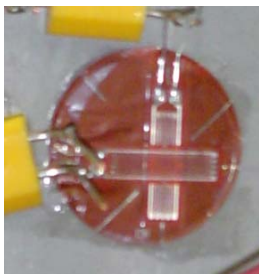


FIGURA 12 – Máquina universal com capacidade de 300 kN
LAEES – Escola de Engenharia – UFMG

As dimensões dos corpos-de-prova foram medidas com um paquímetro digital com capacidade de 150 mm e sensibilidade de 0,01 mm.

Para a instrumentação dos tijolos foram utilizadas para cada um deles cinco rosetas de dois extensômetros da marca Kyowa, modelo KFG-10-120-D16-11 (FIG. 13-a). Os extensômetros foram colados na superfície previamente preparada do tijolo utilizando um adesivo específico. Para o preparo da superfície dos tijolos, foi aplicada no tijolo seco à temperatura ambiente uma massa plástica, com o objetivo de regularizar a superfície tornando-a lisa e proteger os extensômetros da umidade. O intervalo entre a aplicação da massa plástica e a colagem dos extensômetros foi de no mínimo 24 horas, sendo o tijolo ensaiado após um mínimo de 12 horas após a colagem dos extensômetros.

Além dos extensômetros foi instalada na máquina universal uma célula de carga fabricada pela Micro Análise, modelo SWH, com capacidade de 200 kN (FIG. 13-b). Os dados fornecidos pelos extensômetros e pela célula de carga foram coletados por um sistema de aquisição de dados (SAD).



(a)



(b)

FIGURA 13 – Aparelhagem para ensaio dos tijolos instrumentados
(a) roseta (b) célula de carga de 200 kN

7.3. O Sistema de Aquisição de Dados - SAD

Utilizou-se tanto para a moldagem de corpos-de-prova quanto para a execução do ensaio de compressão nos tijolos instrumentados, o Sistema de Aquisição de Dados ADS-2000 da Lynx. Este sistema é composto de um gabinete ligado a um computador. No gabinete estão localizados o módulo controlador (AC-2122) e módulo condicionador

(AI-2160). O módulo AC-2122 possui um conector (de controle dos sinais analógicos e digitais de controle) que permite sua conexão com a placa instalada no computador através de um cabo.

Todos os instrumentos apresentados foram ligados ao sistema ADS-2000. Como o moldador estava ligado ao computador (FIG. 14-a), a coleta de dados foi realizada através do programa Aqdados 5.0 instalado no mesmo. Já no ensaio dos tijolos, os dados foram coletados através do Aqdados 7.0 instalado no notebook (FIG. 14-b). Todos os dados foram tratados no programa Aqdados 7.0 por questões de facilidade.

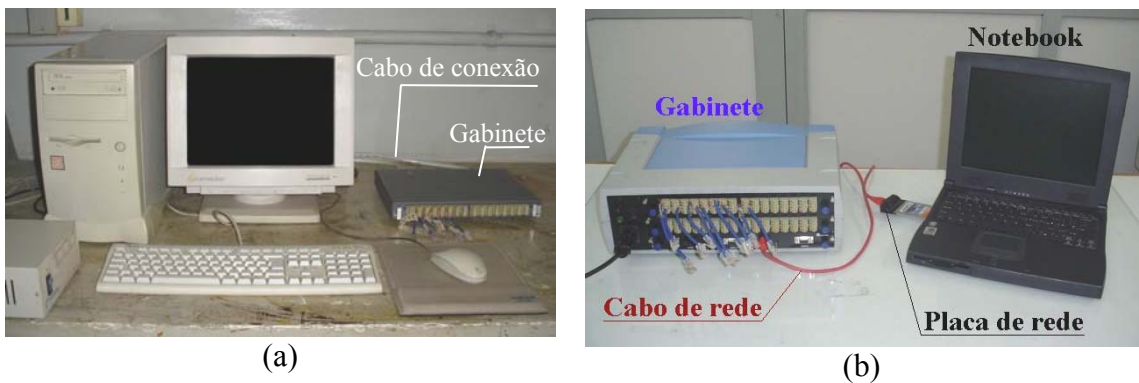


FIGURA 14 – Sistema de aquisição de dados ADS-2000
(a) ligado à um computador (16 canais) (b) ligado à um Notebook (32 canais)

O tratamento dos dados do moldador, obtidos pelo programa Aqdados 5.0, consistiu no registro da máxima carga e seu deslocamento respectivo em cada camada do corpo-de-prova. Neste caso não houve nenhuma filtragem e nem redução do número de dados, já que interessava apenas os valores máximos de carga e deslocamento em cada camada.

Já o tratamento dos dados do ensaio do tijolo, coletados pelo programa Aqdados 7.0, consistiu de uma filtragem passa-baixas (frequências de corte de 60 Hz) e de uma redução do número de dados coletados através de substituição de cinco valores por sua média.

7.3.1. Conexão e configuração dos canais de entrada do ADS-2000

O sistema ADS-2000 possui canais (16 ou 32 conforme o gabinete), cada qual com um conector de entrada para sinais analógicos onde existem quatro pontos para alojamento

dos fios provenientes dos sensores utilizados. Cada um destes pontos tem uma função específica, como pode ser visto na FIG. 15. Os fios alojados neste conector serão ligados aos circuitos existentes na placa AI-2160. Estes circuitos podem ser configurados por meio de jumpers, de acordo com a necessidade de cada sensor aí acoplado.

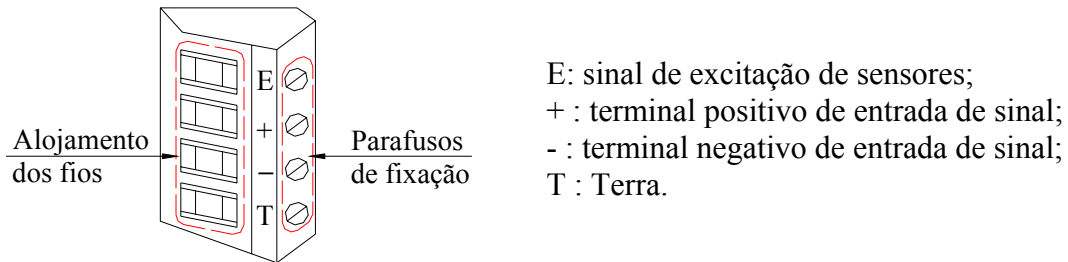


FIGURA 15 – Conector de entrada de sinais no ADS-2000

Para a moldagem dos corpos-de-prova, utilizou-se apenas dois canais dos dezesseis disponíveis no gabinete. Para os ensaios com tijolos instrumentados, foram utilizados onze dos trinta e dois canais disponíveis no SAD. Como cada um dos sensores foi ligado sempre no mesmo canal, a configuração dos mesmos foi executada uma única vez.

Os sensores das células de carga e do DT possuíam quatro extensômetros elétricos ligados internamente em um circuito do tipo ponte completa de Wheatstone (FIG. 16). Já as rosetas por serem formadas por extensômetros individuais foram ligadas em um circuito do tipo $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone (FIG. 17).

Os QUADROS 4 e 5 mostram resumidamente as configurações dos canais e as propriedades dos sensores de cada aparelho a eles ligados.

QUADRO 4

Propriedade dos aparelhos conectados à placa de 16 canais do ADS-2000

Número do canal de entrada	Aparelho conectado	Configuração do sensor do aparelho	Resistência (Ω)	Voltagem de excitação (V)	Configuração para o sensor
00	Célula de carga capacidade 10 kN	Ponte Completa	350	2,0	FIGURA 16
01	DT-1 (modelo 100A)	Ponte Completa	120	2,0	FIGURA 16

QUADRO 5

Propriedade dos aparelhos conectados à placa de 32 canais do ADS-2000

Número do canal de entrada	Aparelho conectado	Configuração do sensor do aparelho	Resistência (Ω)	Voltagem de excitação (V)	Configuração para o sensor
00	Célula de carga capacidade 200 kN	Ponte Completa	1250	2,0	FIGURA 16
16	Extensômetro 01	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
17	Extensômetro 02	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
18	Extensômetro 03	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
19	Extensômetro 04	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
20	Extensômetro 05	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
21	Extensômetro 06	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
23	Extensômetro 08	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
24	Extensômetro 09	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
25	Extensômetro 10	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17
26	Extensômetro 07	¼ de ponte	120	2,0	FIGURA 17

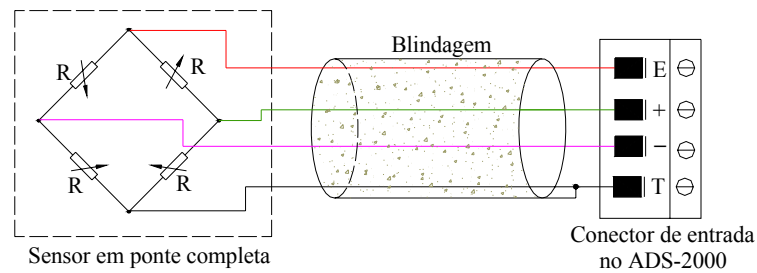


FIGURA 16 – Configuração para sensores em ponte completa

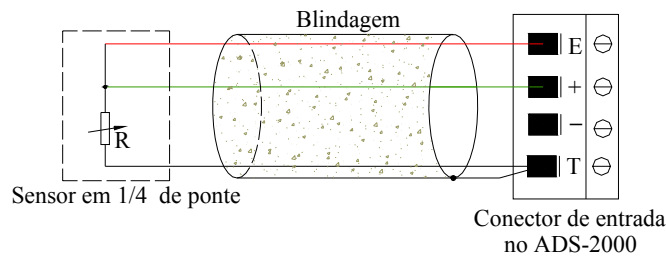


FIGURA 17 – Configuração para sensores em ¼ de ponte

7.3.2. Calibração dos aparelhos

Os aparelhos utilizados foram calibrados em seus respectivos canais de entrada através de uma regressão linear no programa Aqdados. O programa faz a leitura da tensão na entrada do canal correspondente a um valor conhecido na unidade de engenharia. A reta obtida por este par de valores corresponde ao fundo de escala do canal. Nas calibrações executadas, a correlação entre os valores determinantes da constante de calibração foi sempre em torno de 99%.

A célula de carga de 200 kN foi calibrada na máquina universal da EMIC, com o auxílio de uma outra célula (capacidade de 300 kN) da própria máquina. Como o moldador apresenta um mecanismo puramente manual, a célula de carga de 10 kN utilizada no mesmo foi calibrada em uma prensa para ensaios de adensamento do Laboratório de Geotecnia (FIG. 18). O DT 100A foi calibrado a partir de sua própria escala, sendo considerado positivo o sentido de compressão da haste.



FIGURA 18 – Prensa para ensaios de adensamento
Laboratório de Geotecnia – Escola de Engenharia – UFMG

Os extensômetros não foram calibrados pois já vêm configurados de fábrica. Para aceitação desta calibração e para uma conversão dos valores dos extensômetros para valores de engenharia no programa Aqdados, utilizou-se uma constante conhecida como valor de engenharia (V_{eng}), cuja determinação é mostrada na EQ. 1.

$$V_{eng} = \frac{R_g}{k \times (R_g + R_{cal})} = 910,66 \mu\varepsilon = (910,66 \times 10^{-6}) \quad (1)$$

sendo R_g a resistência do extensômetro ($R_g = 120,2 \Omega$), k o fator gage do extensômetro ($k = 2,12$) e R_{cal} a resistência da placa condicionadora ($R_{cal} = 62140 \Omega$).

8

METODOLOGIA

A metodologia aqui descrita aborda desde a preparação das amostras de solo e a caracterização do mesmo, até a execução de ensaios destrutivos e não-destrutivos nos tijolos confeccionados com estes solos.

8.1. Coleta e preparação das amostras de solo

A preparação das amostras de solo iniciou-se com uma coleta prévia de solo de regiões diferenciadas e sua análise preliminar. Conhecidas as propriedades dos solos escolheu-se aquele que melhor se adequaria ao propósito de estudo.

Conforme observado a partir da revisão bibliográfica, vários solos com granulometrias diferenciadas podem ser utilizadas na confecção de tijolos de solo-cimento. Para uma maior facilidade no emprego desta técnica optou-se pela construção de curvas granulométricas de referência, a partir das quais qualquer solo cuja curva granulométrica estivesse situada dentro do intervalo granulométrico proposto poderia ser utilizada na confecção dos tijolos de solo-cimento, podendo-se ainda estimar a resistência do tijolo confeccionado com tal solo.

Com os resultados de ensaios granulométricos dos solos utilizados por diferentes autores em estudos das combinações solo, cimento e fibras, definiu-se um intervalo entre curvas granulométricas onde qualquer solo ali encaixado se adequaria ao propósito da confecção de tijolos de solo-cimento com boa resistência (GRAF. 2).

De posse dos limites deste intervalo, a meta seria a escolha de um solo que se adequasse ao limite superior e outro referente ao limite inferior da curva. Dos solos pesquisados,

escolheu-se inicialmente o solo proveniente da obra da Faculdade de Farmácia da UFMG.

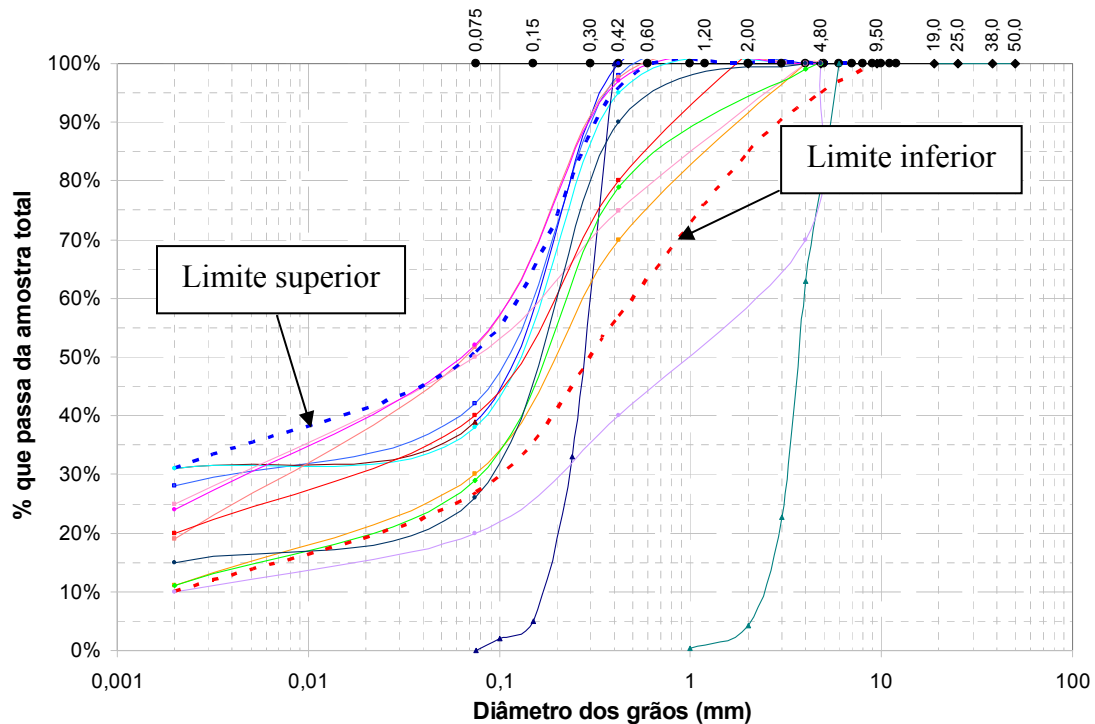


GRÁFICO 2 – Determinação da curva granulométrica ideal
Fonte: elaborado a partir das referências bibliográficas².

O solo foi secado ao ar livre sendo posteriormente destorroado – para desagregação dos torrões de solo. Para a separação das frações de solo utilizou-se a escala da norma americana ASTM D 2487 (1993), onde ocorre a coincidência entre os valores limites para cada solo e as peneiras existentes no mercado. Desta forma tem-se: pedregulho (material retido na peneira # 4 (4,75 mm), areia grossa (material retido entre as peneiras # 4 (4,75 mm) e # 10 (2,0 mm), areia média (material retido entre as peneiras # 10 (2,0 mm) e # 40 (0,425 mm), areia fina (material retido entre as peneiras # 40 (0,425 mm) e # 200 (0,075 mm) e a fração fina composta por silte e argila (material passante na peneira # 200).

² BARBOSA e MATTONE (2002); BARBOSA (2003); BARBOSA *et al.* (2003); FERNANDES *et al.* (2002); FONSECA *et al.* (2002); PRIETTO, SCHNAID e CONSOLI (1997); SEGANTINI e CARVALHO (1994); SEGANTINI e CARVALHO (2000-a); SEGANTINI e CARVALHO (2000-b); VIEIRA *et al.* (2002).

Devido a dificuldade de peneiramento das frações finas do solo utilizando a peneira # 200 (0,075 mm), excluiu-se tal peneira, adotando para a parcela fina do solo, a porcentagem de cada fração determinada através da análise granulométrica do solo natural.

Para a criação de solos que possuíssem a granulometria definida para os limites superior e inferior, o solo natural do local da obra da Faculdade de Farmácia foi corrigido com o acréscimo de frações de areia e agrofilito (APÊNDICE C). A areia, assim como o solo coletado, foram peneirados utilizando as peneiras descritas anteriormente. As proporções utilizadas para a confecção do novo solo podem ser vistas na TAB. 2.

TABELA 2
Frações utilizadas para composição dos novos solos

Solo homogeneizado	Solo Natural - Farmácia				Areia				Agrofilito (g)
	Pedregulho (g)	Areia Grossa (g)	Areia Média (g)	Areia fina + Silte + Argila (g)	Pedregulho (g)	Areia Grossa (g)	Areia Média (g)	Areia fina + Silte + Argila (g)	
01	27,32	52,97	188,24	131,37	0,56	22,89	345,76	27,86	-
02	-	-	48,42	131,37	-	-	-	344,55	235,24

De posse de cada fração de solo, procedeu-se a mistura, revolvendo o solo, com o objetivo de homogeneizá-lo, até que o mesmo possuísse uma cor uniforme (o contrário indicaria a não homogeneidade do solo) (FIG. 19). Após a homogeneização das duas amostras de solo, procedeu-se a classificação das mesmas. As curvas granulométricas bem como os resultados dessa análise poderão ser vistos no capítulo 9.

Para avaliar os argilo-minerais presentes no solo criado, executou-se a análise das frações finas do solo natural (foram utilizadas partículas de solo com diâmetro inferior a 0,075 mm, peneira # 200) através do ensaio de Difração de Raios X. Tal ensaio foi realizado no Laboratório de Análise por Raios X, da Escola de Engenharia da UFMG. Quanto ao material Agrofilito, foi fornecido pela empresa fabricante um relatório que possibilitou a análise dos argilo-minerais presentes no mesmo (APÊNDICE C).



FIGURA 19 - Homogeneização dos solos
 a) solo homogeneizado 01 b) solo homogeneizado 02

Após a análise granulométrica dos solos criados, percebeu-se que o solo homogeneizado 02 - que deveria ter sua granulometria semelhante ao limite superior - não apresentou um resultado satisfatório. Isto ocorreu porque, apesar da análise química do material fornecida pelo fabricante mostrar ser o material possuidor de argilo-minerais, o mesmo apresentou uma granulometria correspondente a um silte, segundo a escala granulométrica adotada. Este fato levou-nos a um novo tipo de solo, diferente do esperado.

Sabendo-se que o limite superior necessitaria de uma grande parcela de material fino (argila) escolheu-se então um novo solo, desta vez, proveniente da antiga pista de testes do projeto Mini Baja do Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC, no campus da UFMG. A classificação deste solo foi feita, sendo seus resultados apresentados no capítulo 9. Para a composição do limite superior, foi necessário apenas o peneiramento do material na peneira # 30 (0,6 mm). Por ser esta, uma malha muito fina, secou-se o material até uma umidade próxima de 0%. A classificação do solo encontrado para corresponder ao limite superior (solo homogeneizado 03) será mostrada no capítulo 9.

Os solos preparados foram acondicionados em sacos plásticos para melhor comodidade de manuseio e proteção contra possíveis contaminações (FIG. 20 e 21). Devido à

escassez de tempo para desenvolver este trabalho utilizando os três solos, estudou-se apenas aqueles referentes aos limites superior (solo homogeneizado 01) e inferior (solo homogeneizado 03). O solo homogeneizado 02 foi guardado para estudos posteriores.



FIGURA 20 – Acondicionamento do solo homogeneizado 02



(a)



(b)

FIGURA 21 – Acondicionamento dos solos utilizados no trabalho.

(a) Solo homogeneizado 01

(b) Solo homogeneizado 03

8.2. Caracterização dos solos

Sabendo-se da diversidade de solos existentes, e da necessidade de avaliação destes solos quanto à sua aplicação, ensaios de caracterização geotécnica foram realizados nos solos naturais e nos solos homogeneizados. Estes ensaios serão descritos a seguir, onde foram observados para a preparação das amostras, os procedimentos descritos na norma brasileira NBR 6457 (1986), tais como secagem prévia, destorroamento e peneiramento na peneira de malha 4,8 mm.

8.2.1. Teor de umidade

O teor de umidade é a relação entre a massa de água (obtida pela diferença de massas entre o solo úmido e o solo seco) e a massa de sólidos (solo seco) existentes em um mesmo volume de solo.

Para a realização deste ensaio, foram seguidas as especificações da norma brasileira NBR 6457 (1986), bem como os procedimentos adotados no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG. É importante ressaltar que em todos os ensaios de caracterização é feita a determinação do teor de umidade.

8.2.2. Limites de consistência

Chamados também de limites de Atterberg, consistem na determinação dos teores limite de umidade entre os estados de consistência líquido, plástico, semi-sólido e sólido, determinados em solos finos ou em frações finas dos solos. Tais limites são divididos em:

- Limite de Liquidez (LL): limita a umidade entre o estado líquido e o estado plástico
- Limite de Plasticidade (LP): limita a umidade entre o estado plástico e o estado semi-sólido.
- Limite de Contração (LC): limita a umidade entre o estado semi-sólido e o estado sólido.

No presente trabalho foram determinados apenas os limites de liquidez e de plasticidade.

8.2.2.1. Limite de Liquidez

O ensaio para a determinação do limite de liquidez foi executado utilizando dois procedimentos diferentes:

- determinação do limite de liquidez através do aparelho de Casagrande;
- determinação do limite de liquidez através do penetrômetro – Ensaio do cone.

O ensaio utilizando o aparelho de Casagrande foi realizado seguindo as especificações da norma NBR 6459 (1984) e os procedimentos do Laboratório de Geotecnia. Já o ensaio do cone seguiu apenas os procedimentos do Laboratório, uma vez que não se encontrou norma referente a este ensaio.

Em ambos os ensaios foram determinados pares de valores, de forma que fosse construído um gráfico. Do ensaio com o aparelho de Casagrande obteve-se uma reta utilizando os valores referentes ao número de golpes versus teor de umidade, onde determinou-se o limite de liquidez como sendo o valor correspondente a um número de golpes igual a 25, sendo seu valor expresso em porcentagem inteira.

Do ensaio do cone obteve-se outra reta com valores de penetração do cone versus o teor de umidade. O limite de liquidez equivale então ao teor de umidade correspondente à uma penetração do cone de 20 mm.

8.2.2.2. Limite de Plasticidade

A determinação do limite de plasticidade seguiu as especificações da norma NBR 7180 (1984). Portanto, o limite de plasticidade foi determinado a partir da média de valores dos teores de umidade correspondentes aos cilindros de solo com as dimensões do gabarito e obedecendo um desvio de 5% com relação à média.

8.2.3. Massa específica dos sólidos

É o valor médio da massa específica de cada tipo de grãos minerais que constituem a fase sólida de um solo. A massa específica dos sólidos é também denominada de massa específica dos grãos.

Para a execução deste ensaio, foram observadas as especificações da norma NBR 6508 (1984) e os procedimentos do Laboratório de Geotecnia. Foram realizadas um mínimo de 3 determinações para cada solo, onde foram considerados satisfatórios, os ensaios que apresentaram resultados com diferença menor que $0,02 \text{ g/cm}^3$ da média, valor este correspondente à massa específica dos sólidos.

8.2.4. Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste na determinação do tamanho dos grãos e suas respectivas porcentagens de ocorrência. Esta determinação foi executada seguindo as especificações da norma NBR 7181 (1984) bem como os procedimentos do Laboratório de Geotecnia.

Para o peneiramento grosso utilizou-se o material retido na peneira # 10 (2,0 mm) e passante na peneira de 76 mm. O material passante na peneira # 10 (2,00 mm) foi usado na determinação do teor de umidade da amostra e na sedimentação. Do material da sedimentação utilizou-se a porção que ficou retida na peneira # 200 (0,075 mm) para o peneiramento fino.

As peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm foram utilizadas no peneiramento fino, sendo para o peneiramento grosso utilizadas as peneiras de 9,5; 4,8 e 2,0 mm.

A partir das massas retidas em cada peneira, determinou-se as porcentagens de solo referentes aos determinados diâmetros das partículas de solo nos peneiramentos grosso e fino. Na sedimentação, a partir das leituras de densidade da solução, estabeleceu-se a porcentagem de solo referente a cada dimensão de partícula, determinando-se a curva granulométrica do material e a classificação do solo utilizado.

8.2.5. Compactação Proctor Normal

É o processo de tornar o solo um material mais denso e com menor índice de vazios atribuindo-lhe assim maior resistência, menor compressibilidade e permeabilidade. As energias de compactação especificadas pela norma brasileira NBR 7182 (1986) são: normal, intermediária e modificada. A energia de compactação utilizada nos ensaios foi a Proctor Normal. Usou-se por isso, o soquete e o cilindro pequenos. O solo foi compactado em 3 camadas iguais, sendo aplicados 26 golpes por camada, número de golpes necessário para atingir o valor da energia Proctor Normal de 583 kJ/m^3 .

Secou-se a amostra previamente à sombra. Após a secagem, a amostra foi colocada em uma bandeja onde foi executado o destorroamento, ou seja, foram desfeitos os torrões

existentes. Posteriormente, a amostra foi passada na peneira de 4,8 mm procurando-se sempre desmanchar os torrões. Sabendo-se que o ensaio pode se conduzido com ou sem reuso do material, optou-se pelo segundo caso, onde para cada determinação foi utilizada uma nova amostra totalizando um número de cinco. O material utilizado no ensaio de compactação foi aquele que passou na peneira de 4,8 mm.

Determinou-se previamente o teor de umidade inicial da amostra. Conhecendo-se esse teor, estabeleceu-se um plano de execução do ensaio através do cálculo do acréscimo da massa de água à amostra inicial para cada teor de umidade programado. Procedeu-se em seguida a homogeneização da amostra.

Pesou-se o cilindro a ser utilizado, anotando-se sua massa. Cada amostra homogeneizada foi colocada no cilindro e foram então aplicados, com o soquete, os golpes referentes à energia de compactação Proctor Normal. Cuidou-se para que houvesse uma uniformização na distribuição dos golpes em toda a área do cilindro. Entre as camadas foi executada a escarificação da superfície da camada compactada, para permitir uma melhor aderência com a camada seguinte. Repetiu-se o processo até que se completasse o número de camadas especificado pela energia de compactação (neste caso três). Como as camadas possuíam espessuras aproximadamente iguais; a última delas excedeu a altura do cilindro. Após a retirada do colar do cilindro, o excesso existente foi cuidadosamente retirado nivelando-se a superfície com uma régua biselada. Desta forma, o solo passou a possuir o mesmo volume do cilindro.

Determinou-se a massa do conjunto cilindro + solo compactado e em seguida retirou-se a amostra compactada do interior do cilindro por meio de um extrator de amostras. Foi retirada uma parcela da amostra de solo compactado para a determinação do teor de umidade. Repetiu-se esse mesmo processo para cada uma das demais determinações, obtendo-se assim, dois pontos com umidade superior, dois pontos com umidade inferior e um ponto próximo do teor de umidade ótimo estimado.

A relação entre a massa de solo compactado e seu volume forneceu a massa específica úmida denominada simplesmente de massa específica. Ao se considerar o teor de

umidade presente na amostra determinou-se a massa específica aparente seca. Com os pares de pontos, massa específica aparente seca e teor de umidade, foi desenhada a curva de compactação do solo, da qual extraiu-se o teor de umidade ótimo correspondente a massa específica aparente seca máxima (o pico da curva) (FIG. 22).

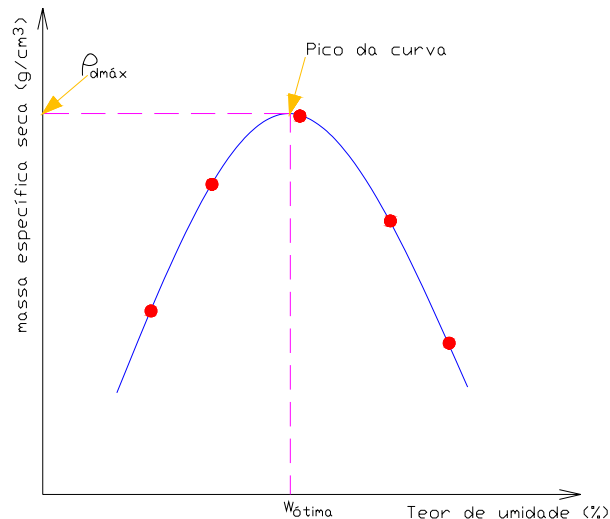


FIGURA 22 – Curva de compactação

8.3. Ensaio de compressão nos corpos-de-prova

8.3.1. Dimensão dos corpos-de-prova

Segundo a norma brasileira NBR 12024 (1992) que trata da moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento, as dimensões especificadas para tais corpos-de-prova são diâmetro de 100 mm e altura de 127 mm. Tais dimensões são contempladas também pelas normas NBR 7182 (1986) e NBR 12023 (1990) que tratam da metodologia de ensaios de compactação em solo e solo-cimento respectivamente. A NBR 12025 (1990) que trata da metodologia de ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos também referencia estas dimensões.

A norma americana ASTM D 2166-91, no entanto, ao tratar da compressão simples em corpos-de-prova de solo refere-se a corpos-de-prova de 30 mm de diâmetro mínimo com relação altura-diâmetro de 2 a 2,5. A prática brasileira adota ainda corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, dimensões estas contempladas pela NBR 7215 (1996) que trata da metodologia de ensaio para a determinação da resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos de argamassa. Por ser a areia utilizada na

argamassa um solo e as misturas solo-cimento e solo-cimento-resíduos utilizadas no estudo possuem uma granulometria semelhante à areia, admite-se que a norma de argamassa, NBR 7215 (1996), possa ser utilizada para a determinação das dimensões do corpo-de-prova. Como pode ser aqui observado, existem algumas variações no que diz respeito a dimensão dos corpos-de-prova.

Para uma melhor avaliação do trabalho proposto, faz-se necessário uma concordância de parâmetros para uma comparação mais significativa. Sendo assim, após ensaios preliminares de laboratório, onde a partir de um mesmo solo - teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima obtidos a partir do ensaio Proctor Normal - moldou-se corpos-de-prova cilíndricos com as diferentes dimensões e ensaiando-os à compressão simples.

Foram analisados corpos-de-prova com as seguintes dimensões em milímetros: 35x87,5 e 50x100 (diâmetro x altura), moldados através da aplicação de pressão por camadas, conhecido por “pisoteamento”. Notar que ambas as medidas estão de acordo com as prescrições da norma americana ASTM D 2166-91. Corpos-de-prova moldados por compactação Proctor Normal com dimensões em milímetros de 100x127 também foram utilizados. Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão e seus resultados analisados. Percebeu-se que devido a diferença nas dimensões do corpo-de-prova os valores obtidos para a carga de ruptura à compressão não apresentavam valores semelhantes, não podendo ser usados como base de estudo. Foi ainda observado que os corpos-de-prova com diâmetro de 100 mm possuíam a relação entre as dimensões diferentes da proposta pela norma americana.

Em uma segunda análise, utilizando a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo obtidos através de ensaios de Proctor Normal, foram moldados corpos-de-prova através da compactação por “pisoteamento” com as dimensões de 35x87,5 mm e 50x100 mm apenas. Novamente os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão e seus resultados analisados. Nessa determinação concluiu-se que para uma melhor retratação dos resultados os corpos-de-prova a serem usados nos ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos de solo, solo-cimento e solo-cimento e resíduos

deveriam possuir as mesmas dimensões, sendo adotada então a dimensão de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para todas as misturas, já que os resultados de ensaio dos corpos-de-prova com as dimensões 35x87,5 mm e 50x100 mm não apresentaram diferenças significativas.

8.3.2. Preparação dos corpos-de-prova

Determinadas as dimensões dos corpos-de-prova, os mesmos foram moldados utilizando os parâmetros obtidos pelo ensaio de compactação Proctor Normal: massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo. Para os ensaios de compressão simples do solo, os procedimentos seguiram as especificações da norma americana ASTM D 2166 (1991). Para os ensaios de compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e solo-cimento-fibras, foram seguidas as especificações das normas brasileiras NBR 12023 (1990), NBR 12024 (1992) e NBR 12253 (1992).

Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida com umidade relativa em torno de 100% e temperatura de $23 \pm 0,2$ °C durante sete dias. Após a cura, os corpos-de-prova permaneceram imersos em recipientes com água durante 4 horas (NBR 12025, 1990). Os corpos-de-prova tiveram suas dimensões (diâmetro e altura) medidas logo após a moldagem, após a cura e antes da imersão em água e após a imersão em água. Os corpos-de-prova não foram capeados por apresentarem superfície plana e regular.

8.3.3. Dosagem dos corpos-de-prova

Os autores nos artigos pesquisados indicam a seqüência que proporciona uma melhor homogeneização dos materiais utilizados na mistura: solo, cimento, água e posteriormente adiciona-se a fibra (neste trabalho, o resíduo de madeira). Porém, mediante os solos utilizados, observou-se a necessidade de uma alteração nesta seqüência. A seqüência utilizada foi então: solo, cimento, resíduos de madeira e posteriormente adicionou-se a água, como mostram as FIG. 23 e 24.



(a) Colocação do solo



(b) Colocação do cimento



(c) 1ª homogeneização do solo e do cimento



(d) Acréscimo dos resíduos na mistura



(e) 2ª homogeneização do solo, do cimento e dos resíduos



(f) Colocação da água

FIGURA 23 – Dosagem da mistura para corpos-de-prova



(g) 3ª homogeneização da mistura solo-cimento-resíduos de madeira

FIGURA 24 – Dosagem da mistura para corpos-de-prova

A presença de partículas finas no solo, torna o solo mais plástico, o que dificulta a mistura dos resíduos de madeira (serragem) ao solo-cimento quando colocado após a água. Outro fator importante para uma melhor homogeneização está no fato de a serragem estar seca. Serragem molhada ou úmida faz com que o solo “agarre” na mesma dificultando sua total homogeneização.

A porcentagem de cimento foi definida a partir de valores utilizados na prática conforme foi descrito na bibliografia consultada. Adotou-se portanto a proporção de 10% de cimento em relação à massa de solo seco (no caso da mistura solo-cimento-resíduos, a proporção foi definida em relação à soma da massa do solo seco e da massa do resíduo). Já a quantidade de água a ser adicionada foi definida a partir do ensaio de compactação Proctor Normal na mistura solo-cimento, onde o teor de umidade ótimo foi o parâmetro que definiu tal dosagem. A porcentagem de resíduos foi determinada em relação à massa de solo seco.

A proposta deste trabalho é a descoberta de uma dosagem de resíduos de madeira (serragem) na qual ocorra um aumento na resistência do composto solo-cimento. Para isto, foram testados quatro teores de resíduos diferentes (0,5%; 1%; 2% e 3%) dos quais, mediante seu comportamento mecânico determinar-se-ia a dosagem ótima. Partindo-se portanto da massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação do solo-cimento, foram mantidas as dosagens definidas alterando-se apenas a quantidade de solo que reduziu proporcionalmente ao acréscimo de resíduo (parte do solo seco foi substituída por teores de resíduo de madeira). Desta forma

garantiu-se que a relação em peso entre o cimento e o solo mais resíduos fosse sempre a mesma para uma dada porcentagem de cimento. Os traços utilizados foram os seguintes (TAB. 3):

TABELA 3
Traços utilizados para o estudo

	cimento: solo seco:resíduo seco de madeira				
% Resíduo	0%	0,5%	1%	2%	3%
Traço	1:9:0	1:8,95:0,05	1:8,9:0,10	1:8,8:0,2	1:8,7:0,3

8.3.4. A moldagem dos corpos-de-prova

As prensas para fabricação de tijolos oferecidas no mercado apresentam uma pressão diferente da obtida durante a moldagem dos corpos-de-prova com parâmetros de compactação do ensaio Proctor Normal. Devido a isso os resultados obtidos na prática muitas vezes não representam o que é prescrito nas normas. Com o intuito de minimizar esse problema, foi feito o controle da moldagem dos corpos-de-prova através da instrumentação do aparelho “moldador”.

O moldador foi instrumentado com uma célula de carga, situada na base do mesmo, e com um transdutor de deslocamentos (DT) posicionado acima da haste de aplicação de carga (FIG. 25).

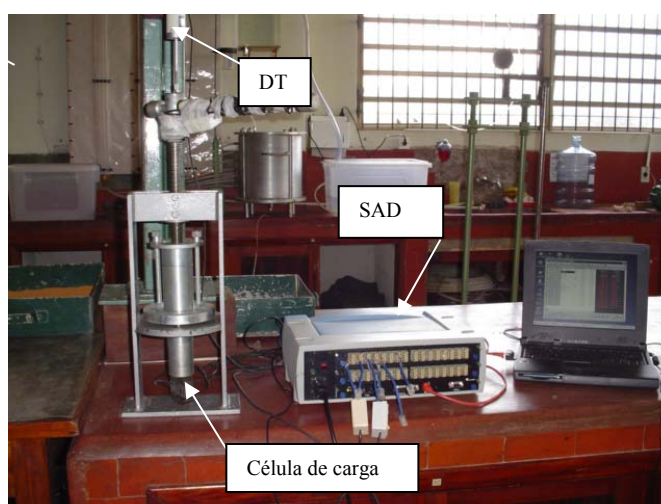


FIGURA 25 – Instrumentação do “Moldador” de corpos-de-prova.
Laboratório de Geotecnia – Escola de Engenharia - UFMG

Inicialmente os corpos-de-prova (CPs) de solo foram moldados com a mesma massa específica seca máxima e teor de umidade obtidos no ensaio Proctor Normal. Estes CPs foram ensaiados à compressão simples segundo a norma americana ASTM D 2166-91. Também os primeiros corpos-de-prova de solo-cimento foram moldados com os parâmetros do ensaio de compactação Proctor Normal.

Para a verificação da influência da variação da pressão de compactação na ruptura, alguns corpos-de-prova de solo, solo-cimento e solo-cimento-resíduos foram moldados considerando a pressão exercida pelas máquinas de tijolos convencionais. Conforme pesquisado, as máquinas oferecidas no mercado exercem uma pressão de 1,5 a 2,0 MPa. A pressão definida admitida para tal avaliação foi 2,0 MPa.

Para a moldagem dos corpos-de-prova, a quantidade de material necessária para atingir a “densidade” esperada foi dividida em cinco porções iguais, de forma que o corpo-de-prova fosse compactado em cinco camadas. Esta divisão em camadas é necessária para garantir a distribuição homogênea da pressão ao longo da altura do corpo-de-prova. Como no ensaio de compactação Proctor Normal, entre as camadas procedeu-se à escarificação da superfície para uma maior ligação entre as mesmas.

A célula de carga registrou a carga aplicada pela haste do moldador sobre cada camada do corpo-de-prova, e conhecendo-se a área de atuação deste carregamento, determinou-se assim a pressão de moldagem do corpo-de-prova. O controle do volume de solo mobilizado durante a moldagem do corpo-de-prova foi feito a partir da medição da altura deste pelo DT. Conhecendo-se a massa de material colocada e o volume de cada camada, foi possível controlar a densidade aparente de cada camada durante a moldagem do corpo-de-prova e conseqüentemente, garantir uma maior homogeneidade da densidade ao longo da altura do corpo-de-prova.

Controlando-se inicialmente a altura das camadas garantiu-se que a densidade (massa específica seca máxima) proposta pela compactação Proctor Normal fosse mantida. Neste caso, como variável resposta obteve-se o carregamento aplicado e conseqüentemente a pressão. Em processo inverso, conhecendo-se a pressão

(equivalente à prensa de tijolos) controlou-se o carregamento aplicado obtendo-se como variável resposta a altura do corpo-de-prova e conseqüentemente a densidade (massa específica seca máxima com energia diferente da Proctor Normal) do mesmo.

Os dados obtidos foram coletados através de um sistema de aquisição de dados (SAD). De posse dos dados, foi possível determinar a pressão aplicada durante a compactação do corpo-de-prova, e sua influência quanto à densidade do mesmo e à sua resistência à ruptura.

Os corpos-de-prova moldados com os parâmetros do ensaio Proctor Normal foram ensaiados à compressão simples. Para uma comparação mais significativa com o tijolo, os corpos-de-prova moldados com a pressão da prensa de tijolos foram ensaiados à compressão simples e à compressão diametral.

