

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO E PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS DE TIJOLOS E MINI-PAINÉIS DE TERRA
CRUA TRATADA COM ADITIVOS QUÍMICOS**

Tese submetida à Banca Examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na área de concentração em
Construções Rurais e Ambiente.

REGIS DE CASTRO FERREIRA

CAMPINAS
DEZEMBRO DE 2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F413d	Ferreira, Regis de Castro Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos / Regis de Castro Ferreira.--Campinas, SP: [s.n.], 2003. Orientador: Wesley Jorge Freire. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 1. Materiais de construção. 2. Tijolos fabricação. 3. Solo-Cimento. 4. Cal. 5. Solo. 6. Alvenaria. I. Freire, Wesley Jorge. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.
-------	--

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO E PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS DE TIJOLOS E MINI-PAINÉIS DE TERRA
CRUA TRATADA COM ADITIVOS QUÍMICOS**

Tese submetida à Banca Examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na área de concentração em
Construções Rurais e Ambiente.

REGIS DE CASTRO FERREIRA

Orientador: Prof. Dr. Wesley Jorge Freire

CAMPINAS
DEZEMBRO DE 2003

*“Quem se rende à tentação do
ninho, jamais aprende a voar;
quem não se aventura pelos mares,
verá o casco de seu barco
apodrecer em pleno cais; quem não
ousar na vida, ficará superado
porque não foi capaz de dialogar
com as mudanças que o tempo
ofereceu (...)”*

**Hamilton Werneck (pedagogo e
educador)**

À minha mãe, Terezinha de Jesus Castro
Ferreira, e ao meu pai, Joaquim Roberto
Ferreira, meus primeiros mentores, exemplos
de amor, virtude e dedicação.

À minha irmã, Roberta, e aos meus irmãos,
Rezio e Rodrigo, pelo incentivo e amizade.

...ofereço

À Tânia, minha esposa, por seu amor e
carinho, incentivo e luz, principalmente nos
momentos de maiores dificuldades.

Ao Igor, nosso tesouro, cujo nascimento trouxe
ainda mais vida e felicidade às nossas vidas.

Com amor...

...dedico

Agradecimentos

À Deus, luz que sempre ilumina, pela força, coragem e sabedoria, sem as quais, os desafios não podem ser superados.

Ao Prof. Dr. Wesley Jorge Freire por sua dedicação, amizade e sobretudo pela simpatia durante a orientação, sem as quais, eu não obteria êxito neste trabalho.

À Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Goiás (UFG) pela liberação para a realização deste curso.

À Profa. Dra. Heloína Teresinha Faleiro da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da UFG, colega e companheira de caminhada, pelo incentivo e por assumir minhas atividades durante minha ausência, meus sinceros agradecimentos.

À Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, pela oportunidade de realização deste curso.

À agência financiadora CAPES pela concessão de bolsa para a realização deste trabalho.

Aos amigos da FEAGRI / UNICAMP, em especial ao Edilson, Ricardo (Paraná), Martha, Wilza, Admilson e Regina, Marlene e Quincas, Cláudio Sverzurt, Carlão, João Alexandre

(Mancha), Cal, Eduardo, Neri, Wellington, Lóris, Lia, Sandra, Lourdes e Ana Paula pela amizade sincera e inesquecíveis momentos vividos.

Às técnicas do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da FEAGRI / UNICAMP Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira e Flávia de Freitas Vieira, pela amizade e auxílio durante os ensaios experimentais.

Aos técnicos do Laboratório de Solos e do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil / UNICAMP pelo auxílio na realização dos ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Protótipos Professor Chang Cheu-Shang: José Maria da Silva, Luís Carlos dos Santos Silva e Francisco Ferreira dos Santos Filho (Chicão), pela disponibilidade e ajuda, sempre que solicitados.

Às secretárias da Pós-graduação Ana Paula Montagner, Marta Vechi e Rosângela Gomes pelo atendimento sempre eficiente, gentil e carinhoso.

Aos funcionários do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola, na pessoa de Jurandi Fagundes de Carvalho, pela presteza no atendimento durante as várias fases da pesquisa.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho...

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

	Página
Epígrafe	iii
Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
Resumo	xxi
Abstract	xxiii
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	05
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
3.1. ADITIVOS QUÍMICOS ESTABILIZADORES DE SOLO	07
3.1.1. Silicato de sódio	07
3.1.2. Cal	11
3.1.3. Cimento	13
3.2. TIJOLOS PRENSADOS OU TIJOLOS NÃO QUEIMADOS	16
3.2.1. Tijolos de terra crua	16
3.2.2. Tijolos de solo-cal	21
3.2.3. Tijolos de solo-cimento e de solo melhorado com cimento	27
3.2.4. Tijolos sílico-calcários	29
3.2.5. Tijolos com incorporação de cinzas	30
3.2.6. Tijolos de cinzas volantes e escória de alto-forno	32
3.2.7. Tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar	35
3.2.8. Tijolos de solo-vinhaça concentrada	38
3.2.9. Tijolos de solo-cimento-fibra	40
3.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO	42

3.3.1. Desempenho térmico de paredes	42
3.3.2. Formas de transmissão de calor	44
3.4. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO ATRAVÉS DE TESTES NÃO-DESTRUTIVOS	60
4. MATERIAL E MÉTODOS	66
4.1. MATERIAL	66
4.1.1. Solo	66
4.1.1.1. Solo arenoso	66
4.1.1.2. Solo argiloso	66
4.1.2. Aditivos químicos	67
4.1.2.1. Silicato de sódio	67
4.1.2.2. Cal	67
4.1.2.3. Cimento	67
4.1.3. Equipamentos	67
4.1.3.1. Máquina universal de ensaios	68
4.1.3.2. Máquina para fabricação de tijolos	68
4.1.3.3. Aparelho de ultra-som	68
4.1.3.4. Umidificador	68
4.1.3.5. Aparelhos para a micro-caracterização dos tijolos	68
4.1.3.6. Aparelhos para ensaios termofísicos	69
4.2. MÉTODOS	72
4.2.1. Procedimentos aplicados aos solos	72
4.2.2. Definição dos tratamentos	72
4.2.3. Aplicação dos tratamentos	74
4.2.4. Moldagem e cura dos corpos-de-prova de solo-aditivo	74
4.2.5. Ensaio de compressão simples dos corpos-de-prova de solo-aditivo	77
4.2.6. Ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova de solo-aditivo	77
4.2.7. Confeção de tijolos de solo-aditivo	78
4.2.8. Ensaio de compressão simples dos tijolos de solo-aditivo	81
4.2.9. Ensaio de absorção de água dos tijolos de solo-aditivo	83
4.2.10. Confeção dos mini-painéis de solo-aditivo	84

4.2.11. Ensaio de compressão simples dos mini-painéis de solo-aditivo	90
4.2.12. Ensaio de ultra-som aplicado aos corpos-de-prova, tijolos e mini-painéis de solo-aditivo	90
4.2.12.1. Escolha da frequência de ressonância da onda	90
4.2.12.2. Acompanhamento da velocidade em função do tempo	91
4.2.13. Correlação entre os valores de resistência à compressão e velocidade da onda ultra-sônica	92
4.2.14. Determinação das propriedades elásticas	92
4.2.15. Combinação de métodos destrutivos e não destrutivos na avaliação da qualidade dos tijolos de solo-aditivo	93
4.2.15.1. Anisotropia total	93
4.2.15.2. Resistência anisotrópica	94
4.2.16. Análises de micro-caracterização	95
4.2.16.1. Difração de raios-X (DRX)	95
4.2.16.2. Microscopia eletrônica de varredura	95
4.2.17. Determinação das propriedades termofísicas	96
4.2.17.1. Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de condutibilidade térmica	104
4.2.17.2. Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de calor específico	106
4.2.18. Análise estatística dos dados experimentais	109
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	111
5.1.1. Massa específica dos sólidos	112
5.1.2. Limites de consistência	112
5.1.3. Análise granulométrica	113
5.1.4. Ensaio de compactação dos solos	114
5.1.5. Classificação dos solos	117
5.2. PROCEDIMENTOS APLICADOS AOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS	119
5.2.1. Massa específica aparente seca e grau de compactação	119
5.2.2. Escolha da frequência de ressonância da onda ultra-sônica	119

5.2.3.	Acompanhamento da velocidade de propagação da onda ultra-sônica	120
5.2.4.	Análise estatística	125
5.2.5.	Resistência à compressão simples e absorção de água	128
5.2.6.	Propriedades elásticas	133
5.2.7.	Relações entre a resistência e a velocidade de propagação da onda ultra-sônica	137
5.3.	PROCEDIMENTOS APLICADOS AOS TIJOLOS	141
5.3.1.	Massa específica aparente seca e grau de compactação	141
5.3.2.	Análise estatística	143
5.3.3.	Resistência à compressão simples e absorção de água	148
5.3.4.	Combinação de métodos de métodos destrutivos e não-destrutivos na avaliação da qualidade dos tijolos	152
5.3.5.	Propriedades elásticas	157
5.3.6.	Análise visual dos tijolos tratados com cimento e silicato de sódio	160
5.4.	PROCEDIMENTOS APLICADOS AOS MINI-PAINÉIS	164
5.4.1.	Massa específica aparente seca e grau de compactação	164
5.4.2.	Análise estatística	168
5.4.3.	Resistência à compressão simples	170
5.4.4.	Propriedades elásticas	173
5.4.5.	Argamassa de assentamento	176
5.5.	ANÁLISES DE MICRO-CARACTERIZAÇÃO	178
5.6.	ENSAIOS TERMOFÍSICOS	181
6.	CONCLUSÕES	184
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
	ANEXOS	200