8.3.5. Ensaio de compressão simples

Os corpos-de-prova preparados conforme descrito no item anterior, foram ensaiados em prensas com carga contínua e sem choques. As máquinas de ensaio possuíam rótulas, para uma melhor distribuição do carregamento vertical e axial aplicado. A velocidade de ensaio para compressão simples nos solos foi de 0,017 mm/s (a norma ASTM D 2166 (1991) especifica 0,5 a 2 %/min que equivale a 0,0083 a 0,033 mm/s). Para os ensaios de compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira, a velocidade de aplicação da carga foi de 1 mm/min estabelecida pela NBR 12025 (1990).

A FIG. 26 mostra o ensaio de compressão simples em corpos-de-prova de solo. A máquina utilizada para este ensaio foi mostrada na FIG. 11 do capítulo 7.



FIGURA 26 – Ensaio de compressão simples em corpos-de-prova de solo
Laboratório de Geotecnia – Escola de Engenharia – UFMG

A máquina utilizada nos ensaios de compressão simples e compressão diametral em corpos-de-prova de solo-cimento, solo-cimento-resíduos e compressão simples em tijolos e prismas foi mostrada na FIG. 12 do capítulo 7. O ensaio de compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos pode ser visto na FIG. 27.



FIGURA 27 – Ensaio de compressão simples
em corpos-de-prova de solo-cimento e solo-
cimento-resíduos de madeira
LAEES – Escola de Engenharia – UFMG

8.3.6. Ensaio de compressão diametral

Os corpos-de-prova preparados conforme descrito no item 8.3.4., foram ensaiados na máquina mostrada na FIG. 12 do capítulo 7, com carga aplicada continuamente, sem choques, com crescimento constante da tensão de tração. A velocidade de ensaio foi de 0,005 MPa/s (a norma brasileira NBR 7222 (1994) determina que tal velocidade seja de 0,05 MPa/s, porém, como a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento apresentou valores da ordem de 10% dos valores da resistência à compressão simples em corpos-de-prova de argamassa e concreto, adotou-se para a velocidade deste ensaio a mesma proporção para a redução da taxa de incremento de tensão).

Conforme especificado na norma referida, entre os pratos da máquina e o corpo-de-prova foram colocadas duas tiras de chapa dura de fibra de madeira (FIG. 28). Para que os corpos-de-prova durante a ruptura não causassem poeira que pudesse danificar a máquina, os mesmos foram revestidos com plástico filme PVC.

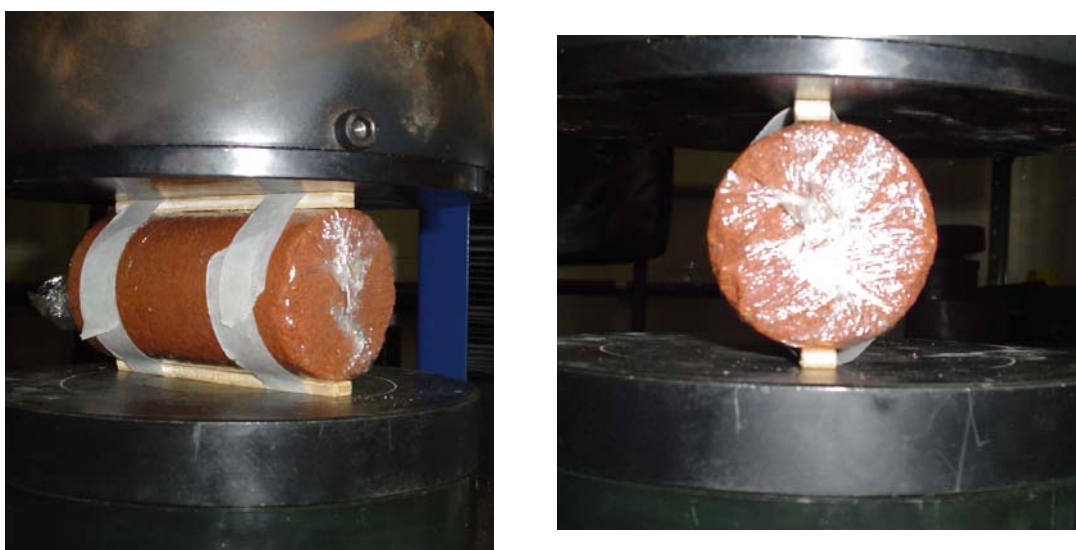


FIGURA 28 – Ensaio de compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos
LAEES – Escola de Engenharia – UFMG

8.4. Ensaio de compressão simples em tijolos e prismas

8.4.1. A dimensão do tijolo

Por se tratar de um tijolo intertravado, sem argamassa de rejuntamento e de assentamento, as dimensões do tijolo são de fundamental importância para um bom encaixe entre eles. Sendo assim, a prensa para confecção de tijolos foi fabricada de forma que o tijolo possuísse as dimensões propostas na FIG. 29.

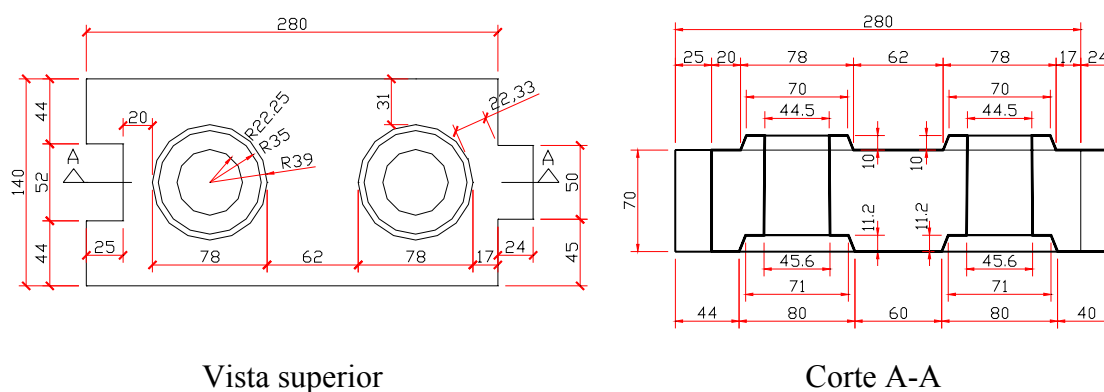


FIGURA 29 – Dimensões em milímetros estudadas para os tijolos

Devido a ocorrência de alguns problemas durante a fabricação desta máquina, não se conseguiu a padronização dos tijolos conforme esperado. Assim, para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas médias de valores referentes à cada dimensão do tijolo. Para cada dimensão foram executadas em torno de seis medidas, a cada etapa do processo de avaliação do mesmo.

8.4.2. Dosagem dos tijolos.

A dosagem dos tijolos seguiu os mesmos parâmetros adotados para a moldagem dos corpos-de-prova. Sendo assim, a sequência solo, cimento, resíduos e água foi respeitada. Como desejava-se confeccionar um número elevado de tijolos, utilizou-se um misturador de argamassa, fabricado pela G. Paniz Ind. de Equipamentos para alimentação Ltda, modelo AE60, capacidade para 60 kg de massa pesada, para auxiliar nesta tarefa (FIG. 30).



FIGURA 30 – Misturador de argamassa
LAEES – Escola de Engenharia – UFMG

Para garantir uma maior homogeneização da mistura, o solo e cimento após pesados, foram colocados no misturador de argamassa e procedeu-se a primeira homogeneização. Em seguida, adicionou-se os resíduos e teve início a segunda homogeneização. Somente então, foi adicionada a água e fez-se a terceira e última homogeneização (FIG. 31 e 32).



(a) Pesagem do solo



(b) Adição de solo no misturador de argamassa

FIGURA 31 – Dosagem da mistura para tijolos



(c) Pesagem do cimento



(d) Adição de cimento no misturador de argamassa



(e) 1ª homogeneização do solo e do cimento



(f) Adição dos resíduos e 2ª homogeneização da mistura



(g) Colocação da água



(h) 3ª homogeneização da mistura solo-cimento-resíduos de madeira

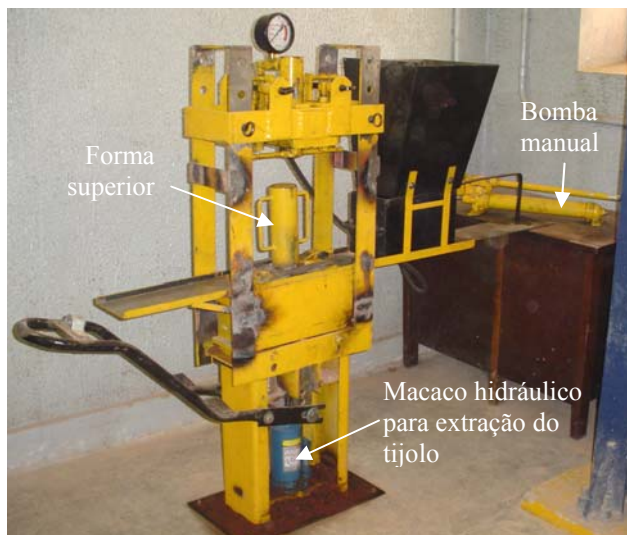
FIGURA 32 – Dosagem da mistura para tijolos

8.4.3. Confeção dos tijolos

Para a confecção dos tijolos de solo-cimento-resíduos de madeira, foi fabricada uma prensa hidráulica de tal forma que fosse possível controlar a pressão durante a

prensagem dos mesmos. Para isto, a mesma foi instrumentada com um manômetro, que foi calibrado com um anel dinamométrico, possibilitando assim a conversão da medida fornecida pelo instrumento para a medida da pressão de compactação (ou prensagem) (FIG. 33).

Conforme dito no item 8.3.4., foi utilizada também para os tijolos, a pressão de aproximadamente 2,0 MPa. Portanto, o cilindro hidráulico foi acionado apenas até que a pressão exercida no tijolo alcançasse tal valor.



(a) Prensa para moldagem de tijolos



(b) Mesa de compressão e cilindro



(c) Manômetro

FIGURA 33 – Prensa de moldagem de tijolos
LAEES – Escola de Engenharia – UFMG

Para que a confecção do tijolo fosse executada de uma forma otimizada, colocou-se a mistura homogeneizada de solo-cimento-resíduos de madeira de forma gradativa, sendo a mesma levemente compactada com um soquete (FIG. 34-a) para que houvesse uma melhor acomodação da mistura na forma. Colocou-se a seguir, a forma superior (FIG. 34-b) e as chapas auxiliares (FIG. 34-c) iniciando a prensagem do tijolo.

Quando o manômetro atingiu o valor referente à pressão de 2,0 MPa, foi retirado o carregamento, seguindo-se da extração do tijolo (FIG. 34-d) e pesagem do mesmo. Após a moldagem, os tijolos foram levados para a câmara úmida onde permaneceram durante sete dias à uma temperatura de $23 \pm 0,2$ °C e umidade relativa em torno de 100%. Após o período de cura os tijolos foram pesados e medidos, sendo a seguir imersos em recipientes com água onde permaneceram durante 24 horas (NBR 10836, 1994). Os tijolos tiveram suas dimensões novamente medidas. Por se tratar de um tijolo com dimensões particulares e os mesmos apresentarem a superfície plana e regular, não foi realizado o capeamento dos mesmos.



(a) Colocação da mistura na forma de tijolo e leve compactação com um soquete



(b) Colocação da forma superior



(c) Colocação das chapas auxiliares e início da prensagem do tijolo.



(d) Extração do tijolo

FIGURA 34 – Confeção do tijolo

8.4.4. Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples em tijolos e prismas foi realizado na máquina universal mostrada na FIG. 12 do capítulo 7. Este tipo de tijolo visa a construção por meio de encaixes (horizontal e vertical). Devido a isto, considerou-se prisma, dois tijolos sobrepostos alternadamente sem nenhum tipo de argamassa entre eles.

Com o objetivo de fabricar prismas com propriedades semelhantes, os tijolos foram inicialmente classificados em ordem crescente de densidade úmida. A densidade adotada foi determinada a partir da massa do tijolo logo após a moldagem.

Conhecendo-se esta classificação, os tijolos foram agrupados de forma que o de menor densidade “fizesse par” com o de maior densidade. Este procedimento possibilitou uma maior homogeneidade entre as densidades dos tijolos e prismas pois, a média das densidades dos tijolos formadores do prisma aproximava-se do valor da densidade dos tijolos individuais. No prisma o tijolo de maior densidade foi colocado abaixo do de menor densidade.

A norma que trata da determinação da resistência à compressão em blocos vazados de solo-cimento sem função estrutural (NBR 10836, 1994) não diz nada a respeito da velocidade de aplicação do carregamento. Já a norma que trata de tal determinação para tijolos maciços de solo-cimento (NBR 8492, 1984) indica um carregamento à razão de 50 kgf/s. Uma vez que o tijolo confeccionado é vazado e a norma para ensaios de compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento (NBR 12025, 1990) indica uma velocidade de 1mm/min para a aplicação do carregamento, adotou-se pois, este valor para a velocidade de aplicação do carregamento.

Para uma melhor distribuição do carregamento na face superior do tijolo, utilizou-se a forma superior da máquina de tijolos como distribuidor de carga. Também por isso, como já dito, não foi executado o capeamento nas faces dos tijolos e prismas.

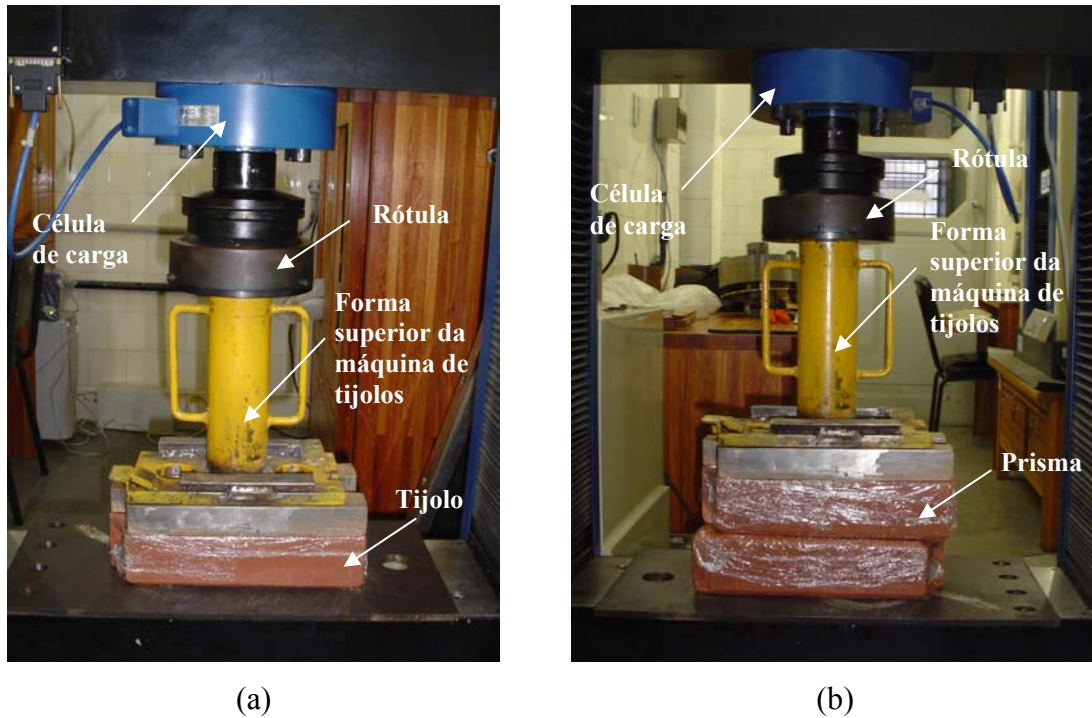


FIGURA 35 – Ensaio de compressão simples
(a) tijolo (b) prisma

8.5. Ensaios não-destrutivos

Com o objetivo de estabelecer uma relação entre a resistência à compressão dos tijolos e corpos-de-prova e a compactação exercida, foram realizados ensaios não-destrutivos. Leituras dos tempos de propagação de ondas ultra-sônicas foram feitas utilizando o aparelho de ultrassom fabricado pela James Instrument Inc., com transdutores de 150 kHz (FIG. 36).

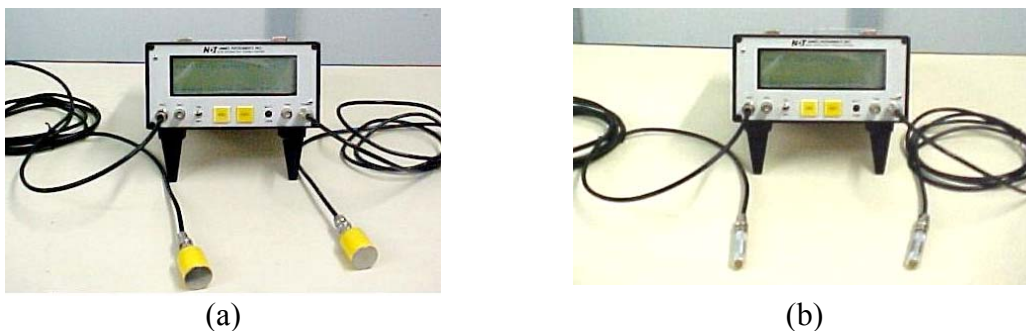


FIGURA 36 – Aparelho de ultra-som fabricado pela James
(a) com transdutor de 150 kHz (b) com transdutor de 500 kHz

Para a escolha do transdutor a ser utilizado, foram realizados ensaios preliminares em corpos-de-prova de solo-cimento, onde leituras com transdutores de 500 kHz foram também executadas. Após estes ensaios, observou-se que não ocorriam variações significativas entre os valores medidos. Devido ao fato de o transdutor de 500 kHz ser menor atuando por isto em uma área menor, optou-se pelo uso do transdutor de 150 kHz por ser ele mais representativo quanto às propriedades dos corpos-de-prova e dos tijolos.

Nos ensaios realizados em corpos-de-prova, os transdutores foram posicionados nas extremidades dos mesmos, sendo executada uma medida da velocidade do pulso para uma distância equivalente à altura deste corpo-de-prova (aproximadamente 100 mm) (FIG. 37).

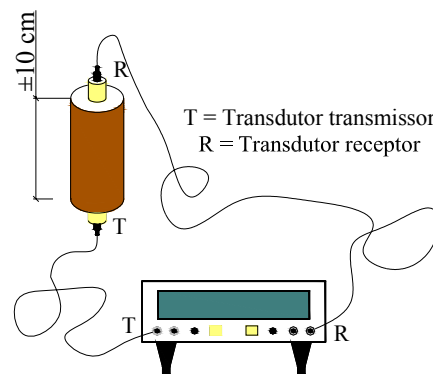


FIGURA 37 – Posicionamento dos transdutores nos corpos-de-prova

Nos tijolos, utilizou-se o ultra-som para fazer medidas em cinco pontos diferentes: dois pontos longitudinalmente (L1 e L2), um ponto transversalmente (Tr) e um ponto na direção da altura (Alt) (FIG. 38).

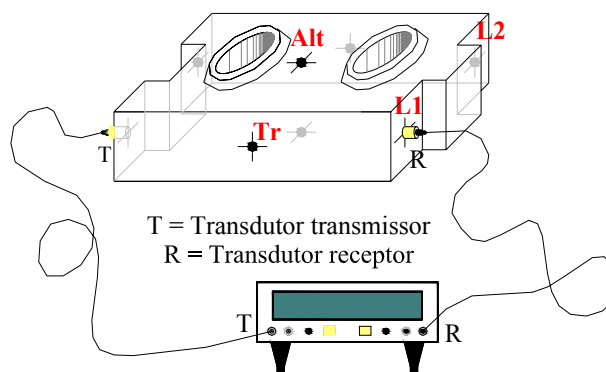


FIGURA 38 – Posicionamento dos transdutores nos tijolos

Com o objetivo de eliminar a presença do ar, que não é bom condutor das ondas ultrassônicas, foi utilizada uma pasta de silicone entre os transdutores e os corpos-de-prova e tijolos. Também a saturação dos tijolos e corpos-de-prova facilitou esta medida, uma vez que todos os vazios existentes foram preenchidos por água.

8.6. Instrumentação dos tijolos

Para uma maior avaliação das tensões atuantes nos tijolos, foi feita a instrumentação de tijolos com rosetas. Para isto, foram confeccionados três tijolos, um de solo-cimento para o solo homogeneizado 01, um segundo de solo-cimento para o solo homogeneizado 03 e um terceiro de solo-cimento e 0,5% de fibras para o solo homogeneizado 01. A disposição das rosetas nos tijolos pode ser vista na FIG. 39.

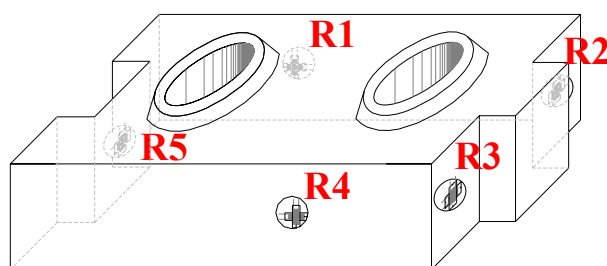


FIGURA 39 – Posicionamento das rosetas nos tijolos

Os tijolos instrumentados foram ensaiados à compressão simples, sendo o carregamento aplicado monitorado através de uma célula de carga (FIG. 40).



FIGURA 40 – Ensaio de compressão simples nos tijolos instrumentados

9

RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização, de compactação e compressão simples nos solos naturais e solos homogeneizados. Serão também apresentados os resultados dos ensaios destrutivos e não-destrutivos realizados nos corpos-de-prova, tijolos e prismas confeccionados com solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira.

9.1. Resultados dos ensaios de caracterização dos solos

Para a classificação dos solos naturais (antes da homogeneização) e dos solos homogeneizados, foram realizados ensaios de caracterização. Sabendo-se que o volume de solo mobilizado era elevado, foi realizado um número de ensaios necessário para tornar a caracterização representativa. Por ser a granulometria uma variável muito importante para a escolha do solo a ser utilizado, um mínimo de quatro análises granulométricas foi executado para cada tipo de solo, exceto para a areia e para o agrofilito, por possuírem características particulares e por sua utilização no trabalho servir apenas para correção e preparo dos solos a serem estudados. Os demais ensaios de caracterização foram realizados, sendo seus resultados analisados simultaneamente à execução. Desta forma, a proximidade entre resultados de ensaios, foi o critério utilizado para determinar se o número de ensaios estava satisfatório ou não. A caracterização dos solos naturais e homogeneizados pode ser vista nas TAB. 4 e 5. Os valores apresentados nestas tabelas foram obtidos a partir das médias aritméticas dos resultados dos ensaios.

TABELA 4
Resultados dos ensaios de caracterização e compressão simples dos solos

Solo	LL (cone) (%)	LL (Casagrande) (%)	LP (%)	IP (%)	w _{ot.} (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	$\sigma_{s, P.N.}$ (kPa)	$\sigma_{s, Tijolo}$ (kPa)
Agrofilito	-	47,0	NP	NP	-	-	-	-
Areia	-	28,0	NP	NP	-	-	-	-
Farmácia	44,0	41,0	31,5	9,5	20,9	1,609	234,22	324,36
Mecânica	49,5	50,0	36,0	14,0	22,1	1,617	272,24	272,24
Homogeneizado 01	35,0	35,0	25,0	10,0	13,5	1,858	131,08	106,33
Homogeneizado 02	28,5	24,5	17,0	7,5	14,8	1,805	196,42	160,57
Homogeneizado 03	53,0	50,5	39,5	11,0	26,1	1,485	181,72	247,06

* NP – Não plástico

TABELA 5
Resultados dos ensaios de massa específica dos grãos e granulometria dos solos

Solo	ρ_s (g/cm ³)	granulometria (%)				Observações
		pedregulho	areia	silte	argila	
Agrofilito	2,845	0,0	8,3	84,4	7,3	Não foi possível executar os ensaios do cone, de compactação e de compressão com este solo devido a não plasticidade do mesmo.
Areia	2,740	0,0	96,1	1,9	2,0	Não foi possível executar os ensaios do cone, de compactação e de compressão com este solo devido a não coesão do mesmo.
Farmácia	2,685	3,7	34,2	41,6	20,5	
Mecânica	2,660	0,0	46,5	22,8	30,7	
Homogeneizado 01	2,690	0,0	69,1	21,3	9,6	Solo confeccionado pela mistura de areia e solo da Farmácia
Homogeneizado 02	2,790	0,0	48,3	42,0	9,7	Solo confeccionado pela mistura de areia, agrofilito e solo da Farmácia
Homogeneizado 03	2,690	0,0	36,8	20,8	42,4	Solo confeccionado através do peneiramento do solo da Mecânica na peneira # 0,6 mm

É importante observar que na areia e no agrofilito, não foram realizados alguns ensaios, pois devido à não plasticidade e/ou não coesão destes solos, tornou-se impossível sua moldagem tanto para a determinação do limite de plasticidade, quanto para a compactação Proctor Normal e conseqüentemente para a moldagem de corpos-de-prova de compressão simples.

As curvas granulométricas descritas na TAB. 5 podem ser visualizadas no GRAF. 3. Lembrar que as mesmas foram obtidas a partir das médias das porcentagens de cada fração de solo.

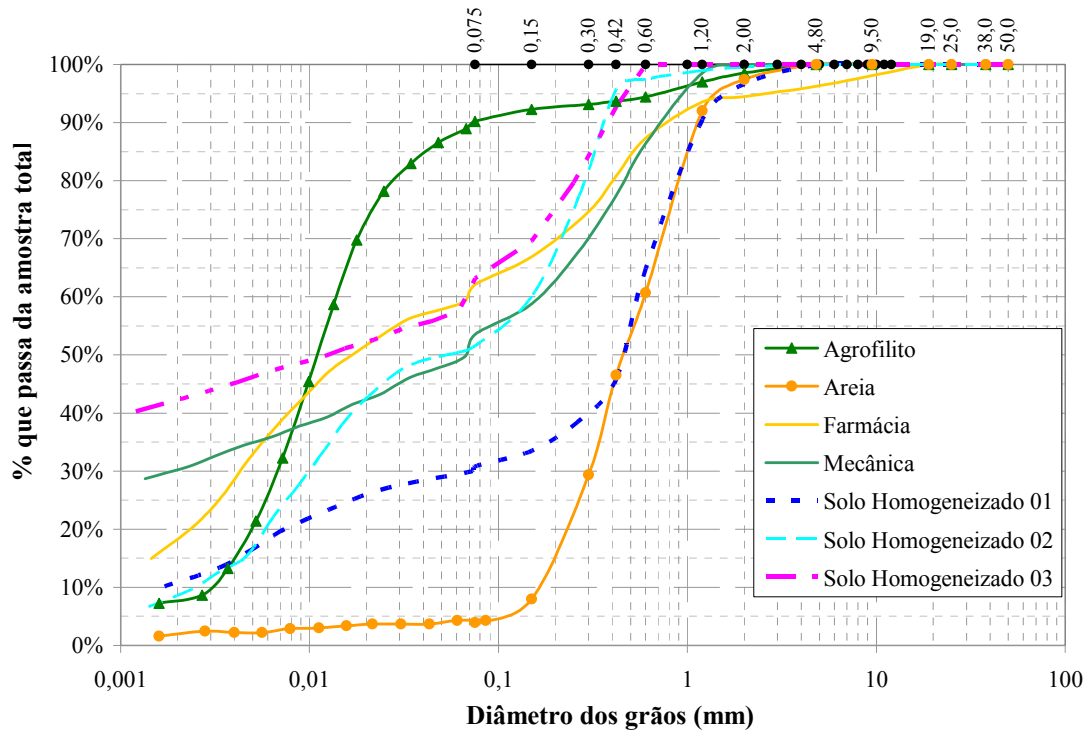


GRÁFICO 3 – Curvas granulométricas dos solos estudados

As TAB. 6 e 7 mostram os valores da massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), a densidade seca, o grau de compactação (GC), a pressão de moldagem e a tensão de ruptura dos corpos-de-prova (σ_s) moldados com os solos estudados.

TABELA 6
Resultados dos ensaios em corpos-de-prova de solo natural e homogeneizado 02

Tipo de solo	Corpo-de-prova	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	Densidade seca do CP (g/cm ³)	Grau de compactação (%)	Pressão de moldagem (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Farnácia	1	1,609	1,572	97,7	1,27	0,205
	2	1,609	1,574	97,8	1,22	0,256
	3	1,609	1,577	98,0	1,14	0,253
	4	1,609	1,563	97,1	1,02	0,231
	5	1,609	1,570	97,6	1,04	0,234
	6	1,609	1,574	97,8	1,11	0,246
	7	1,609	1,567	97,4	1,05	0,215
	8	1,609	1,572	97,7	1,05	0,221
	9	1,609	1,598	99,3	1,47	0,240
	10	1,609	1,597	99,3	1,32	0,198
	11	1,609	1,596	99,2	1,28	0,253
	12	1,609	1,606	99,8	1,46	0,266
	13	1,609	1,593	99,0	1,42	0,224
	14	1,609	1,597	99,3	1,47	0,240
	15	1,609	1,595	99,1	1,46	0,233
	16	1,634	1,637	100,2	2,03	0,337
	17	1,634	1,635	100,1	2,01	0,324
	18	1,634	1,633	99,9	2,04	0,322
	19	1,634	1,632	99,9	2,01	0,322
	20	1,634	1,631	99,8	2,02	0,316
Mecânica	1	1,617	1,611	99,6	2,15	0,238
	2	1,617	1,600	98,9	1,88	0,233
	3	1,617	1,604	99,2	1,93	0,272
	4	1,617	1,615	99,9	2,09	0,285
	5	1,617	1,618	100,1	2,05	0,279
	6	1,617	1,617	100,0	2,10	0,279
	7	1,617	1,621	100,2	2,14	0,307
	8	1,617	1,613	99,8	2,14	0,284
Homogeneizado 02 (solo Farnácia + areia + agrofilito)	1	1,813	1,807	99,7	3,53	0,199
	2	1,813	1,807	99,7	3,66	0,206
	3	1,813	1,808	99,8	3,66	0,209
	4	1,813	1,799	99,3	3,50	0,183
	5	1,813	1,800	99,3	3,37	0,198
	6	1,813	1,797	99,1	3,29	0,196
	7	1,813	1,796	99,1	3,39	0,190
	8	1,813	1,796	99,1	3,22	0,192
	9	1,753	1,726	98,5	2,06	0,160
	10	1,753	1,767	100,8	2,05	0,164
	11	1,753	1,757	100,2	2,05	0,159
	12	1,753	1,747	99,7	2,08	0,158
	13	1,753	1,751	99,9	2,10	0,163
	14	1,753	1,759	100,4	2,08	0,159
	15	1,753	1,758	100,3	2,08	0,164
	16	1,753	1,757	100,2	2,06	0,158

TABELA 7
Resultados dos ensaios em corpos-de-prova dos solos homogeneizados 01 e 03

Tipo de solo	Corpo-de-prova	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	Densidade seca do CP (g/cm ³)	Grau de compactação (%)	Pressão de moldagem (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Homogeneizado 01 (solo Farmácia + areia)	1	1,858	1,808	97,3	2,30	0,123
	2	1,858	1,831	98,5	2,59	0,130
	3	1,858	1,835	98,8	2,96	0,122
	4	1,858	1,859	100,1	4,08	0,135
	5	1,858	1,879	101,1	4,46	0,149
	6	1,858	1,872	100,8	4,09	0,136
	7	1,858	1,886	101,5	4,52	0,147
	8	1,858	1,843	99,2	3,25	0,128
	9	1,858	1,862	100,2	3,58	0,137
	10	1,858	1,857	99,9	3,74	0,130
	11	1,858	1,860	100,1	3,63	0,130
	12	1,858	1,849	99,5	3,47	0,122
	13	1,797	1,804	100,4	2,05	0,114
	14	1,797	1,797	100,0	2,06	0,106
	15	1,797	1,786	99,4	2,10	0,110
	16	1,797	1,797	100,0	2,11	0,116
	17	1,797	1,801	100,2	2,05	0,094
Homogeneizado 03 (solo Mecânica peneirado na # 0,6 mm)	1	1,485	1,482	99,8	1,10	0,173
	2	1,485	1,484	100,0	1,02	0,191
	3	1,485	1,468	98,9	0,94	0,170
	4	1,485	1,476	99,4	0,99	0,178
	5	1,485	1,481	99,8	1,11	0,193
	6	1,485	1,475	99,4	1,20	0,175
	7	1,485	1,482	99,8	1,14	0,192
	8	1,485	1,479	99,6	1,03	0,182
	9	1,522	1,534	100,8	2,04	0,239
	10	1,522	1,533	100,8	2,06	0,229
	11	1,522	1,525	100,2	2,06	0,225
	12	1,522	1,529	100,5	2,09	0,249
	13	1,522	1,515	99,6	2,05	0,266
	14	1,522	1,517	99,7	2,08	0,272
	15	1,522	1,507	99,0	2,09	0,243
	16	1,522	1,512	99,4	2,06	0,254

Os resultados apresentados nas TAB. 6 e 7 referem-se a corpos-de-prova moldados com os mesmos parâmetros da compactação Proctor Normal, exceto as linhas marcadas que referem-se aos corpos-de-prova moldados com a pressão de moldagem padrão dos tijolos de solo-cimento, adotada igual a 2,0 MPa.

Sabendo-se da importância na resistência da pressão de moldagem dos tijolos, estudou-se a pressão de compactação dos corpos-de-prova. Utilizando os parâmetros do ensaio de compactação necessários para atingir a energia Proctor Normal, determinou-se a pressão necessária para atingir tal energia na moldagem de corpos-de-prova. Em processo inverso partindo-se da pressão de moldagem das prensas de tijolos, determinou-se a densidade dos corpos-de-prova confeccionados com cada tipo de solo.

Conhecendo-se a massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) equivalente à pressão dos tijolos (obtida a partir das médias das densidades secas dos CPs) e a umidade na qual os corpos-de-prova foram moldados (a mesma da compactação Proctor Normal), pode-se afirmar que existe uma energia de compactação diferente da Proctor Normal que corresponda a este par de valores. É portanto, admissível adotar a especificação do grau de compactação ($CG = 100 \pm 5 \%$) para avaliar a eficiência da moldagem dos corpos-de-prova. A análise dos valores apresentados nas TAB. 6 e 7 mostra que os corpos-de-prova foram moldados adequadamente.

9.2. Estudo da pressão de moldagem em corpos-de-prova de solo e solo-cimento

A análise das pressões de moldagem nos corpos-de-prova, apresentadas nas TAB. 6 e 7, mostra que em alguns casos a pressão necessária para atingir a energia Proctor Normal, obtendo-se assim um corpo-de-prova otimizado, foi inferior à necessária para a confecção dos tijolos. Observou-se que solos mais granulares, tais como as areias, necessitam de maiores pressões de moldagem. Já solos mais finos, necessitam de pressões mais baixas. Desta forma, observa-se que a pressão imposta pela prensa de tijolos proporciona um aumento na resistência quando utilizado solos mais finos. Já para solos mais granulares, a pressão aplicada pelas prensas convencionais levaria à um produto com resistência inferior à otimizada pelo Proctor Normal.

O GRAF. 4 mostra a resistência à compressão simples nos solos naturais e homogêneos, em relação à pressão de moldagem de cada um. As curvas foram plotadas a partir das médias aritméticas das pressões e das resistências.

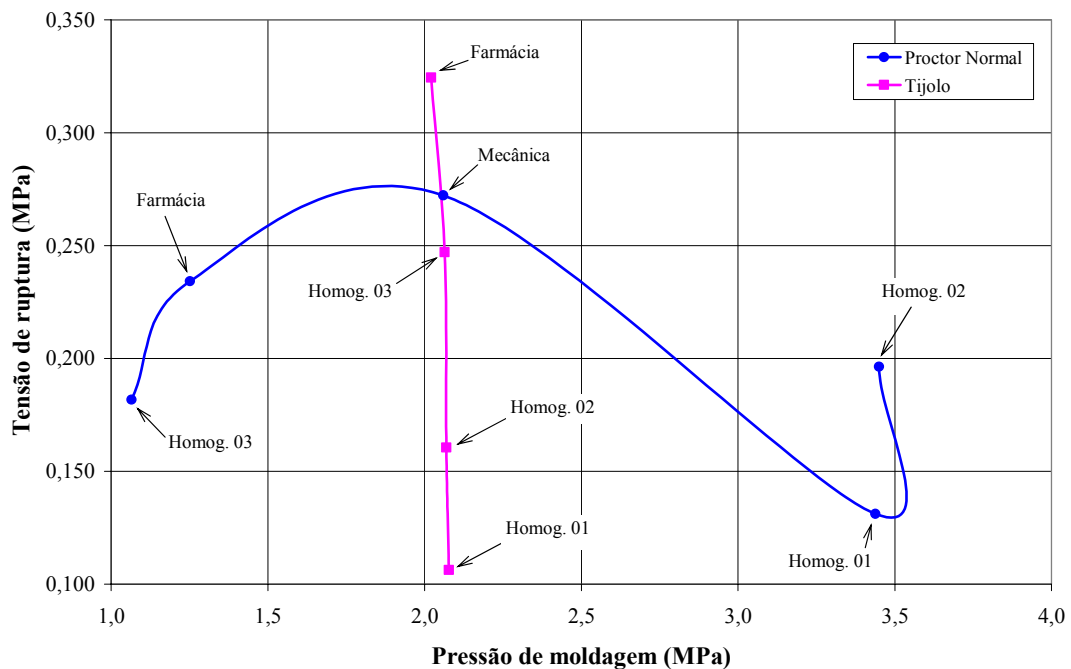


GRÁFICO 4 – Avaliação da pressão de moldagem nos solos estudados

A partir do GRAF. 4 pode-se observar que na determinação da resistência do solo, a pressão de moldagem não é a única variável a ser observada. O formato da curva mostrada indica que outras variáveis não contempladas influenciam na resistência do solo. Ao se adotar uma única pressão para todos os solos, observou-se que a resistência dos solos variou de acordo com a granulometria dos mesmos. Para a pressão de 2,0 MPa, o solo Homog. 01, o mais arenoso de todos, apresentou a resistência menor, sendo esta crescente à medida que os solos diminuía sua porcentagem de areia. Isto indica que solos mais arenosos, por apresentarem a massa específica seca máxima maior, necessitam de maiores pressões de moldagem. Já solos mais finos (com maiores frações de silte e/ou argila), por apresentarem massa específica seca máxima menor, podem ter sua resistência aumentada quando utiliza-se pressões de moldagem superiores à necessária para a energia Proctor Normal.

Conhecendo-se suas características geotécnicas, os solos a serem estudados (limite inferior - Homog. 01 e limite superior - Homog. 03) foram misturados ao cimento, à água e aos resíduos de madeira quando necessários, nas devidas proporções. Ensaio de compactação Proctor Normal foram executados também para a mistura solo-cimento

para determinar a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo, parâmetros que servem de base para a confecção dos tijolos. Com estes parâmetros foram moldados alguns corpos-de-prova donde se determinou a pressão equivalente à compactação Proctor Normal (P.N.). Corpos-de-prova foram moldados na umidade ótima da compactação Proctor Normal e com a pressão das prensas dos tijolos (T). O controle das alturas possibilitou a determinação da densidade (massa específica seca máxima) do corpo-de-prova equivalente a esta pressão. Os resultados da compactação em corpos-de-prova de solo-cimento estão mostrados na TAB. 8. A TAB. 9 apresenta os valores médios das pressões utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova de solo e solo-cimento.