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 01. Condição para transferência de calor	42
Figura 02. Transferência de calor em uma parede	43
Figura 03. Radiação solar em superfícies opacas	46
Figura 04. Esquema de funcionamento do aparelho de ultra-som	63
Figura 05. Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em função da relação L/λ em corpos-de-prova de faia (<i>Fagus sylvatica</i>)	64
Figura 06. Máquina universal de ensaios	69
Figura 07. Máquina para fabricação de tijolos	69
Figura 08. Aparelho de ultra-som	70
Figura 09. Aparelho umidificador	70
Figura 10. Detalhes do umidostato/termostato digital mostrando a umidade relativa (a) e a temperatura (b) da câmara-úmida	70
Figura 11. Placa quente protegida	71
Figura 12. Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão	77
Figura 13. Corpos-de-prova cilíndricos imersos em água	78
Figura 14. Fabricação dos tijolos	79
Figura 15. Tijolos na câmara úmida	79
Figura 16. Tijolos sendo serrados ao meio	81
Figura 17. União das duas metades e capeamento dos prismas	82
Figura 18. Aspecto dos prismas após o capeamento das superfícies superior e inferior	81
Figura 19. Prismas sob imersão em água	83
Figura 20. Tijolo sob compressão	83
Figura 21. Ensaio de absorção de água aplicado aos tijolos: a) tijolos secos em atmosfera; b) tijolos imersos em água	84

	estufa; b) tijolos imersos em água	
Figura 22.	Características geométricas dos painéis	85
Figura 23.	Mistura mecânica	86
Figura 24.	Assentamento dos tijolos	86
Figura 25.	Retirada da guia.	86
Figura 26.	Verificação do paralelismo	86
Figura 27.	Mini-painéis na câmara úmida	87
Figura 28.	a) Mesa de abatimento com o corpo-de-prova tronco-cônico antes do ensaio; b) Medida da base do corpo-de-prova tronco-cônico após o ensaio	88
Figura 29.	Corpos-de-prova de argamassa	88
Figura 30.	Corpos-de-prova de argamassa sob compressão	88
Figura 31.	Mini-painel sob compressão simples	90
Figura 32.	Teste preliminar para a escolha da frequência de ressonância	91
Figura 33.	Esquema da transmissão direta do impulso ultra-sônico nos corpos-de-prova cilíndricos (a), tijolos (b) e mini-painéis (c)	92
Figura 34.	Eixos de leitura da velocidade nos tijolos (dimensões em centímetros)	94
Figura 35.	Tijolo serrado longitudinalmente	104
Figura 36.	Superfície dos tijolos serrados longitudinalmente sendo lixada	104
Figura 37.	Colagem dos tijolos para obtenção da placa.	105
Figura 38.	Placas prontas para o ensaio de condutibilidade térmica	105
Figura 39.	Esquema dos corpos-de-prova entre as placas de ensaio	106
Figura 40.	Cilindros prontos	106
Figura 41.	Vista superior dos cilindros prontos	106
Figura 42.	Tijolo sendo serrado para a obtenção do cubo	107
Figura 43.	Detalhe do tijolo sendo serrado para a obtenção do cubo	107

Figura 44.	Acabamento superficial do cilindro	107
Figura 45.	Confecção do furo central	107
Figura 46.	Curva granulométrica do solo arenoso	113
Figura 47.	Curva granulométrica do solo argiloso	113
Figura 48.	Curvas de compactação do solo arenoso	114
Figura 49.	Curvas de compactação do solo argiloso	114
Figura 50.	Exemplos de curvas obtidas em ensaios de compactação em relação à energia de compactação	116
Figura 51.	Exemplos de curvas obtidas em ensaios de compactação em relação à distribuição das partículas do solo	116
Figura 52.	Classificação trilinear dos solos estudados (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)	117
Figura 53.	Velocidade da onda ultra-sônica em função do tempo para os corpos-de-prova arenosos	124
Figura 54.	Velocidade da onda ultra-sônica em função do tempo para os corpos-de-prova argilosos	124
Figura 55.	Desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos submetidos ao ensaio de compressão simples	132
Figura 56.	Desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos argilosos submetidos ao ensaio de compressão simples	132
Figura 57.	Capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos	133
Figura 58.	Capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos argilosos	133
Figura 59.	Módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova arenosos	136
Figura 60.	Módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova argilosos	136
Figura 61.	Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo arenoso natural e adicionado de cimento	138
Figura 62.	Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo arenoso adicionado de	138

6% e 10% de cal

Figura 63.	Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo arenoso adicionado de 6% e 10% de cal e associado a 4% de silicato de sódio	139
Figura 64.	Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo argiloso natural e adicionado de cimento	139
Figura 65.	Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo argiloso adicionado de 6% e 10% de cal	140
Figura 66.	Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo argiloso adicionado de 6% e 10% de cal e associado a 4% de silicato de sódio	140
Figura 67.	Resistência à compressão simples dos tijolos arenosos em função da idade de cura	151
Figura 68.	Resistência à compressão simples dos tijolos argilosos em função da idade de cura	151
Figura 69.	Capacidade de absorção de água dos tijolos arenosos	152
Figura 70.	Capacidade de absorção de água dos tijolos argilosos	152
Figura 71.	Módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos arenosos em função da idade	159
Figura 72.	Módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos argilosos em função da idade	159
Figura 73.	Eflorescência de CaCO_3 nos tijolos arenosos tratados com Na_2SiO_3	160
Figura 74.	Eflorescência de CaCO_3 nos tijolos argilosos tratados com Na_2SiO_3	160
Figura 75.	Esquema da formação do filme de água na superfície de cimento, argamassa ou concreto	162
Figura 76.	Esquema da formação da eflorescência	162
Figura 77.	Resistência à compressão simples dos mini-painéis arenosos	172
Figura 78.	Resistência à compressão simples dos mini-painéis argilosos	172
Figura 79.	Módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis arenosos	176

Figura 80.	Módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis argilosos	176
Figura 81.	Fissuras verticais e horizontais nos mini-painéis após a ruptura	177
Figura 82.	Difratograma de raios-X da mistura T3 (solo arenoso + 10% de cimento)	179
Figura 83.	Difratograma de raios-X da mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio)	179
Figura 84.	Imagem por microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 10.000 vezes para a mistura sem silicato de sódio (T3)	180
Figura 85.	Imagem por microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 10.000 vezes para a mistura tratada com silicato de sódio (T5)	180
Figura 86.	Parede de tijolos maciços aparentes	200

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 01. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal-silicato de sódio, em MPa	09
Tabela 02. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cimento adicionado de silicato de sódio, em MPa	11
Tabela 03. Resistência à compressão simples do solo-cal, em MPa	13
Tabela 04. Resistência à compressão de blocos de adobe, em MPa, e perda por escovação no ensaio de durabilidade	19
Tabela 05. Resultados físico-mecânicos obtidos com corpos-de-prova	26
Tabela 06. Principais características e propriedades comparativas de tijolos e blocos	30
Tabela 07. Composição granulométrica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar	36
Tabela 08. Valores médios de resistência à compressão e absorção de água de tijolos de solo-cimento com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar	37
Tabela 09. Ensaio realizados com tijolos de solo-cimento com adição de cinzas beneficiadas	38
Tabela 10. Resistência à compressão simples de tijolos confeccionados com solos tratados com 12% de vinhaça concentrada, em MPa	39
Tabela 11. Resistência à compressão simples e absorção de água de tijolos de solo melhorado com cimento e adicionado de fibras de bagaço de cana-de-açúcar	41
Tabela 12. Emissividade de superfícies	45
Tabela 13. Absortividade de cores e superfícies	47
Tabela 14. Massa específica aparente (ρ), condutibilidade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais de construção	49
Tabela 15. Transmitância (U), capacidade térmica (C_T) e atraso térmico (ϕ) para algumas paredes	52
Tabela 16. Propriedades térmicas dos materiais dos componentes da Tabela 15	59
Tabela 17. Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa	59

para cada tipo de vedação externa

Tabela 18.	Número total de corpos-de-prova cilíndricos de solo-aditivo moldados e ensaiados	76
Tabela 19.	Número total de tijolos de solo-aditivo moldados e ensaiados	80
Tabela 20.	Número total de tijolos de solo-aditivo moldados e total de mini-painéis ensaiados	89
Tabela 21.	Resistência térmica superficial interna e externa	98
Tabela 22.	Análise de variância de acordo com o esquema fatorial $2 \times 9 \times 3$ aplicada para os corpos-de-prova cilíndricos e mini-painéis de solo-aditivo	109
Tabela 23.	Análise de variância de acordo com o esquema fatorial $2 \times 9 \times 4$ aplicada para os tijolos de solo-aditivo	110
Tabela 24.	Características físico-mecânicas dos solos estudados	111
Tabela 25.	Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos	121
Tabela 26.	Relação L/λ dos corpos-de-prova cilíndricos para a frequência de 45 kHz	122
Tabela 27.	Velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função da idade de cura para os corpos-de-prova cilíndricos	123
Tabela 28.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta resistência à compressão simples para os corpos-de-prova cilíndricos, em MPa	125
Tabela 29.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova cilíndricos, em MPa	125
Tabela 30.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta capacidade de absorção parcial de água para os corpos-de-prova cilíndricos, em %	126
Tabela 31.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos, em MPa	126
Tabela 32.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios do módulo de elasticidade dinâmico (Ed) dos corpos-de-prova cilíndricos, em MPa	127

Tabela 33.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo e adição química nos valores médios da capacidade de absorção parcial de água dos corpos-de-prova cilíndricos, em %, avaliada aos 7 dias	127
Tabela 34.	Valores médios da resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos	129
Tabela 35.	Ganhos de resistência proporcionados aos corpos-de-prova cilíndricos pela incorporação de silicato de sódio	131
Tabela 36.	Valores médios da massa específica aparente e da velocidade de propagação da onda ultra-sônica nos corpos-de-prova cilíndricos	134
Tabela 37.	Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico em função do período de cura para os corpos-de-prova cilíndricos	135
Tabela 38.	Equações de regressão para os valores de resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica nos corpos-de-prova arenosos e argilosos	137
Tabela 39.	Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos tijolos	142
Tabela 40.	Análise de variância para a variável resposta resistência à compressão simples dos tijolos, em MPa	143
Tabela 41.	Análise de variância para a variável resposta módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos, em MPa	143
Tabela 42.	Análise de variância para a variável resposta resistência anisotrópica dos tijolos, em MPa/%	144
Tabela 43.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a capacidade de absorção de água dos tijolos, em %.	144
Tabela 44.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos tijolos, em MPa	145
Tabela 45.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos, em MPa	145
Tabela 46.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência anisotrópica dos tijolos, em MPa/%	146
Tabela 47.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo e adição química nos valores médios da capacidade de absorção de água dos	146

	química nos valores médios da capacidade de absorção de água dos tijolos, em %	
Tabela 48.	Valores médios de resistência à compressão simples dos tijolos, em MPa	149
Tabela 49.	Capacidade de absorção de água dos tijolos, em %	150
Tabela 50.	Valores médios da velocidade da onda ultra-sônica nas três direções dos tijolos, em m.s ⁻¹	153
Tabela 51.	Valores médios da anisotropia total (ΔM) e resistência anisotrópica (R_A) dos tijolos	156
Tabela 52.	Massa específica aparente e módulo de elasticidade dinâmico em função do período de cura para os tijolos	158
Tabela 53.	Valores médios da massa específica aparente seca dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis arenosos	164
Tabela 54.	Valores médios da massa específica aparente seca dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis argilosos	165
Tabela 55.	Valores médios do grau de compactação dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis arenosos	166
Tabela 56.	Valores médios do grau de compactação dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis argilosos	167
Tabela 57.	Análise de variância para a variável resposta resistência à compressão simples dos mini-painéis, em MPa	168
Tabela 58.	Análise de variância para a variável resposta módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis, em MPa	169
Tabela 59.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos mini-painéis, em MPa	169
Tabela 60.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis, em MPa	170
Tabela 61.	Valores médios da resistência à compressão simples dos mini-painéis, em MPa	171
Tabela 62.	Ganhos de resistência proporcionados aos mini-painéis pela incorporação de silicato de sódio	173

Tabela 63.	Valores médios da massa específica aparente e velocidade de propagação da onda ultra-sônica nos mini-painéis	174
Tabela 64.	Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis	175
Tabela 65.	Resultados dos ensaios de caracterização da argamassa de assentamento dos mini-painéis	177
Tabela 66.	Resultado do ensaio de consistência normal da argamassa de assentamento dos mini-painéis	177
Tabela 67.	Resumo dos resultados do ensaio de condutibilidade térmica	181
Tabela 68.	Resumo dos resultados do ensaio de calor específico	181
Tabela 69.	Principais propriedades termofísicas do tijolo	181
Tabela 70.	Principais propriedades termofísicas da parede	182

RESUMO

O presente trabalho foi conduzido na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, e teve como objetivo pesquisar o efeito da incorporação ao solo de estabilizantes químicos (cal, cimento e silicato de sódio) e, com a mistura assim obtida, moldar corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e mini-painéis que tiveram suas características físico-mecânicas e termofísicas determinadas em laboratório e seu comportamento tecnicamente avaliado através de métodos destrutivos e não-destrutivos (ultra-som). Os teores de cimento e cal usados foram de 0%, 6% e 10% e a dosagem de silicato de sódio foi de 4%. Foram pesquisados um solo arenoso e outro argiloso. As amostras de solo foram submetidas a ensaios de caracterização de acordo com as normas brasileiras. Após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos foram curados em câmara úmida por um período de 7, 28 e 56 dias, após os quais foram submetidos aos ensaios de ultra-som, compressão simples e absorção de água. Os tijolos foram prensados e colocados em câmara úmida por 7, 28, 56 e 91 dias, após os quais, foram submetidos aos ensaios de ultra-som, compressão simples e absorção de água. O mesmo foi feito para os mini-painéis que consistiram em prismas de quatro tijolos. A condutibilidade térmica e o calor específico das misturas solo-aditivo foram determinadas segundo as normas ASTM C177/97 (método da placa quente protegida) e ASTM C351/92b (método do calorímetro), respectivamente. Em seguida, foram calculadas as principais propriedades termofísicas relacionadas ao desempenho térmico de paredes. Associadas a esses testes foram usadas técnicas analíticas de caracterização de materiais (difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura) a fim de se obter informações mais precisas do grau de estabilização dos solos. Cada tratamento foi conduzido com 3 repetições. Os dados obtidos foram estatisticamente analisados aplicando-se a eles o teste de Tukey para a comparação das médias, ao nível de 5% de significância estatística. Os melhores resultados em termos de estabilização química foram alcançados pelo solo arenoso na dosagem de 10% de cimento tratado com silicato de sódio. Foram obtidas boas correlações entre a resistência à compressão simples e a velocidade do pulso ultra-sônico. A adição química que conferiu a melhor qualidade técnica aos tijolos avaliada pela combinação de testes destrutivos e não-destrutivos foi a de 10% de cimento. Os resultados mostraram a resistência anisotrópica como um bom parâmetro para a avaliação da qualidade dos tijolos. No geral, os resultados mostraram que o

silicato de sódio pode ser usado para a melhoria das características físico-mecânicas relacionadas à resistência e durabilidade de tijolos prensados. As análises de micro-caracterização corroboraram esses resultados e evidenciaram o efeito positivo da incorporação do silicato de sódio. As principais propriedades termofísicas do material estudado estão em conformidade com os valores relacionados pelos projetos de normas. Os valores de condutibilidade térmica e calor específico foram menores que aqueles relacionados para tijolos cerâmicos.

Palavras-chave: Materiais de construção, Tijolos fabricação, Solo-Cimento, Cal, Solo, Alvenaria.

ABSTRACT

The aim of this research was the studying of the effect of chemical additives (lime, Portland cement and sodium silicate) on soil in order to obtain compressed soil bricks and prismatic mini panels constructed with such a material being their physical and mechanical characteristics determined in laboratory conditions and its behavior evaluated through the association of destructive and non-destructive methods. The cement and lime contents in the soil-additives mixtures were 0%, 6% and 10%, and the sodium silicate dosage was 4%. For this purpose a sandy soil and a clayey one were utilized being the samples submitted to preliminary testing in according to Brazilian regulations. After molding, the cylindrical specimens were cured in a humidity chamber for 7, 28 and 56 days before being submitted to ultrasonic and compression tests as well as to water absorption test. The compressed soil bricks and the prismatic mini panels were also cured in a humidity chamber for 7, 28, 56 and 91 days before being tested to the same assays applied to cylindrical specimens. Each one of the prismatic mini panel was constructed with four layers of compressed bricks. The thermal conductivity and the specific heat were determined according to ASTM C177/97 and ASTM C351/92b norms respectively, being the data for thermal conductivity achieved through a guarded hot plate apparatus and the data for specific heat through a calorimeter device. Thereafter the main physical and thermal properties related to the wall's thermal performance were calculated as well as the X-ray diffractometry and the scanning electron microscopy in order to reach to a more accurate evaluation of the soil stabilization degree. The treatments were applied with three replications and the obtained data were statically analyzed through analysis of variance (ANOVA) and test of Tukey ($p < 0.05$). The best results in terms of soil stabilization were reached by the sandy soil added of 10% Portland cement associated with sodium silicate. A good correlation was found out between the compressive strength and the ultrasonic pulse velocity. The 10% Portland cement content was the chemical admixture that promoted the better technical quality to the bricks evaluated through the association of destructive and non-destructive tests. The results showed that the "anisotropical resistance" could be used as a good index for brick's technical quality evaluation As a whole the results showed that sodium silicate could be used to ameliorate the compressed soil brick's physical and mechanical characteristics related to strength and durability. The micro characterization

analysis confirmed the positive effects promoted by the sodium silicate addition. The obtained data for thermophysical properties agree with those related by the standards. The thermal conductivity and the heat specific values were lesser than that related for common fired bricks.

Keywords: Construction material, Brick manufacture, Soil-Cement, Lime, Soil, Masonry.

1. INTRODUÇÃO

O termo “estabilização do solo” corresponde a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo primitivo.

Quantitativamente, a estabilização está associada a valores numéricos de resistência e durabilidade, expressos em termos de resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, módulo de deformação, capacidade de carga, absorção de água, rigidez, compacidade e consistência, expansão e contração, resistência ao umedecimento e secagem, resistência ao congelamento e degelo, resistência ao desgaste, resistência à erosão e redução dessas propriedades com o tempo.

Quase todos os ramos da engenharia de solos têm se utilizado da estabilização como um meio de aproveitar o solo local, embora artificialmente tratado, com muito maior vantagem econômica.

Porém, uma das razões do insucesso na estabilização de solos foi o enfoque principal na troca de solos problemáticos por solos melhores ou a limitação da estabilização aplicada apenas aos solos de baixa qualidade. Este enfoque tradicional não conseguiu evitar um aumento da deterioração dos pavimentos de solo estabilizado, acarretando uma mudança de conceito com relação à melhoria dos materiais que até então não eram aceitos na construção de estradas.

Portanto, aceitam-se atualmente todos os tipos de solo na tentativa de obter materiais com melhores comportamentos físico, químico e mecânico para utilização em terraplenagem, construção de estradas, barragens, etc.

Os solos coesivos, que se tornam plásticos com o aumento da umidade, necessitam de estabilização, pois a troca daqueles solos por um material de melhor qualidade provoca elevação dos custos. Além disso, os sistemas de estabilização de solos disponíveis nos últimos 50 anos não resolveram satisfatoriamente o problema da instabilidade estrutural dos solos, levando os pesquisadores a buscarem novos e diferentes produtos, mais baratos e eficientes.

Estes produtos podem ser classificados como:

- produtos que atuam sobre o solo como aglutinantes artificiais;
- produtos que reagem quimicamente com o solo;

- produtos que funcionam como aglutinantes e reagentes químicos.

Todo solo coesivo tem a propriedade de adensar-se, mediante compactação, até um máximo conseguido pela reacomodação ou entrelaçamento das partículas do solo, sob condições de alta pressão e ótimo teor de umidade.

Dentre as inúmeras possibilidades de estabilização de solos, as que têm sido identificadas como soluções práticas e econômicas, segundo FANG (1991), são:

- estabilização granular – combinação dos métodos de estabilização física e química, na qual a capacidade de carga do esqueleto do solo é modificada pelo enchimento dos vazios com cimentos naturais ou outros materiais (como argila, concreto e argamassa);
- estabilização química – termo geral utilizado para designar todos os métodos nos quais, tanto as interações químicas quanto as físico-químicas e físicas, podem ocorrer no processo de estabilização. Este método inclui, também, aqueles nos quais um ou mais compostos são adicionados ao solo com o objetivo de estabilizá-lo. Dentre as técnicas de estabilização química citam-se a do solo-cimento, a do solo-cal, a do solo-betume, a do solo-resina, a estabilização com cinzas volantes (“fly ash”), a estabilização com o emprego de sais (cloretos), ácidos (ácido fosfórico), lignina, silicatos de sódio (“water glass”) e de cálcio, aluminatos de cálcio, sulfatos de potássio, óxidos de ferro, cinzas pozolânicas de turfas e restos de atividade agrícola (palha de arroz, casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar, etc.), materiais vegetais (partículas de madeira, sobras de papel, polpa de celulose, etc.);
- estabilização térmica – método físico de estabilização que utiliza aquecimento (geralmente acima de 300 °C) ou resfriamento, por longos ou curtos períodos de tempo, para a melhoria das propriedades do solo com o qual se está trabalhando;
- estabilização eletrocinética – método que utiliza a influência de um campo elétrico para facilitar a consolidação de solos finos, movimentar estabilizantes através de solos densos e desviar a percolação natural pela criação de barreiras de fluxo.