TABELA 8
Massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo em solo-cimento

	Proctor Normal		Tijolo	
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	w _{ot.} (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	w _{ot.} (%)
Solo Homog. 01	1,846	13,1	1,776	13,1
Solo Homog. 03	1,523	25,1	1,544	25,1

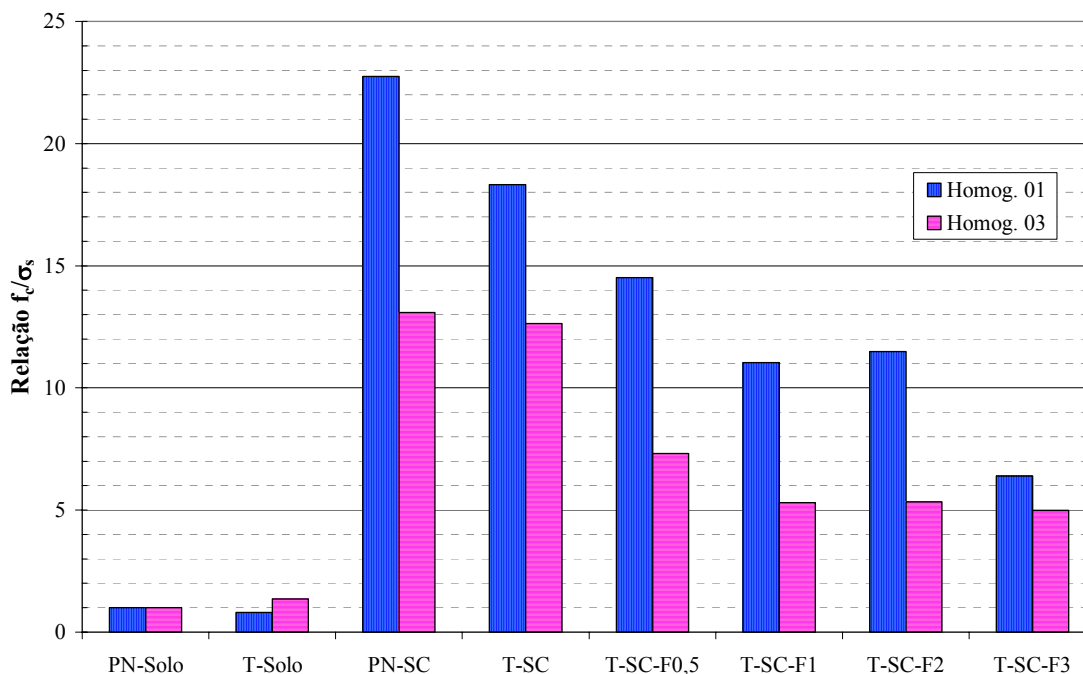
TABELA 9
Pressão de compactação dos corpos-de-prova de solo e solo-cimento (MPa)

	Proctor Normal (PN)		Tijolo (T)	
	Solo	Solo-cimento	Solo	Solo-cimento
Solo Homog. 01	3,55	3,39	2,07	2,05
Solo Homog. 03	1,07	2,05	2,07	2,05

Notar que a pressão utilizada para a confecção de corpos-de-prova com a pressão do tijolo foi de aproximadamente 2,0 MPa para todas as misturas. Para o solo Homog. 01 esta pressão é inferior à necessária para a moldagem de corpos-de-prova com os parâmetros do ensaio de compactação Proctor Normal. Já para o solo Homog. 03 a pressão referente ao ensaio Proctor Normal mostrou-se menor ou aproximadamente igual à pressão de moldagem dos tijolos. Acredita-se que esta diferença entre as pressões possa influenciar de alguma forma na resistência dos compósitos.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão. Uma relação (f_c / σ_s) entre a resistência à compressão do solo-cimento e do solo-cimento-resíduos de madeira (f_c) e a resistência à compressão simples dos solos (σ_s), em corpos-de-prova

pode ser vista no GRAF. 5. A influência da pressão na moldagem dos corpos-de-prova de solo e solo-cimento pode também ser notada.



f_c/σ_s	Resistência do solo-cimento e solo-cimento-resíduos / resistência do solo	Desvio padrão	
		Homog. 01	Homog. 03
PN-Solo	CPs de solo moldados com os parâmetros do ensaio de compactação Proctor Normal no solo.	0,009	0,009
T-Solo	CPs de solo moldados com a pressão equivalente às máquinas de tijolo (aproximadamente 2,0 MPa).	0,009	0,017
PN-SC	CPs de solo-cimento moldados com os parâmetros de compactação Proctor Normal no solo-cimento	0,437	0,542
T-SC	CPs de solo-cimento moldados com a pressão equivalente às máquinas de tijolo (aproximadamente 2,0 MPa).	0,457	0,799
T-SC-F0,5	CPs de solo-cimento-0,5% de resíduos moldados com a pressão equivalente às máquinas de tijolo (aproximadamente 2,0 MPa)	0,265	0,271
T-SC-F1	CPs de solo-cimento-1% de resíduos moldados com a pressão equivalente às máquinas de tijolo (aproximadamente 2,0 MPa)	0,245	0,116
T-SC-F2	CPs de solo-cimento-2% de resíduos moldados com a pressão equivalente às máquinas de tijolo (aproximadamente 2,0 MPa)	0,085	0,074
T-SC-F3	CPs de solo-cimento-3% de resíduos moldados com a pressão equivalente às máquinas de tijolo (aproximadamente 2,0 MPa)	0,113	0,061

GRÁFICO 5 – Relação entre resistências médias à compressão em corpos-de-prova de solo, solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira

Do gráfico pode-se observar a ocorrência de um acréscimo na resistência do solo com a introdução do cimento. Observa-se também que para o solo Homog. 01,

predominantemente arenoso, a resistência do corpo-de-prova de solo, quando moldado sob a pressão do ensaio de compactação Proctor Normal (PN-Solo), foi maior que a do corpo-de-prova moldado com a pressão do tijolo (T-Solo). Esta situação não ocorre para o solo Homog. 03, predominantemente argiloso, que possui uma resistência à compressão um pouco maior quando moldado com a pressão do tijolo. Já para os ensaios nos corpos-de-prova de solo-cimento, observou-se que a diferença entre a resistência à compressão quando moldados com a pressão Proctor Normal (PN-SC) é consideravelmente maior que a daqueles moldados com a pressão do tijolo (T-SC). Para o solo Homog. 03 esta diferença mostrou-se muito pequena. Isto confirma que para alguns solos, a pressão utilizada na moldagem influencia consideravelmente na resistência. Solos com maior massa específica seca máxima ($\rho_{d,m\acute{a}x}$) necessitarão de pressões mais elevadas que a das prensas convencionais para que ocorra a otimização de sua resistência. Quanto à inclusão dos resíduos de madeira, o gráfico nos dá indícios de que as mesmas reduzem a capacidade mecânica dos corpos-de-prova. Para o solo Homog. 01, pode-se observar um decréscimo quase linear entre os teores de resíduo, ocorrendo, porém, uma leve tendência à estabilização para teores de resíduo de 1% (T-SC-F1) e de 2% (T-SC-F2). Para o solo Homog. 03, observa-se um decréscimo na resistência com a introdução de teores de resíduo de 0,5% (T-SC-F0,5) e 1% (T-SC-F1). A partir daí, observa-se uma tendência à estabilização. Para ambos os solos, a inclusão de 3% de resíduos (T-SC-F3) apresentou os piores resultados mostrando que a inclusão de teores mais elevados não resultariam na elevação da resistência.

9.3. Avaliação da resistência da mistura solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira

Os GRAF. 6 e 7 mostram a resistência à compressão simples e à compressão diametral em corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira, moldados com a pressão convencional dos tijolos (2,0 MPa). O desvio de cada um dos gráficos pode ser visto na TAB. 10.

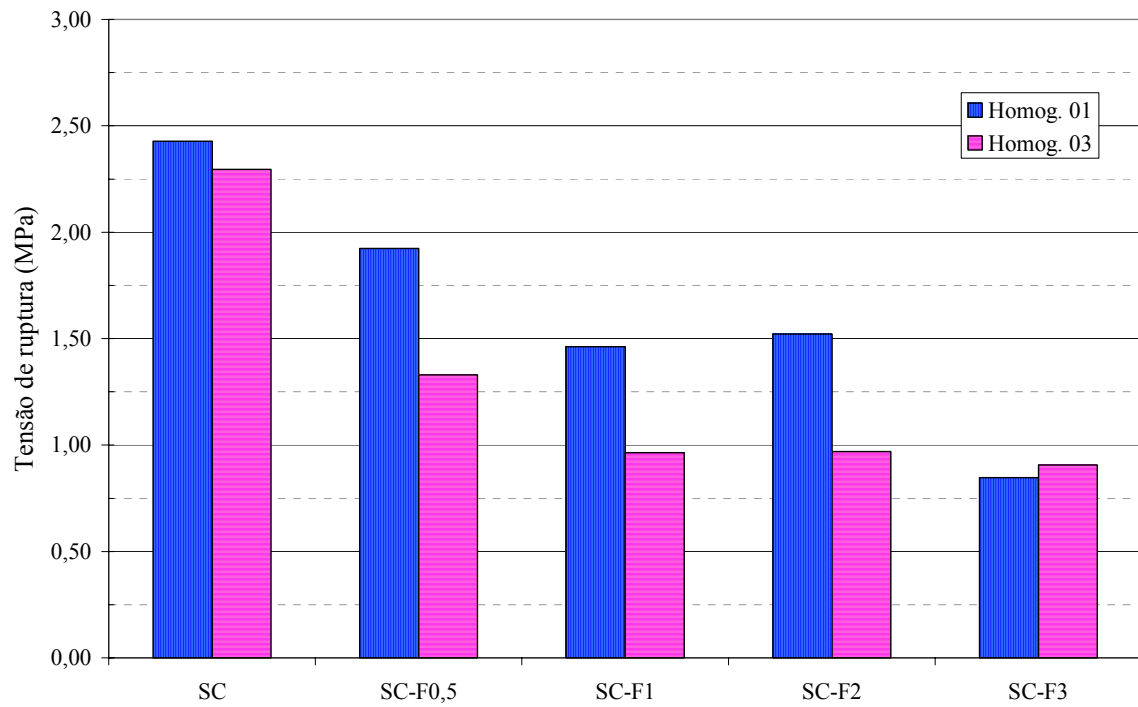


GRÁFICO 6 – Comparação entre a resistência à compressão simples média nos corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03

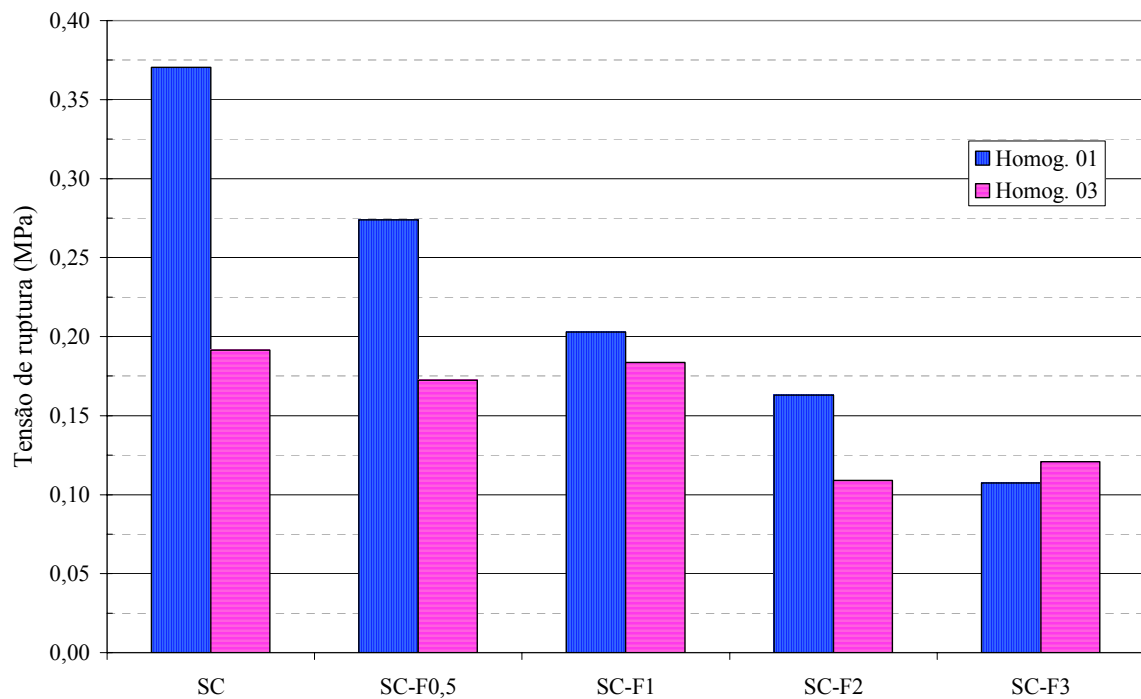


GRÁFICO 7 – Comparação entre a resistência à compressão diametral média nos corpos-de-prova para os solos Homog. 01 e 03

TABELA 10
Cálculo do desvio padrão dos GRÁFICOS 6 a 9

	Corpos-de-prova				Tijolos (GRAF. 8)		Prismas (GRAF. 9)	
	Compressão Simples (GRAF. 6)		Compressão Diametral (GRAF. 7)		Homog. 01	Homog. 03	Homog. 01	Homog. 03
	Homog. 01	Homog. 03	Homog. 01	Homog. 03				
T-SC	0,457	0,799	0,074	0,030	1,167	0,208	0,232	0,195
T-SC-F0,5	0,265	0,271	0,016	0,007	0,076	0,148	0,119	0,094
T-SC-F1	0,245	0,116	0,030	0,019	0,171	0,309	0,068	0,139
T-SC-F2	0,085	0,074	0,032	0,005	0,072	0,037	0,113	0,038
T-SC-F3	0,113	0,061	0,005	0,004	0,133	0,255	0,080	0,058

Um decréscimo na resistência à compressão e à tração pode ser observado para ambos os solos nos ensaios de compressão simples e compressão diametral respectivamente. É possível observar ainda que os resíduos de madeira, quanto a sua resistência à tração, exercem maior influência no solo Homog. 01 que no solo Homog. 03. Quanto à compressão, a influência dos resíduos mostra-se mais significativa no solo Homog. 03 para menores teores e no solo Homog. 01 para maiores teores. Observou-se durante os ensaios que o solo Homog. 01 por ser mais arenoso resulta em um compósito com ruptura mais frágil. A inclusão dos resíduos neste compósito aumentou a ductilidade do mesmo tornando sua ruptura mais dúctil que frágil, melhorando assim seu comportamento mecânico, apesar de não aumentar sua resistência. O solo Homog. 03 devido sua plasticidade, já apresentava uma ductilidade inicial, o que ocasionou em compósitos com ruptura um pouco menos frágil; situação esta não modificada pela inclusão dos resíduos.

Uma análise primária e superficial levaria à conclusão equivocada de que como a resistência do CP é reduzida com o acréscimo de resíduos de madeira, não justificaria sua utilização. Porém, para uma análise mais profunda, faz-se necessário o estudo do compósito na sua real forma de utilização. Os GRAF. 8 e 9 mostram os resultados da resistência à compressão em tijolos e prismas confeccionados com solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira. Tal resistência foi calculada a partir da área líquida dos tijolos. O desvio padrão referente aos GRAF. 8 e 9 foi apresentado na TAB. 10.

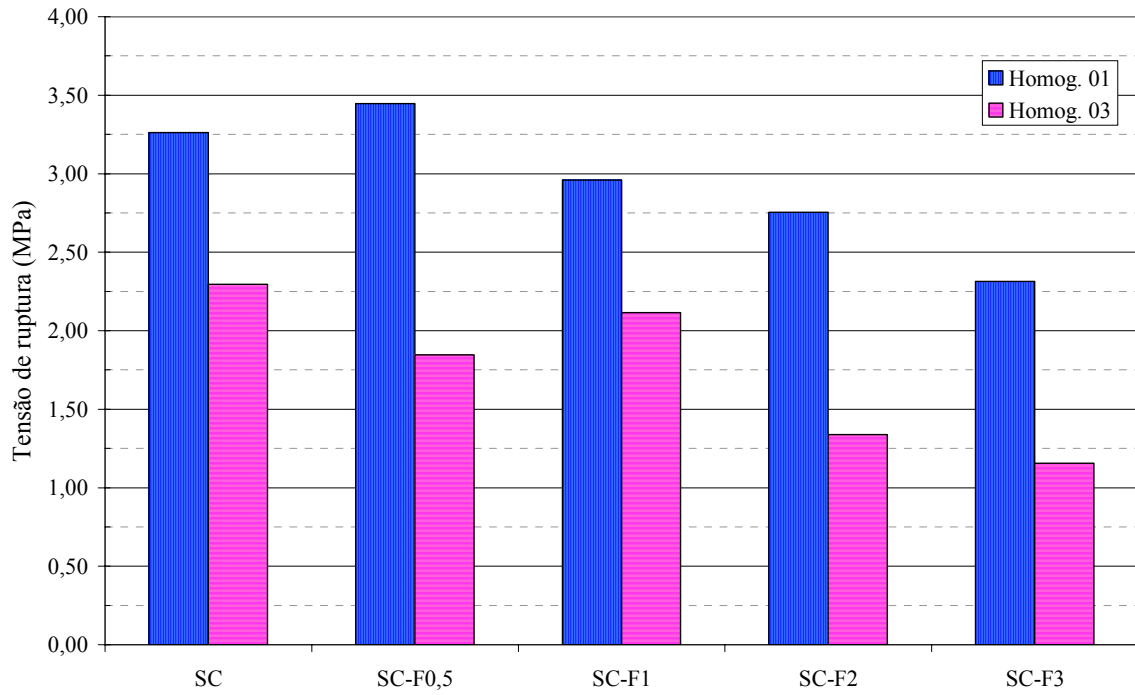


GRÁFICO 8 – Comparação entre a resistência à compressão média nos tijolos para os solos Homog. 01 e 03

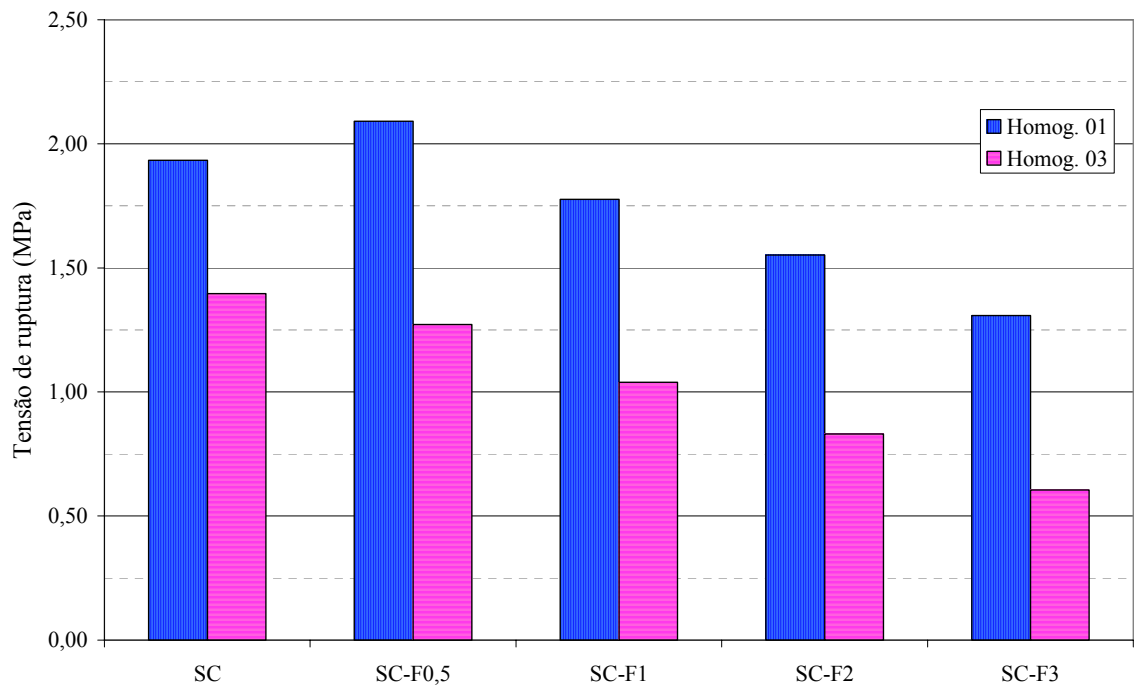


GRÁFICO 9 – Comparação entre a resistência à compressão média nos prismas para os solos Homog. 01 e 03

O decréscimo na resistência dos tijolos e prismas confeccionados utilizando o solo Homog. 03 confirma os valores obtidos nos ensaios em corpos-de-prova. Porém, pode-se observar que para o solo Homog. 01 ocorreu um pequeno acréscimo na resistência quando da utilização do teor de fibra de 0,5% (SC-F0,5). Este acréscimo leva a crer que o formato da peça confeccionada com o compósito solo-cimento-resíduo influencia em sua resistência. Tal fato confirma o que foi afirmado por alguns autores que os corpos-de-prova não representam eficientemente as propriedades dos tijolos.

Os GRAF. 10 e 11 ilustram a comparação entre a tensão de ruptura dos corpos-de-prova, tijolos e prismas nos ensaios de compressão simples e compressão diametral para os dois solos estudados.

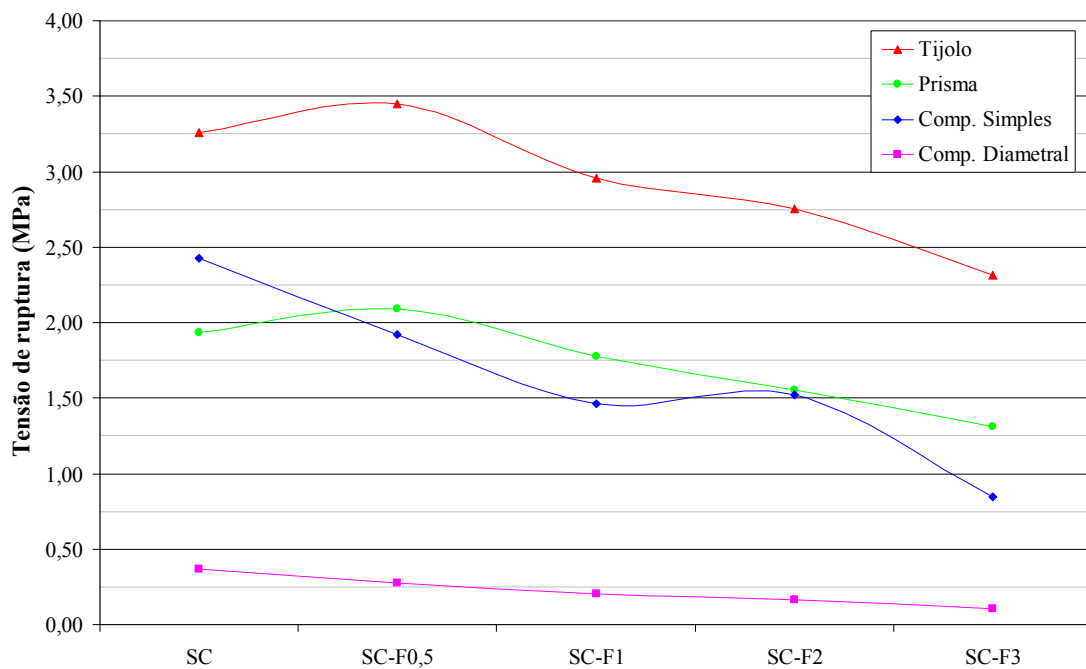


GRÁFICO 10 – Comparação entre as peças confeccionadas com o solo Homog. 01

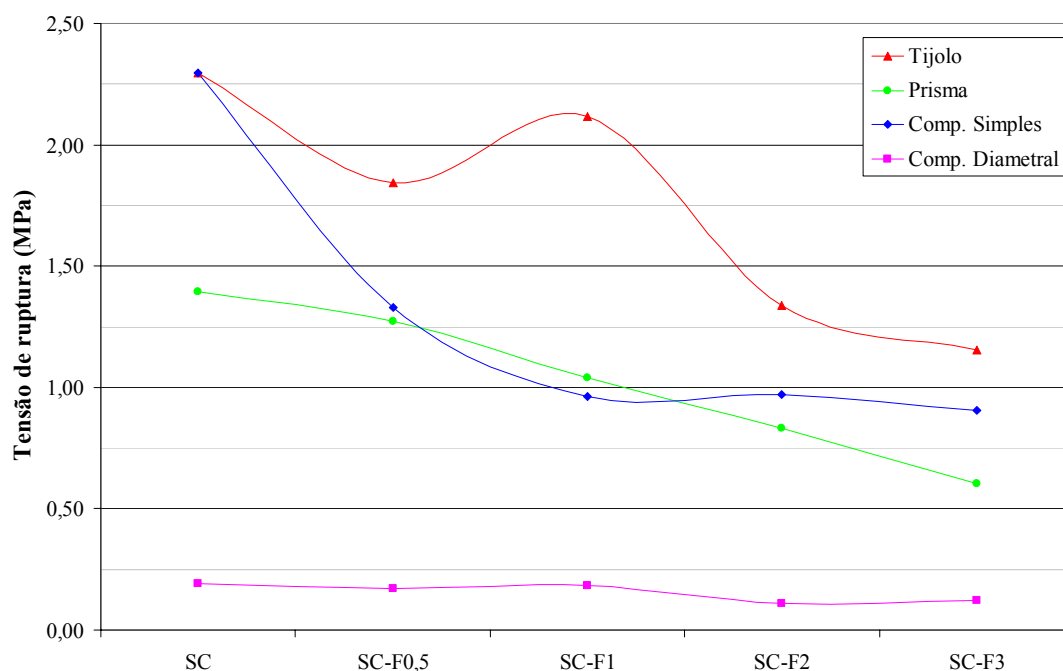


GRÁFICO 11 – Comparação entre as peças confeccionadas com o solo Homog. 03

A análise individual do ensaio de compressão diametral mostra um decréscimo na resistência à tração para o solo Homog. 01 e uma tendência à constância nos valores desta resistência para o solo Homog. 03 com o aumento do teor de resíduos. Porém, é relevante ressaltar a importância da avaliação conjunta das curvas anteriormente mostradas.

A comparação entre as peças confeccionadas com a mistura solo-cimento-resíduos, mostra a influência do formato da peça quanto à resistência. Em ensaios de compressão realizados em tijolos, prismas e corpos-de-prova, foram obtidos valores distintos de ruptura. Dos gráficos pode-se observar que os valores de ruptura dos corpos-de-prova aproximam-se em alguns pontos dos valores obtidos para os prismas. A comparação entre as curvas de resistência à ruptura nos tijolos e prismas confeccionados com solo Homog. 01 mostram que para o teor de resíduo 0,5% (SC-F0,5) ocorre o máximo da resistência, apesar de a curva dos corpos-de-prova mostrar um decréscimo na resistência. De posse destes valores é possível afirmar que dos teores de resíduos estudados, o que se mostra ideal para a dosagem otimizada é 0,5% de resíduo. Para o solo Homog. 03, a comparação entre as curvas confirma a influência negativa da inclusão dos resíduos neste tipo de solo. Assim, não foi possível determinar um teor de

resíduo para a dosagem otimizada, adotando-se, portanto para esta, a mistura solo-cimento sem resíduos de madeira.

A análise combinada dos resultados dos ensaios em corpos-de-prova, tijolos e prisma estabeleceu uma relação entre eles. As EQ. 2 a 5 referem-se ao solo Homog. 01, sendo as EQ. 6 a 9 referentes ao solo Homog. 03.

$$f_{t,D} = 0,17 \times f_{c,CP} - 0,05 \quad R^2 = 0,95 \quad (2)$$

$$f_{c,Tijolo} = 0,66 \times f_{c,CP} + 1,86 \quad R^2 = 0,77 \quad (3)$$

$$f_{c,Prisma} = 0,44 \times f_{c,CP} + 1,00 \quad R^2 = 0,70 \quad (4)$$

$$f_{c,Prisma} = 0,69 \times f_{c,Tijolo} - 0,31 \quad R^2 = 0,99 \quad (5)$$

$$f_{t,D} = 0,04 \times f_{c,CP} + 0,10 \quad R^2 = 0,40 \quad (6)$$

$$f_{c,Tijolo} = 0,58 \times f_{c,CP} + 1,00 \quad R^2 = 0,48 \quad (7)$$

$$f_{c,Prisma} = 0,44 \times f_{c,CP} + 0,46 \quad R^2 = 0,64 \quad (8)$$

$$f_{c,Prisma} = 0,58 \times f_{c,Tijolo} + 0,01 \quad R^2 = 0,79 \quad (9)$$

onde:

$f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa

$f_{c,CP}$ = à compressão nos corpos-de-prova cilíndricos, expressa em MPa

$f_{c,Tijolo}$ = à compressão nos tijolos, expressa em MPa

$f_{c,Prisma}$ = à compressão nos prismas, expressa em MPa

As equações apresentadas para o solo Homog. 01 mostram valores de correlação considerados satisfatórios, podendo as mesmas serem utilizadas para estimar valores de resistência. Já as equações relacionadas ao solo Homog. 03 não apresentaram valores de correlações satisfatórios, não sendo, portanto, confiáveis para tal determinação. Observou-se que a relação entre tração e compressão que no concreto convencional é de 1/10, nas misturas estudadas foi de 1/6 no solo Homog. 01 (mais arenoso) e 1/25 no solo Homog. 03 (mais argiloso). Notar que a correlação obtida para o solo Homog. 03 foi insatisfatória não sendo aconselhável adotar esta relação para solos argilosos.

9.4. Avaliação da velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas longitudinais

Para uma melhor avaliação das propriedades de corpos-de-prova, tijolos e prismas, foram realizadas leituras do tempo de propagação de onda nos mesmos. De posse deste tempo, conhecendo-se as dimensões das peças e utilizando-se as equações da física obteve-se a velocidade de propagação da onda longitudinal nas peças estudadas. Os valores obtidos nestes ensaios podem ser vistos no Anexo A.

Como foram executadas quatro leituras de tempo de propagação da onda nos tijolos, foi necessário estabelecer-se uma relação entre estas. Segundo Cazalla *et al.* (1999) e Ferreira e Freire³ (2004) é possível relacionar a velocidade da onda ultra-sônica longitudinal nas três direções do tijolo a partir da EQ. 10:

$$\Delta M = 100 \times \left| 1 - \frac{2 \times V_1}{(V_2 + V_3)} \right| \quad (10)$$

onde: ΔM = anisotropia total do tijolo em %;

V_1 = velocidade da onda longitudinal, através da altura do tijolo, em m/s;

V_2 = velocidade da onda longitudinal, através da largura do tijolo, em m/s;

V_3 = velocidade da onda longitudinal, através do comprimento do tijolo, em m/s.

A FIGURA 41 ilustra as direções adotadas para cada uma das velocidades.

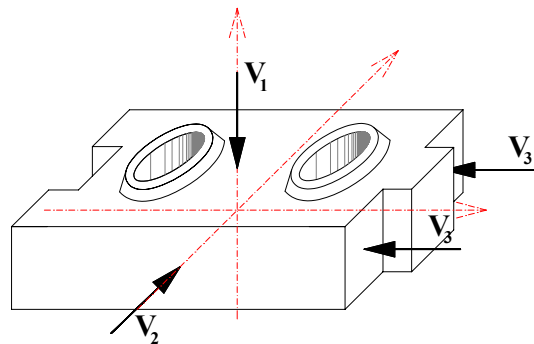


FIGURA 41 – Direções de leitura da onda longitudinal

³ Nos artigos citados, a equação da anisotropia não faz nenhuma consideração sobre valores de velocidade cuja relação resulta em valores negativos; por isto adotou-se a função modular para expressar tal relação.

Como o tijolo confeccionado possui furos, foram executadas duas leituras ao longo do comprimento do mesmo. Sendo assim o valor adotado para a velocidade V_3 foi a média das duas leituras determinadas nesta direção.

Segundo Ferreira e Freire (2004), quanto menor o valor da anisotropia total (ΔM), menos espaços vazios possui o tijolo e conseqüentemente, maior resistência mecânica.

Em uma análise mais ampliada, pode-se ainda dizer que nesse caso, o tijolo apresenta-se mais homogêneo, ou seja, suas características mostram-se semelhantes em todas as direções.

A análise dos tijolos e prismas confeccionados com diferentes teores de resíduos mostrou que os menores valores de anisotropia foram obtidos quando se utilizou baixas porcentagens de resíduos (0% e 0,5%) em ambos os solos. Já os maiores valores de anisotropia foram obtidos quando se utilizou as maiores porcentagens de resíduos (2% e 3%) no solo Homog. 03. A análise isolada da anisotropia levaria a concluir que os melhores resultados de resistência mecânica seriam obtidos com a utilização de 0% ou 0,5% de resíduos, independente do solo empregado. Porém, como o teor de resíduo utilizado não é a única variável a influenciar na resistência, não se pode afirmar com certeza que este seria o melhor teor a ser utilizado.

Um estudo estatístico foi realizado em um número mínimo de três corpos-de-prova, quatro tijolos e três prismas para cada teor de fibras de cada tipo de solo. Sendo assim, pode-se afirmar que foi utilizado um número mínimo de 30 corpos-de-prova (2x5x3), 40 tijolos (2x5x4) e 30 prismas (2x5x3). Desta forma, acredita-se que a amostragem utilizada foi satisfatória, podendo ser significativa para a determinação de relações entre os mesmos.

A partir dos valores obtidos nos ensaios procurou-se estabelecer relações entre características físicas (densidade aparente seca) e mecânicas (tensão de ruptura), bem como o teor de resíduo utilizado. Fazendo um tratamento estatístico dos resultados experimentais, mediante a utilização do software MINITAB 13.20, foram encontradas

equações para a determinação da tensão de ruptura à compressão (f_c), através de regressões lineares múltiplas. Nos corpos-de-prova, as equações foram determinadas em função do teor de resíduo (%R), da densidade aparente seca ($\rho_{ap,seca}$) e da velocidade de propagação da onda longitudinal (V). Já para os tijolos e prismas, utilizou-se a relação entre as velocidades de onda – anisotropia (ΔM), sendo as correlações de cada equação mostradas.

As EQ. 11, 12 e 13 referem-se à resistência à compressão em corpos-de-prova, tijolos e prismas respectivamente.

$$f_{c,CP} = 10^{-1,02} \times \%R^{-0,0397} \times \rho_{ap,seca}^{1,97} \times V^{0,224} \quad R^2 = 0,72 \quad (11)$$

$$f_{c,Tijolo} = 10^{-0,495} \times \%R^{-0,0131} \times \rho_{ap,seca}^{4,56} \times \Delta M^{-0,0819} \quad R^2 = 0,85 \quad (12)$$

$$f_{c,Prisma} = 10^{-0,776} \times \%R^{-0,0196} \times \rho_{ap,seca}^{4,85} \times \Delta M^{-0,0798} \quad R^2 = 0,84 \quad (13)$$

sendo f_c em MPa; $\rho_{ap,seca}$ em g/cm^3 ; V em m/s; $\%R$ e ΔM em %.

Ao se analisar os dados obtidos nos ensaios para os solos Homog. 01 e 03 observou-se que as equações que apresentaram melhores resultados foram aquelas em que não se fazia distinção do tipo de solo utilizado. Acredita-se desta forma que esta variável já esteja sendo considerada nas demais variáveis ($\rho_{ap,seca}$, V e ΔM). As correlações obtidas mostraram valores satisfatórios, uma vez que a mistura solo-cimento e solo-cimento-resíduos apresentam características anisotrópicas. Das equações pode-se ainda observar a grande influência da densidade na resistência. Sabendo-se que a densidade está ligada à pressão de moldagem, confirma-se também a importância da pressão na resistência.

9.5. Análise das relações constitutivas

O conhecimento do carregamento aplicado nos corpos-de-prova, tijolos e prismas (P), da área da seção transversal dos corpos-de-prova (A) e da área líquida dos tijolos (A_{liq}) possibilitou o cálculo das tensões atuantes nestas peças. Para o cálculo das tensões atuantes nos prismas utilizou-se a área líquida do tijolo no qual o carregamento foi aplicado. O cálculo das deformações foi realizado a partir da relação entre a variação da altura (Δh) e sua altura inicial (h_0), sendo que nos prismas considerou-se como altura

inicial a soma das alturas dos dois tijolos utilizados para a montagem do prisma. As EQ. 14 a 16 apresentam estas relações.

Cálculo das tensões nos corpos-de-prova:
$$\sigma_{CP} = \frac{P}{A} \quad (14)$$

Cálculo da tensões nos tijolos e prismas:
$$\sigma_{Tijolo} = \frac{P}{A_{liq.}} \quad (15)$$

Cálculo das deformações nos corpos-de-prova, tijolos e prismas:
$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (16)$$

Os GRAF. 12 a 17 mostram a relação entre a tensão e a deformação considerando cada teor de resíduo utilizado nos corpos-de-prova, tijolos e prismas. As curvas mostradas foram obtidas a partir da média entre as curvas dos exemplares avaliados, respeitando suas características particulares.

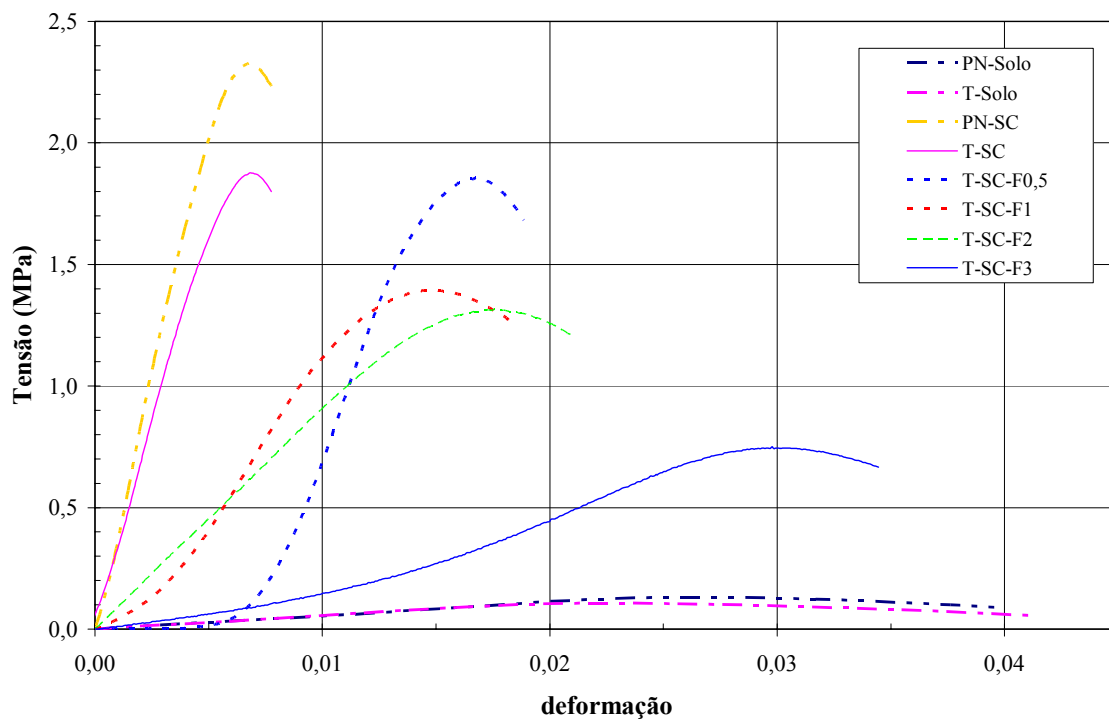


GRÁFICO 12 – Curva tensão-deformação referente a corpos-de-prova confeccionados com solo Homog. 01

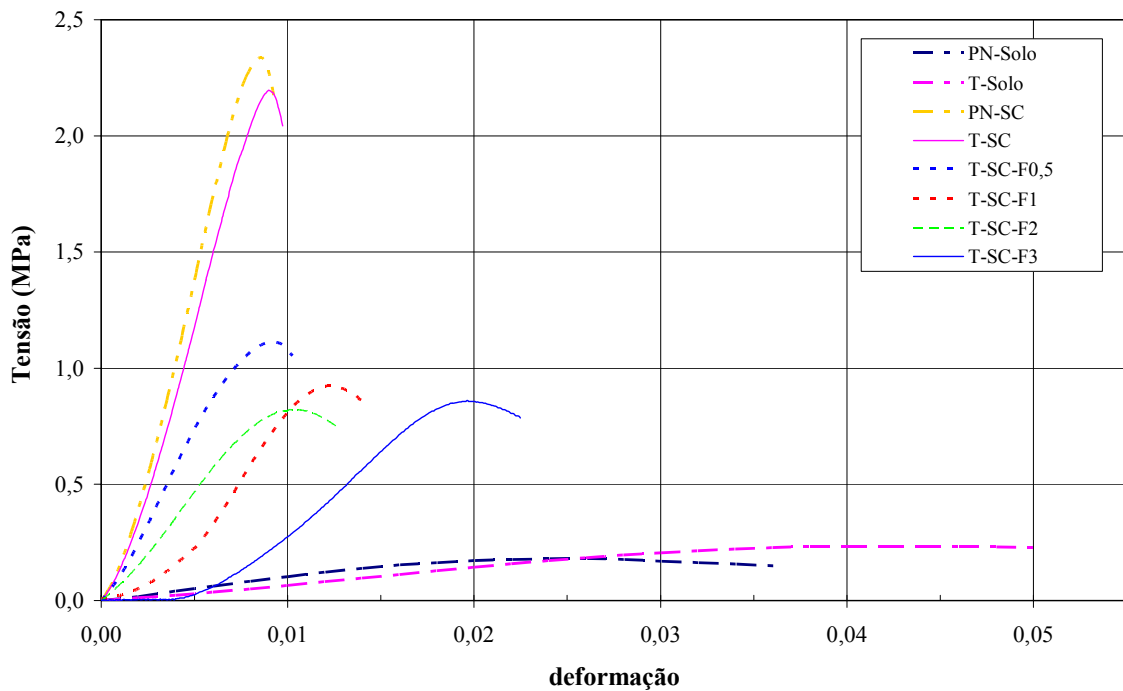


GRÁFICO 13 – Curva tensão-deformação referente a corpos-de-prova confeccionados com solo Homog. 03

É possível observar a partir dos GRÁF. 12 e 13, o comportamento dos materiais solo, solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira utilizados na confecção de corpos-de-prova. A análise dos solos Homog. 01 e 03 mostra que o acréscimo do cimento aos solos ocasionou um aumento na fragilidade do compósito. Os corpos-de-prova moldados apenas com solo (PN-Solo e T-Solo) mostraram-se mais dúcteis independentemente da energia empregada na moldagem quando comparados com os corpos-de-prova de solo-cimento moldados com energias equivalentes (PN-SC e T-SC). A comparação entre os corpos-de-prova moldados com a pressão das máquinas de tijolos mostrou que a inclusão dos resíduos de madeira proporcionou um aumento na ductilidade proporcional ao crescimento do teor dos resíduos. Este aumento de ductilidade mostrou-se mais sensível no solo Homog. 01, naturalmente de comportamento mais frágil. O reduzido acréscimo de ductilidade no solo Homog. 03 se deve à plasticidade natural do mesmo.