Por outro lado, as crises econômica e habitacional que atingem os países em desenvolvimento têm forçado os pesquisadores a resgatarem todas as técnicas e materiais que possam oferecer soluções apropriadas para a construção de moradias de interesse social, quer sejam elas urbanas ou rurais.

Independentemente da finalidade e complexidade da obra, os custos gerados em sua execução são geralmente elevados e de retorno quase sempre de médio a longo prazos. Tal situação, se não inviabiliza num primeiro momento quaisquer benfeitorias, torna-as altamente dispendiosas, principalmente para os pequenos produtores rurais.

Em face disto, o uso de tecnologias apropriadas em construções rurais que levem à racionalização dos recursos disponíveis, à diminuição dos custos dos processos construtivos e ao melhor aproveitamento da mão-de-obra local, deve ser considerado.

A terra crua, por ser um material de grande disponibilidade e baixo custo, vem se mostrando como uma excelente alternativa técnica e econômica para uso em construções rurais. Os solos que não possuem as características desejadas para um determinado tipo de construção podem ser melhorados acrescentando-se a eles um ou mais estabilizadores.

Modernamente se adota a prática de estabilizar solos com aditivos químicos, tais como o cimento, a cal, a borra de carbureto, cinzas volantes, escórias de alto-forno e materiais pozolânicos em geral, com a finalidade de se obter, entre outros, tijolos e blocos, não apenas mais resistentes, mas, também, de maior estabilidade volumétrica, maior durabilidade e menores permeabilidade e compressibilidade.

Tais características, desejáveis sob o ponto-de-vista do comportamento mecânico de tijolos e blocos, não devem ser as únicas a serem preconizadas. Devem ser também conhecidas as propriedades termofísicas relacionadas ao conforto térmico. O conhecimento dessas informações é imprescindível ao planejamento de instalações funcionais do ponto de vista estrutural e ocupacional.

A avaliação do grau de estabilização de misturas de solo e de solos adicionados de aditivos, é feita por meio de ensaios físico-mecânicos, tais como, ensaios de compressão simples, de tração na compressão diametral, de capacidade de suporte, de módulo de resiliência, de durabilidade e outros. Tais ensaios são conhecidos como ensaios destrutivos. Entretanto, algumas caracterizações podem ser realizadas por intermédio de ensaios não-destrutivos. Para tijolos e blocos de solo estabilizado, o método do ultra-som pode ser útil para a avaliação da resistência mecânica, do módulo de elasticidade dinâmico, para o acompanhamento da evolução do processo de pega, bem como para a detecção de patologias na alvenaria (ALMEIDA, 1999).

De acordo com ADAM e JONES (1995), durante os últimos 30 anos, intensivas pesquisas foram desenvolvidas buscando a melhoria de materiais de construção baseados em terra. Estes trabalhos, em sua grande maioria, tiveram como objetivo principal o incremento da massa específica aparente seca do solo com vistas ao aumento de sua estabilidade, resistência, durabilidade e melhoria de seu comportamento sob a ação da água. Todavia, poucas informações sobre as características termofísicas de tijolos de terra crua estabilizados quimicamente vêm sendo produzidas pelos pesquisadores.

As propriedades termofísicas dos materiais de construção e dos elementos estruturais podem ser determinadas por meio de ensaios de condutibilidade e resistência térmica. Os métodos mais utilizados são o do fio quente, o da placa quente protegida, e o do fluxímetro.

Assim, da mesma forma que se pode estabelecer relações entre os fatores velocidade de propagação da onda ultra-sônica e resistência à compressão simples, a condutibilidade térmica e a massa específica aparente seca de um material podem guardar estreitas relações.

É dentro deste contexto que se situa o presente trabalho que propõe recomendar parâmetros que combinem critérios qualitativos e quantitativos para a avaliação da qualidade de tijolos prensados de terra crua por meio da análise de seu desempenho mecânico e termofísico.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

- pesquisar o efeito da adição ao solo de alguns aditivos químicos, notadamente conhecidos como estabilizantes de solo e, com a mistura, moldar corpos-de-prova, tijolos e mini-painéis que tiveram suas características físico-mecânicas e propriedades termofísicas determinadas em laboratório e seu comportamento tecnicamente avaliado.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- determinar as características físicas e mecânicas de misturas de solo e aditivos, buscando identificar aquelas combinações que melhores resultados apresentem em termos de estabilização química;
- experimentar diferentes doses de aditivos, tempos de cura e tratamentos com aditivos químicos, visando à obtenção de materiais solo-aditivo mais resistentes e duráveis;
- confeccionar tijolos moldados com misturas de solo e aditivos químicos e determinar suas características de resistência mecânica e absorção de água, verificando seu enquadramento dentro dos critérios de aceitação definidos pelas normas vigentes;
- confeccionar mini-painéis de tijolos feitos com misturas de solo e aditivos químicos e determinar suas características de resistência mecânica;
- confeccionar tijolos moldados a partir de misturas de solo e aditivos químicos e determinar suas principais propriedades termofísicas;
- realizar ensaios não-destrutivos através do método acústico do ultra-som juntamente ao de compressão simples e estudar as relações entre a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e as características mecânicas dos corpos-de-prova, tijolos e mini-painéis estudados;
- experimentar diferentes doses de aditivos e tempos de cura e sua influência sobre a resistência à compressão simples e a velocidade de propagação da onda ultra-sônica;

- definir e recomendar equações que expressem a resistência à compressão de corpos-de-prova, de solo estabilizado em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para as diferentes misturas solo-aditivo estudadas;
- recomendar parâmetros que combinem critérios qualitativos e quantitativos para a avaliação da qualidade de tijolos prensados de terra crua;
- proceder a micro-caracterização das misturas de solo estabilizado e relacionar os resultados obtidos com seu desempenho mecânico;
- definir e recomendar, para fins de fabricação de tijolos prensados não queimados, o tratamento mais adequado em termos de tipo de solo, dose empregada, idade de cura, resistência à compressão simples, capacidade de absorção de água, e propriedades termofísicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ADITIVOS QUÍMICOS ESTABILIZADORES DE SOLO

3.1.1. SILICATO DE SÓDIO

O silicato de sódio (Na_2SiO_3) é um composto químico cujo processo manufatureiro consiste, essencialmente, na fusão conjunta de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e areia, devidamente dosados, sendo que o cristal obtido é, posteriormente, dissolvido em água. Os tipos especiais de solução são obtidos pela adição de soda cáustica ou sílica, a fim de se conseguir a proporção requerida de sílica para álcali, e evaporando a solução para se obter a concentração desejada. Portanto, além de variarem na relação sílica : álcali, os silicatos de sódio variam no conteúdo de água e tamanho da partícula, dependendo da finalidade proposta.

Já de longa data o silicato de sódio tem sido usado para melhorar a qualidade de materiais de construção, principalmente como agente endurecedor de agregados artificiais obtidos pela mistura de soluções de silicato de sódio com soluções de compostos de cálcio, ou como agente deliquescente para o assentamento de poeira em leitos de estradas de rodagem de base granular.

Vários autores, citados por RUFF e DAVIDSON (1961), relataram que o silicato de sódio é usado na estabilização de solos principalmente porque ele reage com os sais solúveis de cálcio em soluções aquosas para formar silicatos de cálcio gelatinosos insolúveis. Os silicatos de cálcio hidratados são agentes cimentantes, e o silicato de cálcio gelatinoso melhora a estabilidade do solo preenchendo seus vazios e expulsando, conseqüentemente, a água do solo. O excesso de água no solo resulta em perda de sua resistência e redução da sua estabilidade.

À medida que ocorre a formação do gel de silicato de sódio, o mesmo começa a absorver água e a se hidratar, endurecendo-se e alterando a aparência do solo cujas partículas são aglutinadas, mudando, assim, a granulometria da mistura e aumentando sua resistência à compactação; isto afeta não apenas a umidade ótima de compactação como também a própria massa específica aparente seca máxima. Uma vez que a energia de compactação é mantida

constante, no ensaio de compactação, um aumento na resistência do solo à compactação provocará um decréscimo na massa específica aparente seca máxima.

RUFF e DAVIDSON (1961) pesquisaram a estabilização de um solo argiloso montmorilonítico, A₇₋₆₍₁₁₎, contendo 39,5% de argila e 27,6% de silte, e cujos limites de liquidez e de plasticidade eram, respectivamente, 39,4% e 16,5%, adicionando a ele 6% de cal cálcica hidratada e 5 tipos diferentes de silicato de sódio em pó, em diferentes dosagens. Decorridos 15 minutos ou 5 horas após a mistura, os autores moldaram corpos-de-prova que foram submetidos à cura de 7 dias em câmara úmida, à temperatura de 24 °C e umidade relativa de 95% ou superior e a 1 dia de imersão em água destilada, antes de serem rompidos à compressão simples.

Os dados obtidos indicaram que os melhores resultados foram alcançados com a utilização do sesquisilicato pentahidratado de sódio (Na₃HSiO₄.5H₂O), de relação molecular Na₂O : SiO₂ igual a 3 : 2, contendo 38,1% de H₂O, 36,7% de Na₂O e 24,2% de SiO₂, adicionado à razão de 5,3%, em peso.

Com este tipo de silicato de sódio, os autores realizaram novos ensaios visando à determinação da melhor combinação de cal cálcica hidratada e silicato de sódio, adicionados ao solo, experimentando teores variáveis de cal e de silicato de sódio. Os resultados são apresentados na **Tabela 1**. Os corpos-de-prova foram moldados depois de decorridas 2 horas a partir da mistura dos componentes, curados em câmara úmida durante 7 dias e imersos em água durante 24 horas, imediatamente antes do rompimento.

Baseados nestes resultados, RUFF e DAVIDSON (1961) concluíram que a combinação de cal e silicato de sódio que proporcionou a máxima resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal-silicato foi 6% de cal mais 4% de silicato de sódio, em peso. Os autores alertaram para o fato de que, em condições de campo, o uso de solo estabilizado com misturas de cal e silicato de sódio exige controle rigoroso do teor de umidade e do tempo decorrido entre a mistura e a compactação, a fim de se alcançar o resultado desejado.

Tabela 1. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal-silicato de sódio, em MPa.

Composição (%)		Resistência à compressão simples	Teor de umidade de moldagem
Cal	Silicato de sódio	(MPa)	(%)
0	0	0	-
0	2	0	-
0	4	0	-
0	6	0	-
2	0	0,90	1,80
2	2	0,84	1,93
2	4	0,70	2,02
2	6	0,53	1,62
4	0	0,90	1,88
4	2	1,44	1,90
4	4	1,63	2,11
4	6	1,15	2,03
6	0	0,74	1,86
6	2	1,70	2,09
6	4	2,00	2,00
6	6	1,55	2,15

Fonte: RUFF e DAVIDSON (1961).

O efeito aglomerativo do silicato de sódio não é significativo quando o mesmo é aplicado em doses pequenas, de 0,1% ou menos (SINGH, 1955). Quando aplicado ao solo em altas concentrações, o silicato de sódio desenvolve forte alcalinidade no solo (JAMISON, 1954).

Já de longa data se pesquisa, também, o uso do silicato de sódio como aditivo do solo-cimento, visando melhorar suas características de resistência. Assim é que HANDY *et al.* (1959) aspergiram uma solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio em corpos-de-prova de solo-cimento e observaram um aumento na resistência dos mesmos, de sorte que o silicato de sódio foi mais eficaz com o solo barro-arenoso estudado, enquanto que o hidróxido de sódio foi o melhor para o solo barro-siltoso.

O tratamento do solo com álcalis fortes favorece as reações do quartzo com estabilizadores alcalinos, tais como a cal ou o cimento Portland, podendo a resistência inicial ser elevada em 15 % a 400%.

MATEOS *et al.* (1963), estudando os efeitos de aditivos químicos sobre a resistência das misturas de solo-cimento, verificaram que, em geral, a resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cimento aumentou diretamente com o teor de cada aditivo experimentado; contudo, o aditivo químico só é eficiente até um certo teor de cimento, acima do qual qualquer acréscimo na resistência é atribuído, primeiramente, ao teor mais elevado de cimento e não, propriamente, à reação do aditivo com os constituintes do solo.

Os estudos sobre os efeitos da relação sílica : álcali do silicato de sódio, quando usado como aditivo de solo-cimento, indicaram que os silicatos de mais baixa relação sílica : álcali tendem, de acordo com MOH *et al.* (1962), a produzir maiores resistências iniciais, porém, menores resistências finais, enquanto que silicatos de mais alta relação sílica : álcali retardam o processo de cimentação; conseqüentemente, há uma relação sílica : álcali ótima que concorre para a maior eficiência do silicato de sódio, como aditivo químico. Por outro lado, a resistência máxima depende da quantidade total de material cimentante o qual, por sua vez, é uma função do teor total de sílica e cálcio disponíveis. Deste modo, maiores resistências são alcançadas utilizando-se silicatos de mais alta relação sílica : álcali; no entanto, a resistência máxima depende, também, do total de cálcio disponível o qual, por sua vez, depende do teor de cimento. Se a quantidade de silicato adicionada for muito alta, não haverá cálcio suficiente para precipitá-lo ou formar silicato de cálcio hidratado e, conseqüentemente, menores resistências serão esperadas. MOH *et al.* (1962) concluíram que a relação sílica : álcali ótima tenderá a um maior valor se o teor de cimento na mistura de solo e cimento for aumentado.

FREIRE (1976), trabalhando com dois tipos de solo, um argiloso A₇₋₆₍₉₎, com 50,8% de argila, e outro arenoso A₂₋₄₍₀₎, com 17,6% de argila, adicionou a eles silicato de sódio, de relação sílica : álcali igual a 3,2 : 1, nos teores de 0,6% e 1,2%, em relação ao peso do solo seco. Logo após a aplicação, as misturas foram deixadas em repouso, em condições ambientais, pelo período de 1 dia, antes de serem ensaiadas em laboratório e moldados os corpos-de-prova de solo-cimento, de acordo com as normas vigentes. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida até 4 horas antes de serem submetidos ao ensaio de compressão simples, quando então foram removidos e colocados totalmente imersos em água até o momento da ruptura. Os corpos-de-prova de solo-cimento adicionado de silicato de sódio foram confeccionados com dois teores de cimento e rompidos com as idades de 7 e 28 dias. Os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cimento adicionado de silicato de sódio, em MPa.

Idade (dias)	Teor de cimento (%)	Solo argiloso		
		Testemunha	0,6% SS	1,2% SS
7	12 ^(*) – 14 ^(**)	0,81	0,99	1,40
7	14 ^(*) – 16 ^(**)	0,99	1,18	1,54
28	12 ^(*) – 14 ^(**)	1,09	1,40	1,59
28	14 ^(*) – 16 ^(**)	1,45	1,55	1,85
Idade (dias)	Teor de cimento (%)	Solo arenoso		
		Testemunha	0,6% de SS	1,2% de SS
7	7	0,23	0,38	0,57
7	9	0,28	0,63	0,79
28	7	0,32	0,70	1,07
28	9	0,35	0,85	1,30

^(*) para corpos-de-prova de solo argiloso moldados com 0,6% de silicato de sódio

^(**) para corpos-de-prova de solo argiloso moldados com 1,2% de silicato de sódio

Fonte: FREIRE (1976).

Em todos os casos, e para ambos os solos, a adição de silicato de sódio ao solo-cimento levou a acréscimos significativos na resistência à compressão simples, sendo os maiores valores obtidos para a dose maior de silicato de sódio (1,2%) e para a idade de 28 dias. Em termos absolutos, o solo-cimento com solo argiloso respondeu melhor ao tratamento do que o solo-cimento com solo arenoso.

3.1.2. CAL

A cal é o produto resultante da calcinação, em altas temperaturas, de rochas carbonatadas naturais. Seu uso como aglomerante de solos é conhecido, desde os tempos antigos, pelos gregos, etruscos, chineses e, posteriormente, pelos romanos.

O cálcio, principal componente da cal, ataca quimicamente parte das argilas e até mesmo o próprio quartzo, resultando na formação de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, de notável capacidade pozolânica (GUIMARÃES, 1992).

No mecanismo das reações envolvidas entre a cal e os constituintes do solo, as primeiras reações são as de floculação/aglomeração, seguidas das trocas iônicas entre as argilas e a cal. Tais reações resultam no aumento da capacidade de suporte do solo, na redução da expansão/contração, na melhoria da plasticidade e da sensibilidade à água e, posteriormente, na formação de compostos químicos sílico-aluminosos pelo ataque da cal aos minerais argilosos e ao quartzo (GUIMARÃES, 1995). Simultaneamente ocorrem os fenômenos de carbonatação, com o ataque do anidrido carbônico, presente no ar e nas águas de infiltração, aos hidroxidados da cal.

O desempenho da cal como agente estabilizador do solo, principalmente como aglomerante, pode ser melhorado com o acréscimo de aditivos, tais como o cimento Portland, cinzas volantes, minerais (como os diatomitos, o trípoli e as cinzas vulcânicas) e resinas e compostos orgânicos (GUIMARÃES, 1992). O cimento Portland é utilizado em proporções de 6 % a 8% para estabilizar solos areno-argilosos cuja granulometria foi previamente melhorada com adição de 2 % a 3% de cal ao solo. As cinzas volantes, de natureza pozolânica, são adicionadas em teores muito variáveis, sendo freqüentes as proporções de 1 parte de cinza para 4 a 9 partes de cal, em peso. Escórias de alto-forno, cinzas vulcânicas, trípoli e diatomitos, são materiais pozolânicos que têm sido experimentados com sucesso em adição à cal. Resinas e compostos orgânicos são produtos líquidos ou pulverulentos dotados de ação impermeabilizante/aglutinante, conhecidos comercialmente como Quimikal, DS-328, Dinacal, Stábile, Durasolo, etc.

Três solos, um Latossolo Vermelho Amarelo, um Podzólico Vermelho Amarelo e um Latossolo Vermelho Escuro, respectivamente designados por A, B e C, contendo o solo A 26% de argila, o solo B 31% de argila e o solo C 52% de argila, foram estudados por ALCÂNTARA *et al.* (1995), que a eles adicionaram teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de cal cálcica, tomados em relação ao peso do solo seco; com a mistura, os autores moldaram corpos-de-prova cilíndricos que, após cura em câmara úmida, foram submetidos ao ensaio de compressão simples. Durante a cura, os corpos-de-prova foram mantidos ensacados em saco plástico, para evitar a carbonatação dos mesmos. Os resultados obtidos estão registrados na **Tabela 3.**

Tabela 3. Resistência à compressão simples do solo-cal, em MPa.

Dose de cal (%)	Solo	Idade de rompimento (em dias)					
		3	7	28	90	120	180
2	A	0,24	0,24	0,48	0,22	0,42	0,60
	B	0,64	1,00	1,82	1,35	1,60	1,09
	C	0,60	0,60	0,70	0,46	0,43	0,62
4	A	0,23	0,28	0,54	1,28	2,35	2,70
	B	0,77	1,10	3,20	3,63	3,78	4,19
	C	0,69	0,60	1,72	1,37	0,95	1,37
6	A	0,31	0,31	0,64	1,62	2,38	3,50
	B	0,74	1,21	3,63	5,83	6,77	7,14
	C	0,68	0,74	1,57	2,08	2,32	2,39
8	A	0,34	0,39	0,74	1,21	2,83	3,60
	B	0,72	1,23	3,35	5,35	8,50	7,90
	C	0,75	0,71	1,65	2,67	3,11	3,71
10	A	0,31	0,37	0,56	1,19	2,88	4,57
	B	0,88	1,08	3,54	5,31	8,06	8,63
	C	0,72	0,76	1,75	2,55	2,75	3,71

Fonte: ALCÂNTARA *et al.* (1995).