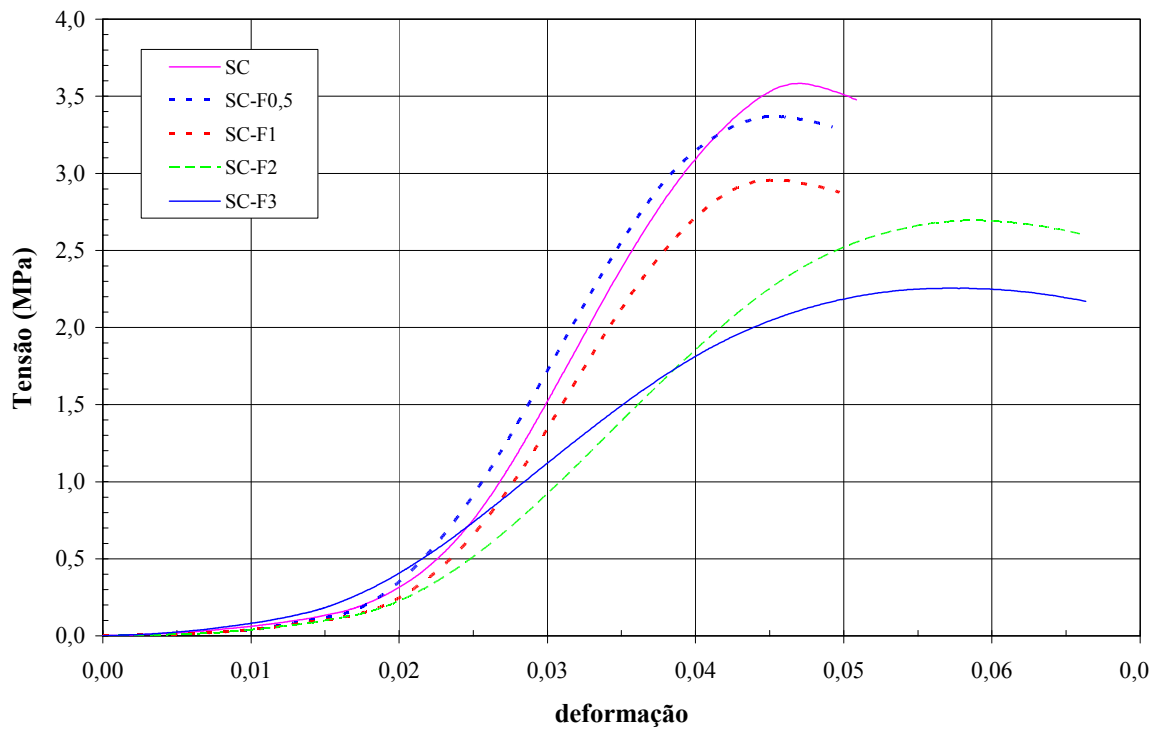


GRÁFICO 14 – Curva tensão-deformação referente a tijolos confeccionados com solo Homog. 01

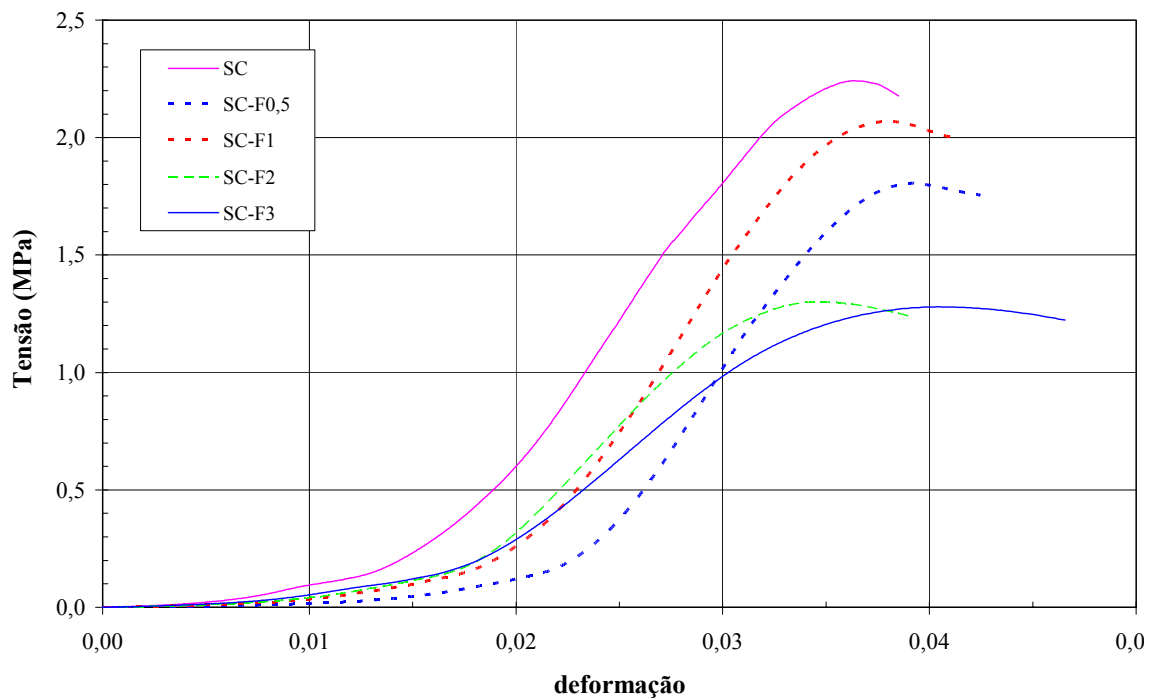


GRÁFICO 15 – Curva tensão-deformação referente a tijolos confeccionados com solo Homog. 03

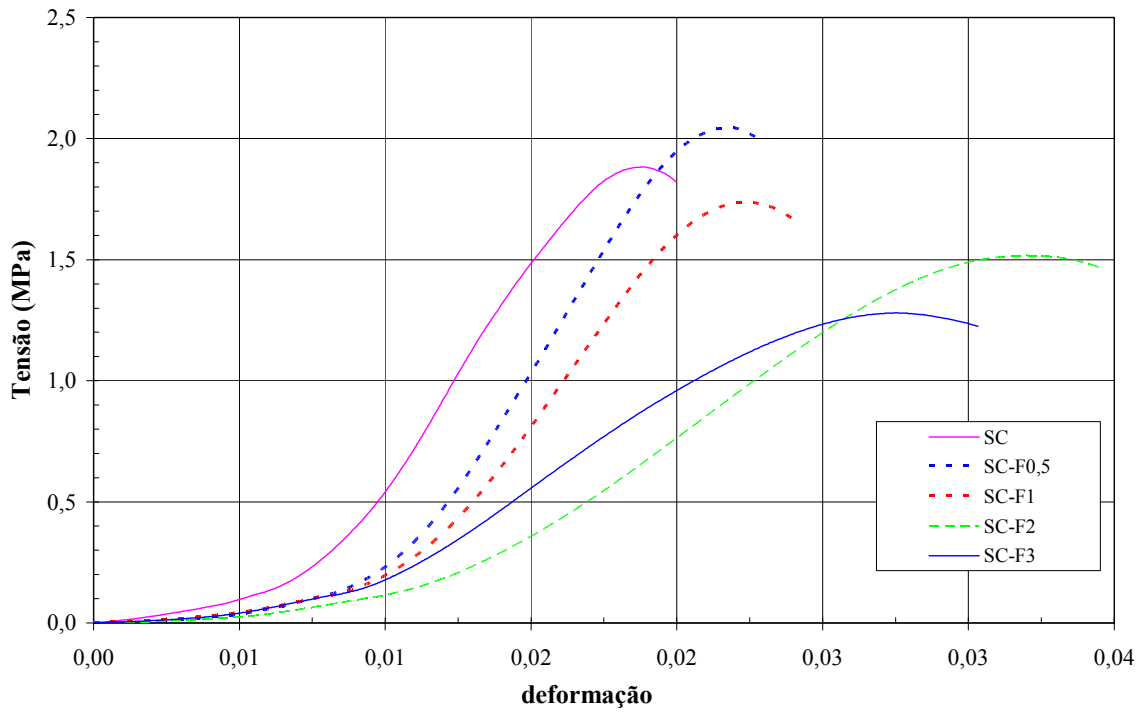


GRÁFICO 16 – Curva tensão-deformação referente a prismas confeccionados com solo Homog. 01

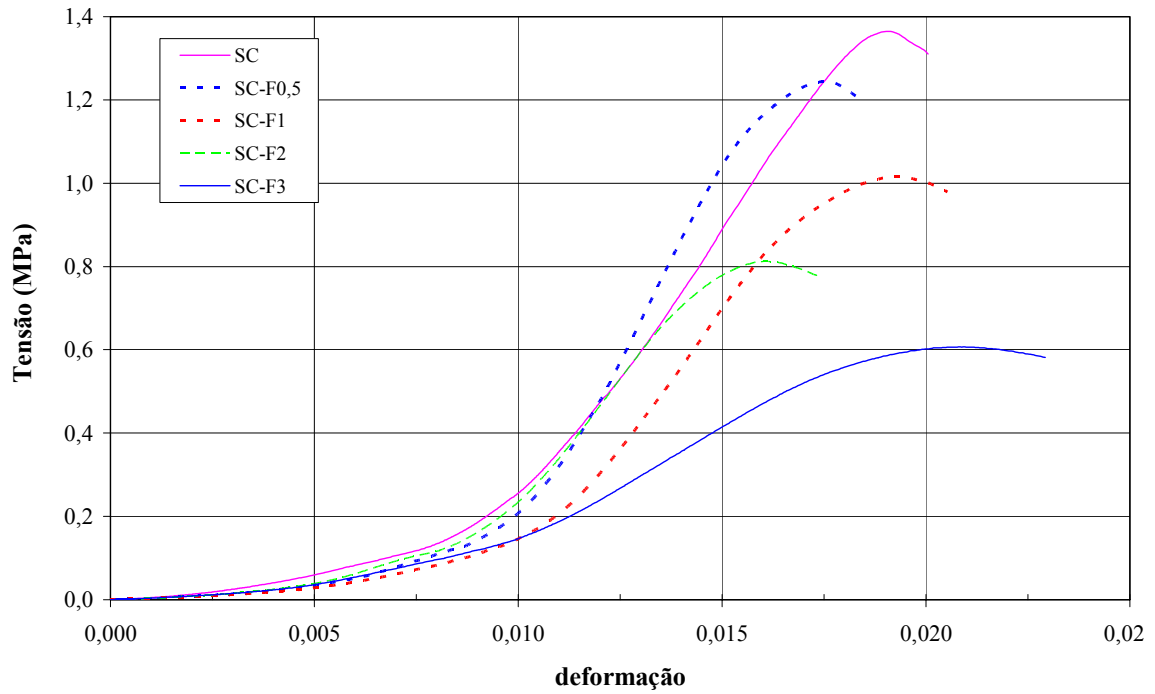


GRÁFICO 17 – Curva tensão-deformação referente a prismas confeccionados com solo Homog. 03

Com comportamento semelhante ao apresentado pelos corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos, as curvas referentes aos tijolos e prismas também mostraram um acréscimo na ductilidade devido à inclusão dos resíduos. No solo Homog. 01, o acréscimo de resíduos possibilitou um aumento na deformação das peças antes da ruptura. No solo Homog. 03 a deformação das peças antes da ruptura apresentou uma pequena variação indicando pouca influência dos resíduos para o compósito que utilizou este tipo de solo. Além disto é possível visualizar uma tendência à formação de um patamar para maiores teores de resíduos. As curvas plotadas possibilitaram a determinação do módulo de elasticidade para cada um dos teores de resíduos considerando o formato empregado durante a confecção das peças ensaiadas.

9.6. Análise do Módulo de Elasticidade

A partir dos ensaios de compressão simples executados em corpos-de-prova, tijolos e prismas, foi possível a determinação do módulo de elasticidade de cada um deles, bem como a influência dos resíduos no mesmo. Os GRAF. 18 e 19 mostram a influência dos resíduos na determinação do módulo de elasticidade.

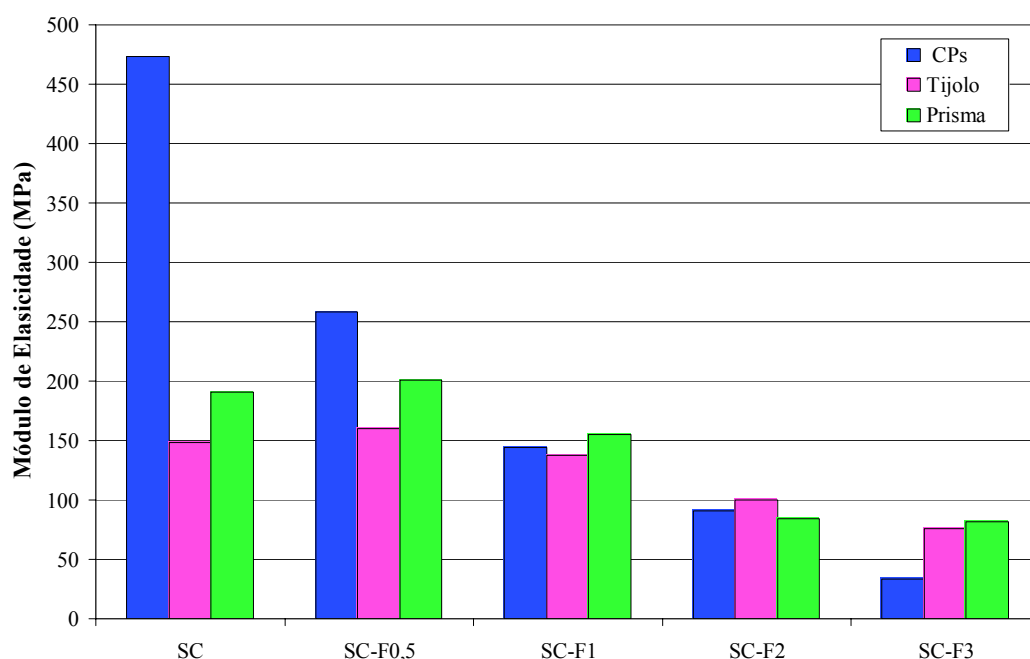


GRÁFICO 18 – Módulo de Elasticidade determinado a partir de corpos-de-prova, tijolos e prismas utilizando o solo Homog. 01

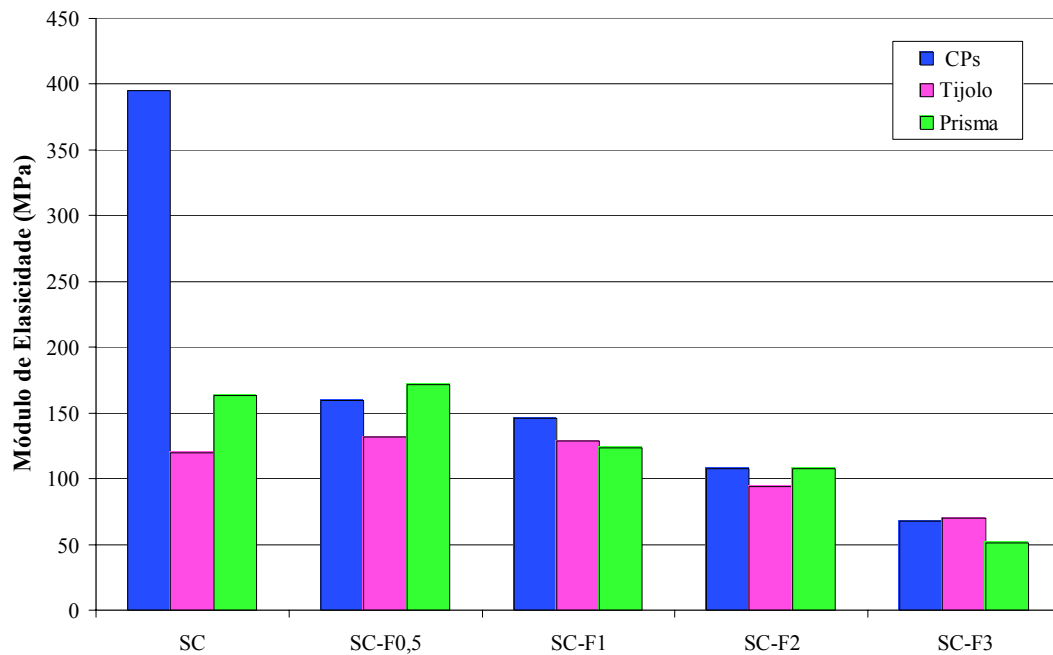


GRÁFICO 19 – Módulo de Elasticidade determinado a partir de corpos-de-prova, tijolos e prismas utilizando o solo Homog. 03

O estudo do módulo de elasticidade (E) mostra que para ambos os solos ocorre um decréscimo no módulo com a inclusão dos resíduos quando são analisados apenas os corpos-de-prova. Porém, ao serem analisados tijolos e prismas observa-se uma pequena elevação no módulo de elasticidade com a utilização de 0,5% de resíduo, seguindo-se de um decréscimo no mesmo. A variação no módulo de elasticidade é acentuada para corpos-de-prova e discreta para tijolos e prismas. A configuração geométrica das peças é a possível causa para a grande diferença entre os valores obtidos.

Dos valores obtidos para o módulo de elasticidade foram estabelecidas relações entre a variação do módulo em função do teor de resíduos utilizado. As EQ. 17, 18 e 19 mostram as relações obtidas utilizando o solo Homog. 01 para corpos-de-prova, tijolos e prismas, respectivamente:

$$E_{CP} = 10^{2,08} \times \%R^{-0,122} \quad R^2 = 0,717 \quad (17)$$

$$E_{Tijolo} = 10^{2,07} \times \%R^{-0,0251} \quad R^2 = 0,095 \quad (18)$$

$$E_{Prisma} = 10^{2,09} \times \%R^{-0,0457} \quad R^2 = 0,217 \quad (19)$$

sendo E em MPa; e $\%R$ em %.

Para o solo Homog. 03, as relações obtidas para corpos-de-prova, tijolos e prismas, respectivamente são mostradas nas EQ. 20, 21 e 22.

$$E_{CP} = 10^{2,04} \times \%R^{-0,108} \quad R^2 = 0,786 \quad (20)$$

$$E_{Tijolo} = 10^{2,00} \times \%R^{-0,0193} \quad R^2 = 0,065 \quad (21)$$

$$E_{Prisma} = 10^{2,01} \times \%R^{-0,0514} \quad R^2 = 0,156 \quad (22)$$

sendo E em MPa; e $\%R$ em %.

As correlações obtidas para as equações acima mostram que a avaliação do módulo de elasticidade a partir dos ensaios de compressão em tijolos e prismas não é confiável. Os valores baixos destas correlações comparando-se aos valores obtidos para os corpos-de-prova, confirmam que a configuração dos tijolos e prismas não é adequada para tal determinação. Desta forma, o módulo de elasticidade da mistura solo-cimento-resíduos, determinado a partir dos corpos-de-prova é mostrada na TAB. 11.

TABELA 11
Valores do Módulo de Elasticidade para os diferentes teores de resíduos

	Módulo de elasticidade (MPa) – valores médios				
	0% Resíduo	0,5% Resíduo	1% Resíduo	2% Resíduo	3% Resíduo
Solo Homog. 01	473,50	258,28	144,48	90,93	33,458
Solo Homog. 03	395,10	159,33	145,64	107,68	67,69

Adotando-se os mesmos parâmetros de análise, foram estabelecidas também relações entre a tensão de ruptura e o teor de resíduos utilizado. As EQ. 23, 24 e 25 mostram tais relações para o solo Homog. 01, obtidas para corpos-de-prova, tijolos e prismas, respectivamente:

$$f_{c,CP} = 10^{0,164} \times \%R^{-0,0521} \quad R^2 = 0,70 \quad (23)$$

$$f_{c,Tijolo} = 10^{0,452} \times \%R^{-0,00981} \quad R^2 = 0,004 \quad (24)$$

$$f_{c,Prisma} = 10^{0,215} \times \%R^{-0,0159} \quad R^2 = 0,11 \quad (25)$$

sendo E em MPa; e $\%R$ em %.

As relações obtidas para o solo Homog. 03 em corpos-de-prova, tijolos e prismas são mostradas respectivamente nas EQ. 26, 27 e 28.

$$f_{c,CP} = 10^{0,0174} \times \%R^{-0,0719} \quad R^2 = 0,81 \quad (26)$$

$$f_{c,Tijolo} = 10^{0,198} \times \%R^{-0,0334} \quad R^2 = 0,35 \quad (27)$$

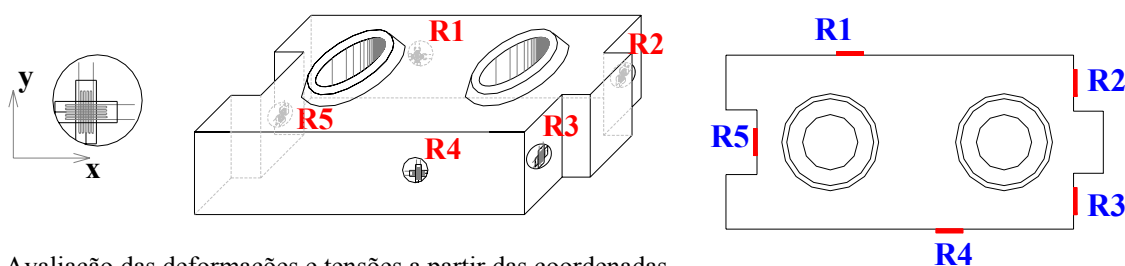
$$f_{c,Prisma} = 10^{-0,0507} \times \%R^{-0,0486} \quad R^2 = 0,39 \quad (28)$$

sendo E em MPa; e $\%R$ em %.

Como ocorreu na avaliação do módulo de elasticidade, as equações obtidas para a resistência à compressão em tijolos e prismas, quando considerado apenas o teor de resíduo utilizado, mostraram-se não confiáveis, uma vez que a correlação foi insatisfatória. Desta forma, uma estimativa da resistência à compressão da mistura solo-cimento-resíduos, somente poderia ser feita a partir de corpos-de-prova.

9.7. Análise exploratória experimental dos tijolos

Após a avaliação da resistência dos corpos-de-prova, tijolos e prismas, e determinação do teor ideal de resíduos, foram confeccionados três tijolos, um utilizando o solo Homog. 01 e cimento apenas; outro com solo Homog. 01, cimento e 0,5% de resíduos de madeira e o terceiro com solo Homog. 03 e cimento apenas. Com o objetivo de estudar o caminho da ruptura, bem como obter um indicativo de um limite a partir do qual ocorra a modificação do mecanismo de ruptura dos tijolos, foram colocadas 5 rosetas nos locais indicados pela FIG. 42. As rosetas colocadas eram formadas apenas por dois extensômetros (um vertical e outro horizontal), de forma que foram coletados dados referentes às deformações horizontais (ϵ_x) e verticais (ϵ_y).



Avaliação das deformações e tensões a partir das coordenadas do sistema local de cada roseta

FIGURA 42 – Posição e numeração das rosetas no tijolo

A partir dos dados coletados em cada extensômetro, e utilizando-se as equações da resistência dos materiais, foram determinados os coeficientes de Poisson em cada um dos pontos mostrados. A TAB. 12 mostra os valores para o coeficiente de Poisson encontrados nos três tijolos instrumentados.

Presume-se que, devido ao seu posicionamento, as rosetas R1 e R4 e também R2 e R3, apresentam um comportamento similar. Neste sentido foi tirada a média aritmética entre cada par.

TABELA 12
Valores do coeficiente de Poisson nos tijolos

Roseta	Coeficiente de Poisson (ν)						
	1	4	média 1-4	2	3	média 2-3	5
SC1-0% resíduos	0,23	0,27	0,25	0,23	0,21	0,22	0,16
SC1-0,5% resíduos	0,18	0,23	0,21	0,25	0,14	0,20	0,16
SC3-0% resíduos	0,07	0,05	0,06	0,35	0,30	0,32	0,12

Na tabela observa-se que em cada tijolo, para cada roseta foi encontrado um valor diferente para o coeficiente de Poisson. A geometria do tijolo colabora para que tal situação ocorra. Porém, admitindo a similaridade de comportamento entre os pares de rosetas R1-R4 e R2-R3 observou-se que os valores médios encontrados nos tijolos fabricados utilizando o solo Homog. 01 mostraram-se coerentes com os conhecidos para diversos tipos de materiais. O coeficiente de Poisson determinado pela R5 mostrou-se diferente dos demais devido à configuração geométrica do tijolo. Para o tijolo fabricado com o solo Homog. 03 observou-se uma grande variação entre os valores de ν . Porém, a relação de similaridade entre as posições foi mantida, o que pode indicar uma influência do solo utilizado nesta determinação.

Utilizando os valores do coeficiente de Poisson encontrados para cada ponto, o módulo de Elasticidade (módulo de Young) determinado para a mistura solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira, e as deformações, foram calculadas as tensões correspondentes a cada roseta conforme as equações do Estado Plano de Tensões (EQ. 29 a 31):

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} \times (\varepsilon_x + \nu \times \varepsilon_y) \quad (29)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} \times (\varepsilon_y + \nu \times \varepsilon_x) \quad (30)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (31)$$

Onde: E = módulo de Young em MPa

ν = coeficiente de Poisson

σ_x e σ_y = tensões normais no plano em MPa

Os GRAF. 20 a 22 mostram as tensões σ_x e σ_y obtidas em cada ponto nos tijolos estudados. Por se tratar de um estado plano de tensões, não se calculou σ_z uma vez que tal componente é resultado de tensões nulas na direção z (admitindo-se sistema local).

Para a análise da trajetória da ruptura foi necessário confeccionar gráficos individuais de cada roseta, onde mostrou-se as tensões σ_x e σ_y atuantes em cada uma delas (GRAF. 23 a 37). Em cada curva determinou-se o carregamento responsável pela perda de capacidade resistente, indicada pela mudança do tipo de esforço. O maior dos dois foi determinante na avaliação da trajetória. Para a determinação da seqüência da ruptura, os maiores carregamentos obtidos de cada ponto foram ordenados de forma crescente.

Nos gráficos, onde se lê s_x e s_y têm-se as componentes da tensão σ_x e σ_y .

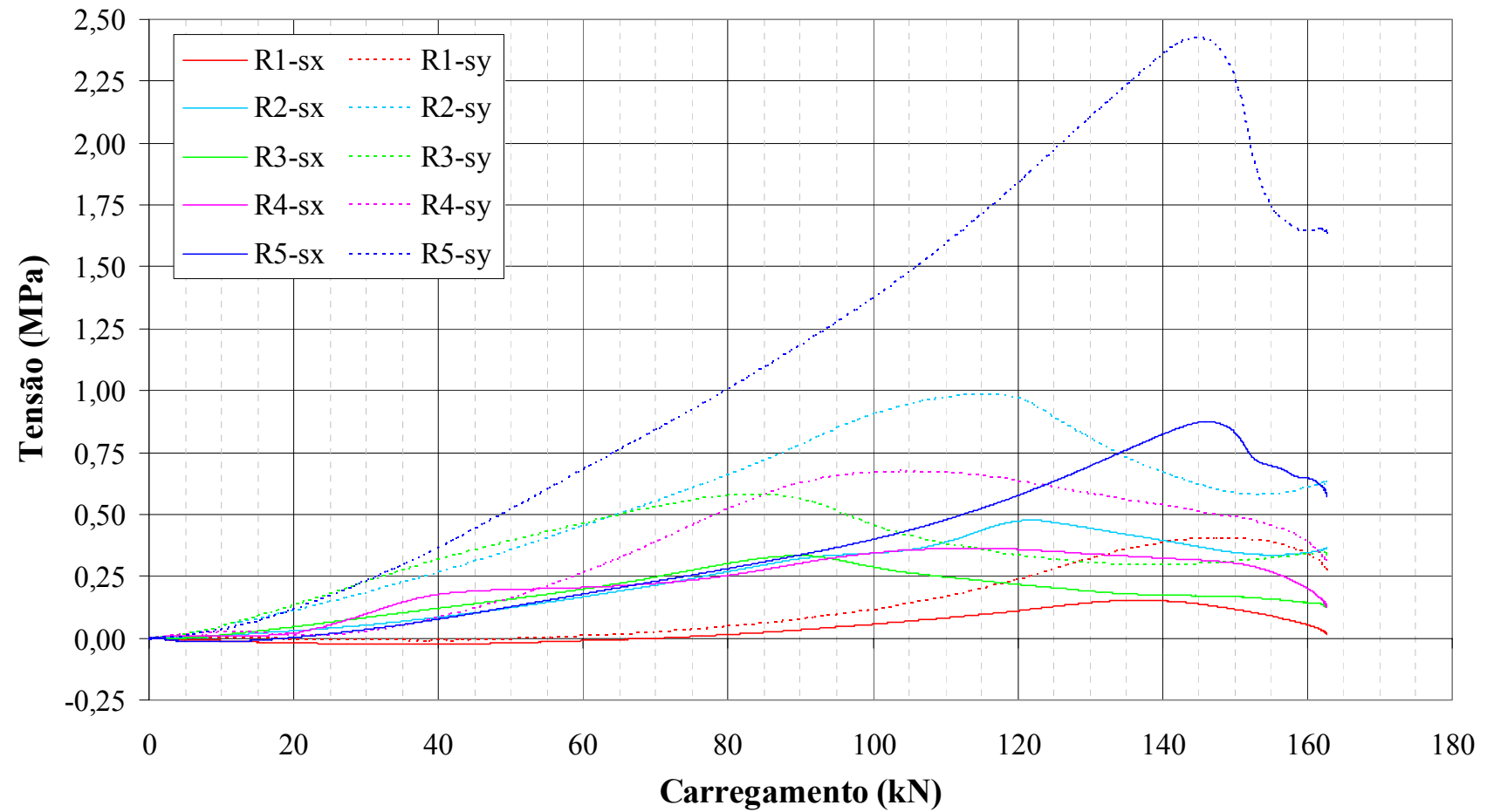


GRÁFICO 20 – Análise da tensão em cada roseta para o tijolo fabricado com solo Homog. 01 e 0% de resíduos

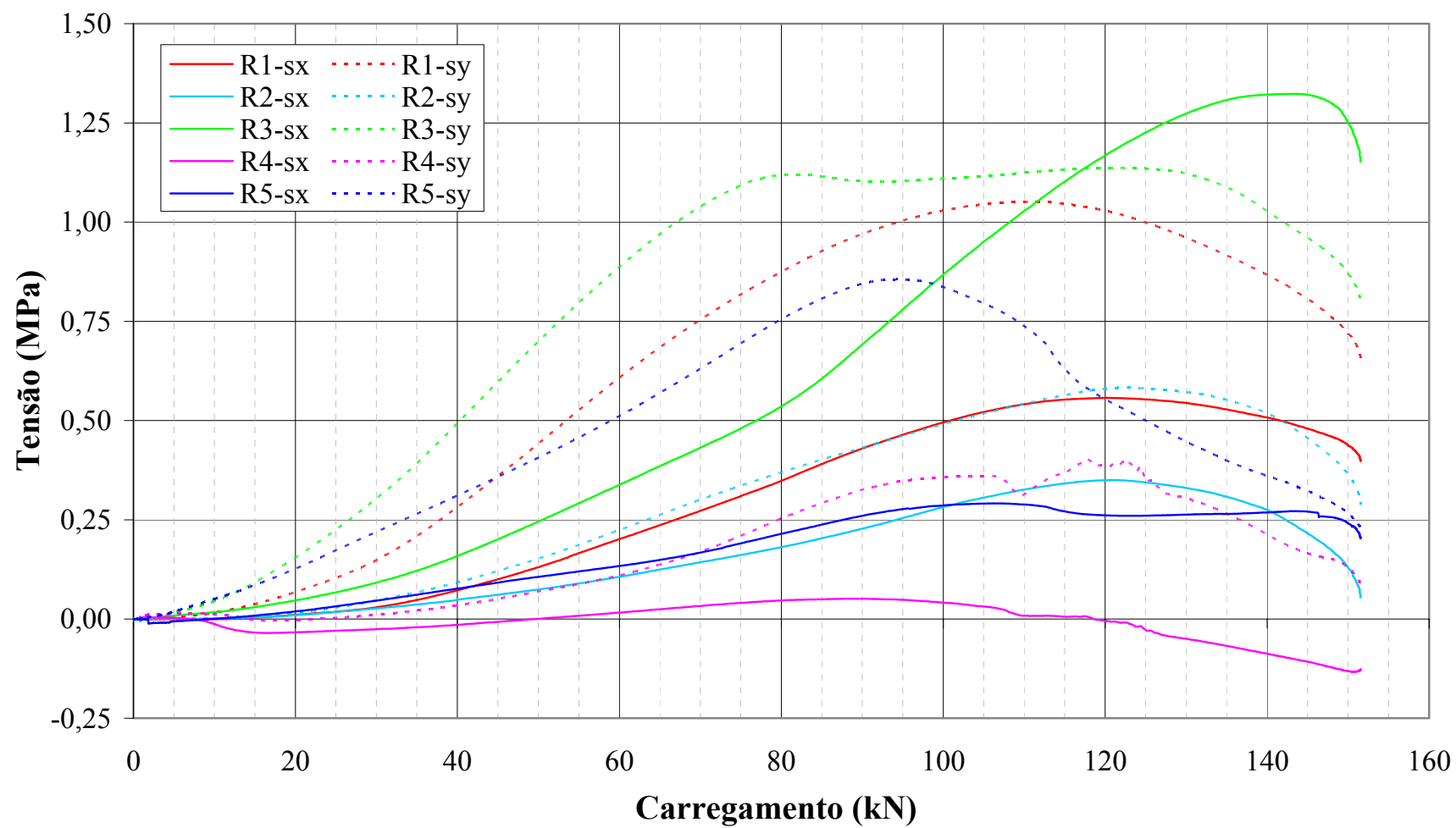


GRÁFICO 21 – Análise da tensão em cada roseta para o tijolo fabricado com solo Homog. 01 e 0,5% de resíduos

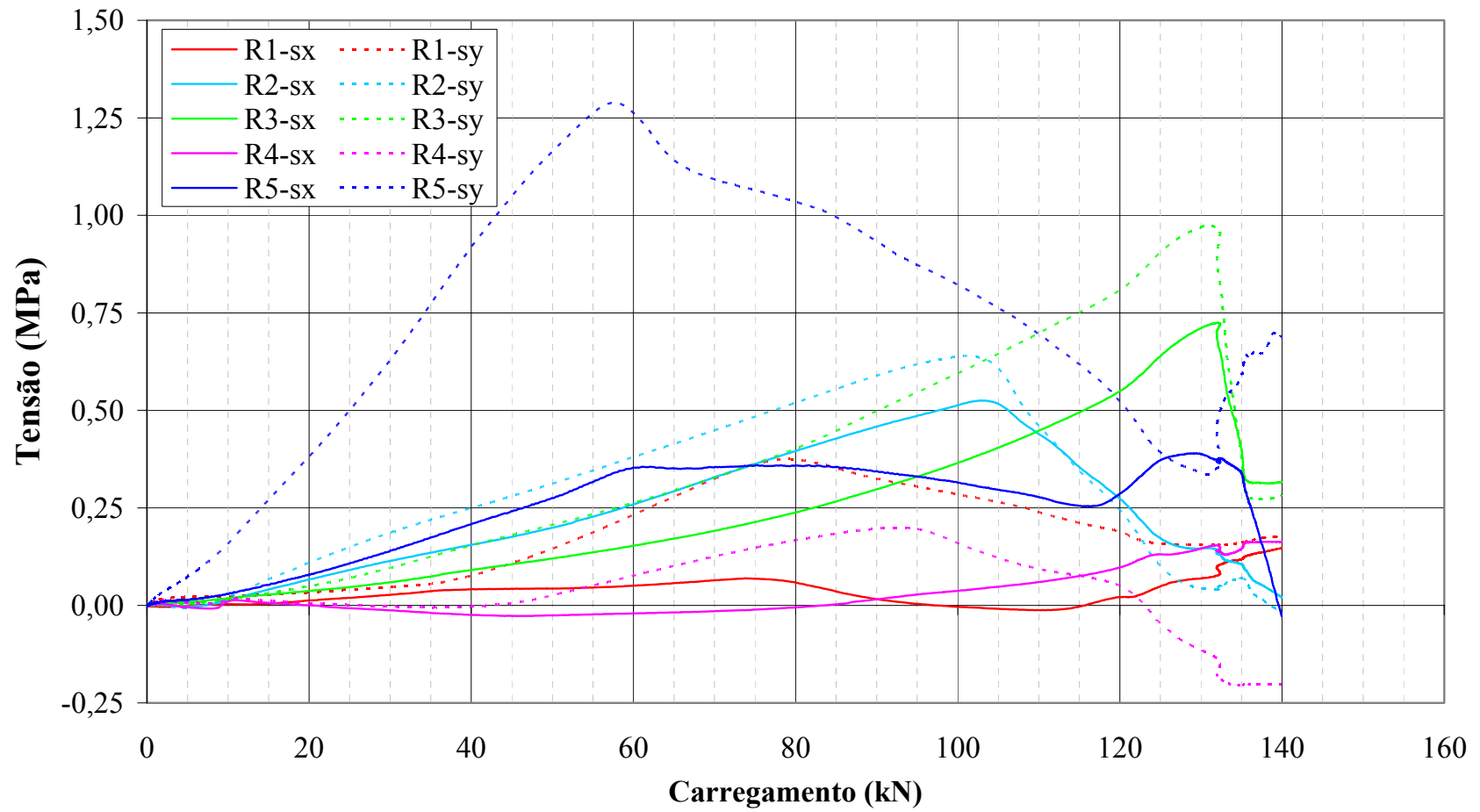


GRÁFICO 22 – Análise da tensão em cada roseta para o tijolo fabricado com solo Homog. 03 e 0% de resíduos

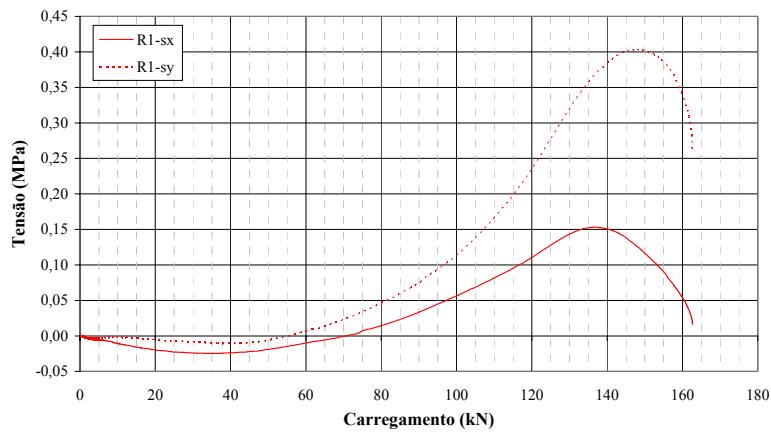


GRÁFICO 23 – Análise da tensão na roseta R1 - tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos

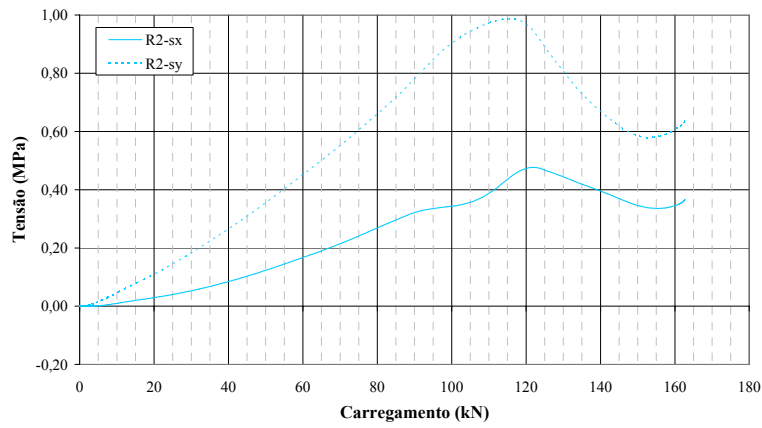


GRÁFICO 24 – Análise da tensão na roseta R2 - tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos

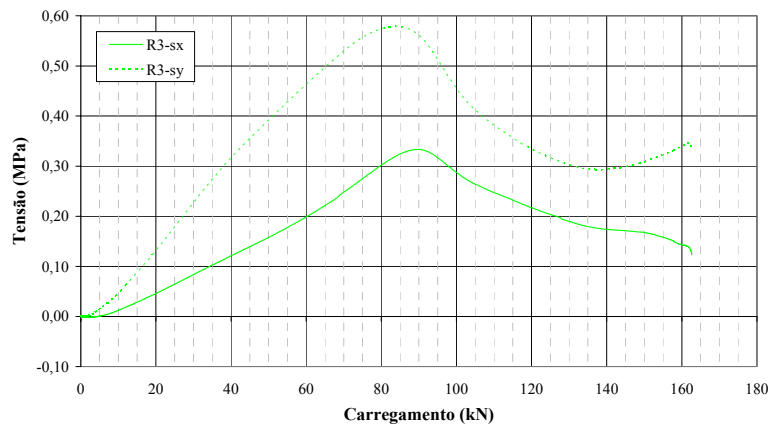


GRÁFICO 25 – Análise da tensão na roseta R3 - tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos

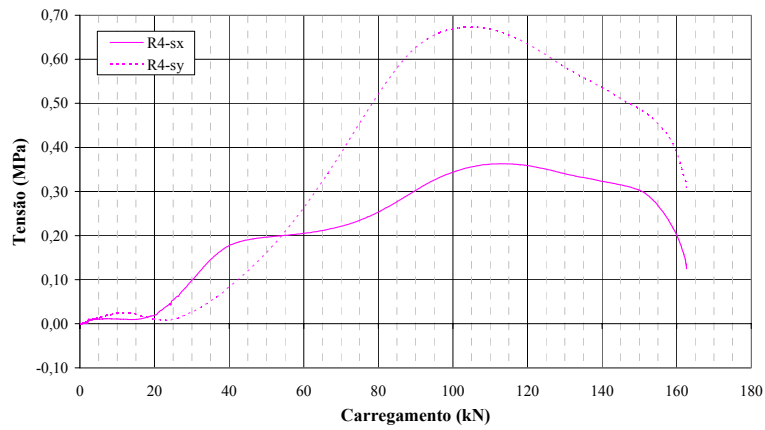


GRÁFICO 26 – Análise da tensão na roseta R4 - tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos

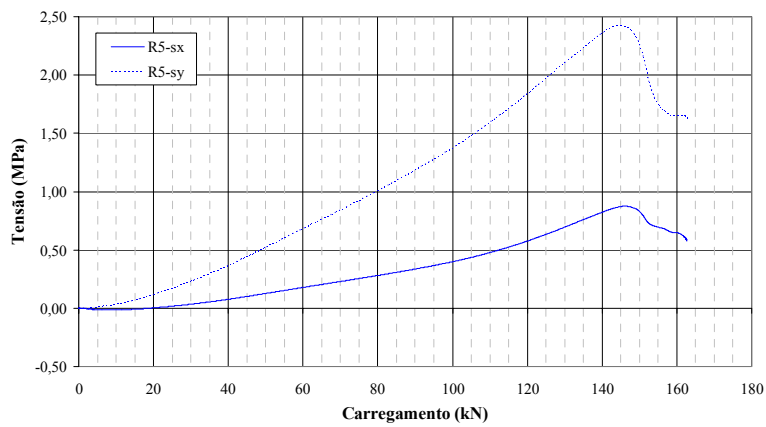


GRÁFICO 27 – Análise da tensão na roseta R5 - tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos

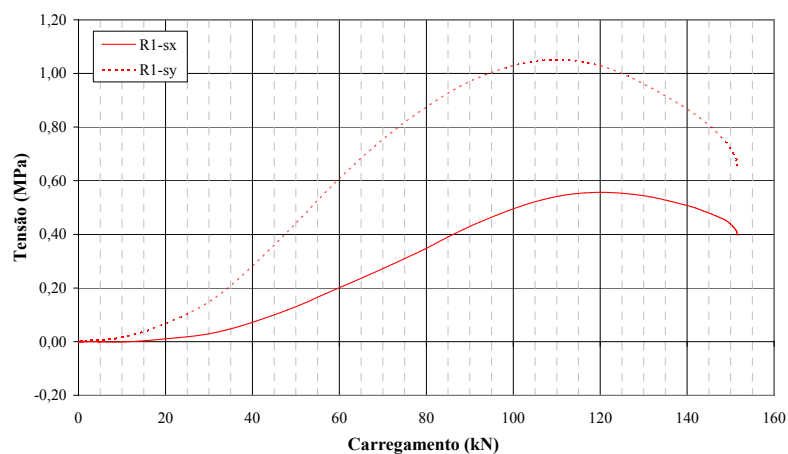


GRÁFICO 28 – Análise da tensão na roseta R1 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos

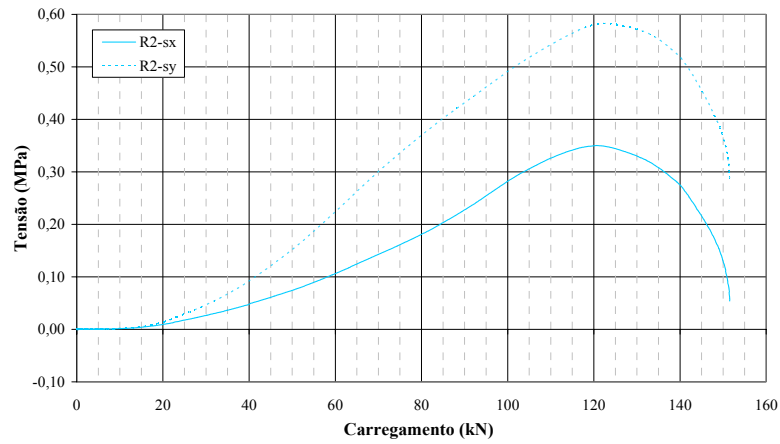


GRÁFICO 29 – Análise da tensão na roseta R2 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos

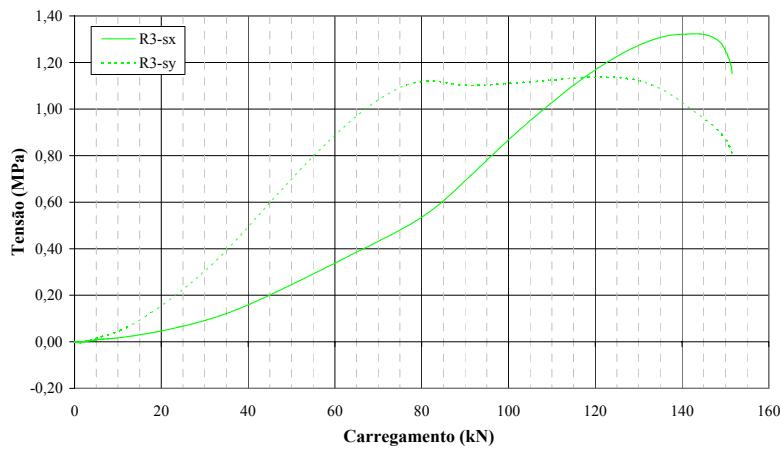


GRÁFICO 30 – Análise da tensão na roseta R3 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos

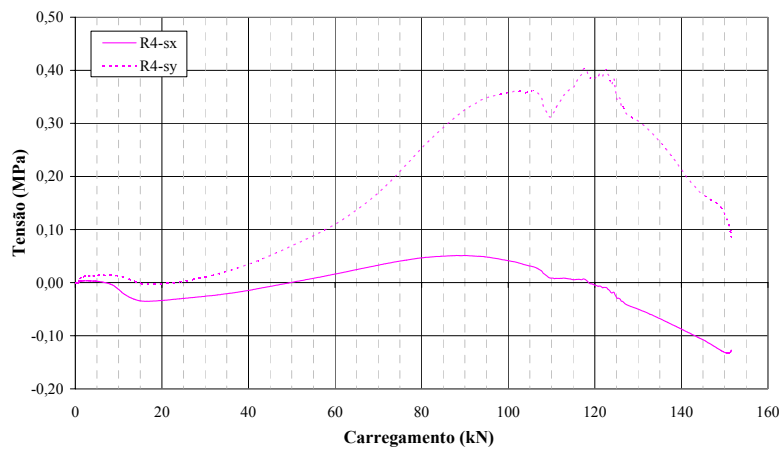


GRÁFICO 31 – Análise da tensão na roseta R4 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos

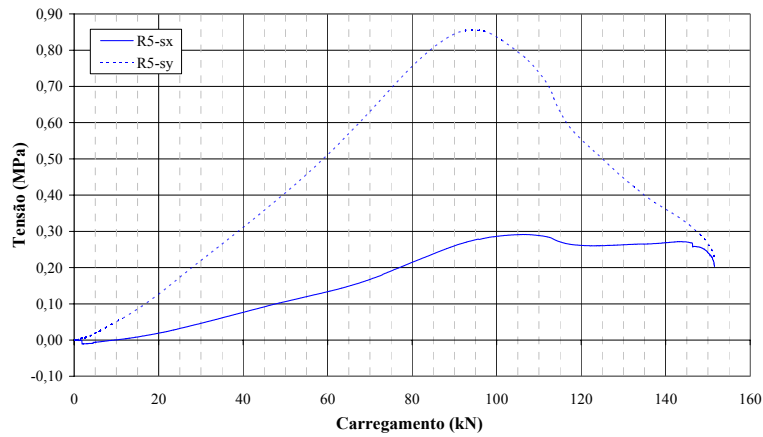


GRÁFICO 32 – Análise da tensão na roseta R5 - tijolo com solo Homog. 01 e 0,5 % de resíduos

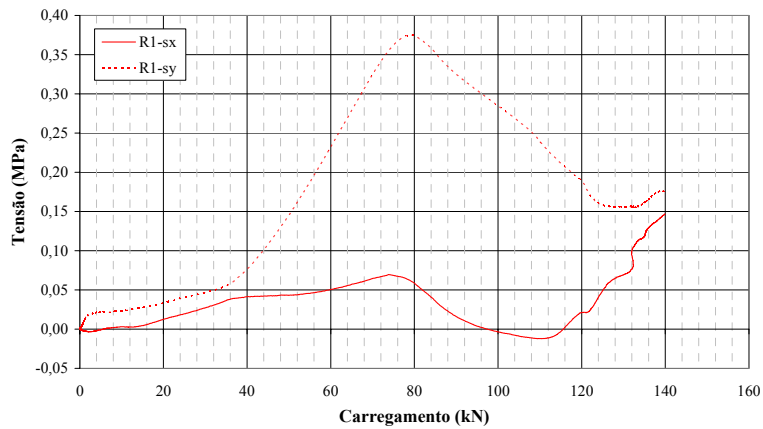


GRÁFICO 33 – Análise da tensão na roseta R1 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos

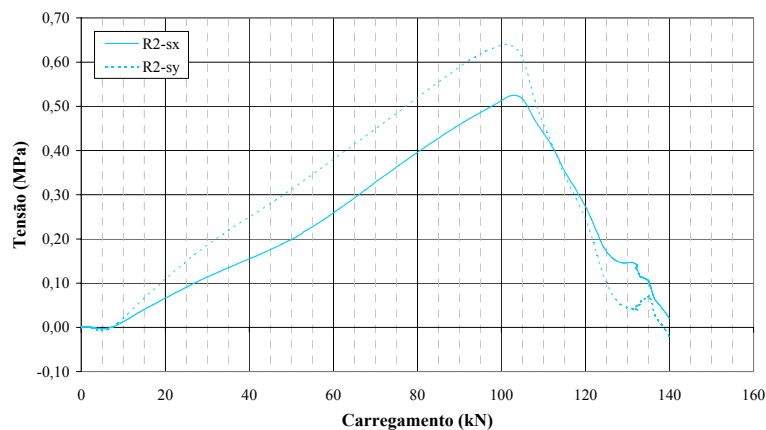


GRÁFICO 34 – Análise da tensão na roseta R2 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos

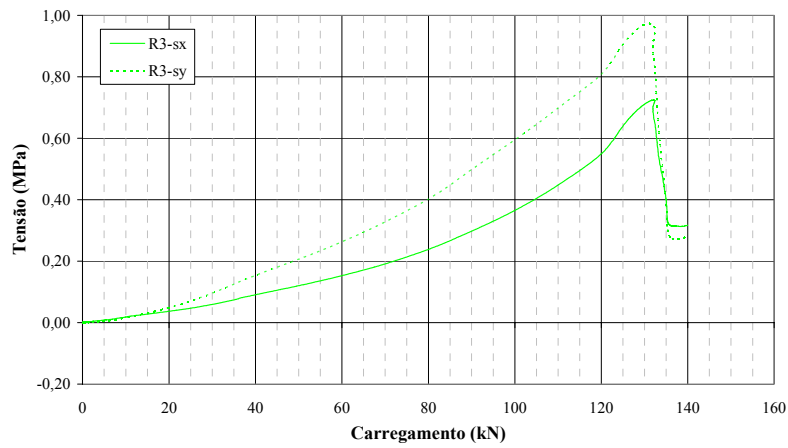


GRÁFICO 35 – Análise da tensão na roseta R3 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos

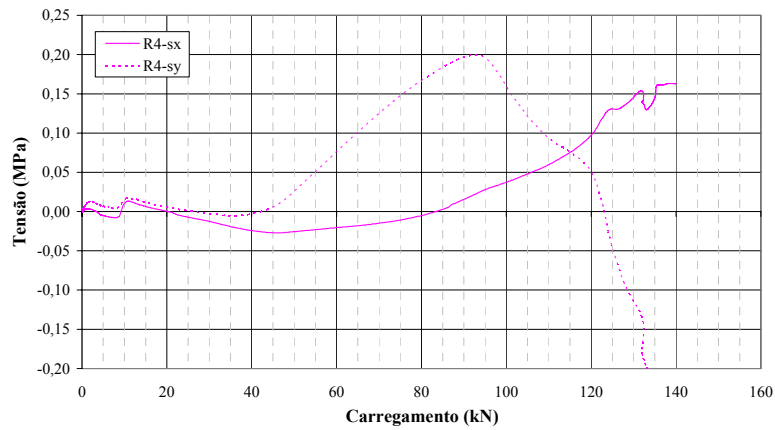


GRÁFICO 36 – Análise da tensão na roseta R4 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos

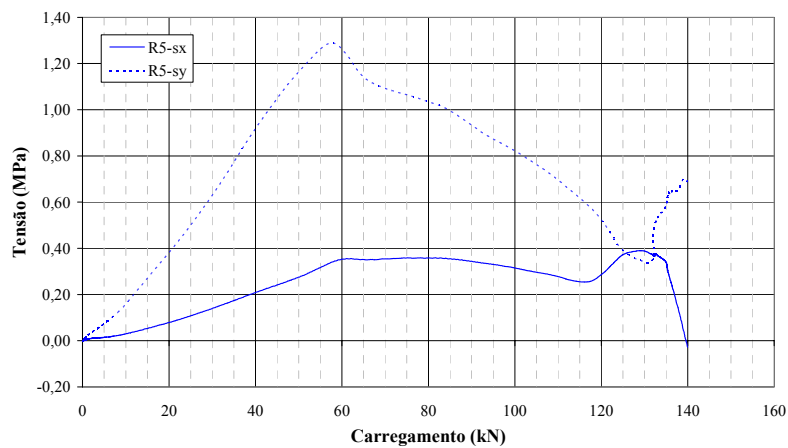


GRÁFICO 37 – Análise da tensão na roseta R5 - tijolo com solo Homog. 03 e 0 % de resíduos

Analisando-se as curvas expressa nos gráficos, determinou-se o caminho da ruptura. O QUADRO 6 mostra a trajetória da ruptura.

QUADRO 6
Trajetória da ruptura nos tijolos

Seqüência de ruptura	
SC1-0% resíduos	3 ⇒ 4 ⇒ 2 ⇒ 1 ⇒ 5
SC1-0,5% resíduos	5 ⇒ 4 ⇒ 1 ⇒ 2 ⇒ 3
SC3-0% resíduos	5 ⇒ 1 ⇒ 4 ⇒ 2 ⇒ 3

As seqüências mostradas no QUADRO 6 mostram a ocorrência de um comportamento semelhante nos tijolos com solo Homog. 01 e 0,5% de resíduos e com solo Homog. 03 sem resíduos. Ambos apresentam uma ductilidade maior que o tijolo com solo Homog. 01 e 0% de resíduos. O solo Homog. 03, naturalmente mais plástico devido a maior presença de fração argilosa, apresenta inicialmente uma maior ductilidade. Já o solo Homog. 01 com a adição de 0,5% de resíduos aumenta sua ductilidade. Observa-se também que a comparação entre os tijolos mais ou menos dúcteis mostrou que a ruptura começou de forma oposta. Esta trajetória de ruptura fornece indícios de que a ductilidade afeta o caminho da ruptura.

Conhecendo-se a trajetória da ruptura, determinou-se as tensões relacionadas à modificação do mecanismo de ruptura do tijolo. Sabe-se que o estado limite de utilização é caracterizado pela impossibilidade de emprego da estrutura, no todo ou em parte, quanto às condições necessárias de conforto e durabilidade, mesmo que ela não tenha esgotado sua capacidade portante. O aparecimento de deformações excessivas ou uma fissuração prematura ou excessiva, etc. são parâmetros adotados para esta determinação. Desta forma, nos tijolos estudados, a partir das curvas tensão x carregamento, procurou-se o carregamento responsável pelo primeiro indício de alteração do mecanismo de ruptura, mesmo que não aparente, pois existe uma possibilidade que esteja atingindo-se seu limite de utilização. Uma das características dos tijolos estudados é a possibilidade da não execução de reboco, emboço, etc., por isto, qualquer fissura aparente poderia comprometer suas características. A TAB. 13 mostra as tensões de utilização obtidas para os três tijolos, bem como o módulo transversal (G). Conhecendo-se a trajetória da ruptura, o menor carregamento dentre

todos os cinco pontos do tijolo, admitiu-se como sendo este o responsável pelas tensões de utilização. Na TAB. 13, nas rosetas onde a primeira ruptura ocorreu, são destacados os valores limites prováveis de ocorrência da tensão de utilização. Os demais valores mostrados referem-se às tensões atuantes nos pontos indicados pelas rosetas, quando da aplicação do carregamento equivalente a tal tensão.

Os valores de tensões mostrados na TAB. 13 dão indícios de que a tensão de utilização do tijolos estudados varia:

- entre 0,33 MPa e 0,56 MPa quando fabricados com solo Homog. 01 e 0% de resíduos;
- entre 0,28 MPa e 0,86 MPa quando fabricados com solo Homog. 01 e 0,5% de resíduos;
- entre 0,35 MPa e 1,26 MPa quando fabricados com solo Homog. 03 e 0% de resíduos.

Não é possível precisar um valor específico para a tensão de utilização, uma vez que avaliou-se apenas um tijolo de cada tipo.

TABELA 13
Tensões de utilização nos tijolos

Solo homogeneizado 01 + cimento + 0% resíduo									
Roseta 1		Roseta 2		Roseta 3		Roseta 4		Roseta 5	
$v_1 =$	0,23	$v_2 =$	0,23	$v_3 =$	0,21	$v_4 =$	0,27	$v_5 =$	0,16
$G_1 =$	192,87 MPa	$G_2 =$	193,25 MPa	$G_3 =$	196,20 MPa	$G_4 =$	186,67 MPa	$G_5 =$	203,37 MPa
σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_z (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
0,034	0,075	0,322	0,781	0,333	0,561	0,302	0,627	0,337	1,184
Solo homogeneizado 01 + cimento + 0,5% resíduo									
Roseta 1		Roseta 2		Roseta 3		Roseta 4		Roseta 5	
$v_1 =$	0,18	$v_2 =$	0,25	$v_3 =$	0,14	$v_4 =$	0,23	$v_5 =$	0,16
$G_1 =$	109,06 MPa	$G_2 =$	103,51 MPa	$G_3 =$	112,93 MPa	$G_4 =$	104,69 MPa	$G_5 =$	111,21 MPa
σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
0,465	1,005	0,256	0,463	0,784	1,104	0,048	0,349	0,278	0,856
Solo homogeneizado 03 + cimento + 0% resíduo									
Roseta 1		Roseta 2		Roseta 3		Roseta 4		Roseta 5	
$v_1 =$	0,07	$v_2 =$	0,35	$v_3 =$	0,30	$v_4 =$	0,05	$v_5 =$	0,12
$G_1 =$	184,49 MPa	$G_2 =$	146,59 MPa	$G_3 =$	151,83 MPa	$G_4 =$	187,46 MPa	$G_5 =$	175,97 MPa
σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
0,051	0,232	0,259	0,380	0,153	0,264	-0,020	0,076	0,353	1,262

As FIG. 43 a 47 mostram alguns tijolos onde podem ser vistas algumas linhas de ruptura. O conhecimento destas linhas possibilitou a determinação dos pontos onde se situariam as rosetas, e conseqüentemente onde seriam avaliadas as tensões atuantes.



FIGURA 43 – Ruptura do tijolo – face longitudinal

Da FIG. 43 percebe-se linhas de ruptura verticais próximas às extremidades do tijolo. A existência de furos nos tijolos, talvez tenha causado pontos de fragilidade próximos à esta região.



FIGURA 44 – Ruptura do tijolo – região do encaixe fêmea



FIGURA 45 – Ruptura do tijolo – região do encaixe macho

Os encaixes existentes no tijolo mostram rupturas diferenciadas. Nas reentrâncias, os tijolos apresentaram algumas linhas de fissuras horizontais. Já próximo às saliências observou-se uma linha de ruptura inclinada.



FIGURA 46 – Ruptura no tijolo – solo Homog. 03
(a) 0% resíduos (b) % resíduos



FIGURA 47 – Ruptura no tijolo – solo Homog. 01
(a) 0% resíduos (b) 1% resíduos

As FIG. 46 e 47 mostram a melhoria conseguida com a inclusão dos resíduos. Os tijolos confeccionados com solo sem resíduos tendem a apresentar um comportamento frágil. Com a inclusão dos resíduos vegetais, a ruptura tende a ficar mais dúctil. Notar a abertura das trincas existentes nos tijolos sem resíduos e as linhas de fissuras apresentadas nos tijolos com resíduos.

A ruptura nos prismas pode ser vista nas FIGURAS 48 e 49. Nestas figuras pode ser visto a transferência dos esforços de um tijolo para o outro.



FIGURA 48 – Ruptura no prisma



FIGURA 49 – Ruptura no prisma

Observou-se nos prismas que foi mantida a localização das linhas de ruptura. O prolongamento da ruptura de um tijolo para o outro mostra que os mesmos trabalharam conjuntamente, mesmo não havendo nenhuma argamassa entre eles. A transferência dos esforços se deu por contato, o que demonstra a eficiência do encaixe horizontal (na região dos furos).

10

CONCLUSÃO

A avaliação das curvas granulométrica utilizadas nos trabalhos referentes à compósitos formados por solo, ligantes (cimento) e resíduos de madeira (e fibras em geral) possibilitou a determinação de uma faixa granulométrica teórica. Acredita-se que esta faixa contemple a maioria dos solos existentes com características satisfatórias para a confecção de tijolos de solo-cimento. A escolha dos solos com características referentes aos limites superior e inferior da faixa, permitiu o estudo e determinação das características físicas e mecânicas deles. O conhecimento destas características limites possibilita uma estimativa de resultados para outros solos contidos nesta faixa.

A maioria dos construtores de solo-cimento existentes no mercado desconhece a importância da análise das características do solo empregado na resistência dos tijolos e prismas. Sendo assim, a determinação e o estudo das características do solo proporcionaram a otimização e melhoria da resistência uma vez que foram consideradas as vantagens naturais de cada tipo de solo melhorando-as com o acréscimo de cimento. O conhecimento das características e parâmetros do solo possibilita sua utilização racional.

Através do estudo da relação entre a pressão de moldagem proporcionada pelas prensas convencionais de tijolos e a pressão correspondente à compactação Proctor Normal, verificou-se que na maioria das vezes não são atendidos os parâmetros de compactação. O ensaio de compactação no solo e no solo-cimento fornece parâmetros necessários para a dosagem e resistência otimizadas. A utilização de pressões inferiores à correspondente à energia Proctor Normal reduzirá a capacidade mecânica do tijolo, dificultando seu transporte e manuseio. Em oposição, verificou-se também que é

possível conseguir melhorias na resistência e na consistência do material ao se aplicar pressões maiores. Confirmou-se, portanto que a pressão, em conjunto com a densidade, são variáveis de grande importância para a otimização da resistência.

Mediante o estudo de corpos-de-prova, tijolos e prismas, foi possível a determinação da resistência das misturas solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira empregada nas formas acima, relacionando-as. Os valores da resistência à compressão nos tijolos mostraram-se maiores que os dos corpos-de-prova e prismas, independente do tipo de solo e da presença ou não de resíduos. A determinação da resistência foi importante também na avaliação das variáveis que influenciam na mesma.

Do estudo da resistência em corpos-de-prova, tijolos e prismas, verificou-se que as configurações diferenciadas das peças estabelecem relações mostradas pelas equações:

Solo Homog. 01 (mais arenoso)	Solo Homog. 03 (mais argiloso)
$f_{t,D} = 0,17 \times f_{c,CP} - 0,05$	$f_{t,D} = 0,04 \times f_{c,CP} + 0,10$
$f_{c,Tijolo} = 0,66 \times f_{c,CP} + 1,86$	$f_{c,Tijolo} = 0,58 \times f_{c,CP} + 1,00$
$f_{c,Prisma} = 0,44 \times f_{c,CP} + 1,00$	$f_{c,Prisma} = 0,44 \times f_{c,CP} + 0,46$
$f_{c,Prisma} = 0,69 \times f_{c,Tijolo} - 0,31$	$f_{c,Prisma} = 0,58 \times f_{c,Tijolo} + 0,01$

As equações determinadas pelo solo Homog. 03 apresentaram correlações não satisfatórias, não sendo portanto significativas. A validade das equações obtidas pela avaliação do solo Homog. 01 pode ser confirmada pelo valor das correlações obtidas ($R^2 = 0,70$ a $R^2 = 0,99$). Estes valores são considerados satisfatórios devido às características anisotrópicas apresentadas pelo material utilizado. Notar ainda que a relação entre tração e compressão que no concreto convencional é de 1/10, nas misturas estudadas foi de 1/6 no solo Homog. 01 (mais arenoso) e apesar da correlação não confiável de 1/25 no solo Homog. 03 (mais argiloso).

O estudo da inclusão dos resíduos de madeira no compósito mostrou que estes resíduos influenciam na resistência de peças confeccionadas com a mistura solo-cimento-

resíduos. Para solos mais granulares ou arenosos, ocorre o aumento da resistência até um certo teor de resíduos, reduzindo posteriormente, confirmando informações fornecidas pela bibliografia. Para solos mais finos, no entanto, ocorre a redução da resistência. Além disto, observou-se o aumento da ductilidade do compósito que sem resíduos apresentou um comportamento mais frágil e com a inclusão dos mesmos tornou-se um pouco mais dúctil. A inclusão de resíduos, ainda que não proporcione um grande aumento na resistência é aconselhável por melhorar o comportamento do compósito.

O estudo das relações constitutivas do material proporcionou a avaliação qualitativa do aumento da ductilidade do compósito com a inclusão dos resíduos. A fragilidade dos solos estudados quando somente foi adicionado o cimento mostrou-se muito maior que nos compósitos solo-cimento-resíduos. Observou-se que o aumento na ductilidade foi crescente com o aumento do teor de resíduos na mistura solo-cimento. Deste estudo ainda foi possível a determinação do Módulo de Elasticidade do compósito formado com os diferentes teores de resíduos.

A geometria do tijolo propiciou a determinação de valores distintos de tensão, Módulo de Elasticidade e coeficiente de Poisson em cada ponto coincidente com as rosetas. Da avaliação experimental de tensões obteve-se resultados que possibilitaram a determinação de algumas propriedades mecânicas do material tais como o módulo de elasticidade, variando entre 33,46 MPa para o solo Homog. 01 com 3% de resíduo até 473,50 MPa para o solo Homog. 01 sem resíduos e o coeficiente de Poisson variando de 0,05 a 0,35. Observou-se um decréscimo no módulo de elasticidade com a inclusão dos resíduos.

A relação entre módulo de elasticidade, resistência à compressão e resíduos mostrou que somente é válida quando determinada a partir de corpos-de-prova. Para estes casos obteve-se uma boa correlação ($R^2=0,70$ para E e $R^2 = 0,81$ para f_c).

A determinação do caminho da ruptura mostrou comportamentos semelhantes para os tijolos que apresentaram uma maior ductilidade (plasticidade natural do solo Homog. 03

– mais argiloso - ou aumento da ductilidade conseguida pela inclusão dos resíduos vegetais no solo Homog. 01 – mais arenoso). O tijolo menos dúctil (solo Homog. 01 sem resíduos) apresentou um caminho de ruptura inverso. Conhecendo-se o momento do início da ruptura foi possível a determinação de um limite provável da tensão de utilização (possivelmente primeiro indício de alteração de comportamento do tijolo e também 1º ponto de ruptura). Os ensaios realizados apenas dão indícios de sua ocorrência, pois só foi avaliado experimentalmente um tijolo de cada tipo.

A avaliação não-destrutiva dos materiais através das ondas ultra-sônicas possibilitou a análise da anisotropia e da eficiência da compactação dos corpos-de-prova, tijolos e prismas. Permitiu também estabelecer uma relação entre a resistência e variáveis como a porcentagem de resíduo adicionada e a densidade aparente seca sem a destruição do espécime ensaiado.

Em uma análise global é possível afirmar que o tijolo de solo-cimento-resíduos de madeira mostra-se promissor concorrente aos tijolos convencionais, necessitando apenas mais alguns estudos sugeridos com trabalhos futuros:

- estudo da absorção d' água nos tijolos
- avaliação dimensional dos tijolos quanto a inclusão dos resíduos.
- análise numérica das tensões atuantes nos tijolos;
- realização de uma análise comparativa com os tijolos convencionais;
- estudo do desempenho estrutural, térmico e acústico de paredes construídas com este tijolo.

REFERÊNCIAS

ABRIL, Enciclopédia Brasileira Almanaque. CD-ROM, 2005. Ed. Abril, Brasil.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. EPUSP, São Paulo, 1991. 204 p. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, *apud* JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras vegetais**. Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. EPUSP, São Paulo. 2 de julho de 1993. p. 27-38.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. EPUSP, São Paulo, 1991. 204 p. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, *apud* SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. **Fibras naturais para produção de componentes construtivos**. Curso Internacional Materiales Compuestos Fibrorreforzados. Cali, Colombia, Universidad del Valle/Cyted Proyecto VIII. 5, 1998.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Durability evaluation of vegetable fibre reinforced materials**. Building Res. Inf., v. 20, nº 4, 1992. p. 223-235, *apud* JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras vegetais**. Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. EPUSP, São Paulo. 2 de julho de 1993. p. 27-38.

AGOPYAN, V. **O emprego de materiais fibrosos na construção civil**. Anais do Simpósio Internacional sobre materiais reforçados com fibras para a construção civil, EPUSP, São Paulo. 1993. p.11-25.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)**. D 2487-93, Annual Book of ASTM Standards, v. 04.08. Philadelphia, PA, 1993. 11p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard test method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil**. D 2166-91, Annual Book of ASTM Standards, v. 04.08. Philadelphia, PA, 1991. 5p.

ASSIS, João Batista Santos de. **Avaliação experimental do comportamento estrutural de paredes não armadas, submetidas à compressão axial, construídas com Tijolito**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de UFMG. 2001. Belo Horizonte, M. G. p. 209.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Solo-cimento na habitação popular**. 1985, São Paulo. 14p. ilus. 30cm.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Método de ensaio. São Paulo, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Método de ensaio. São Paulo, 1984. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** Método de ensaio. São Paulo, 1984. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Método de ensaio. São Paulo, 1984. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Método de ensaio. São Paulo, 1984. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, RJ, 1996. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento.** Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8492: Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10833: Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica.** Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 1989. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10834: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural.** Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10835: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Forma e dimensões.** Padronização. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10836: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11798: Materiais para sub-base ou base de solo-cimento.** Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 1990. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12023: Solo-cimento – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, RJ, 1990. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12024: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, RJ, 1990. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, RJ, 1990. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento.** Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 1992. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12254: Execução de sub-base ou base de solo-cimento.** Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 1990. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12770: Solo Coesivo – Determinação da Resistência à compressão não Confinada.** São Paulo, 1984. 4p.

BARBOSA, Normando; MATTONE, Roberto. **Construção com terra crua.** Anais do I Seminário Ibero Americano de Construção com terra. 16 a 18 de setembro 2002. Salvador, BA. Brasil.

BARBOSA, Normando Perazzo *et al.* **Uma experiência de transferência de tecnologia de construção de casas com tijolos prensados de terra crua em uma favela paraibana.** Disponível em: <<http://www.prac.ufpb.br/rev2.html>>. Acesso em: 06/05/03.

BARBOSA, Normando Perazzo. **Transferência de tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua para uma comunidade muito pobre.** Departamento de tecnologia da construção civil. Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <<http://www.obelix.polito.it/edizpoli/terra/testi.htm>>. Acesso em 23/07/2003.

BENSON, C. H.; KHIRE, M. V. **Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene**. Journal of the Geotechnical Engineering, New York, 1994, v. 120, n. 5, p. 838-855, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo Cesar; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

BERALDO, A. L. **Compósitos Biomassa Vegetal-Cimento**. In Toledo Fº, R.D.; Nascimento, J. W. B.; Ghavami, K. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande, UFPB / SBEA, 1997, *apud* BERALDO, A. L., PIMENTEL, L. L. **Efeito de tratamentos físico-químicos sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de pinus (*P. caribaea* var *hondurensis*) e cimento XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola 1999**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por mantilla@dees.ufmg.br em 20 de maio de 2003.

BERALDO, A. L. **Compósitos Biomassa Vegetal-Cimento**. In Toledo Fº, R.D.; Nascimento, J. W. B.; Ghavami, K. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande, UFPB / SBEA, 1997, *apud* BERALDO, A. L. **Efeito da cura e da dosagem em cimento sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de *Pinus caribaea* e cimento Portland**. Professor Doutor, Dep. De Construções Rurais, Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp. CP 6011, CEP 13083-970, Campinas, SP. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por mantilla@dees.ufmg.br em 20 de maio de 2003.

BERALDO, A. L., PIMENTEL, L. L. **Efeito de tratamentos físico-químicos sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de pinus (*P. caribaea* var *hondurensis*) e cimento XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola 1999**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por mantilla@dees.ufmg.br em 20 de maio de 2003.

BERALDO, Antônio Ludovico, CARVALHO, J.V. **Efeito de variáveis nas características de compósito Eucalipto-cimento**. XXX CONBEA – XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2000. Imperial Othon Palace, Fortaleza, Ceará. 4 a 7 de julho de 2000.

BERALDO, Antonio Ludovico; CARVALHO, José Vitório. ***Eucalyptus grandis* wood –Portland cement particleboard**. Agribuilding 2001. 3-6 september 2001. Campinas, SP, Brazil.

BERALDO, A. L. *et al.* **Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland**. VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia. Julho de 2002.

BERALDO, A. L. **Efeito da cura e da dosagem em cimento sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de *Pinus caribaea* e cimento Portland**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por mantilla@dees.ufmg.br em 20 de maio de 2003.

BIBLIS, E. J.; LO, L. **Sugar and others wood extractives: Effects on the setting of southern-pine cement mixtures.** Forest Products Journal, 18 (8), p. 28-34, 1968, *apud* BERALDO, Antônio Ludovico, CARVALHO, J.V. **Efeito de variáveis nas características de compósito Eucalipto-cimento.** XXX CONBEA – XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2000. Imperial Othon Palace, Fortaleza. Ceará, 4 a 7 de julho de 2000.

BRITO, E. O. **Estimativa da Produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira.** Revista da Madeira, v. 4, n. 26, 1995. p. 34-39.

CARVALHO, J.V., BERALDO, A. L. **Efeito de variáveis nas características de compósito Eucalipto-cimento.** Anais do XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Fortaleza, 2000. SBEA, UFCE. CD-ROM *apud* BERALDO, A. L. *et al.* **Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland.** VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia. Julho de 2002.

CARVALHO, J.V., BERALDO, A. L. **Efeito de variáveis nas características de compósito Eucalipto-cimento.** Anais do XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Fortaleza, 2000. SBEA, UFCE. CD-ROM *apud* BERALDO, Antonio Ludovico; CARVALHO, José Vitório. ***Eucalyptus grandis* wood –Portland cement particleboard.** Agribuilding 2001. 3-6 september 2001. Campinas, SP, Brazil.

CAZALLA, O.; SEBASTIÁN, E.; CULTRONE, G.; NECHAR, M.; BAGUR, M. G. **Three-way ANOVA interaction analysis and ultrasonic testing to evaluate air lime mortars used in cultural heritage conservation projects.** Cement and Concret Research, v. 29, p. 1749-1752, 1999.

CEBRACE - Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares. **Solo-cimento na construção de escolas – SC01.** 2ª ed. Rio de Janeiro, MEC/CEBRACE, 1981. 39p. il. (sistemas construtivos 2).

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. **Cartilha para construção de paredes monolíticas em solo cimento.** Bahia. 4ª edição revisada e ampliada. Rio de Janeiro, BNH / DEPEA, 1985. 39 p. ilus.

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. **Manual de construção com solo cimento – MT-5.** Thaba, Camaçari, Bahia. 1999. Convênio CEPED / BNH / URBIS / CONDER / PMC / OEA / CEBRACE. 114 p. il. 4ª edição.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira, CASANOVA, Francisco José. **Um método físico químico para dosagem de solo-cimento.** In Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em geotecnia, 1988, RJ. Anais ... RJ: COPPE; ABMS; ABGE, 2V.1, p.191-200, 1988.

CONSOLI, N. C.; PRIETO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. **Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil.** Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, v. 124, n. 12, p. 1211-1214, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo Cesar; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

DINWOODIE, J. M. **Wood-cement particleboard.** Building Research Establishment. Abstract, 1978, *apud* LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto.** Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.

FERNANDES, Dalila C. M.; MACHADO, Carlos C.; LIMA, Dario C.; JUCKSCH, I.; PEREIRA, Reginaldo S. **Emprego de misturas solo-alcatrão de madeira de eucalipto em estradas florestais.** CERNE, v.8, n.1, p. 042-048, 2002.

FERREIRA, Regis de Castro; FREIRE, Wesley Jorge. **Propriedades físico-mecânicas de solos estabilizados com cimento e silicato de sódio avaliadas através de testes destrutivos e não-destrutivos.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 221-232, maio/ago 2003.

FERREIRA, Regis de Castro; FREIRE, Wesley Jorge. **Eficiência da estabilização do solo e qualidade de tijolos prensados de terra crua tratada com aditivos químicos, avaliadas pela combinação de testes destrutivos e não-destrutivos.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 1-15, maio/ago 2004.

FILHO, R. D. T.; BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. **Application of sisal and coconut fibres in adobe blocks.** Vegetable Plants and their fibres as building materials. Proceeding of the Second International Symposium sponsored by RILEM – Proceedings 7. Salvador, BA, Brazil. Set., 1990. p. 139-149.

FISCHER *et al.* **The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wool boards.** Holztechnologie, 15 (1), p. 12-19, 1974, *apud* BERALDO, Antônio Ludovico, CARVALHO, J.V. **Efeito de variáveis nas características de compósito Eucalipto-cimento.** XXX CONBEA – XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2000. Imperial Othon Palace, Fortaleza. Ceará, 4 a 7 de julho de 2000.

FONSECA, F.O. *et al.* **Compósito cimento-madeira com resíduos provenientes da indústria madeireira da região amazônica.** VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia. Julho de 2002.

GOMES, José Wilson. **Tijolos de solo-cimento – solução para o problema habitacional de países em desenvolvimento.** Adendo complementar ao trabalho, 1980.

GRAY, D.; OHASHI, H. **Mechanics of fiber reinforced in sand.** Journal of the Geotechnical Engineering, New York, 1983, v. 109, n. 3, p. 335-353, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

GRAY, D. H.; AL-REFEAI, T. **Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand.** Journal of the Geotechnical Engineering, New York, 1986, v. 112, n. 8, p. 804-820, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

GRAY, D. H.; AL-REFEAI, T. **Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand.** Journal of the Geotechnical Engineering, New York, 1986, v. 112, n. 8, p. 804-820 *apud* SPECHT, L. P. *et al.* **Comportamento de misturas Solo-Cimento-Fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos.** Revista Solos e Rochas, São Paulo, 25(1) 15-34, Janeiro-Abril, 2002.

GRAY, D. H.; MAHER, M. G. **Admixture stabilization of sands with random fibers.** 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 1989, v. 2, p. 1363-1366, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo Cesar; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

HACHMI, M.; CAMPBELL, A. G. **Wood-cement chemical relationships.** In Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials. Session II: Raw Material Considerations. USA. Vol. I, 1989. p. 43-47, *apud* LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto.** Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.

HACHMI, M. MOLESMI, A. A. **Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives.** Forest Products Journal, 39(6), p.55-58, 1989, *apud* BERALDO, Antonio Ludovico; CARVALHO, José Vitório. ***Eucalyptus grandis* wood –Portland cement particleboard.** Agribuilding 2001. 3-6 september 2001. Campinas, SP, Brazil.

HANNANT, L. **Fibre-reinforced cements and concretes.** Construction Materials; their nature and behavior. 2ª ed., London, J. M. Illston/E & FN Spon, p.359-403, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

HOLDERNESS, S. **Marketing and opportunities for cement-bonded particleboard: Lesson from Great Britain in North América.** In Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, vol. 2, 1990, p. 129-132, *apud* BERALDO, Antônio Ludovico, PIMENTEL, Lia Lorena. **Efeito de tratamentos físico-químicos sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de pinus (*P. caribaea* var *hondurensis*) e cimento** XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola 1999. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por mantilla@dees.ufmg.br em 20 de maio de 2003.