3.1.3. CIMENTO

O cimento Portland é uma substância alcalina, composta, em sua maior parte, de silicatos e aluminatos de cálcio que, por hidrólise, dão origem a compostos cristalinos hidratados e gel. Os principais compostos, silicatos e aluminatos, liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais que se formam apresentam formas alongadas, prismáticas, ou formas de agulhas de monossilicatos de cálcio hidratados e de aluminatos hidratados; esses cristais aciculares acabam se entrelaçando à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos. O gel do cimento desenvolve-se espontaneamente sobre a superfície mineral,

ligando-se aos íons de oxigênio expostos, crescendo por polimerização dos grupos SiO_4 e incorporando íons de cálcio livre à superestrutura formada pelos grupamentos de SiO_4 (TAYLOR, 1992).

O cimento, como agente estabilizador do solo, teve sua história iniciada lá pelos idos de 1916, nos Estados Unidos da América do Norte; vinte anos depois, no Brasil fundou-se a Associação Brasileira de Cimento Portland, com um dos objetivos de regulamentar, pesquisar e fomentar o uso e aplicação do solo-cimento.

Ao se formularem quaisquer mecanismos de reação do solo-cimento provocando agregação, CHADDA (1970) observou que o efeito do cálcio livre, liberado durante o processo de endurecimento do cimento, deve ser levado em conta. Para este autor, uma das mais importantes características do cimento é que suas partículas comportam-se como eletricamente carregadas, aumentando a condutibilidade elétrica da mistura de solo-cimento; a presença de cargas elétricas nas partículas de cimento provoca uma atração entre o cimento e as partículas de argila, produzindo agregação. A aglomeração de partículas de argila é, posteriormente, incrementada pela reação com o cálcio livre liberado durante o processo de hidratação do cimento.

HANDY (1958) admitiu que a cimentação resultante da adição de cimento Portland ao solo úmido, pode ser atribuída à combinação de (1) ligações mecânicas do cimento com as superfícies minerais imperfeitas, e (2) ligações químicas estabelecidas entre o cimento e as superfícies minerais, sendo este processo o mais importante no caso dos solos finamente divididos, por causa da maior superfície específica envolvida. Este autor verificou, também, que, na formação do solo-cimento, as argilas participam intimamente dos fenômenos químicos.

Embora quase todos os solos possam ser estabilizados com cimento, somente aqueles que necessitam de teores de cimento relativamente baixos são considerados solos economicamente empregáveis, tendo a ABCP (1972) definido suas características. O acréscimo dos teores de silte e argila bem como a uniformidade da granulometria da areia acarretam uma elevação no teor de cimento.

As partículas de cimento envolvem, fisicamente, os grânulos do solo formando agregados que aumentam de tamanho à medida que se processam a hidratação e cristalização

do cimento. FELT (1955) e CHADDA (1970) chegaram a verificar que o teor de argila de dois solos argilosos ensaiados decresce com o aumento do teor de cimento.

Mesmo solos misturados com pequenas quantidades de cimento apresentam características de suporte muito superiores às de outros materiais empregados como base de pavimentos flexíveis; de acordo com PINTO (1960), isto se deve à coesão química criada pelo cimento, cujo efeito cessa se o material for desagregado.

Solos tratados com cimento desenvolvem valores de coesão e atrito interno muito superiores àqueles obtidos a partir do solo original. No entanto, a estabilidade do solo-cimento é conseguida principalmente à custa da hidratação do cimento e não pela coesão e atrito interno dos componentes; daí poder-se utilizar, praticamente, todos os solos e combinações de solos para fins de solo-cimento.

A escolha do teor de cimento mínimo capaz de assegurar a estabilidade necessária e de garantir à mistura a permanência de suas características, é, antes de tudo, uma imposição do critério de economia.

Os solos finos necessitam de mais cimento que os solos granulares, pelo fato de apresentarem maior superfície específica. Todavia, conforme asseguraram ARMAN e SAIFAN (1967), um aumento no teor de cimento acima do ótimo não melhora, necessariamente, a qualidade do solo-cimento, pois, se a quantidade adequada de cimento for misturada com o solo, toda a área superficial dos agregados será coberta pelo cimento.

Estudando os efeitos de aditivos químicos sobre a estabilidade de taludes e qualidade do material formado, FREIRE (1981) concluiu que a adição de 4% e 6% de cimento Portland, em peso, ao solo areno-argiloso $A_{6(4)}$ estudado, reduziu seu teor de argila e aumentou o teor de silte, aumentando também sua capacidade de suporte (CBR) e sua resistência à compressão simples, assim como sua resistência ao cisalhamento, em termos de valores totais e efetivos de coesão e ângulo de atrito interno.

3.2. TIJOLOS PRENSADOS OU TIJOLOS NÃO QUEIMADOS

3.2.1. TIJOLOS DE TERRA CRUA

A terra é um dos materiais mais abundantes no planeta, de tal sorte que sua utilização, como material de construção, remonta aos tempos mais primitivos.

As construções podem ser feitas completa ou parcialmente de terra, dependendo fundamentalmente da sua localização, do clima, dos recursos disponíveis, do custo e do uso que se fará das mesmas, podendo as paredes ser erguidas de forma monolítica ou não, neste último caso utilizando-se elementos construtivos na forma de tijolos, blocos ou painéis.

O precursor dos tijolos prensados de terra foi o tijolo moldado com barro conhecido como tijolo de adobe, que vem sendo usado há alguns milhares de anos. A palavra “adobe”, de acordo com ROGERS e SMALLEY (1995), vem do árabe (“At-tub” = tijolo de barro).

Pode-se construir blocos resistentes e estáveis dimensionalmente, compactando, em condição ligeiramente úmida, um solo de boa granulometria, com um conteúdo de argila entre 10 % e 25% em peso.

As vantagens de se construir com blocos de solo estabilizado, comparadas à outras técnicas, são:

- maior resistência ao contato com a água;
- maior resistência à compressão;
- possibilidade de transporte manual imediatamente após sua fabricação;
- requer pouco espaço para secagem e armazenagem, o que permite empilhamento imediato logo após sua fabricação;
- redução de custo, materiais e energia;
- menor custo de produção para volumes equivalentes de tijolos e blocos de concreto.

Os solos mais apropriados para produzir blocos estabilizados devem ter um teor de areia de até 75% e um mínimo de 10% de argila, ambas as porcentagens referidas em peso.

Para a preparação do solo é necessário passá-lo pela peneira de 5 mm. A mistura deve ser aplicada em moldes e os aditivos incorporados a seco. Se o aditivo for usado como estabilizante, a cura pode ser completada em apenas 5 dias.

A prática de se misturar barro com fibras vegetais para depois moldá-lo na forma de tijolos ou blocos, é uma das muitas técnicas de construção com terra conhecidas pelo homem desde a antiguidade.

Alvenarias construídas com tijolos e blocos de adobe ainda hoje permanecem erguidas, 4.000 anos após terem sido edificadas. Tijolos feitos pelos romanos, há 2.000 anos atrás, continuam em uso até os dias de hoje. Adobes datando do século XV foram encontrados em Picardie, França, em perfeitas condições de conservação, comprovando assim a durabilidade do material, desde que mantidos ao abrigo da água.

Podendo ser usada como “argamassa” de consistência plástica ou compactada para formar tijolos ou blocos de adobe, a terra é ainda hoje empregada na construção de fundações, paredes, pisos e tetos.

Conhecido desde o período neolítico, o adobe, tijolo seco ao sol e empregado cru, segundo BUYLE-BODIN *et al.* (1990), é confeccionado com um teor de água de amassamento elevado, da ordem de 20 % a 40%, e com uma porcentagem em volume de palha usualmente da ordem de 50% em relação à quantidade de terra úmida, o que resulta em aproximadamente 3% de fibras em peso.

De acordo com Calame, *apud* BUYLE-BODIN *et al.* (1990), o adobe tradicional pode apresentar as seguintes características:

- 1/20 da resistência à compressão e 1/5 da resistência à tração, em média, de um concreto dosado à razão de 300 kg de cimento por m³;
- módulo de Young entre 200 MPa e 300 MPa;
- condutibilidade térmica ao redor de 0,7 W/mK;
- fissuração e retração excessivas;
- desprendimento do revestimento à base de cimento;
- apodrecimento das fibras vegetais.

NEVES (1995) relatou que, na fabricação de adobes, a palha deve ser sempre adicionada em volumes apropriados aos diferentes tipos de solo. A técnica de fabricação é totalmente artesanal, com as dimensões do elemento variando em torno de 10 x 20 x 40 cm³, conforme as exigências de conforto, qualidade da construção e tradição cultural de cada região.

O U.S.D.A. (1965), Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte, divulgou uma técnica de fabricação de adobes feitos com solo barro-argiloso, palha e água, e blocos de terra estabilizada feitos com solo barro-argilo-arenoso, cimento Portland e água, ou solo barro-argilo-arenoso, emulsão betuminosa e água.

Os blocos, de 10 x 15 x 30 cm³, apresentaram as seguintes vantagens: (1) a maioria dos materiais utilizados para a sua confecção consistia de material disponível a baixo ou mesmo nenhum custo; (2) as paredes ficaram fortes, duráveis e resistentes ao fogo; (3) as paredes maciças mantinham uma temperatura confortável no interior da construção. As seguintes desvantagens estavam associadas a estes materiais: (1) deterioravam-se sob contato prolongado com a água e (2) exigiam fundações reforçadas. Paredes portantes construídas com blocos de adobe devem ter espessura mínima de 30 cm e, em se tratando de moradias, uma altura não superior a oito vezes sua espessura; em alguns casos, essa relação pode chegar a doze vezes. Paredes de blocos de terra não revestidas duram de 25 a 40 anos, em clima árido, se o topo e a base forem protegidos contra a umidade.

LAVINSKY *et al.* (1991) pesquisaram a fabricação de adobes manuais (moldagem em fôrma, sem prensagem), utilizando três tipos diferentes de solo argiloso, com teores de silte + argila variando de 60% a 83%, os quais, após correção granulométrica com areia grossa, passaram a apresentar teores variáveis de silte + argila de 54% a 60%. Os adobes foram moldados em fôrmas de madeira, sem fundo, com as dimensões 23 x 11 x 7 cm³ e 23 x 11 x 10 cm³. Após a adição de água (aproximadamente 40% do volume do solo), o barro era amassado com os pés descalços e, em seguida, lançado nas fôrmas. Os adobes eram secos ao sol (com proteção de PVC) e à sombra, durante 27 dias, e em secador de cacau, durante 3 dias, após 20 dias de secagem à sombra. Após terem sido os tijolos submetidos a ensaios de compressão simples, escovação e absorção de água, os resultados (**Tabela 4**) indicaram que as diferentes condições de secagem não tiveram efeito significativo sobre a resistência mecânica dos adobes, salvo no caso do solo I (menos arenoso), para o qual a secagem em secador de cacau permitiu alcançar maior valor de resistência à compressão simples. O solo III, por sua vez, apresentou o menor valor de perda de material por escovação, nos ensaios de durabilidade, indicando menor grau de erodibilidade que os demais. Por outro lado, os blocos de adobe, sem exceção, não resistiram ao ensaio de absorção de água tal como concebido para

tijolos de solo-cimento (NBR 08492). Os valores de resistência à compressão simples foram, em geral, muito baixos, variando de 0,50 MPa a 0,56 MPa.