HOUAISS, INSTITUTO ANTÔNIO. **Dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa.** Versão 1.0, dezembro, 2001. Editora Objetiva Ltda.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras vegetais.** Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. EPUSP, São Paulo. 2 de julho de 1993. p. 27-38.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucaliptus spp.* Na produção de painéis de cimento-madeira.** Curitiba, 2000. Tese (Doutorado em ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná. 191 p., *apud* LATORRACA, João Vicente; SILVA, G.C. **Compósitos Cimento-Cadeia de Eucalipto.** II Seminário de produtos sólidos de madeira de Eucalipto – SIF – 2003.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto.** Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.

LATORRACA, João Vicente; SILVA, G.C. **Compósitos Cimento-Cadeia de Eucalipto.** II Seminário de produtos sólidos de madeira de Eucalipto – SIF – 2003.

LOPES, Wilza Gomes Reis. **A taipa de mão no Brasil.** I SIACOT – I Seminário Ibero-Americano de construção com terra, Anais. 16-18 setembro de 2002. Salvador, Ba, Brasil.

MACHADO, Carlos Cardoso; LIMA, Dario Cardoso de; ALMEIDA, Roberto Mauro. **Estudo do comportamento da mistura solo-cimento reforçado com fibra sintética para uso em Estradas florestais.** Cerne, V.4, N.1, p.123-128, 1998. Disponível em: <<http://www.dcf.ufla.br/cerne/revistav4n1-1998/art08.doc>>. Acesso em 19/03/04.

MAHER, M. H.; HO, Y. C. **Behavior of fiber-reinforced cement sand under static and cyclic loads.** Geotechnical Testing Journal, 1993, v. 16, n. 3, p. 330-338, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; ALHASANI, M. M. **Effect of inclusion properties on the behaviour of sand response of sand**. Géotechnique, 1978, v. 28, n. 3, p. 327-346, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; HYTIRIS, N. MERCER, F. B. **Soil strengthening using randomly distributed mesh elements**. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, São Francisco, 1988, v. 3, p. 1735-1738, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo Cesar; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

MINKE, G. **Earth Construction Handbook – The building material earth in modern architecture**. Published by: Wit Press Southampton, Boston. 2000. E-mail: witpress@witpress.com. Home page: <http://www.witpress.com>.

MITCHELL, J. K.; KATTI, R. K. **Soil improvement. State-of-the-art report**. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981, A. A. Balkema, v. 4, p. 261-317, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo Cesar; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

MOLESMI, A. A. **Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites**. In: I Seminário Internacional Sobre Produtos Sólidos de Madeira de Alta Tecnologia. I Encontro Sobre Tecnologias Apropriadas de Desdobro, Secagem e Utilização de Madeira de Eucalipto. Belo Horizonte, 1998. p. 144-156, *apud* LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto**. Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.

MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

MORAIS, C. R. S. *et al.* **Utilização de solo-cimento na fabricação de tijolos**. Disponível em: <<http://www.prac.ufpb.br/anais/tecnologia/tijolos.pdf>>. Acesso em 03/10/03.

MOREL, J. C.; GOURC, J. P. **Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements**. Geosynthetics International, Minnesota, 1997, v. 4, n. 5, p. 481-508, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

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

OLIVEIRA, M. J. E. **A influência dos tratamentos simples para as fibras de malva empregadas em reforço de argamassa de cimento Portland**. São Paulo, 1989. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 170p. *apud* SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. **Fibras naturais para produção de componentes construtivos**. Curso Internacional Materiales Compuestos Fibrorreforzados. Cali, Colombia, Universidad del Valle/Cyted Proyecto VIII. 5, 1998.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos**. Seminário sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia, Brasília, 1992, p. 1-20, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo Cesar; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

PIMENTEL, Lia Lorena, BERALDO, Antônio Ludovico. ***Pinus caribaea* Word-Portland cement mortar composite for roofing tile fabrication**. Agribuilding 2001. 3-6 September 2001 – Campinas, SP, Brazil.

PIMIENIA, P. *et al.* **Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois**. Cahiers du CSTB, Paris, 1994, p.12-36, *apud* BERALDO, A. L., PIMENTEL, L. L. **Efeito de tratamentos físico-químicos sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de pinus (*P. caribaea* var *hondurensis*) e cimento** XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola 1999. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por mantilla@dees.ufmg.br em 20 de maio de 2003.

PRIETTO, Pedro Domingos Marques; SCHNAID, Fernando; CONSOLI, Nilo César. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 20, (3): 145-165, Dez., 1997.

RANJAN, G. R.; CHARAN, H. D. **Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil**. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, v. 122, n. 6, p. 419-426, *apud* MONTARDO, Júlio Portella; CONSOLI, Nilo César; PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.

SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. **Transitions zone of hardened cement paste and vegetable fibres. Fibre reinforced cement and concrete.** R. N. Swamy, editor. London, E & FN Spon, 1992 p.1110-1119, *apud* JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras vegetais.** Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. EPUSP, São Paulo. 2 de julho de 1993. p. 27-38.

SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. **Fibras naturais para produção de componentes construtivos.** Curso Internacional Materiales Compuestos Fibrorreforzados. Cali, Colombia, Universidad del Valle/Cyted Proyecto VIII. 5, 1998.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. **Brasilian waste fibers as reinforcement for cement-based composites.** Cement & concret composites – Elsevier, 2000, *apud* FONSECA, F.O. *et al.* **Compósito cimento-madeira com resíduos provenientes da indústria madeireira da região amazônica.** VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia. Julho de 2002.

SEGANTINI, Antônio Anderson da Silva; CARVALHO, David de. **Comportamento de estacas de pequeno diâmetro de solo-cimento.** X COBRAMSEF – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Foz do Iguaçu, nov. 1994 volume 1 p. 103-110.

SEGANTINI, Antônio Anderson da Silva; CARVALHO, David de. **Comportamento ao longo do tempo de estacas moldadas in loco com solo-cimento plástico.** Anais do 4º seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. São Paulo. 17-20 jul 2000-a. p. 93-102.

SEGANTINI, Antônio Anderson da Silva; CARVALHO, David de. **Aplicação de solo-cimento em elementos de fundação. Evolução da Pesquisa em Ilha Solteira-SP.** Anais do 4º seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. São Paulo. 17-20 jul 2000-b. p. 339-348.

SILVA, Ana Paula da; AKASAKI, Jorge Luís. **Influência dos resíduos agroindustriais na produção de tijolo de solo-cal.** XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. 27 a 31 de maio de 2002. Universidade de Brasília. UNB. Brasília, DF. Brasil.

SIMATUPANG *et al.* **Influence of wood species on the setting of cement and gypsum.** In International Conference of Fiber and Particleboard with Inorganic Binder, Spokane, USA, vol. 1, 1988, p.33-42. (1988), *apud* BERALDO, Antônio Ludovico, CARVALHO, J.V. **Efeito de variáveis nas características de compósito Eucalipto-cimento.** XXX CONBEA – XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2000. Imperial Othon Palace, Fortaleza, Ceará, 4 a 7 de julho de 2000.

SIMATUPANG, M. *et al.* **Technologies for rapid production of mineral-bonded wood composite boards**. In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Material. Session I: New Developments in Mineral-Bonded Wood and Fiber Composites. USA. 1991. p. 18-27, *apud* LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto**. Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.

SOUZA, M. R. **Durability of cement-bonded particleboard made conventionally and carbon dioxide injection**. Idaho, 1994. Tese (Doctor of Philosophy) – University of Idaho. 123 p, *apud* LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto**. Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.

SOUZA, Soenia M. T., BARBOSA, Normando P. **Estabilização granulométrica de solos para confecção de tijolos prensados de terra crua**. In ENTAC, 8º, Salvador, 2000. v. 2p. 1043-1050 il.

SPECHT, L. P. *et al.* **Comportamento de misturas Solo-Cimento-Fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 25 (1) 15-34, Janeiro-Abril, 2002.

SUPER OBRA. **Fibrocimento desenvolvido por pesquisadores da USP pode oferecer alternativa ao uso de amianto. Alternativa para o amianto**. Revista eletrônica Super Obra – E-mail da construção nº 174 de 29 de dezembro de 2003 a 04 de janeiro de 2004.

SUPERTOR. **O tijolo de solo cimento**. Catálogo de divulgação tecnológica. SUPERTOR – Máquinas e tecnologia em solo-cimento – Tijolos sem queima. [198-], Brasil.

SWAMY, R. N. Fibre Reinforcement of Cement and Concrete. Materials and Structures, v. 8, n. 45, 1975. p. 235-254, AGOPYAN, V. **O emprego de materiais fibrosos na construção civil**. Anais do Simpósio Internacional sobre materiais reforçados com fibras para a construção civil, EPUSP, São Paulo. 1993. p. 11-25.

TAVEIRA, Eduardo Salmar Nogueira. **O solo-cimento no campo e na cidade. Construir, morar, habitar**. Coleção Brasil Agrícola, Ícone editora. 2ª edição. São Paulo, SP, 1987.

TAYLOR, G. D. **Material in Construction**. London: Longman Scientific e Technical, 1994, 2nd ed, 284 p. , *apud* SPECHT, L. P. *et al.* **Comportamento de misturas Solo-Cimento-Fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 25(1) 15-34, Janeiro-Abril, 2002.

VIEIRA, L. F. *et al.* **Comportamento elasto-plástico de misturas solo-cimento-fibra**. Anais do XII COBRAMSEG - XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. São Paulo, Vol. I. p.241-250, 20 a 24 outubro, 2002.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. **Effect of wood on setting of Portland cement**. Forest Products Journal, 14(2), 1964, p. 567-570, *apud* BERALDO, A. L. **Efeito da cura e da dosagem em cimento sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de *Pinus caribaea* e cimento Portland**. Professor Doutor, Dep. de Construções Rurais, Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp. CP 6011, CEP 13083-970, Campinas, SP. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por mantilla@dees.ufmg.br em 20 de maio de 2003.

<http://www.c3.lanl.gov/~rocha/santafe.html> acesso em 11/05/04.

<http://zonalitoral.com/litoraltur/santafe.htm> acesso em 11/05/04.

http://www.multirio.rj.gov.br/historia/modulo01/vila_piratininga.html acesso em 11/05/04.

APÊNDICE A: ENSAIOS EXPEDITOS

Ap-A1. Introdução

Os ensaios expeditos propostos por Taveira (1987) e pelo CEPED (1999), são apenas de caráter qualitativo, não sendo possível a determinação de valores quantitativos. Porém, para uma avaliação preliminar são bastante úteis, sendo, portanto descritos a seguir.

Ap-A2. Ensaio da caixa

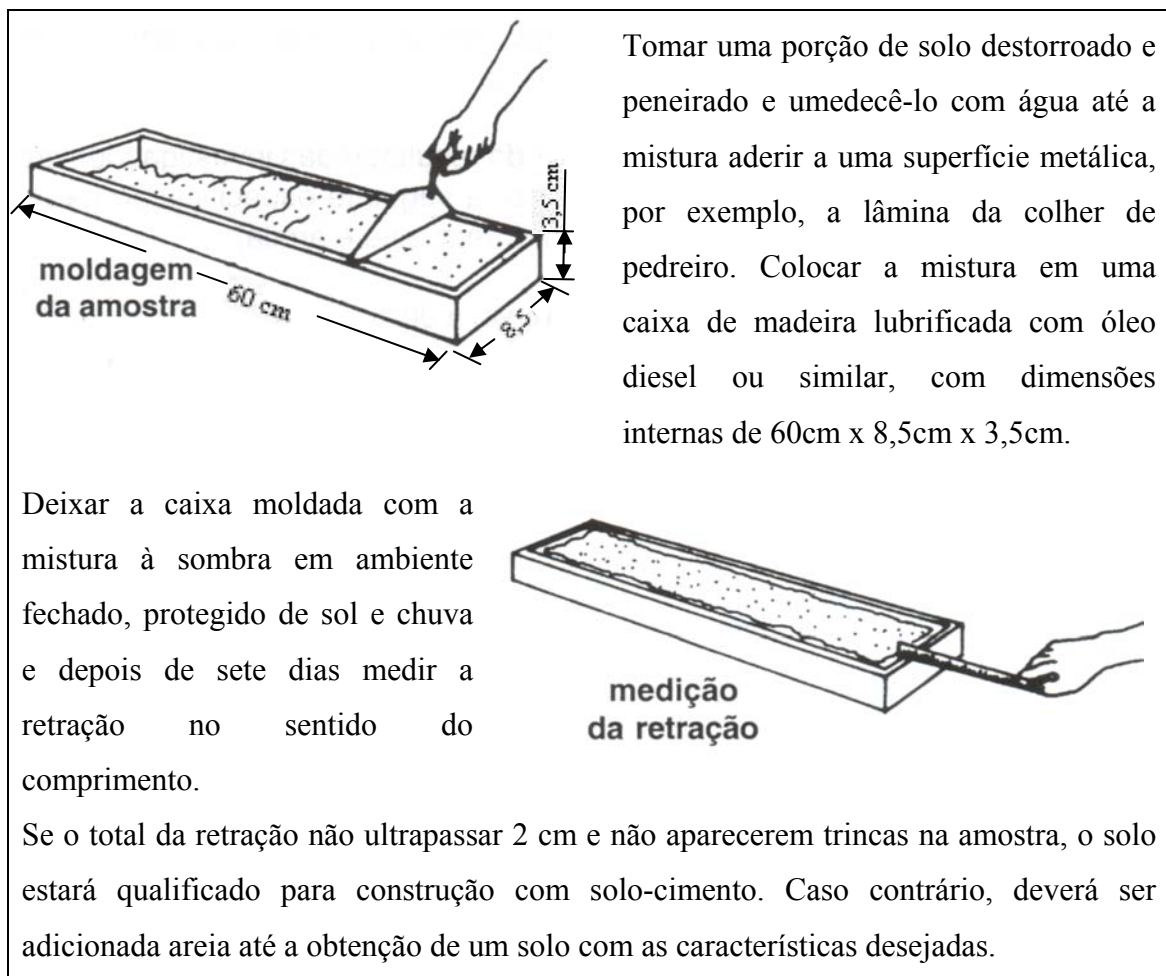



FIGURA Ap-A1 – Ensaio da caixa

Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

Ap-A3. Ensaio da fita



Tomar uma porção de solo, com a mesma umidade do ensaio do cordão, e fazer um cilindro do tamanho de um cigarro. Amassar este cilindro até formar uma fita, com 3 a 6 mm de espessura e com o maior comprimento possível.

- Fita longa: 25 a 30 cm sem dificuldade

- Fita curta: 5 a 10 cm com dificuldade.





FIGURA Ap-A2 – Ensaio da fita
Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

Ap-A4 Ensaio do cordão



Tomar uma porção de solo seco e juntar água rolando cordões até que os mesmos comecem a se quebrar com um diâmetro de 3 mm.

Com os cordões quebrados, formar uma bola mantendo essa umidade. Esmagar a bola entre o polegar e o indicador verificando a força necessária para esmagá-la.

Ensaio do cordão
(rolando cordões)

FIGURA Ap-A3 – Ensaio do cordão
Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

- Cordão duro: só se pode quebrar a bola com muito esforço.
- Cordão mole: a bola se fissa ou esmigalha com pouco esforço.
- Cordão frágil: não é possível reconstituir a bola sem que ela se fissure ou esmigalhe.



FIGURA Ap-A4 – Ensaio do cordão
Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

Ap-A5. Ensaio de resistência seca

Fazer duas ou três pastilhas de solo bem úmido, com cerca de 1 cm de espessura e 2 a 3 cm de diâmetro. Secar estas pastilhas ao sol por dois ou três dias. Após a secagem, tentar esmagar a pastilha entre o indicador e o polegar:



- Grande resistência seca: É muito difícil esmagar a pastilha e quando se consegue esta se quebra como um “biscoito”.
- Média resistência seca: Não é difícil partir a pastilha e com algum esforço consegue-se reduzir os pedaços a pó.
- Fraca resistência seca: É muito fácil partir a pastilha e ao partir-se reduz-se a pó.

FIGURA Ap-A5 – Ensaio de resistência seca
Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

Ap-A6. Ensaio do bolo

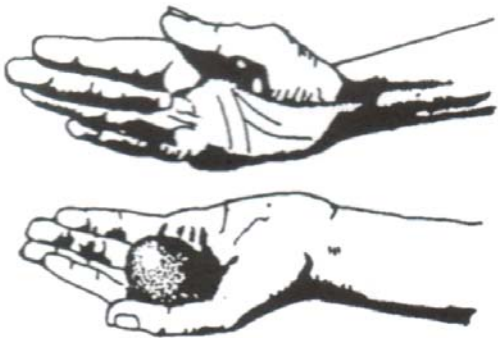

	<p>Tomar uma porção de solo bastante úmida e colocá-la na palma da mão. Golpear esta bola com a outra mão de modo que uma película de água aflore na superfície da amostra, dando-lhe um aspecto liso e brilhante. Pressionar então o bolo com os dedos.</p>
<p>- Reação rápida: Bastam 5 a 10 golpes para que a água aflore à superfície da amostra, sendo que a pressão dos dedos faz a água desaparecer imediatamente e uma pressão mais forte esmigalha o bolo.</p> <p>- Reação lenta: São necessários 20 a 30 golpes para que a água aflore; a pressão dos dedos faz com que o bolo se deforme como uma bola de borracha.</p>	

FIGURA Ap-A6 – Ensaio do bolo
 Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

O QUADRO Ap-A1 mostrado a seguir complementa a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios do cordão, da fita, de resistência seca e do bolo.

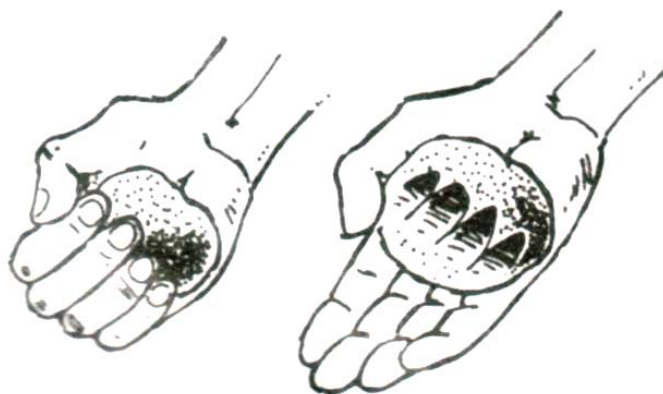
QUADRO Ap-A1
Interpretação dos ensaios expeditos do solo

Ensaio do cordão	Ensaio da fita	Ensaio do bolo	Resistência seca	Tipo do solo	Possibilidade de utilização
Cordão frágil ou resistência nula	Fita curta ou não se consegue fazer a fita	Reação rápida a lenta, mas jamais muito lenta	Fraca a nula, geralmente nula	Areias finas, areias finas siltosas, areias finas argilosas, siltes argilosos	Solo prensado para tijolos, adobes com cimento, terra compactada com ou sem cimento; quando muito arenosos, juntar solos finos, siltes e argilas
Cordão frágil a semi-duro	Fita curta	Reação lenta a muito lenta	Fraca a média	Siltes	Utilização mais difícil que os solos anteriores, mas possível com o uso de cimento
Cordão semi-duro	Fitas curtas a longas	Reação muito lenta ou não tem reação	Média a grande	Argilas com pedregulhos, argilas com areia e argilas siltosas	Possível de usar apenas para a terra compactada ou tijolo prensado, com cimento
Cordão duro	Fitas longas	Não tem reação	Grande	Argilosos	Não deve ser usado

Fonte: modificado de CEPED, 1999.

Ap-A7. Ensaio para determinação da umidade ótima em campo (hand test)

Tomar uma porção de solo umedecido nas mãos, apertando-o entre os dedos de forma que ao abrir a mão, a massa tenha adquirido a sua forma (fique a marca dos dedos).



Se a marca dos dedos ficar bem definida, a umidade é adequada. Caso a marca não ocorra ou se houver esfarelamento, significa que o solo pode estar muito seco e a umidade é insuficiente. Se a marca aparecer muito compacta e molhada – mais do que úmida – então a umidade é excessiva.

FIGURA Ap-A7 – Hand test

Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

Ap-A8. Ensaio para determinação da umidade ótima (teste da bola de solo)



Tomar uma porção de solo umedecido nas mãos prensando-o até fazer uma bola com ele. Em seguida, deixe a bola de massa cair de uma altura de aproximadamente 1,0 m em um chão firme. Ao chocar-se com qualquer superfície dura, o bolo deverá esfarelar indicando assim um teor de umidade adequado.

Caso contrário, se a bola não esfarelar, é sinal de que a umidade é excessiva. Neste caso, há necessidade de secar a amostra ou então acrescentar solo e cimento em suas devidas proporções, repetindo assim o ensaio. A umidade é considerada insuficiente caso não se consiga formar o bolo na mão.

FIGURA Ap-A8 – Determinação da umidade ótima do solo

Fonte: modificado de TAVEIRA, 1987 e CEPED, 1999.

Ap-A9. Ensaio do vidro

Tomar um frasco transparente de boca larga. Colocar a amostra de solo até a metade do vidro. Adicionar duas colheres de chá de sal e completar o vidro com água. Tampar o vidro, agitando-o vigorosamente. Deixá-lo em repouso por aproximadamente meia hora.



SOLO BOM
QUANDO:
ARGILA = AREIA
E
MELHOR AINDA
AREIA > ARGILA

Após esta meia hora ocorrerá a decantação do solo, e observando-se as frações nitidamente diferenciadas no vidro pode-se avaliar o solo. O solo é considerado bom quando a quantidade de argila é igual à quantidade de areia. Caso a quantidade de areia seja maior que a de argila, o solo é melhor ainda. Se ocorrer de o solo possuir mais argila que areia, deve-se proceder uma correção no solo.

FIGURA Ap-A9 – Ensaio do vidro
Fonte: elaborado a partir de TAVEIRA, 1987.

APÊNDICE B: EQUIPAMENTOS E APARELHAGEM PARA A CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Ap-B1. Introdução

Para a classificação e caracterização dos solos estudados foram utilizados os equipamentos e aparelhagem especificados pelas normas. Este capítulo mostra alguns dos equipamentos e aparelhos utilizados, bem como sua utilização no desenvolvimento do trabalho em questão.

Ap-B2. Equipamentos, aparelhagem e utilização

O solo coletado em sua forma natural possuía uma certa umidade, favorecendo assim a existência de torrões. Por isto, para facilitar o manuseio do mesmo, este foi secado ao ar livre e posteriormente destorroado. Inicialmente utilizou-se o almofariz e a mão de gral com ponta de borracha (FIG. Ap-B1), para destorroar os torrões de solo sem quebrar seus grãos. Porém, devido à grande quantidade de solo a ser destorroado, trocou-se o almofariz e a mão de gral por uma bandeja metálica e desempenadeira, pois possibilitava o destorroamento mais rápido de uma maior quantidade de solo.



FIGURA Ap-B1 – Almofariz e mão de gral

O peneiramento do grande volume de solo coletado foi feito utilizando-se um peneirador com peneiras quadradas de 50 cm e temporizador (FIG. Ap-B2). Este peneirador possui as peneiras #200 (0,075 mm), #40 (0,425 mm), #10 (2,0 mm), #4 (4,75 mm).



(a)



(b)

FIGURA Ap-B2 – Peneirador com temporizador
(a) Peneirador (b) Temporizador

A massa dos materiais, quando necessário, foi obtida por balanças de precisão. Para os ensaios de caracterização e para a confecção de corpos-de-prova foi utilizada uma balança, com capacidade máxima de 5000 g e mínima de 0,25 g e com precisão de 0,01/0,1 g. Já para massas maiores, como por exemplo dosagem dos tijolos, utilizou-se uma balança com capacidade de 50 kg e precisão de 0,01 g (FIG. Ap-B3).



(a)



(b)

FIGURA Ap-B3 – Balanças de precisão
(a) capacidade de 5000 g (b) capacidade de 50 kg

Na determinação do teor de umidade, foram utilizadas estufas elétricas do Laboratório de Geotecnia (FIG. Ap-B4), tendo-se o cuidado de monitorar a temperatura das mesmas com termômetros para que esta fosse mantida entre 105°C e 110°C, segundo a recomendação da NBR 6457 (1986).



FIGURA Ap-B4 – Estufas do Laboratório de Geotecnia

Além das estufas, na determinação do teor de umidade foram utilizadas cápsulas metálicas de alumínio com tampa. Espátulas de lâminas flexíveis, conchas metálicas e pissetas plásticas com água destilada foram utilizadas na maioria dos ensaios, juntamente com as cápsulas de porcelana (FIG. Ap-B5).



cápsulas de porcelana

FIGURA Ap-B5 – Materiais de uso comum nos ensaios

A separação das partículas do solo no ensaio de massa específica dos grãos e de sedimentação foi feita utilizando-se um aparelho de dispersão com controle de velocidade, hélice metálica substituível e copo munido de chincanas metálicas (FIG. Ap-B6-a). A eliminação do ar existente no solo dentro do picnômetro com água

destilada no ensaio massa específica dos grãos foi realizada com uma bomba de vácuo com aplicação de vácuo de 88 kPa (66 cm de Hg a 0°C) (FIG. Ap-B6-b).



(a)



(b)

FIGURA Ap-B6 – Dispersor e bomba de vácuo

(a) Dispersor (b) Bomba de vácuo

Para a determinação dos limites de consistência (limites de Atterberg), especificamente os limites de liquidez e de plasticidade, foram utilizados o aparelho de Casagrande, cinzel, penetrômetro, placa de vidro de superfície esmerilhada e gabarito cilíndrico (FIG. Ap-B7).



(a) Placa esmerilhada e gabarito - usados no ensaio de limite de plasticidade



(b) Aparelho de Casagrande elétrico e cinzel - usados no ensaio de limite de liquidez



(c) Penetrômetro - usado no ensaio de limite de liquidez

FIGURA Ap-B7 – Material usado nos ensaios de limites liquidez e de plasticidade

O controle do tempo e da temperatura foram feitos respectivamente através de um cronômetro e um termômetro graduado de -10 a 60° com precisão de 0,5°C. A determinação da densidade da solução no ensaio de sedimentação foi feita através de leituras em um densímetro de bulbo simétrico graduado, calibrado à 20°C (FIG. Ap-B8).

Alguns recipientes de vidro foram utilizados nos ensaios: picnômetros de 500 cm³ calibrados a 20°C, funil, provetas com capacidade de 1000 cm³, béquer de 250 cm³ (FIG. Ap-B9).



FIGURA Ap-B8 – Termômetro, densímetro e cronômetro



FIGURA Ap-B9 – “Vidrarias” usadas nos ensaios

Os instrumentos de ensaio mostrados nas FIG. Ap-B10 e Ap-B11 foram necessários para o ensaio de compactação: bandeja metálica para homogeneização do solo, régua de aço biselada, cilindro metálico pequeno (cilindro de Proctor), soquete pequeno, desempenadeira, extrator de corpo-de-prova.



(a)



(b)

FIGURA Ap-B10 – Instrumentos usados no ensaio de compactação
 (a) bandeja, desempenadeira e régua biselada (b) cilindro de Proctor Normal e soquete pequeno



(a)



(b)

FIGURA Ap-B11 – Extrator de corpos-de-prova
 (a) Extrator (b) Extrator com cilindro de Proctor Normal



FIGURA Ap-B12 – Agitador magnético e conjunto de peneiras

Para a análise granulométrica dos solos estudados, foram utilizados os seguintes aparelhos: peneiras com aberturas de 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8 e 2,0 mm para o peneiramento grosso e de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm para o peneiramento fino, agitador magnético de peneiras (FIG. Ap-B12) e escova com cerdas metálicas para a limpeza das peneiras. Nos diversos ensaios de caracterização, a seleção da amostra utilizada foi feita utilizando algumas destas peneiras.

APÊNDICE C: ANÁLISE DOS SOLOS

Ap-C1. Introdução

Com o objetivo de se conhecer a composição do material Agrofilito, utilizado na composição do solo homogeneizado 02, solicitou-se à empresa fabricante do mesmo que nos encaminhasse tal composição. O laudo fornecido pelo fabricante foi aqui reproduzido. Outro procedimento para a análise dos solos foi a determinação dos minerais existentes no solo proveniente da obra da Faculdade de Farmácia no campus da UFMG. Para isto foi realizada a avaliação por Difração de Raios X. A descrição simplificada deste ensaio bem como seu resultado será apresentado também neste anexo.

Ap-C2. Composição química do Agrofilito

O laudo técnico fornecido pelo fabricante do material referido foi aqui transcrito.

IGARAFILITO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA

LAUDO TÉCNICO

MATERIAL: FILITO CAULÍNICO

SOLICITANTE: IGARAFILITO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA

O presente laudo foi elaborado a partir de uma análise química e do exame petrográfico macroscópico e microscópico de uma amostra de filito da Formação Sabará, topo do Supergrupo Minas.

EXAME MACROSCÓPICO

A amostra é constituída por fragmentos de uma rocha de coloração cinzenta clara com partes mais esbranquiçadas, textura granular muito fina e estrutura orientada com microdobras. O metamorfismo é aparentemente muito brando, no limite anquizona/fácies xisto verde.

EXAME MICROSCÓPICO

A rocha tem textura granular extremamente fina e estrutura mostrando um conspícuo micro bandamento, constituída por quartzo, mica branca, óxido de ferro e material argiloso. A granulometria varia de silte fino a argila, tornando, portanto, muito difícil a identificação mineralógica. O grau de metamorfismo não atinge o fácies xisto verde, como já observado macroscopicamente.

A mica branca é do tipo illita/paragonita, o que é comum no grau de metamorfismo da rocha, o quartzo é extremamente fino e a argila está intimamente associada, não sendo possível separar-se faixas de composição definida. O óxido de ferro é negro, não está oxidado e dissemina-se em grãos muito pequenos por toda a massa rochosa.

Classificação

Filito caulínico; por causa da coloração, este material é também conhecido comercialmente pelo nome de leucofilito.

ANÁLISE QUÍMICA

A análise química foi realizada pela Lakefield Geosol Ltda, o laboratório brasileiro mais conceituado no setor analítico de rochas e minerais. A análise é a seguinte, em percentagem de óxidos:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	P.F.
59,1	19,8	0,57	10,2	0,34	0,57	0,02	0,27	3,6	0,027	4,60

Obs: a mostra \$RXREF1 no boletim de análise é o padrão do laboratório

COMENTÁRIOS

O teor de K₂O somado ao de Na₂O é de 3,87%, indicativo da presença de mica branca do tipo illita ou muscovita. Fazendo um cálculo estequiométrico, este teor corresponde a aproximadamente 31% de mica na rocha; com a quantidade de sódio incorporada, porém significando a presença da molécula paragonítica em muito pequena quantidade, cerca

de 7% do total de mica branca presente. Este teor de mica consome cerca de 6,5% do total de Al_2O_3 na análise, o resto sendo obrigatoriamente consumido pela caulinita, o que corresponde então, aproximadamente 39% deste argilomineral.

O restante do SiO_2 , descontado o consumido para a formação de caulinita e mica, corresponde ao quartzo livre, cerca de 23%.

O teor alto em Fe_2O_3 deve corresponder ao óxido de ferro clástico, já visível em lâmina delgada. Entretanto, parte do ferro pode ser devido às substituições diadóxicas do Al^{3+} nos sítios octaédricos dos dois filossilicatos, o que é fato bem conhecido em cristalquímica.

Infelizmente, as análises químicas de rotina não discriminam o ferro divalente do trivalente, o que é necessário para se saber a quantidade de óxido vermelho e hidróxido presentes na rocha. Contudo, como o filito é de coloração cinzenta, não há contaminação aparente por hidróxidos de ferro de intemperismo. Se houvesse, a rocha teria certamente a coloração rosa ou vermelha, dependendo da quantidade de hidróxido de ferro presente.

Os teores de titânio, manganês e magnésio são também devidos às substituições diadóxicas do Al^{3+} nos sítios octaédricos dos filossilicatos. O titânio pode também significar que existe uma pequena fração clástica de rutilo, anatásio ou ilmenita durante a sedimentação.

De posse destes dados, a rocha pode ser perfeitamente classificada como sendo um **filito caulínico**, material nobre para a indústria cerâmica e de argamassas.

Transcrição do relatório emitido em 07 de outubro de 2002, assinado pelo Engenheiro Geólogo Antônio Wilson Romano, CREA 13680/D – MG, baseado nos dados fornecidos pela empresa Lakefield Geosol Ltda, através do certificado de análises de número LG2143-SEP02, transcrito a seguir.

LAKEFIELD GEOSOL LTDA

- Laboratório de Análises Minerais e Ambientais -
 Rua São Vicente, 250 – Belo Horizonte, MG
 30390-570 – Brasil
 Fone (31) 3288-1122 Fax (31) 3288-1261

quinta-feira, 03 de outubro de 2002

Igarafilito Ind e Comércio Ltda
 Sr. Antonio Wilson Romano

Data rec.: 11 de setembro de 2002
LGL REPORT: LG2143-SEP02
Ref. Cliente: Pedido 11/09/02

CERTIFICADO DE ANÁLISES

Sample ID	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	P.F. %
1: Igarafilito	59.1	19.8	0.57	10.2	0.34	0.57	0.02	0.27	3.6	0.027	4.60
2: \$RXREF1	59.5	8.3	0.30	5.8	0.23	8.6	7.0	0.25	1.4	0.066	---

PF: Calcinação a 1000° C, até peso constante.

Demais elementos por Fluorescência de Raios-X, Fusão com Tetraborato de Lítio.

Amostra com identificação \$: Amostra de referência p/ Controle de Qualidade.

Preparação Física: Secagem a 100° C, britar <2mm, quartear 250 gr, pulverizar a -150#.

Transcrição do relatório de número LG2143-SEP02, emitido em 03 de outubro de 2002, pela empresa Lakefield Geosol Ltda; química responsável: Nádia Lúcia Perdigão, CRQ II 02300822.

Ap-C3. Análise de Difração de Raios X

Para o ensaio de Difração de Raios X, executado no Laboratório de Análise por Raios X, do Departamento de Engenharia de Minas, foram preparadas três amostras com aproximadamente 2 a 3 g de solo da Faculdade de Farmácia passado na peneira # 200. Cada uma destas amostras foi compactada em um “prato” metálico (FIG. Ap-C1-a). Este “prato” foi então colocado no equipamento de Difração de Raios X, do fabricante Philips, modelo PW 3710 (FIG. Ap-C1-b), sendo “bombardeado” com raios sob vários ângulos de incidência durante 20 minutos. Existe um controle no equipamento para que os raios sejam introduzidos de acordo com uma programação pré-estabelecida (FIG. Ap-C2).

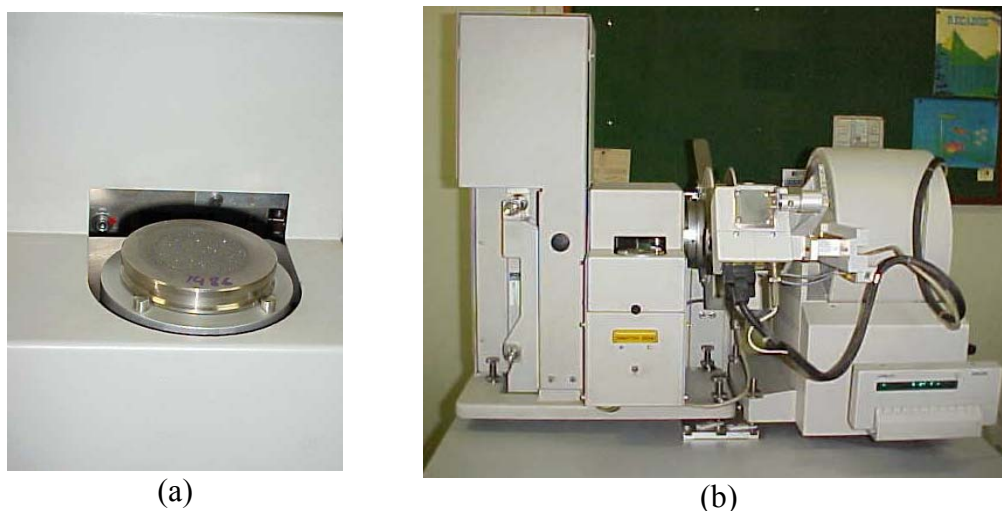


FIGURA Ap-C1 – Compactação do solo no “prato” de ensaio
Laboratório de Análise por Raios X – Escola de Engenharia – UFMG
(a) preparação do solo para o ensaio (b) equipamento de Difração de Raios X

Após o ensaio, a análise dos resultados foi feita através de um gráfico que mostra a intensidade de incidência dos raios como função do número d . A interpretação deste gráfico pode ser feita à luz da lei de Bragg onde tem-se a relação:

$$n\lambda = 2 \times d \times \text{sen}\theta \quad (\text{Ap-C1})$$

Após a comparação dos dados obtidos no ensaio com tabelas de calibração específicas para os diversos tipos de minerais, apresentadas pelo JCPDS - International Centre for Diffraction Data, determinou-se qualitativamente os minerais presentes na amostra.

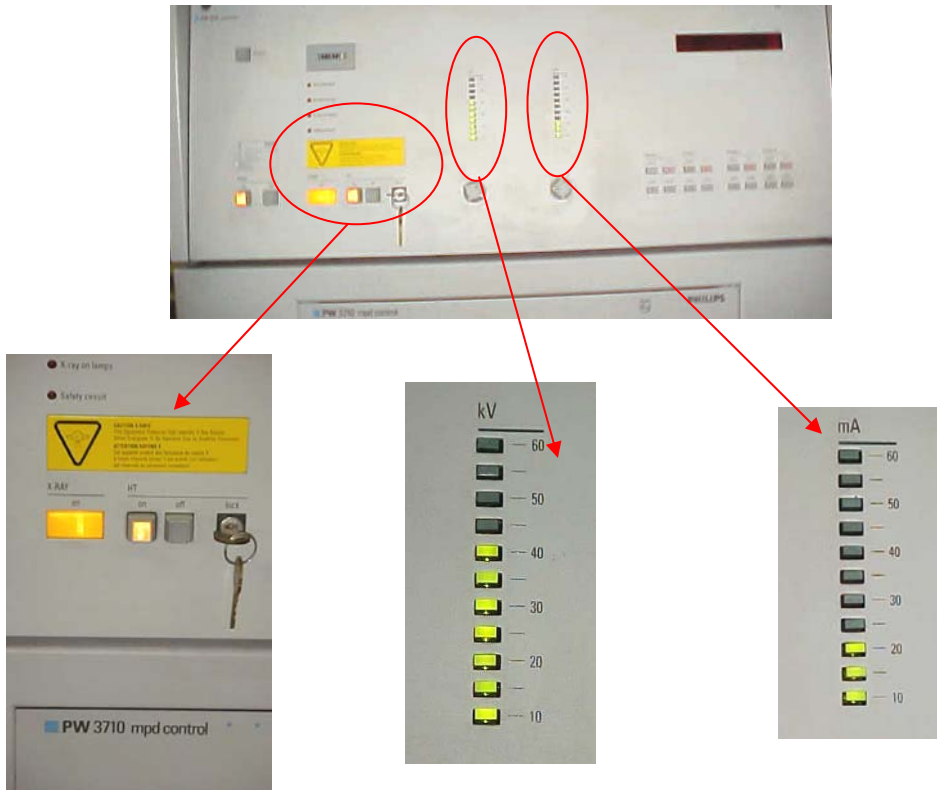


FIGURA Ap-C2 – Tela de programação do equipamento de Difração de Raios X
Laboratório de Análise por Raios X – Escola de Engenharia – UFMG

O resultado deste ensaio acusou uma grande quantidade de quartzo [SiO_2] e caulinita [$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], podendo ser encontrados ainda, em proporções menores a hematita [Fe_2O_3], a magnetita [Fe_3O_4] e a moscovita [$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$], nenhum destes prejudiciais à utilização do solo em tijolos de solo-cimento. Este tipo de ensaio não fornece a quantidade de cada mineral, apenas um maior ou menor percentual de ocorrência do mesmo.

APÊNDICE D: RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

Ap-D1. Introdução

Com o objetivo de melhor esclarecer os gráficos e tabelas mostrados no trabalho, os dados utilizados nas determinações serão listados em tabelas. Dados referentes à caracterização física do solo e das misturas solo-cimento e solo-cimento-resíduos, bem como da caracterização mecânica dos mesmos serão apresentados.

Ap-D2. Ensaio de caracterização dos solos

Os valores utilizados para a determinação dos parâmetros médios dos solos podem ser vistos nas TAB. Ap-D1 e Ap-D2.

Ap-D3. Ensaio de caracterização da mistura solo-cimento e solo-cimento-resíduos

Nas TAB. Ap-D3 e Ap-D4 podem ser encontrados os valores referentes aos corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos para ensaios de compressão simples e compressão diametral.

As TAB. Ap-D5, Ap-D6 e Ap-D7 mostram os valores referentes aos tijolos e prismas de solo-cimento e solo-cimento-resíduos para ensaios de compressão simples.

Nas TAB. Ap-D8 a Ap-D11 são listadas as velocidades de propagação da onda longitudinal nos tijolos. Estas velocidades foram utilizadas no cálculo da anisotropia dos tijolos. O valor da anisotropia do prisma foi calculado a partir das médias aritméticas dos tijolos formadores deste prisma.