Tabela 4. Resistência à compressão de blocos de adobe, em MPa, e perda por escovação no ensaio de durabilidade.

Tipo de material	Condições de secagem				Perda por escovação (%)*
	Ao sol	À sombra	Em secador de cacau	Média	
Solo I	0,45	0,51	0,52	0,50	2,8
Solo II	0,59	0,53	0,56	0,56	2,3
Solo III	0,53	0,55	0,56	0,55	1,2
Solo-cimento (1:20)	-	-	-	0,39	8,6

*10 escovações da face com 7 x 23 cm², com escova de pêlos de aço.

Fonte: LAVINSKY *et al.* (1991).

SILVEIRA (1995) chamou a atenção para o fato de que a produção de tijolos em prensas permite perfeita coordenação modular e alto desempenho técnico. Para este autor, qualquer tentativa de industrialização deverá ser feita com perfeito controle de qualidade e alta tecnologia; caso contrário, a sobrevivência industrial no atual mercado competitivo estará seriamente comprometida.

O Centro Internacional de Construção com Terra (CRATerre), de Grenoble, França, recomenda que, em termos de granulometria do solo, a faixa ideal para a fabricação de tijolos prensados é aquela que compreende de 0% a 7% de pedregulho, 40% a 70% de areia, 20% a 40% de silte e 10% a 30% de argila (BARBOSA e MATTONE, 1996).

BUYLE-BODIN *et al.* (1990) afirmaram, ainda, que adobes modernos, produzidos industrialmente, precisam ser estudados sob o ponto de vista científico, técnico e econômico, e devem ser pesquisados quanto às seguintes características: proteção contra as intempéries, elasticidade, permeabilidade à água, resistência à abrasão, resistência a choques térmicos, aderência a suportes, e estética. É necessário, previamente à sua confecção, determinar o teor de argila do solo; definir a quantidade de areia a se adicionar ao solo para corrigir o teor de argila, que não deve ser superior a 18%; estudar a influência do diâmetro, comprimento e natureza das fibras sobre o produto resultante; pesquisar a eventual e às vezes necessária estabilização com produtos adequados.

Estes mesmos autores mencionados pesquisaram técnicas modernas de fabricação de adobes e concluíram que:

- a adição de palha parece ter alguma influência sobre a resistência à compressão, influência esta menos benéfica à medida que se adiciona cimento como aglomerante ao solo;
- sem a adição de palha, o comportamento do adobe à ruptura é do tipo frágil e, com palha, distintamente mais dúctil;
- a resistência à compressão é um parâmetro secundário em comparação com a elasticidade e permeabilidade ao ar;
- os imperativos elasticidade e permeabilidade ao ar excluem o uso de aglomerantes hidráulicos como estabilizadores de adobes;
- a durabilidade do produto depende quase que integralmente do revestimento superficial e da proteção contra a ação da água de chuva.

FIORAVANTI (1984) reportou que o tijolo prensado, também chamado de não cozido, feito na própria obra, utilizando-se de uma prensa manual e empregando-se qualquer tipo de solo (salvo a terra preta vegetal) estabilizado com 3% a 4% de cimento e cal, pode ser usado, dois dias depois da prensagem, em paredes, tetos e outros elementos construtivos. Onze tipos diferentes de tijolos prensados puderam ser feitos a partir de uma fôrma básica, mudando-se apenas as peças do molde; tais tijolos, usados no erguimento de paredes, são colados uns nos outros com pingos de uma cola branca de cerâmica, ao invés de assentados com a tradicional argamassa de cimento, cal e areia. A técnica construtiva empregada, além de simples, é barata, permitindo a construção de uma casa pela metade do preço de uma tradicional.

TIMOTEO DE SOUSA *et al.* (1996) construíram cinco pequenos painéis, de aproximadamente 1 m² de área lateral, confeccionados com tijolos feitos com: (1) solo 1, natural, sem adições, contendo 34,5% de silte + argila; (2) solo 1 adicionado de 0,5% de fibras de sisal; (3) solo 1 melhorado com 4% de cimento Portland; (4) solo 1 adicionado de cal, na proporção de 11:1 de solo:cal; (5) solo 2, contendo 29% de silte + argila, adicionado de 5% de cimento Portland. As dimensões dos tijolos eram de 7,5 x 15 x 30 cm³ (para os tijolos confeccionados com o solo 1) e de 9,5 x 14 x 28 cm³ (para os tijolos confeccionados com o solo 2). Rompidos à compressão axial, os dois painéis construídos com tijolos de solo melhorado com cimento apresentaram resistências de 1,26 MPa e 2,32 MPa, contra

resistências de 1,26 MPa, 1,05, MPa e 1,04 MPa para os painéis construídos com tijolos de solo-fibra, de solo-cal e de solo natural, respectivamente.

Infelizmente, a utilização do adobe no Brasil, principalmente em regiões pobres como o Vale do São Francisco e o Vale do Jequitinhonha, se dá, de acordo com ALVARENGA (1995), de forma empírica, sem controle dos materiais, sendo a mistura feita sem nenhuma dosagem. Eventualmente se utiliza o capim gordura e estrume fresco de gado na tentativa de melhorar a qualidade do material.

3.2.2. TIJOLOS DE SOLO-CAL

A estabilização com cal é o método comumente aplicado para solos que contêm uma significativa fração argila. Os resultados da estabilização variam dependendo da natureza dos minerais da argila e são melhores com alta concentração de silicatos de alumínio, sílicas e hidróxido de ferro (NGOWI, 1997).

Solos reativos à cal são aqueles que com ela reagem para produzir ganhos de resistência à compressão simples superiores a 345 kPa; valores inferiores a este indicam que os solos não são reativos. Para o caso de solos vermelhos tropicais, THOMPSON (1967) propôs que a atividade da cal seja tomada como sendo a diferença numérica de resistência à compressão simples do solo-cal estabilizado em relação à do solo natural.

A adição de cal ao solo provoca floculação de suas partículas e, conseqüentemente, alterações nas suas propriedades geotécnicas, as quais, de acordo com PICCHI *et al.* (1987), são as seguintes: aumento do limite de plasticidade e diminuição do limite de liquidez e do índice de plasticidade; achatamento das curvas de compactação, com aumento do teor de umidade ótima e diminuição do peso específico aparente seco máximo, além de aumento da resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica.

As reações de troca de cátions e floculação são quase que instantâneas, tão logo a cal é adicionada a um solo. Por outro lado, essas reações se desenvolvem de forma lenta, fazendo com que a resistência dos tijolos de terra estabilizada com cal se desenvolva ao longo de semanas, meses ou até anos (WEEB, 1992).

Herrin e Mitchell, citados por SVENSON (1981), verificaram também que, tão logo a cal é adicionada ao solo, ocorre floculação e, ao longo do tempo, troca catiônica. As reações que se processam lentamente são as que desenvolvem a ação cimentante da cal, sendo a reação

pozolânica a principal responsável pela cimentação. Os autores afirmaram que a temperatura afeta essa reação, provocando retardamento entre 13 °C e 16 °C, aceleração a temperaturas superiores a essa faixa, e interrupção ao reagir a cal com o dióxido de carbono do ar, carbonatando-se, isto é, produzindo carbonato de cálcio.

No caso particular dos solos argilosos, a adição de cal provoca reações de troca iônica, mudanças das estruturas cristalinas, recarbonatações e, sobretudo, a formação de novos minerais capazes de cimentar as partículas e/ou preencher os espaços intercristalinos (GUIMARÃES, 1985). De imediato, a cal hidratada provoca significativa elevação da alcalinidade do solo, tornando instável alguns dos seus constituintes, permitindo um possível ataque ao silício e ao alumínio dos minerais do solo e a recombinação desses íons com o cálcio, formando compostos estáveis, tais como silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Nessas condições, nova estrutura cristalina aparece, com a ocupação dos espaços vazios existentes entre os agregados, dando sustentação à micro-estrutura da mistura solo-cal compactada.

SVENSON (1981) estudou a estabilização de um solo podzólico vermelho amarelo, textura argilosa (A₂₋₄), com cal nos teores de 0%, 3%, e 5%, sendo os corpos-de-prova curados aos 14, 28 e 90 dias, em três condições de umidade, antes de serem ensaiados. Foram realizados ensaios de granulometria, de compressão simples, de tração na compressão diametral, de CBR, de compressão triaxial de carga repetida, assim como análise mineralógica. Os resultados mostraram que, com relação à massa específica aparente seca máxima, houve um decréscimo do seu valor com o acréscimo do teor de cal, enquanto que, para a umidade ótima, os aumentos foram proporcionais ao acréscimo do teor de cal. Para os valores de resistência à compressão simples, houve um acréscimo com o aumento do teor de cal aplicado, bem como com o tempo de cura, em relação ao solo natural. No entanto, para o teor de 3% de cal, houve uma diminuição de aproximadamente 5%, para os períodos de cura de 14 e 90 dias. No caso específico da resistência à tração na compressão diametral, houve um aumento com a adição da cal, ganho este não significativo com o acréscimo de 3% para 5%, nem com o acréscimo do tempo de cura. No ensaio de resiliência, os corpos-de-prova se romperam sob tensões de aproximadamente 80% da tensão máxima de ruptura, obtida do ensaio de resistência à compressão simples; quanto à tensão confinante, houve uma

diminuição das deformações com o seu acréscimo, sendo que os valores dos módulos resilientes cresceram com o seu aumento.