TABELA Ap-D1
Resultados dos ensaios de caracterização e compressão simples dos solos naturais

Solo	Ensaio n°	ρ_s	granulometria				LL (cone)	LL (Casagrande)	LP	w_{ot}	$\rho_{dm\acute{a}x}$
			pedregulho	areia	silte	argila					
Agrofilito	1	2,850	0,0	8,3	84,4	7,2	-	47,0	NP	-	-
	2	2,840	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Areia	1	2,730	0,0	96,1	1,9	2,0	-	28,0	NP	-	-
	2	2,750	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Farmácia	1	2,760	2,4	40,1	45,2	17,1	44,0	41,0	30,0	21,1	1,606
	2	2,610	1,8	36,9	44,3	17,0	44,0	-	33,0	20,8	1,612
	3	-	6,0	28,5	44,0	21,6	-	-	-	-	-
	4	-	4,6	31,4	42,7	21,3	-	-	-	-	-
Mecânica	1	2,660	0,0	45,7	23,0	32,2	51,0	50,0	36,0	22,8	1,615
	2	-	0,0	47,5	30,1	22,4	48,0	-	-	21,5	1,618
	3	-	0,0	46,3	15,7	38,0	-	-	-	-	-
	4	-	0,0	46,4	24,1	29,5	-	-	-	-	-

TABELA Ap-D2
Resultados dos ensaios de caracterização e compressão simples dos solos homogeneizados

Solo	Ensaio nº	ρ_s	granulometria				LL (cone)	LL (Casagrande)	LP	wot.	$\rho_{dm\acute{a}x}$
			pedregulho	areia	silte	argila					
Homogeneizada 01	1	2,690	0,0	71,5	16,0	12,5	36,0	35,0	22,0	13,5	1,858
	2	-	0,0	70,0	19,5	10,5	34,0	-	26,0	-	-
	3	-	0,0	71,8	18,4	9,9	-	-	27,0	-	-
	4	-	0,0	63,4	25,7	10,9	-	-	-	-	-
Homogeneizada 02	1	2,790	0,0	50,0	41,5	8,5	29,0	24,0	17,0	14,8	1,805
	2	-	0,0	48,7	42,8	8,5	28,0	25,0	17,0	-	-
	3	-	0,0	46,1	44,6	9,3	-	-	-	-	-
	4	-	0,0	48,7	43,4	7,9	-	-	-	-	-
Homogeneizada 03	1	2,690	0,0	37,8	14,1	48,1	52,0	51,0	39,0	26,0	1,475
	2	-	0,0	37,0	13,5	49,6	54,0	50,0	40,0	26,3	1,495
	3	-	0,0	36,2	13,1	50,8	-	-	-	-	-
	4	-	0,0	38,2	32,6	29,1	-	-	-	-	-
	5	-	0,0	34,7	31,9	33,4	-	-	-	-	-

TABELA Ap-D3

Dados dos corpos-de-prova para ensaio de compressão simples – solo Homog. 01.

Tipo de solo	CPs	Densidade aparente seca do CP (g/cm ³)	Grau de compactação (%)	Pressão de moldagem (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Velocidade de propagação da onda (m/s)	Módulo de Elasticidade (MPa)	
Solo homogeneizado 1 + cimento	0% Resíduos	1	1,842	99,8	2,65	3,57	2392,3	493,93
		2	1,790	97,00	2,89	2,39	2227,3	563,18
		3	1,842	99,8	4,47	3,21	2306,3	493,19
		4	1,837	99,5	3,20	3,05	2404,4	441,31
		5	1,838	99,6	3,73	2,85	2341,6	416,72
		6	1,795	101,0	2,03	2,77	2344,4	366,05
		7	1,804	101,6	2,02	3,18	2359,7	451,21
		8	1,794	101,00	2,08	2,65	2267,5	428,08
		9	1,774	99,9	2,03	2,53	2229,1	500,70
		10	1,775	99,9	2,08	2,39	2126,7	447,90
		11	1,745	98,3	2,08	2,16	2125,9	451,70
		12	1,739	97,9	2,06	1,87	2091,4	354,55
		13	1,791	100,8	2,03	2,84	2406,2	567,88
		14	1,777	100,1	2,04	2,67	2350,8	652,63
		15	1,761	99,2	2,06	1,79	2300,6	176,10
		16	1,749	98,5	2,05	1,85	2207,7	244,88
0,5% Resíduos	1	1,769	99,6	*	2,28	2299,6	332,68	
	2	1,755	98,8	*	1,94	2265,0	231,36	
	3	1,742	98,1	*	1,80	2146,5	249,96	
	4	1,747	98,4	*	1,67	2126,3	219,11	
1% Resíduos	1	1,802	101,5	*	1,70	0,0	153,58	
	2	1,791	100,8	*	1,64	0,0	176,30	
	3	1,739	97,9	*	1,29	0,0	118,32	
	4	1,750	98,5	*	1,21	0,0	129,74	
2% Resíduos	1	1,720	96,9	*	1,59	1835,0	94,14	
	2	1,709	96,2	*	1,60	1600,9	96,47	
	3	1,697	95,5	*	1,44	1588,0	81,37	
	4	1,694	95,4	*	1,45	1452,4	91,75	
3% Resíduos	1	1,645	92,6	*	0,91	454,9	31,06	
	2	1,628	91,7	*	0,72	0,0	19,50	
	3	1,650	92,9	*	0,91	180,0	35,84	

- Para as dosagens com resíduos não foram mostrados os valores de pressão por serem semelhantes ao valor da prensa de tijolos e não ter sido utilizado em nenhuma análise.
- Os corpos-de-prova 1 a 5 foram moldados utilizando os parâmetros do ensaio de compactação Proctor Normal. Já os demais corpos-de-prova foram moldados a partir da pressão dos tijolos.

TABELA Ap-D4

Dados dos corpos-de-prova para ensaio de compressão simples – solo Homog. 03

Tipo de solo	CPs	Densidade aparente seca do CP (g/cm ³)	Grau de compactação (%)	Pressão de moldagem (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Velocidade de propagação da onda (m/s)	Módulo de Elasticidade (MPa)	
Solo homogeneizado 3 + cimento	0% Resíduos	1	1,539	101,0	1,71	2,54	1944,9	350,83
		2	1,523	100,0	2,35	1,64	1833,3	385,82
		3	1,525	100,2	2,49	1,91	1841,5	292,70
		4	1,534	100,7	1,64	2,89	1952,3	480,17
		5	1,532	100,6	1,49	3,02	2007,4	514,34
		6	1,529	100,4	1,65	2,27	1987,0	320,91
		7	1,546	100,1	2,05	2,91	1951,7	451,46
		8	1,544	100,0	2,06	3,09	1921,4	493,40
		9	1,544	100,0	2,08	3,45	1912,0	525,18
		10	1,530	99,1	2,05	2,11	1876,2	249,29
		11	1,549	100,3	2,05	2,87	2022,7	471,62
		12	1,536	99,5	1,99	2,63	1943,0	512,46
		13	1,557	100,8	2,00	1,72	2056,5	225,08
		14	1,557	100,8	2,02	1,73	2056,0	258,07
		15	1,545	100,0	2,02	1,35	1990,6	193,13
		16	1,537	99,5	2,02	1,11	1971,4	137,97
	0,5% Resíduos	1	1,560	101,0	*	0,98	1798,0	108,99
		2	1,557	100,8	*	1,32	1576,2	114,69
		3	1,557	100,8	*	1,36	1708,9	166,50
		4	1,556	100,8	*	1,65	1702,3	247,12
1% Resíduos	1	1,530	99,1	*	1,03	1416,8	104,52	
	2	1,525	98,8	*	1,09	1678,9	215,58	
	3	1,519	98,4	*	0,84	1338,6	84,39	
	4	1,519	98,4	*	0,89	1543,8	116,83	
2% Resíduos	1	1,502	97,3	*	0,94	1591,0	92,37	
	2	1,489	96,4	*	1,08	1551,7	121,97	
	3	1,484	96,1	*	0,91	1063,6	82,38	
	4	1,481	95,9	*	0,95	1123,7	108,70	
3% Resíduos	1	1,515	98,1	*	0,84	982,7	60,63	
	2	1,514	98,0	*	0,99	1121,3	82,55	
	3	1,505	97,5	*	0,89	855,2	61,07	
	4	1,502	97,3	*	0,90	911,1	66,52	

- Para as dosagens com resíduos não foram mostrados os valores de pressão por serem semelhantes ao valor da prensa de tijolos e não ter sido utilizado em nenhuma análise.
- Os corpos-de-prova 1 a 6 foram moldados utilizando os parâmetros do ensaio de compactação Proctor Normal. Já os demais corpos-de-prova foram moldados a partir da pressão dos tijolos.

TABELA Ap-D5
Dados dos tijolos utilizados nos ensaios de compressão simples

Tipo de solo		TIJOLO	Densidade aparente seca do tijolo (g/cm ³)	Grau de compactação do tijolo (%)	Pressão de moldagem dos tijolos (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Anisotropia do tijolo (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	
Solo homogeneizado 1 + cimento	0% Resíduos	1	1,754	98,2	2,11	4,86	0,79	190,70	
		3	1,664	93,2	2,63	2,97	9,00	130,15	
		8	1,695	94,9	2,11	3,16	6,62	166,65	
		11	1,612	90,2	2,16	2,06	16,01	107,47	
	0,5% Resíduos	1	1,675	93,8	1,68	3,52	2,97	173,86	
		5	1,662	93,1	1,89	3,42	0,34	152,15	
		7	1,679	94,0	1,89	3,40	1,36	156,68	
		8	1,668	93,4	1,89	3,34	3,66	168,01	
		12	1,678	94,0	2,11	3,54	0,66	164,41	
	1% Resíduos	14	1,669	93,5	2,24	3,46	1,62	142,59	
		2	1,660	93,0	1,89	3,16	1,84	157,73	
		3	1,650	92,4	2,11	2,88	0,88	147,34	
		5	1,644	92,0	2,00	3,02	4,03	130,65	
	2% Resíduos	6	1,659	92,9	2,11	2,77	2,78	114,38	
		3	1,619	90,7	2,05	2,76	3,10	70,08	
		6	1,646	92,2	2,11	2,84	7,05	107,67	
		8	1,638	91,7	2,11	2,67	6,97	99,52	
	3% Resíduos	9	1,628	91,2	2,11	2,75	5,88	93,94	
		3	1,603	89,8	2,11	2,35	5,89	76,84	
		4	1,597	89,4	2,11	2,39	6,72	81,70	
		6	1,623	90,9	2,00	2,40	6,53	82,91	
	Solo homogeneizado 3 + cimento	0% Resíduos	8	1,588	88,9	1,89	2,12	16,43	60,31
			5	1,482	97,0	2,11	2,56	0,66	124,90
			6	1,448	94,8	2,11	2,07	1,63	133,95
9			1,457	95,4	2,13	2,34	0,96	115,96	
0,5% Resíduos		10	1,477	96,7	2,11	2,21	1,97	105,05	
		5	1,457	95,4	1,89	2,02	6,11	141,33	
		7	1,468	96,1	1,89	1,85	0,83	118,67	
		8	1,474	96,4	2,00	1,85	2,69	135,50	
1% Resíduos		9	1,460	95,6	1,58	1,66	0,15	131,11	
		1	1,448	94,7	1,47	2,45	0,24	137,48	
		4	1,433	93,8	1,63	2,29	1,69	133,89	
		6	1,455	95,2	1,58	1,92	0,73	126,49	
2% Resíduos		7	1,454	95,1	1,63	1,79	1,10	115,42	
		1	1,479	96,8	2,00	1,38	0,90	92,32	
		3	1,460	95,6	2,11	1,30	19,85	86,63	
		4	1,458	95,4	2,00	1,31	0,82	90,15	
3% Resíduos		7	1,468	96,1	2,00	1,35	16,13	106,57	
		6	1,429	93,5	2,00	1,41	3,75	74,85	
		7	1,428	93,5	2,00	1,47	10,29	82,98	
		9	1,427	93,4	2,00	1,40	7,06	72,29	
			12	1,415	92,6	2,00	0,97	48,74	

TABELA Ap-D6

Dados dos prismas utilizados nos ensaios de compressão simples – solo Homog. 01

Tipo de solo		TIJOLO	Densidade aparente seca do tijolo (g/cm ³)	Grau de compactação do tijolo (%)	Pressão de moldagem dos tijolos (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Anisotropia do tijolo - ΔM (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
Solo homogeneizado 1 + cimento	0% Resíduos	2	1,663	93,1	2,11	2,19	17,16	196,22
		4	1,665	93,2	2,15		7,74	
		5	1,690	94,6	2,13	1,88	8,79	198,63
		10	1,669	93,5	2,11		5,92	
		6	1,695	94,9	2,11	1,73	7,88	177,35
		7	1,692	94,8	2,11		3,06	
		0,5% Resíduos	2	1,672	93,6	1,79	2,20	1,07
	13		1,686	94,4	2,21	3,33		
	15		1,672	93,6	2,26	2,13	6,32	219,97
	3		1,676	93,8	2,00		0,74	
	4		1,652	92,5	1,79	1,92	2,23	161,95
	11		1,748	97,9	2,21		4,94	
	9		1,670	93,5	1,79	2,12	0,37	195,22
	6	1,695	94,9	1,79	2,76			
	1% Resíduos	1	1,657	92,8	2,00	1,85	3,99	159,82
		8	1,666	93,3	2,11		0,47	
		4	1,639	91,8	2,00	1,71	1,92	154,65
		9	1,657	92,8	2,11		0,75	
		7	1,661	93,0	2,11	1,78	2,47	151,38
		10	1,664	93,2	2,11		3,40	
	2% Resíduos	1	1,613	90,3	1,68	1,49	46,03	74,56
		5	1,626	91,0	2,00		5,18	
		7	1,638	91,7	2,11	1,48	3,85	74,03
		2	1,624	91,0	2,11		45,15	
10		1,638	91,7	2,11	1,68	9,65	103,21	
4		1,634	91,5	2,00		1,03		
3% Resíduos	1	1,591	89,1	2,00	1,23	2,77	75,21	
	10	1,582	88,6	2,00		5,36		
	2	1,615	90,4	2,11	1,39	0,89	86,93	
	7	1,612	90,3	2,00		3,81		
	5	1,582	88,6	2,00	1,31	2,32	83,25	
	9	1,596	89,4	2,00		5,74		

TABELA Ap-D7

Dados dos prismas utilizados nos ensaios de compressão simples – solo Homog. 03

Tipo de solo		TIJOLO	Densidade aparente seca do tijolo (g/cm ³)	Grau de compactação do tijolo (%)	Pressão de moldagem dos tijolos (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Anisotropia do tijolo - ΔM (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
Solo homogeneizado 3 + cimento	0% Resíduos	2	1,470	96,2	2,11	1,62	0,49	176,72
		1	1,533	100,3	2,11		6,97	
		4	1,449	94,8	2,11	1,24	3,88	86,80
		3	1,489	97,5	2,11		0,67	
		7	1,453	95,1	2,13	1,34	2,88	150,54
		8	1,459	95,5	2,13		0,98	
	0,5% Resíduos	4	1,458	95,4	1,89	1,34	0,35	178,74
		1	1,472	96,3	1,89		0,35	
		10	1,459	95,5	1,79	1,17	5,97	161,10
		2	1,473	96,4	2,00		1,74	
		6	1,467	96,0	2,00	1,31	1,91	175,50
		3	1,463	95,8	1,89		2,04	
	1% Resíduos	2	1,443	94,4	1,58	1,20	0,70	150,13
		3	1,436	94,0	1,58		1,09	
		5	1,460	95,5	1,47	0,99	4,54	104,84
		10	1,452	95,0	1,68		9,44	
		8	1,456	95,3	1,58	0,93	2,96	114,69
		9	1,444	94,5	1,58		114,68	
	2% Resíduos	2	1,462	95,7	2,00	0,87	1,67	117,77
		9	1,455	95,2	2,11		54,48	
		5	1,451	94,9	2,00	0,80	8,98	91,33
		6	1,461	95,6	2,00		20,64	
		8	1,465	95,9	2,00	0,82	5,78	114,76
		10	1,449	94,8	2,11		5,07	
3% Resíduos	8	1,421	93,0	2,00	0,65	3,76	55,06	
	11	1,421	93,0	2,11		7,34		
	10	1,416	92,7	2,00	0,66	3,32	58,00	
	15	1,418	92,8	2,11		2,47		
	14	1,408	92,1	2,00	0,55	0,34	41,43	
	13	1,420	92,9	2,00		4,73		

TABELA Ap-D8
Velocidades de propagação da onda nos tijolos – solo Homog. 01

Tipo de solo		TIJOLO	V ₃ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₁ (m/s)
Solo homogeneizado 1 + cimento	0% Resíduos	1	2573,53	2648,50	2627,74
			2723,74		
		3	2197,80	2291,61	2488,00
			2348,99		
	8	2296,96	2361,16	2495,62	
		2343,10			
	11	2165,51	2981,98	2183,09	
		2267,21			
	0,5% Resíduos	1	2517,99	2385,24	2337,22
			2347,02		
		5	2236,42	2246,46	2241,14
			2265,37		
		7	2380,95	2278,36	2284,78
			2327,51		
8		2323,65	2173,42	2146,19	
		2240,00			
12	2327,51	2337,35	2347,90		
	2451,84				
14	2462,62	2324,09	2288,23		
	2192,64				
Tipo de solo		TIJOLO	V ₃ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₁ (m/s)
Solo homogeneizado 1 + cimento	1% Resíduos	2	2391,12	2380,53	2422,57
			2362,87		
		3	2300,74	2307,86	2264,23
			2220,46		
	5	2190,92	2222,87	2282,40	
		2139,04			
	6	2439,02	2398,21	2323,71	
		2325,58			
	2% Resíduos	3	0,00	2014,34	1038,43
			0,00		
		6	2130,90	2172,46	2004,63
			2150,54		
	8	1980,20	2046,34	1856,93	
		1911,26			
	9	1944,44	1955,89	1821,43	
		1884,25			
	3% Resíduos	3	1967,67	2035,32	1868,45
			1903,47		
4		1889,34	1771,36	1953,63	
		1890,61			
6	2086,44	2296,29	2075,48		
	2202,99				
8	1944,44	1982,26	2290,24		
	1959,41				

TABELA Ap-D9
Velocidades de propagação da onda nos tijolos – solo Homog. 03

Tipo de solo		TIJOLO	V ₃ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₁ (m/s)	Tipo de solo		TIJOLO	V ₃ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₁ (m/s)
Solo homogeneizado 3 + cimento	0% Resíduos	5	2067,95	2064,19	2099,71	Solo homogeneizado 3 + cimento	2% Resíduos	1	1672,64	1730,81	1666,97
			2147,24						1474,46		
		6	1937,72	2001,64	1993,56			3	1661,72	1725,98	1766,45
			2165,51						781,90		
	9	1971,83	2020,09	2056,02	4		1688,78	1736,57	1726,22		
		2134,15					1686,75				
	10	2126,04	2021,81	2026,40	7	850,03	1789,19	1763,51			
		2098,95				1646,09					
	0,5% Resíduos	5	1691,84	1934,64	2008,85	Solo homogeneizado 3 + cimento	3% Resíduos	6	1434,43	1620,22	1573,25
			2011,49						1390,96		
		7	2020,20	1971,18	1929,34			7	1125,40	1652,23	1623,12
			1819,36						1456,82		
	8	1976,01	1991,71	2017,00	9	1456,82	1574,19	1602,65			
		1897,02				1382,72					
	9	1929,70	1905,28	1889,76	12	1245,00	1470,92	1343,91			
		1830,07				1283,81					
1% Resíduos	1	2052,79	2054,53	2052,18							
		2027,52									
	4	2002,86	1989,59	2053,13							
		2094,24									
	6	1842,11	1966,88	1942,21							
		1936,38									
	7	1941,75	1922,37	1937,14							
		1877,93									

TABELA Ap-D10
Velocidades de propagação da onda nos tijolos dos prismas – solo Homog. 01

Tipo de solo		TIJOLO	V ₃ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₁ (m/s)					
Solo homogeneizado 1 + cimento						0% Resíduos	2	1319,51	2361,03	2498,66
								2488,89		
							4	2464,79	2379,56	2512,04
								2102,10		
							5	2422,15	2565,66	2726,47
								2471,32		
							10	2145,59	2126,85	2275,08
								2192,64		
							6	2511,21	2356,23	2562,28
								2276,42		
							7	2439,02	2329,76	2428,23
								2325,58		
						0,5% Resíduos	2	2341,14	2356,23	2330,82
								2370,87		
							13	2422,15	2301,76	2259,12
								2321,72		
							3	2293,20	2173,19	2217,22
								2295,08		
							15	2306,43	2233,64	2114,87
								2256,24		
							4	2263,54	2142,58	2148,21
								2240,00		
							11	2626,64	2563,25	2452,54
								2566,45		
6	2372,88	2405,46	2350,43							
	2484,47									
9	2314,05	2234,88	2262,12							
	2231,08									
Solo homogeneizado 1 + cimento						1% Resíduos	1	2441,15	2219,65	2422,81
								2439,02		
							8	2302,63	2336,24	2333,09
								2401,37		
							4	2106,85	2233,40	2245,73
								2240,00		
							9	2261,71	2261,92	2285,19
								2287,58		
							7	2368,87	2325,62	2411,85
								2395,21		
							10	2333,33	2308,55	2382,76
								2267,21		
						2% Resíduos	1	1948,50	2046,56	1074,44
								1921,76		
							5	2114,80	2023,13	1944,64
								2042,30		
							2	1952,58	2104,40	1111,14
								1941,75		
							7	2098,95	1991,91	1947,69
								2020,20		
							4	1150,37	2146,35	1858,82
								2069,48		
							10	2051,28	1982,95	1796,77
								1937,72		
3% Resíduos	1	2111,61	2197,27	2085,99						
		2075,61								
	10	1814,65	1904,35	1782,93						
		1912,57								
	2	2012,94	2107,85	2032,65						
		1974,61								
	7	2098,95	2116,68	1993,96						
		1959,41								
	5	1876,68	1958,54	1873,41						
		1877,93								
	9	1952,58	2030,36	1892,06						
		2015,84								

TABELA Ap-D11
Velocidades de propagação da onda nos tijolos dos prismas – solo Homog. 03

Tipo de solo		TIJOLO	V ₃ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₁ (m/s)
Solo homogeneizado 3 + cimento	0% Resíduos	2	2152,19	2117,36	2133,14
			2103,68		
		11	2165,51	2183,80	2016,86
			2139,04		
		3	2069,48	2129,17	2115,82
			2192,64		
		4	2135,77	2053,44	2058,30
	1682,69				
	7	1994,30	1921,72	1932,86	
		2122,82			
	8	2015,84	1976,51	1988,75	
		2064,90			
	0,5% Resíduos	1	2043,80	2081,38	2079,17
			2074,07		
		4	1985,82	1979,83	1974,37
			1974,61		
		2	1964,91	2018,06	2043,18
			2026,05		
		10	1830,07	1881,64	1918,20
	1643,19				
	3	1981,60	1981,96	2035,51	
		2031,93			
	6	1936,38	2000,89	2014,96	
		1964,91			
1% Resíduos	2	2080,24	1967,61	1993,31	
		2014,39			
	3	2086,44	1954,00	1969,48	
		1798,33			
	5	1851,85	1978,70	1968,93	
		1724,14			
	10	1563,37	1819,62	1892,56	
		1714,64			
	8	1827,68	1811,44	1898,69	
		1925,72			
	9	1648,03	1779,56	3667,43	
1626,02					
Solo homogeneizado 3 + cimento	2% Resíduos	2	1713,59	1783,27	1726,30
			1511,88		
		9	1746,72	1781,08	2369,31
			825,96		
		5	1499,73	1680,91	1729,29
			1485,41		
		6	805,52	1763,46	1768,32
	1530,89				
	8	2310,23	1806,75	1777,88	
		1624,13			
	10	1530,05	1693,52	1712,41	
		1601,83			
	3% Resíduos	4	1275,63	1494,29	1497,04
			0,00		
		5	1487,78	1505,03	1549,62
			0,00		
		8	1427,84	1681,33	1612,15
			1424,21		
		11	1092,90	1465,10	1281,23
			1507,81		
		10	1412,00	1597,25	1599,24
			2010,05		
		15	1311,48	1476,55	1381,39
	1400,70				
13	1266,97	1457,74	1358,40		
	1520,91				
14	1333,97	1444,85	1398,65		
	1390,27				

APÊNDICE E: REGISTRO FOTOGRÁFICO

Ap-E1. Introdução

As fotos mostradas a seguir têm a finalidade de ilustrar o trabalho realizado. Assim, serão apresentadas algumas fotos de corpos-de-prova de solo, solo-cimento e solo-cimento-resíduos e também tijolos e prismas de solo-cimento e solo-cimento-resíduos de todos os solos utilizados.

Ap-E2. Ensaios de compressão simples em solos

As FIG. Ap-E1 a Ap-E5 mostram corpos-de-prova antes e após a ruptura. É possível observar a diferente aparência dos corpos-de-prova confeccionados com diferentes solos, bem como as linhas de ruptura de cada tipo de corpo-de-prova.

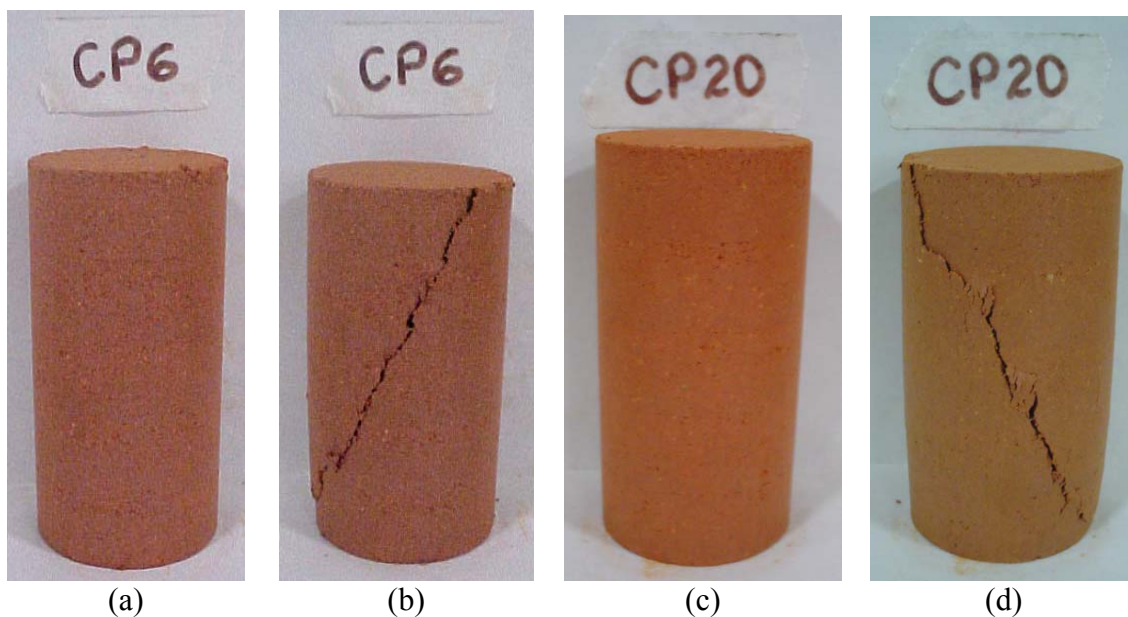


FIGURA Ap-E1 – Corpos-de-prova de solo da Faculdade de Farmácia
(a) Proctor Normal - antes da ruptura (b) Proctor Normal - após a ruptura
(c) Tijolo - antes da ruptura (d) Tijolo - após a ruptura

As FIG. Ap-E1-a e AP-E1-b mostram um corpo-de-prova moldado com a pressão correspondente à energia Proctor Normal. Já as FIG. Ap-E1-c e Ap-E1-d mostram outro corpo-de-prova, confeccionado com a pressão equivalente à prensa dos tijolos.

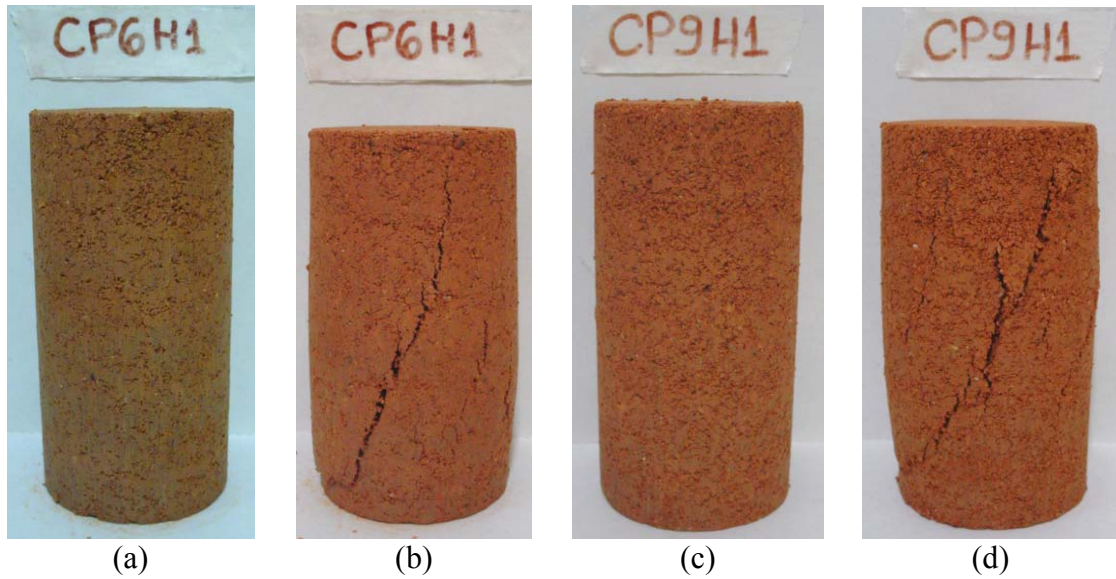


FIGURA Ap-E2 – Corpos-de-prova de solo homogeneizado 01
 (a) Proctor Normal - antes da ruptura (b) Proctor Normal - após a ruptura
 (c) Tijolo - antes da ruptura (d) Tijolo - após a ruptura

Assim como nas figuras anteriores, as FIG. Ap-E2-a e Ap-E2-b mostram um corpo-de-prova moldado com a pressão correspondente à energia Proctor Normal. Já as FIG. Ap-E2-c e Ap-E2-d mostram outro corpo-de-prova, confeccionado com a pressão equivalente à prensa dos tijolos.

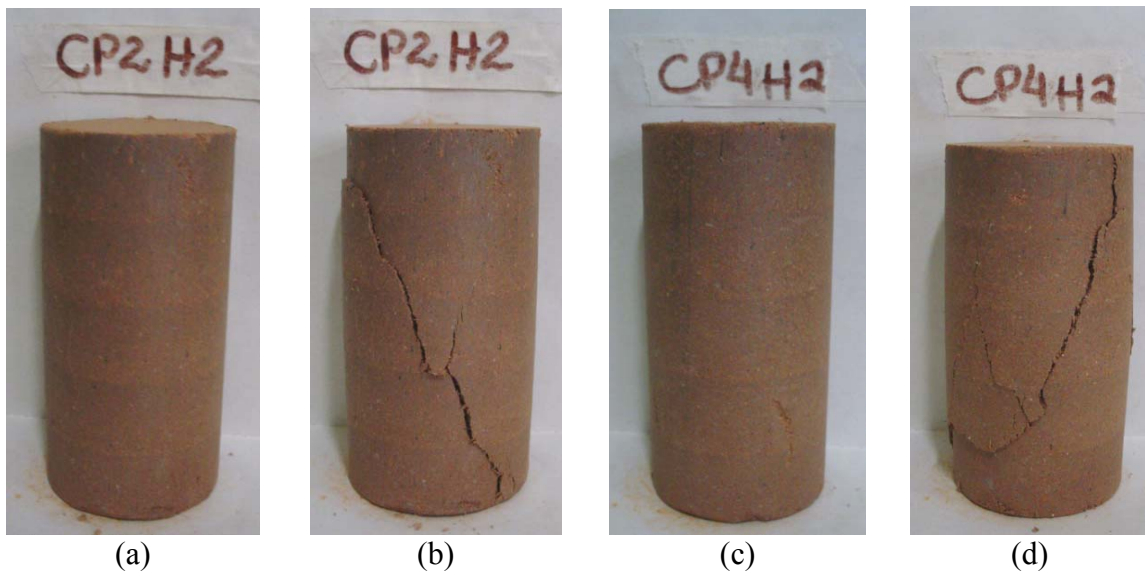


FIGURA Ap-E3 – Corpos-de-prova de solo homogeneizado 02
 (a) Proctor Normal - antes da ruptura (b) Proctor Normal - após a ruptura
 (c) Tijolo - antes da ruptura (d) Tijolo - após a ruptura

A pressão correspondente à energia Proctor Normal e a pressão das prensas de tijolos também foram estudadas para o solo homogeneizado 02. Nas FIG. Ap-E3-a e Ap-E3-b é mostrado um corpo-de-prova moldado com a pressão equivalente à energia Proctor Normal e as FIG. Ap-E3-c e Ap-E3-d mostram outro corpo-de-prova, confeccionado com a pressão dos tijolos. A influência das diferentes pressões empregadas na confecção dos corpos-de-prova pode ser observada através do aumento de vazios nos corpos-de-prova.

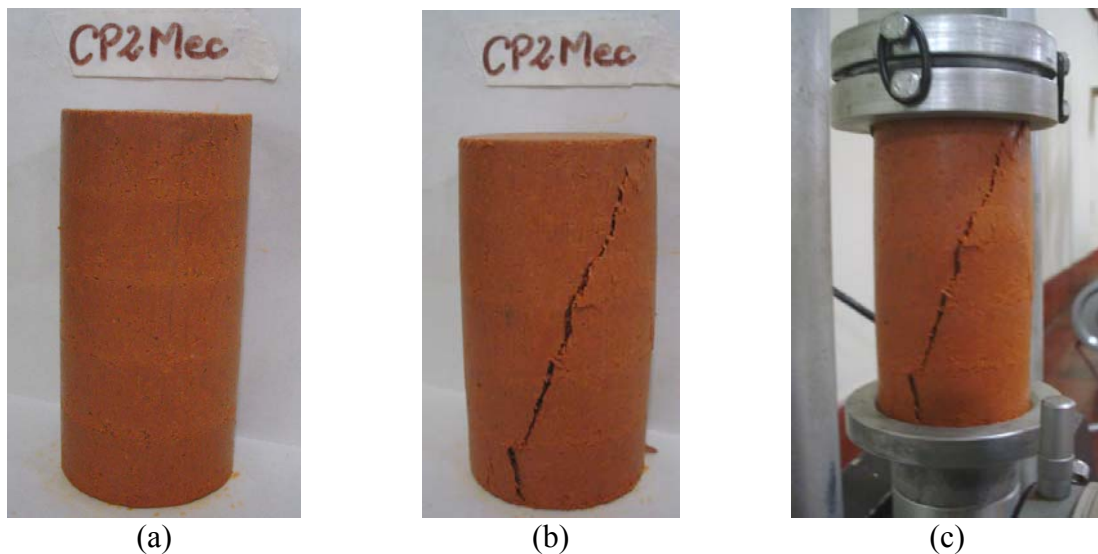


FIGURA Ap-E4 – Corpos-de-prova de solo da pista de testes da Mecânica
(a) antes da ruptura (b) após a ruptura (c) ruptura durante o ensaio

Como já dito ao longo do trabalho, a pressão equivalente à energia Proctor Normal é aproximadamente a mesma das prensas de tijolos para o solo proveniente da Mecânica. Por isso, os corpos-de-prova foram moldados com uma única pressão (FIG. Ap-E4).

Do solo da Mecânica foi extraído o solo homogeneizado 03. As FIG. Ap-E5-a e Ap-E5-b mostram um corpo-de-prova moldado com a pressão equivalente à energia Proctor Normal e nas FIG. Ap-E5-c e Ap-E5-d pode ser encontrado outro corpo-de-prova, confeccionado com a pressão dos tijolos.

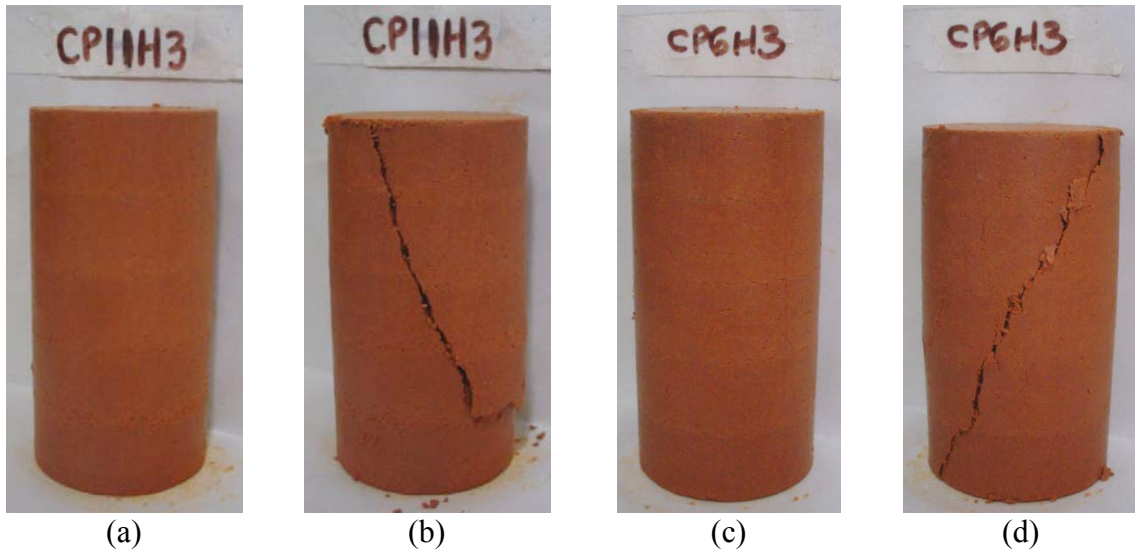


FIGURA Ap-E5 – Corpos-de-prova de solo homogeneizado 03
 (a) Proctor Normal - antes da ruptura (b) Proctor Normal - após a ruptura
 (c) Tijolo - antes da ruptura (d) Tijolo - após a ruptura

Ap-E3. Ensaios de compressão simples em corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos

As FIG. Ap-E6 a Ap-E18 mostram corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos confeccionados com os solos homogeneizados 1 e 3. Estes corpos-de-prova foram ensaiados à compressão simples sendo sua ruptura mostrada nas figuras.

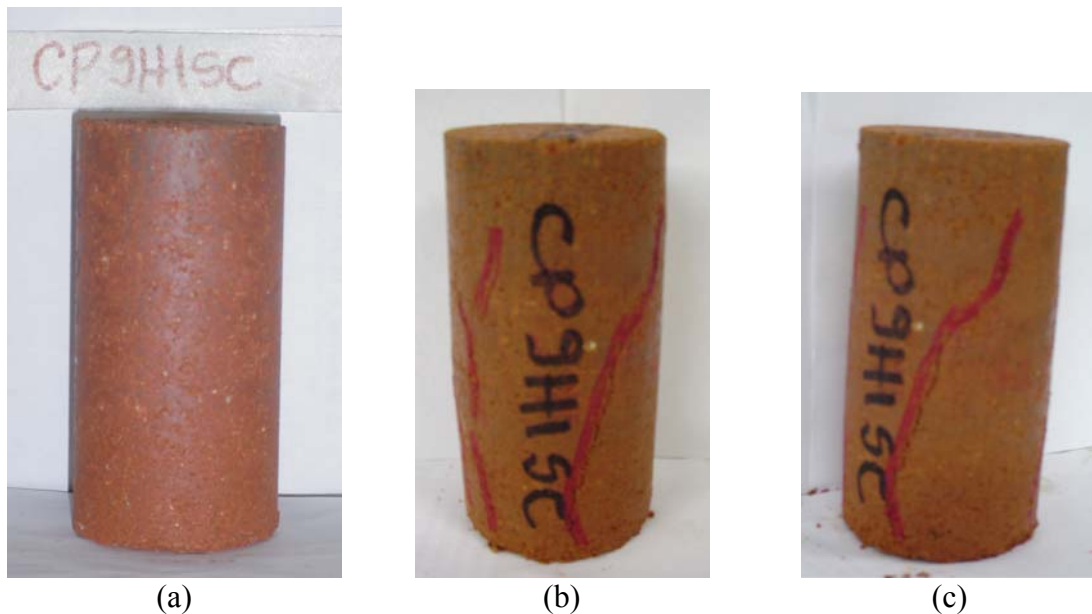


FIGURA Ap-E6 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 01 - Proctor Normal
 (a) antes da ruptura (b) e (c) após a ruptura

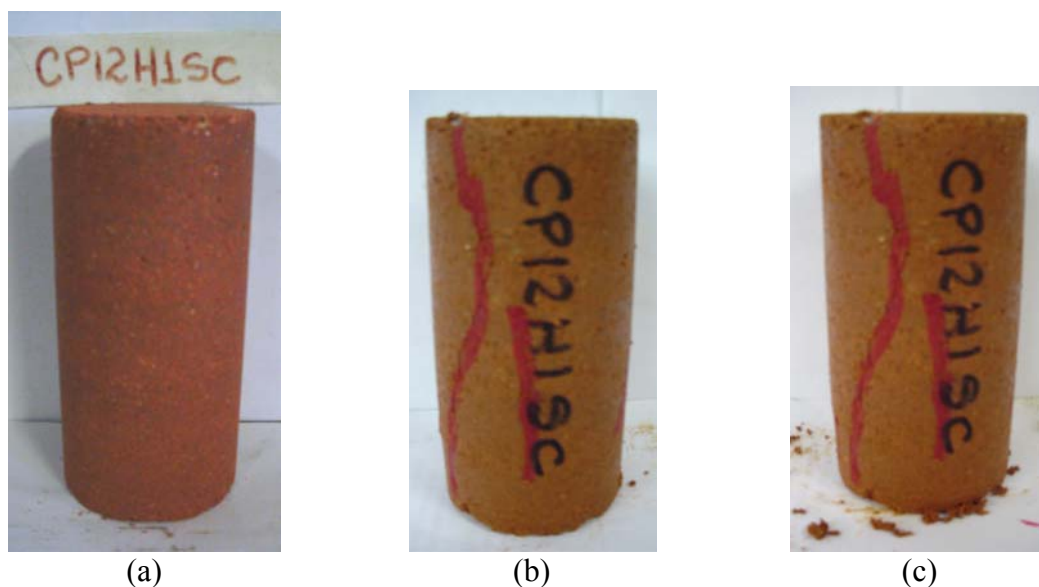


FIGURA Ap-E7 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 01 - Tijolo
(a) antes da ruptura (b) e (c) após a ruptura

A FIG. Ap-E6 mostra um corpo-de-prova moldado utilizando o solo homogeneizado 01 e cimento, com a pressão correspondente à energia Proctor Normal. Já a FIG. Ap-E7 mostra outro corpo-de-prova do mesmo material, confeccionado com a pressão equivalente à prensa dos tijolos. A partir das figuras percebe-se a deficiência da compactação quando são utilizadas as prensas convencionais.

As FIG. Ap-E8 e Ap-E9 mostram corpos-de-prova moldados utilizando o solo homogeneizado 03 e cimento. O corpo-de-prova da primeira figura foi moldado com os parâmetros do ensaio de compactação Proctor Normal. A segunda figura mostra o corpo-de-prova moldado com a pressão dos tijolos.

É possível observar a partir das FIG. Ap-E8 e Ap-E9 o aumento da massa específica aparente do corpo-de-prova com a aplicação da pressão dos tijolos. Como estudado a pressão referente à compactação Proctor Normal é menor que a pressão das máquinas de tijolos. O corpo-de-prova da FIG. Ap-E8 mostra-se menos denso que o da FIG. Ap-E9. Em todos os corpos-de-prova mostrados, as linhas de ruptura mantêm a mesma geometria independente da pressão utilizada.

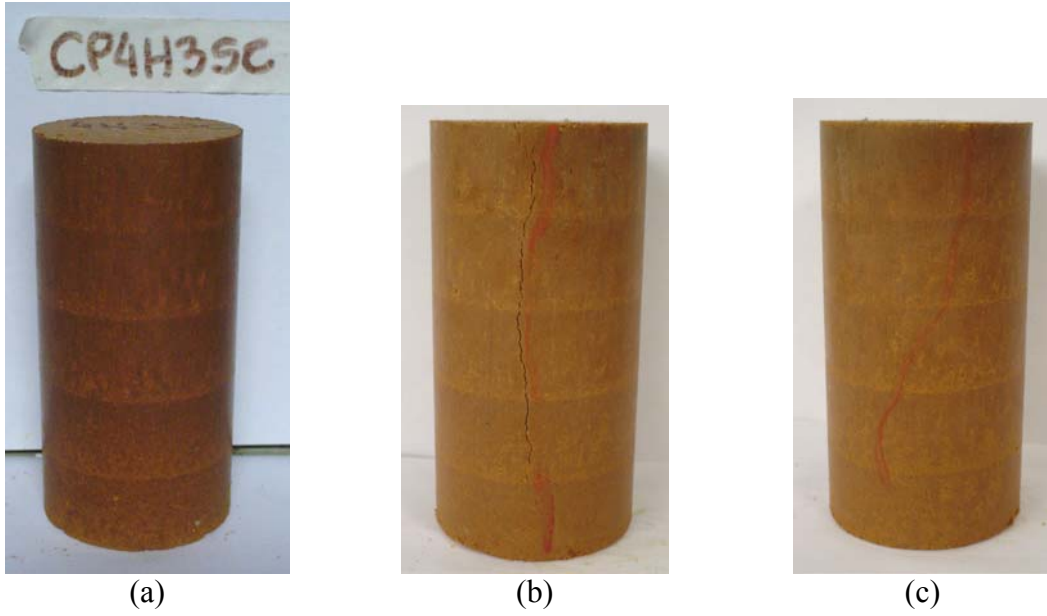


FIGURA Ap-E8 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 03 - Proctor Normal
(a) antes da ruptura (b) e (c) após a ruptura

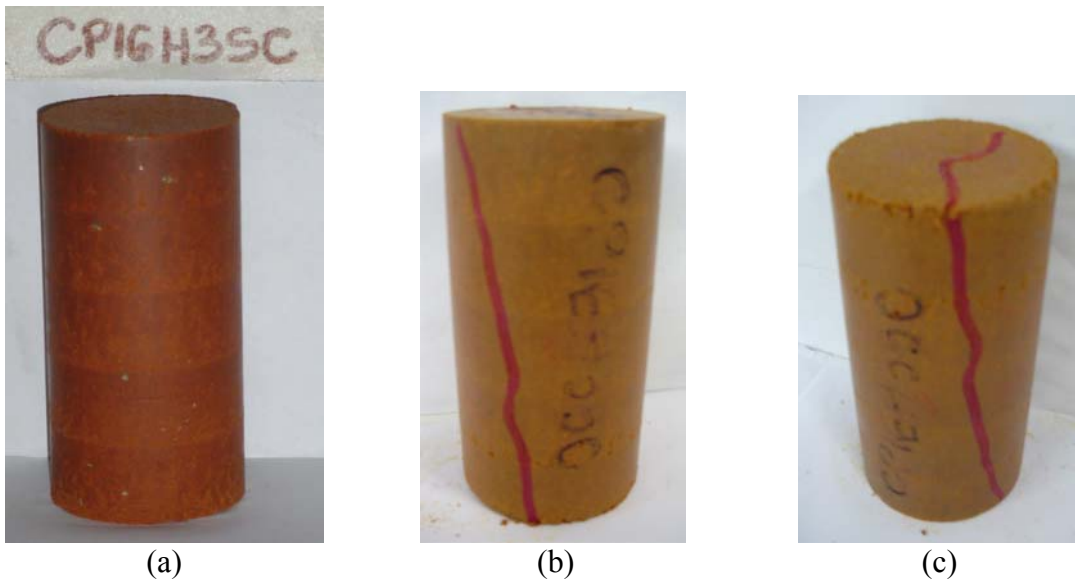


FIGURA Ap-E9 – Corpos-de-prova de solo-cimento – solo homogeneizado 03 - Tijolo
(a) antes da ruptura (b) e (c) após a ruptura

A inclusão de resíduos pode ser vista nas FIG. Ap-E10 a Ap-E13 para o solo homogeneizado 01.

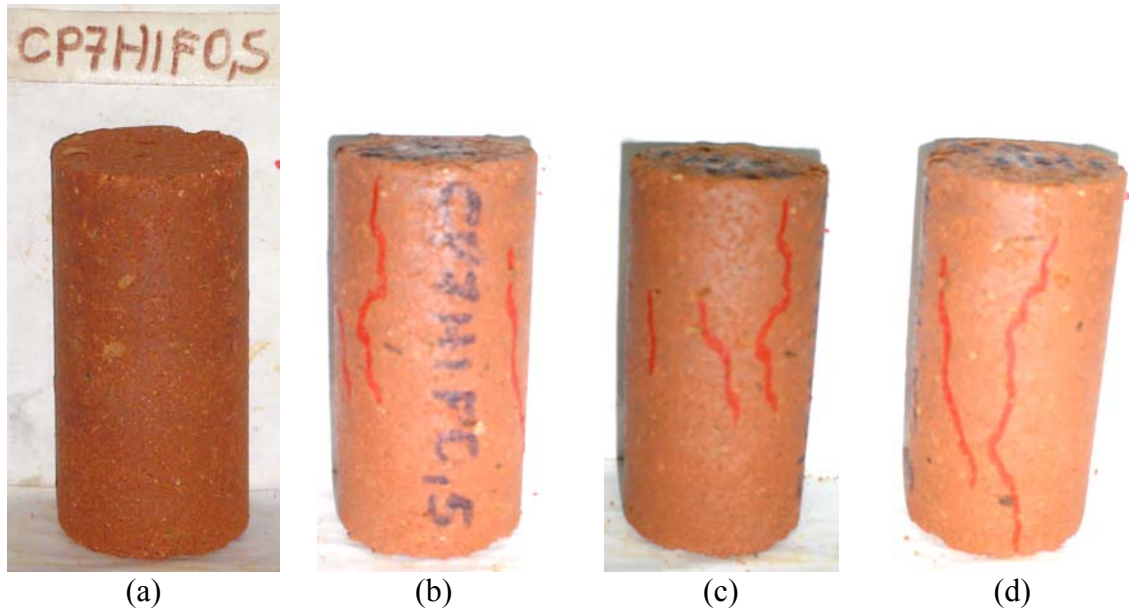


FIGURA Ap-E10 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 0,5% resíduos
(a) antes da ruptura (b), (c) e (d) após a ruptura

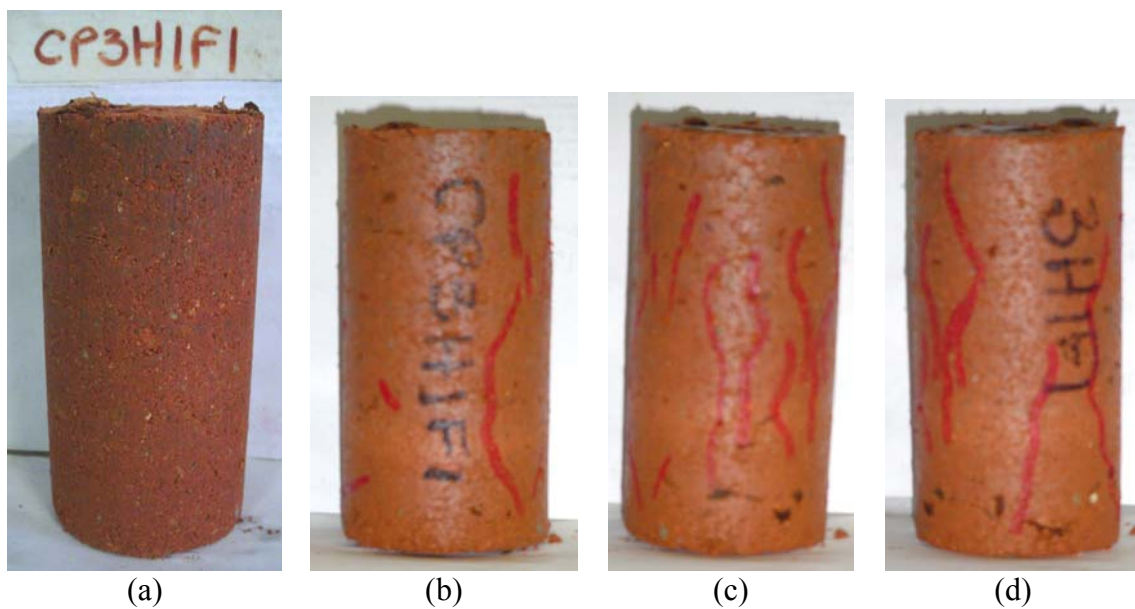


FIGURA Ap-E11 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 1% resíduos
(a) antes da ruptura (b), (c) e (d) após a ruptura

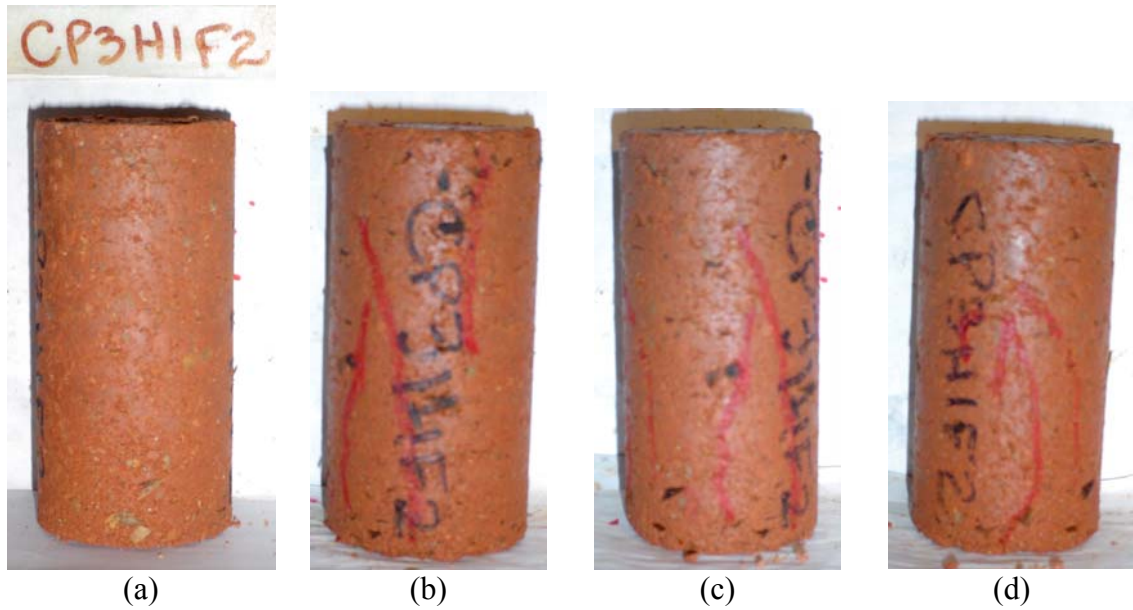


FIGURA Ap-E12 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 2% resíduos
 (a) antes da ruptura (b), (c) e (d) após a ruptura

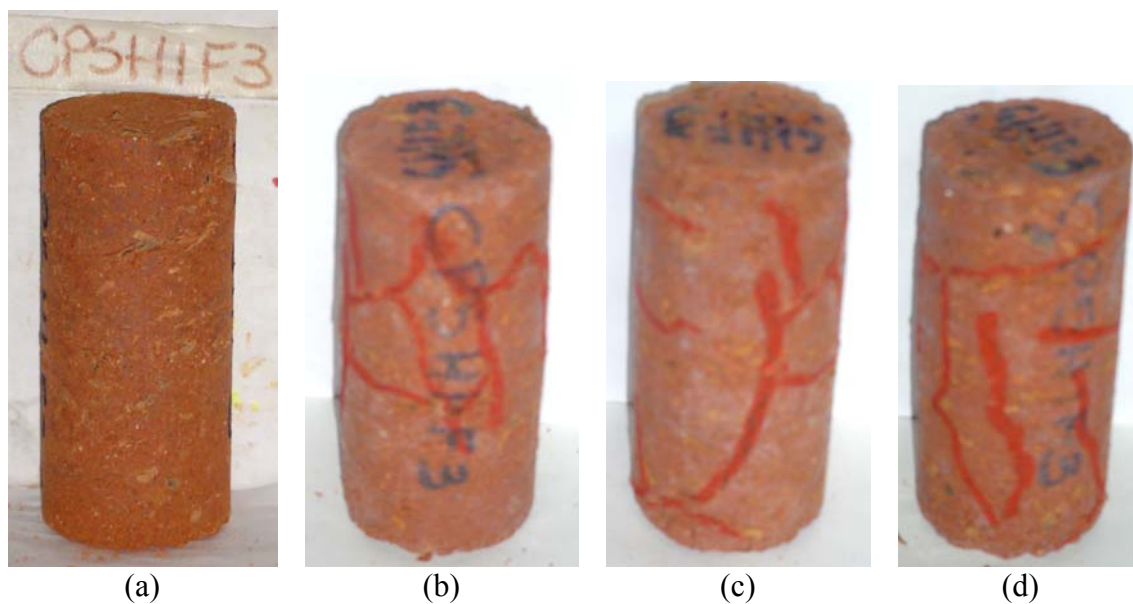


FIGURA Ap-E13 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 3% resíduos
 (a) antes da ruptura (b), (c) e (d) após a ruptura

O aumento do número de linhas de ruptura e a variação na direção de ruptura mostram a influência dos resíduos no compósito.

Nos corpos-de-prova onde foram misturados 3% de resíduos ao solo homogeneizado 01, observou-se uma dificuldade maior na moldagem, ocasionando uma compactação

deficitária. A FIG. Ap-E14 mostra dois corpos-de prova que tiveram a ruptura coincidente com a divisão entre as camadas de compactação.

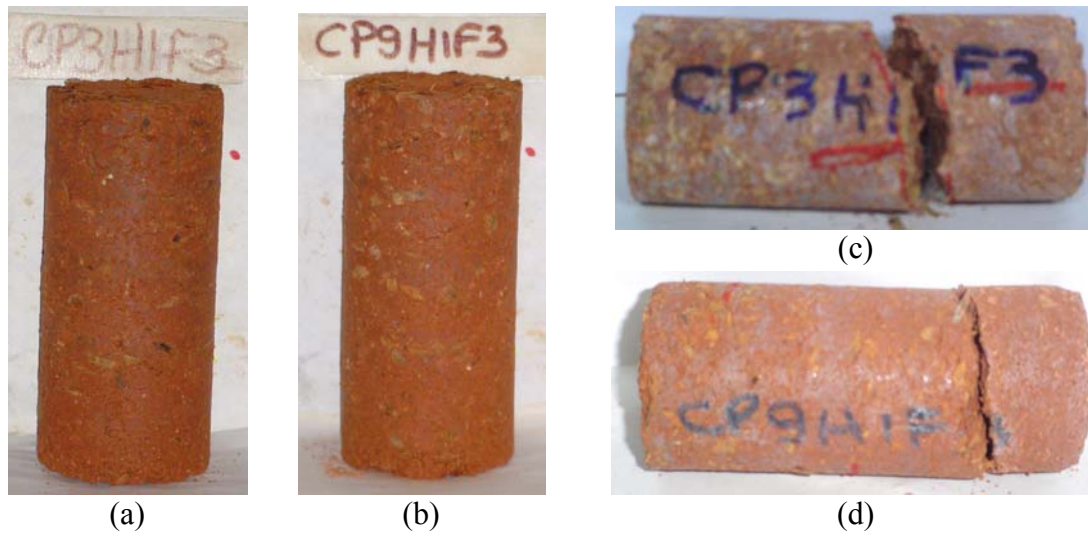


FIGURA Ap-E14 – CP- solo homogeneizado 01 – cimento – 3% resíduos
 (a) CP3 antes da ruptura (b) CP9 antes da ruptura
 (c) CP3 após a ruptura (d) CP9 após a ruptura

Para o solo homogeneizado 03 a inclusão de resíduos pode ser vista nas FIG. Ap-E15 a Ap-E18.

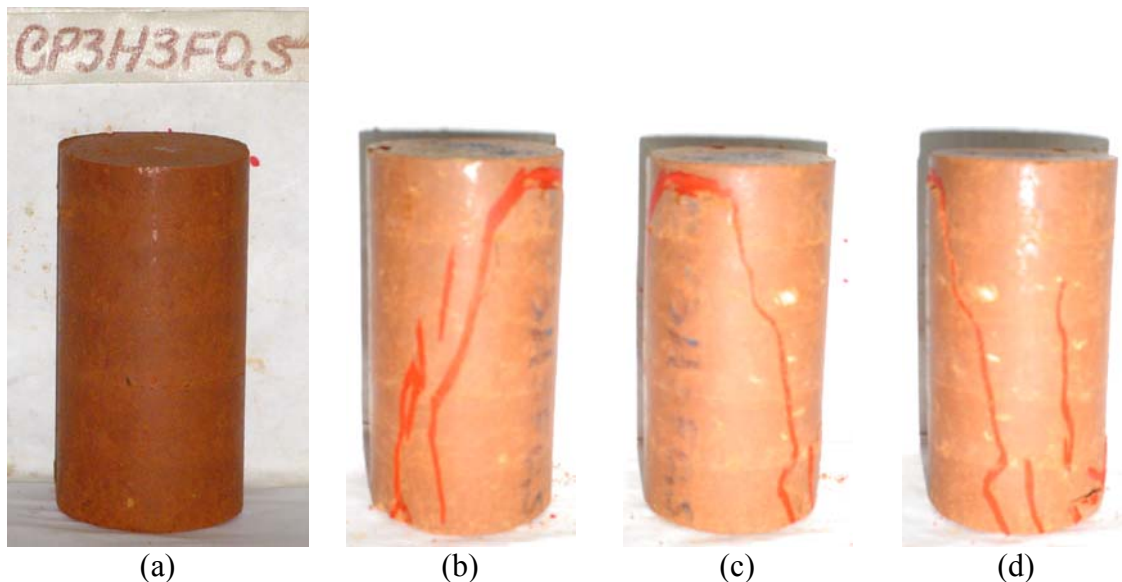


FIGURA Ap-E15 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 0,5% resíduos
 (a) antes da ruptura (b), (c) e (d) após a ruptura

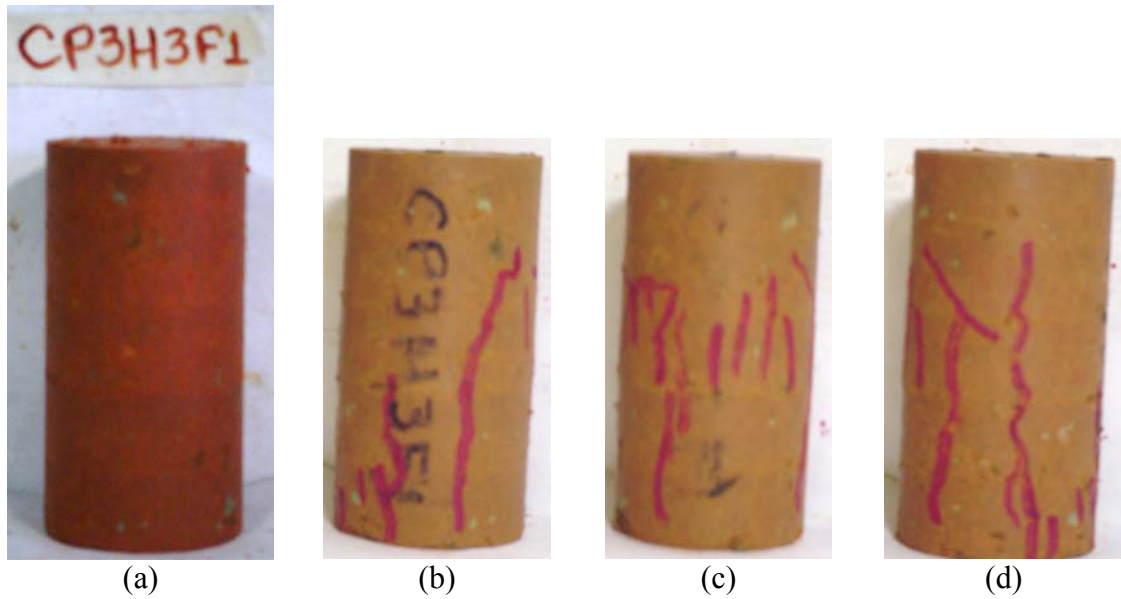


FIGURA Ap-E16 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 1% resíduos
 (a) antes da ruptura (b), (c) e (d) após a ruptura

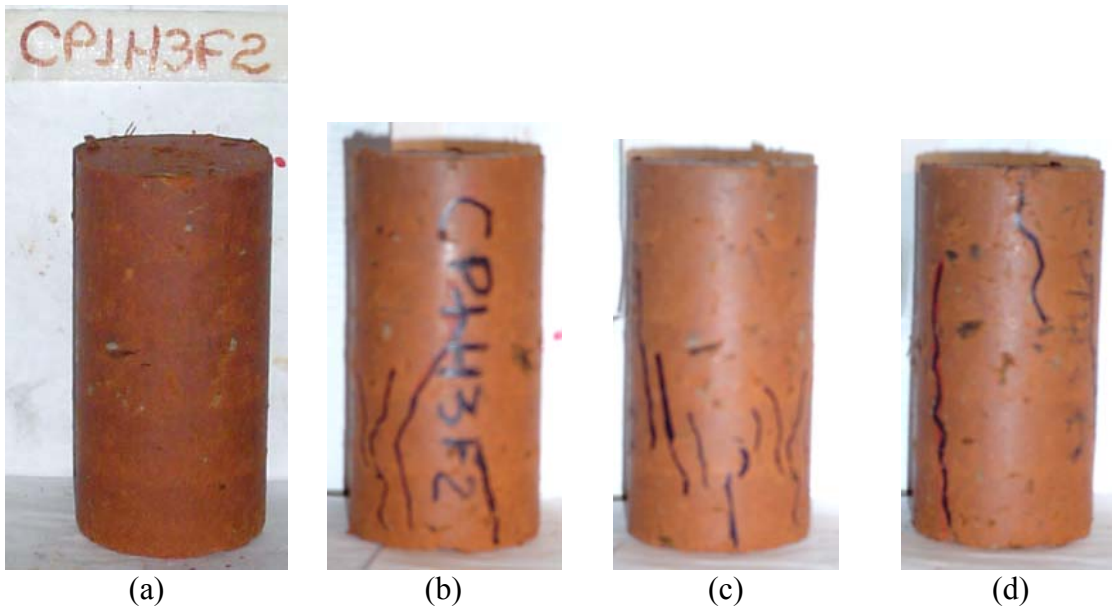


FIGURA Ap-E17 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 2% resíduos
 (a) antes da ruptura (b), (c) e (d) após a ruptura

Observou-se para o solo homogeneizado 03, com relação às linhas de ruptura, um comportamento semelhante ao solo homogeneizado 01. Porém, o corpo-de-prova mostrado na FIG. Ap-E18 apresentou uma ruptura bem definida apesar da inclusão do teor mais elevado de resíduos (3%).

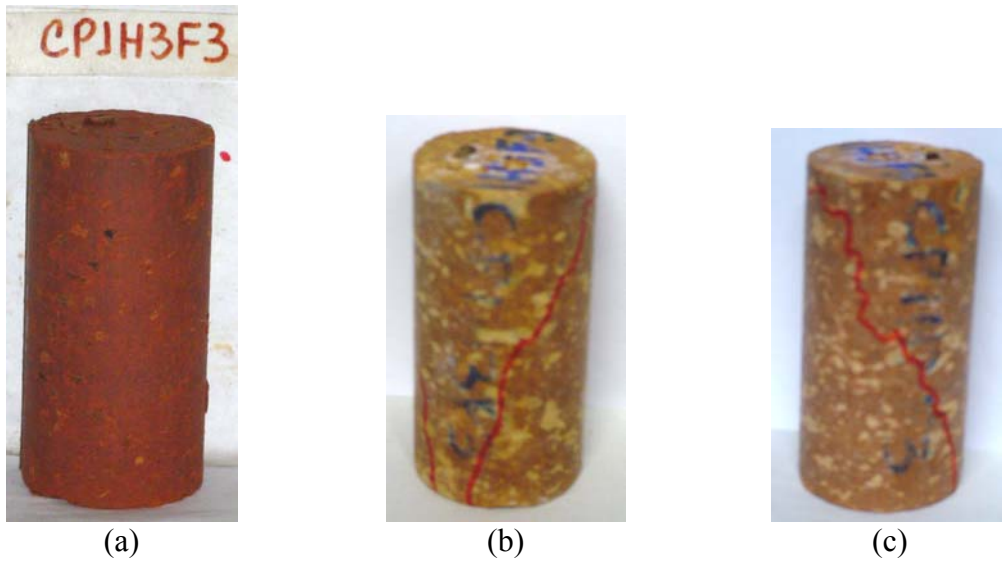


FIGURA Ap-E18 – CP- solo homogeneizado 03 – cimento – 3% resíduos
 (a) antes da ruptura (b) e (c) após a ruptura

Ap-E4. Ensaio de compressão diametral nos corpos-de-prova

Os ensaios de compressão diametral realizados nos corpos-de-prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduos podem ser vistos nas FIG. Ap-E19 e Ap-E20 respectivamente.

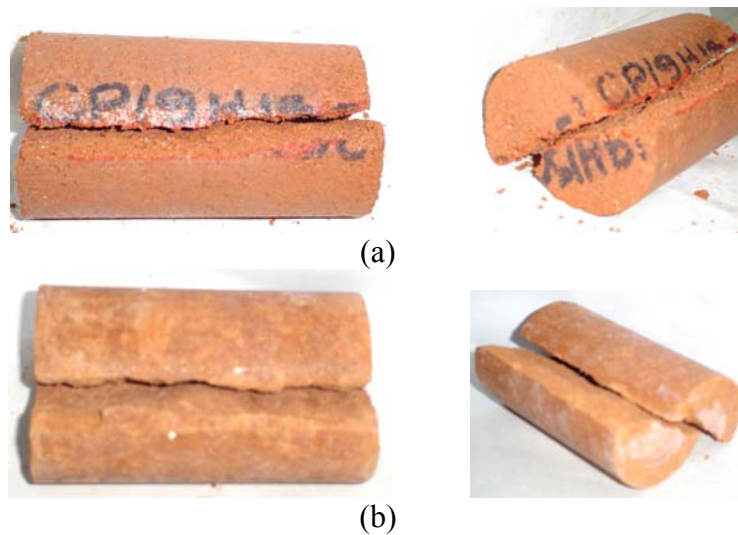


FIGURA Ap-E19 – CP- solo – cimento – 0% de resíduos
 (a) solo homogeneizado 01 (b) solo homogeneizado 03



0,5% resíduos
(a)



0,5% resíduos
(b)



1% resíduos
(c)



1% resíduos
(d)



2% resíduos
(e)



2% resíduos
(f)



3% resíduos
(g)



3% resíduos
(h)

FIGURA Ap-E20 – Corpos-de-prova de solo–cimento–resíduos
(a), (c), (e) e (g) solo homogeneizado 01 (b), (d), (f) e (h) solo homogeneizado 03

A ruptura apresentada pelos corpos-de-prova ensaiados à compressão diametral, mostrou não haver variação considerável na direção e quantidade das linhas existentes.

Ap-E5. Ensaio de compressão simples em tijolos e prismas

O tijolo utilizado neste estudo visa à construção de alvenarias intertravadas sem a utilização de argamassa de assentamento, ou de vedação. Por isto, o mesmo apresenta em sua geometria, um formato de encaixe conforme mostrado na FIG. Ap-E21.

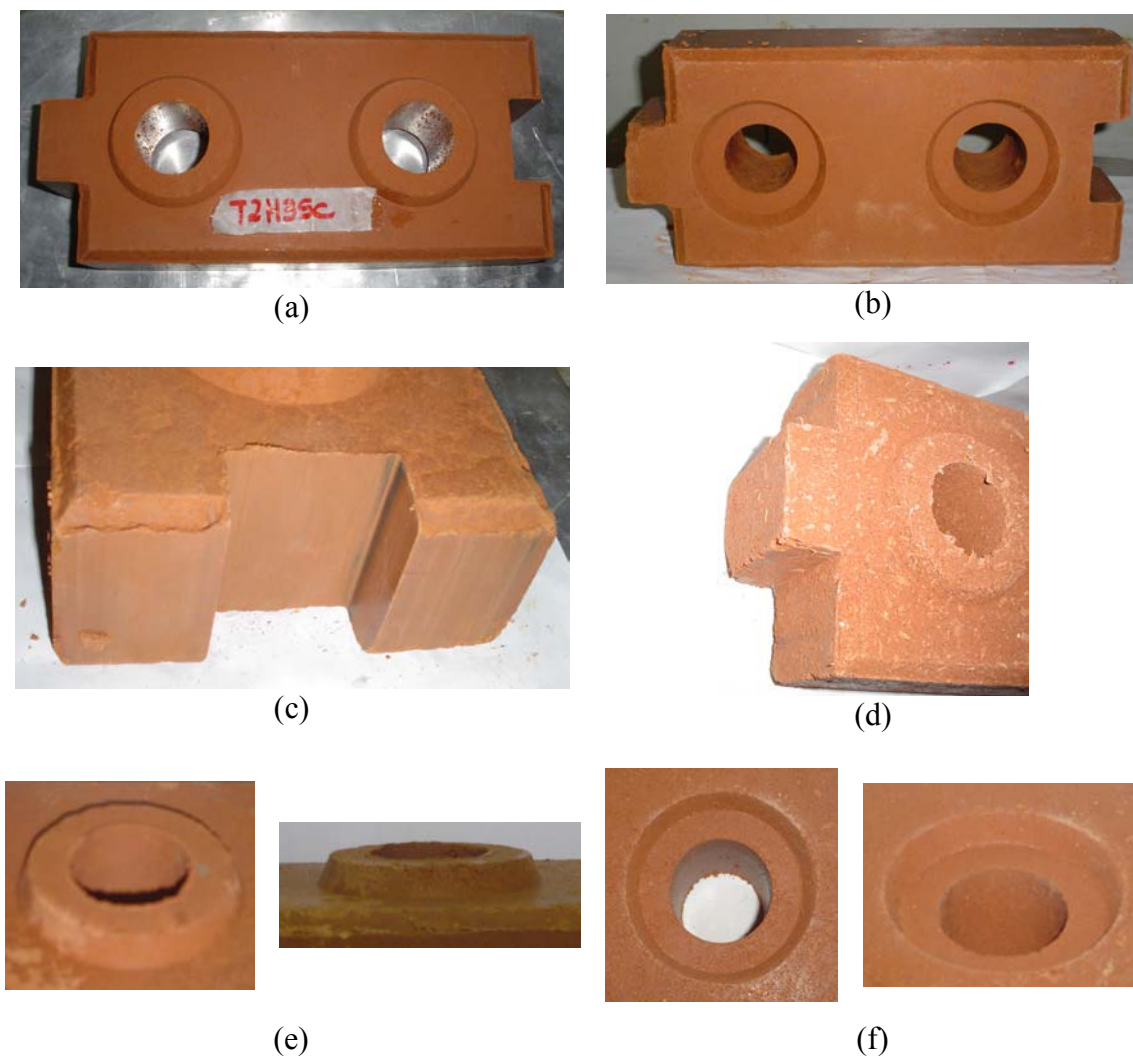


FIGURA Ap-E21 – Geometria dos tijolos utilizados
 (a) face superior do tijolo (b) face inferior
 (c) detalhe da reentrância (d) detalhe da saliência
 (e) e (f) detalhes do furo



(a) 0% resíduos



(b) 0% resíduos



(c) 0,5% resíduos



(d) 0,5% resíduos



(e) 1% resíduos



(f) 1% resíduos



(g) 2% resíduos



(h) 2% resíduos



(i) 3% resíduos



(j) 3% resíduos

FIGURA Ap-E22 – Tijolos com diversos teores de resíduos
 (a), (c), (e), (g) e (i) solo homogeneizado 01 (b), (d), (f), (h) e (j) solo homogeneizado

A FIG. AP-E22 mostra alguns tijolos moldados com diferentes teores de resíduos. Através destas é possível comparar a aparência dos tijolos com relação à inclusão dos resíduos. Tijolos confeccionados com teores de resíduos mais elevados (3%), apresentam uma maior exposição destes em sua superfície; o que favorece à perda de massa proporcionada pelo arrancamento dos mesmos. Tijolos com teores de resíduo menores mostraram maior homogeneidade entre os componentes solo-cimento-resíduos. Observou-se ainda que os resíduos mostraram-se mais visíveis quando utilizados conjuntamente com o solo homogeneizado 01 (mais arenoso).

Muito se falou da importância da prensagem dos tijolos na resistência. A FIG. Ap-E23 mostra alguns tijolos que tiveram uma prensagem deficitária. A ruptura ocorrida nos pontos de pior prensagem mostra sua influência negativa.



FIGURA Ap-E23 – Tijolos com prensagem deficitária

A FIG. Ap-E24 mostra um prisma ensaiado à compressão simples. Na figura são mostrados os tijolos utilizados para montagem do prisma, bem como o mesmo após o ensaio. É possível visualizar as linhas de ruptura ocorridas em todos os quatro lados. A ruptura ocorrida é típica (com variação apenas no número de linhas de ruptura) da maioria dos prismas ensaiados. Percebe-se também a partir da figura a transferência de esforço aplicado de um tijolo para o outro, através do prolongamento da linha de ruptura.

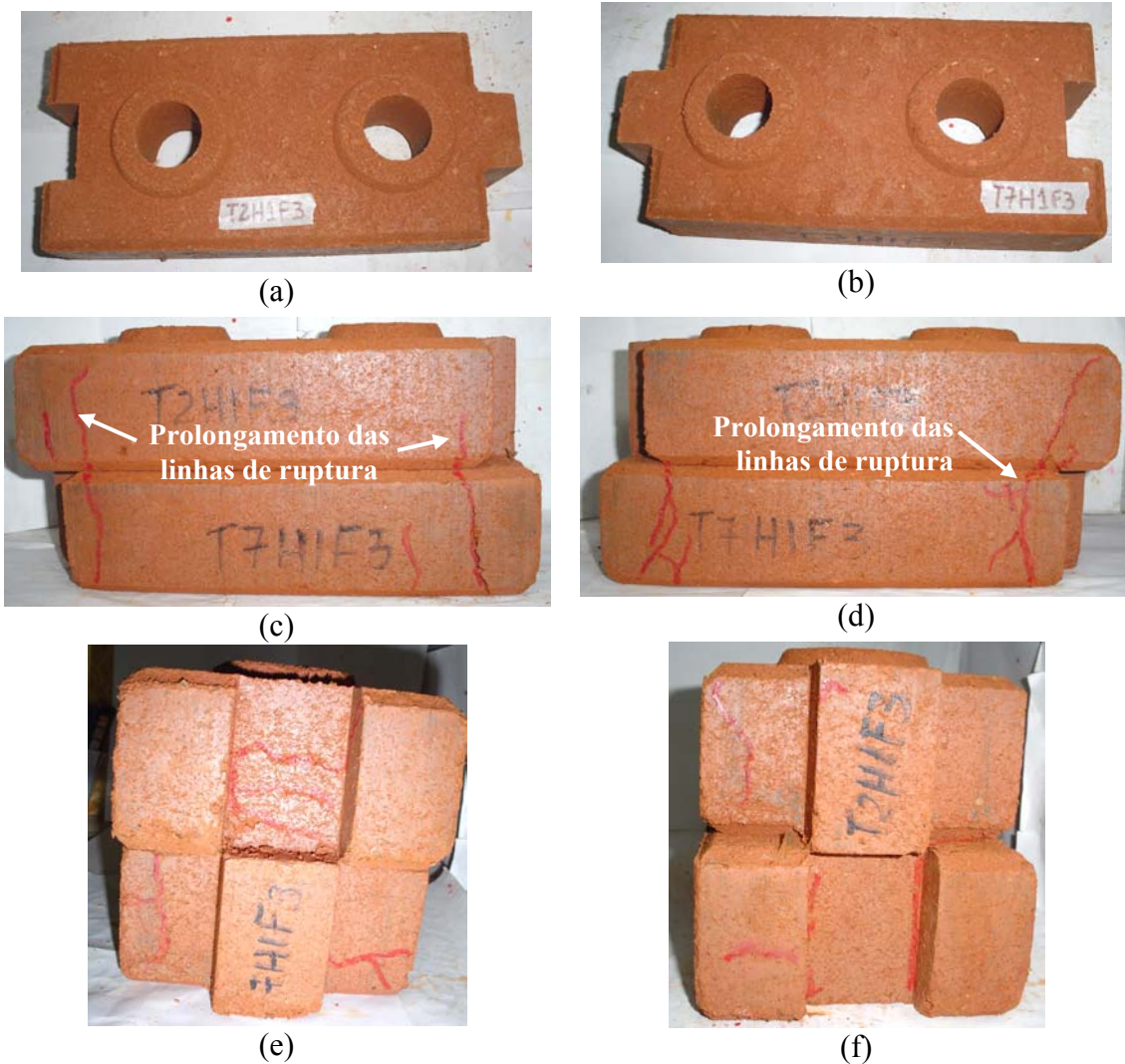


FIGURA Ap-E24 – Prisma ensaiado à compressão simples
 (a) e (b) tijolos utilizados no prisma (c) e (d) ruptura nas faces longitudinais
 (e) e (f) ruptura nas faces transversais

O encaixe vertical dos tijolos na montagem do prisma é mostrado na FIG. Ap-E25. Nesta é possível perceber que não ocorreu ruptura no mesmo devido à transferência dos esforços entre os tijolos. O leve “descascamento” ocorrido mostra que o contato entre os tijolos ocorreu de forma satisfatória, não ocorrendo nesta região concentração de tensões prejudiciais ao comportamento do prisma.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA Ap-E25 – Detalhe dos furos após o ensaio de compressão nos prismas