AFLITOS e FERREIRA (1986) estudaram a utilização de cal e hidróxido de sódio (NaOH) como aditivos na estabilização de solos e suas influências nos parâmetros de plasticidade, compactação e resistência à compressão simples. Para isto, corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos à cura em câmara úmida, sendo acondicionados em sacos plásticos e soterrados em areia úmida durante 27 dias, e imersos em água 24 h antes de serem rompidos. A cal foi misturada diretamente ao solo enquanto que a soda cáustica foi diluída na água de amassamento, empregando-se teores de 1%, 4%, 7% e 10% para a cal e 0,3%; 0,5%; 1,2%; 2,4% e 3,0% para a soda. A adição de cal reduziu consideravelmente o índice de plasticidade da mistura, enquanto que a soda teve comportamento similar ao de um desfloculante. A adição de soda cáustica inicialmente elevou o peso específico, para em seguida reduzi-lo; a umidade ótima comportou-se de forma inversa. A mistura solo-cal-soda apresentou valores de resistência maiores que os obtidos pelas misturas individualmente. Quanto ao ensaio de absorção, o aspecto amolecimento/desagregação foi melhorado após a imersão em água por 24 h. Teores elevados de soda (maiores que 3%) causaram reações exotérmicas e desagregação dos corpos-de-prova.

É marcante a influência da temperatura no processo de endurecimento da mistura solo-cal compactada, estando a taxa de aumento de resistência da mistura relacionada com a temperatura na qual a massa compactada sofre a cura. Quando curada a baixas temperaturas, o aumento na resistência é lento; à temperaturas normais (21,1 °C), a velocidade é maior; e, à altas temperaturas (60 °C), as resistências evoluem rapidamente. Em alguns casos, obteve-se, em 10 dias, a 60 °C, a resistência correspondente a três ou quatro meses de cura, a 21,1 °C, como relatado por LIMA (1981).

METCALF (1963), estudando o efeito de altas temperaturas de cura na resistência à compressão simples de uma argila estabilizada com cal e com cimento, observou que o acréscimo na temperatura de cura elevava a razão de ganho de resistência, de ambas as misturas. Assim, na mesma idade, uma temperatura de cura mais elevada resulta sempre em maior resistência. O autor constatou, também, que baixas temperaturas, alternadas com altas temperaturas, equívalem à cura sob temperatura constante entre os dois extremos.

O efeito da temperatura de cura na resistência à compressão simples de solos estabilizados com cal foi estudado por MENDONÇA *et al.* (1997), para dois tipos de solo: um latossolo (A_{7.5}) e outro saprolítico de gnaiss (A_{7.5}), tratados com 2%, 6% e 10% de cal cálcica e curados à temperaturas de 22,8 °C; 30 °C; 50 °C e 70 °C. Os resultados mostraram que houve ganho substancial de resistência para todas as doses de cal aplicadas aos dois tipos de solo, ficando mais evidente no caso do latossolo; a resistência das misturas mostrou-se crescente com os aumentos do tempo e da temperatura de cura, evidenciando a influência dos parâmetros estudados nas reações pozolânicas.

Os efeitos da aplicação de 2%, 4%, 7% e 10% de cal pozolânica sobre a estabilização de solos vermelhos tropicais, avaliados através dos parâmetros de compactação, de resistência à compressão simples aos 7, 28 e 60 dias, e da superfície específica, foram estudados por AMORIM *et al.* (1996). A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que:

- a cal pozolânica provocou uma diminuição da massa específica aparente seca máxima e um aumento na umidade ótima dos solos estudados;
- a reatividade dos solos vermelhos é manifestada muito lentamente e depende de fatores como o teor de cal e o tempo de cura;
- o uso da superfície específica como índice de atividade pozolânica dos solos estabilizados com cal pozolânica não se mostrou satisfatório;
- não há correlação entre a superfície específica e a resistência à compressão simples dos solos estudados;
- não foi possível obter uma correlação entre a superfície específica e o índice de reatividade de Thompson, para solos vermelhos tropicais tratados com cal.

Pesquisando a fabricação de tijolos de solo-cal, PICCHI *et al.* (1987) tomaram amostras dos horizontes B textural e B latossólico de um solo Terra Roxa Estruturada e as trataram com diversos teores de cal cálcica e dolomítica. Com essas misturas e com o auxílio de uma prensa manual foram confeccionados tijolos, os quais foram submetidos a dois processos diferentes de cura: cura úmida (25 °C e 100% U.R.) e cura térmica (40 °C e 100% U.R.). Os tijolos foram, então, ensaiados em laboratório, e os resultados permitiram aos autores concluir que: (1) nos dois tipos de cura, a cal cálcica manteve resultados superiores; (2) para ambos os tipos de cal, a cura úmida mostrou-se melhor; (3) a resistência do tijolo cresce com o teor de cal, mas apresenta um pico em 10%, para tempo de cura de 28 dias; (4) a

absorção de água diminui ligeiramente com o teor de cal e com curas úmidas e térmicas; (5) a variação dimensional dos tijolos de solo-cal é muito reduzida, significando um bom comportamento do tijolo na alvenaria. Os autores observaram também que, com adição de cal, a umidade ótima de compactação aumenta e a massa específica aparente seca máxima caem; a energia de compactação conseguida com a prensa manual utilizada é menor que a energia normal de Proctor; os óxidos e hidróxidos de cálcio são mais reativos que os de magnésio.

A adição de 10% de cales cálcica e magnesiana a um solo laterítico foi pesquisada por GUIMARÃES (1985), visando a fabricação de tijolos de solo-cal moldados em prensa manual, com um teor de umidade superior à ótima de compactação. Após prensagem, os tijolos foram curados ao abrigo de chuvas intensas por um período de três dias e por mais de sete dias expostos às intempéries, sendo umedecidos ligeiramente uma vez por dia. Painéis de tijolos de solo-cal magnesiana, de 1,4 x 0,45 x 2,1 m³, foram construídos, assentados com argamassa mista de cimento, cal e areia de traço 1:2:9, e revestidos de diferentes formas, a saber: (1) pintura com nata de cimento; (2) pintura com tinta látex; (3) chapisco com argamassa mista de traço 1:1:6; (4) revestimento com argamassa mista de traço 1:2:9. Expostos às intempéries, os painéis se mostraram sem defeitos, quatro anos após sua execução, quer fossem revestidos ou não. Ensaaiados à compressão, os tijolos apresentaram resistências da ordem de 0,87 – 0,94 – 2,07 MPa aos 30 - 120 - 180 dias de idade, respectivamente, para a série cálcica com 10% de cal hidratada, e resistência de 0,69 a 0,18 MPa, para as mesmas idades, para a série magnesiana com 10% de cal hidratada. Pelo fato de os tijolos de solo-cal sofrerem apenas os encargos referentes à coleta do solo, aquisição ou preparo da cal hidratada, mistura, moldagem e cura, o custo do tijolo de solo-cal foi avaliado por GUIMARÃES (1985) como sendo pouco mais que a metade do custo do tijolo cerâmico cozido.

CORRÊA e FELEX (1990) estudaram a adição de cal, nos teores de 3% e 5%, a um latossolo roxo, sendo o material avaliado quanto ao seu comportamento como base e sub-base de pavimento, com espessura de 15 cm, para ambos os casos, e revestimento de 3 cm. A técnica de construção adotada para o solo-cal foi a mesma do solo-cimento. Os corpos-de-prova, moldados durante a fase de construção, apresentaram valores de resistência à compressão simples, aos 7 dias, inferiores a 0,4 MPa e, aos 28 dias, inferiores a 0,7 MPa; a cura dos corpos-de-prova foi por via úmida, sendo os mesmos rompidos após 4 dias de

imersão em água, em ensaios de CBR. As avaliações da pista indicaram, para a base de solo-cal, um comportamento estrutural mais próximo ao de pavimento flexível; os resultados dos ensaios estão indicados na **Tabela 5**.

Tabela 5. Resultados físico-mecânicos obtidos com corpos-de-prova.

Nº de golpes	CBR (%)	Umidade (%)	$\gamma_{\text{máx}}$ (kN/m ³)*
13	32	20,4	16,90
28	57	20,5	17,80
60	70	18,7	18,50

* $\gamma_{\text{máx}}$ = Massa específica aparente seca máxima.

Fonte: CORRÊA e FELEX (1990).

Dentre os critérios de avaliação do material solo-cal para fins de pavimentação, CORRÊA e FELEX (1990) afirmaram ser a resistência à compressão simples a mais utilizada, seguido pelo CBR. Nenhum desses critérios, no entanto, é totalmente satisfatório, não ficando comprovada a eficiência da estabilização do latossolo roxo com cal.

Segundo o jornal de divulgação Cal Virgem Procampo, publicado pela CAMPICAL (1994), a proporção de cal hidratada a ser adicionada ao solo para fins de fabricação de tijolos de solo-cal depende do tipo de solo que será utilizado, recomendando-se que, para solos de cor vermelha roxa, o teor de cal, em relação ao volume de solo, seja igual a 10%; para solos de cor vermelha amarela, 15%; para solos de cor amarela, 20%. Após prensagem dos tijolos, a cura deve ser feita em ambientes protegidos contra o sol e chuvas intensas, durante 3 dias, sendo que, do quarto ao décimo dias, os tijolos de solo-cal podem ficar expostos ao tempo, devendo ser regados pelo menos uma vez ao dia durante o período de cura. A partir do décimo dia, os tijolos de solo-cal já podem ser utilizados em alvenarias, devendo os mesmos ser assentados ou revestidos com argamassa de cimento Portland:cal hidratada:areia de traço 1:2:9, em volume.

3.2.3. TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO E DE SOLO MELHORADO COM CIMENTO

Entendendo a estabilização dos solos com cimento como uma alternativa tecnológica para a habitação popular, dentro de certos limites, ABIKO (1984) ponderou que, *“do ponto de vista da organização social do trabalho, a fabricação deste material pode possibilitar uma integração dos indivíduos em torno da produção, permitindo que os resultados e os produtos permaneçam na comunidade”*.

O processo de fabricação de tijolos de solo-cimento passa pelas fases de destorroamento, peneiramento e secagem do solo; mistura homogênea do solo com o cimento; adição de água em quantidades adequadas; cura à sombra, devendo os tijolos ser regados duas a quatro vezes ao dia, dependendo das condições climáticas.

Por ser diferente do tijolo cerâmico tradicional, o assentamento e o revestimento de tijolos de solo-cimento com argamassas tradicionais devem ser feitos de forma cuidadosa, tendo em vista as diferentes características de absorção de água e de variação dimensional dos tijolos de solo-cimento.

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

- podem ser produzidos com o próprio solo local e no canteiro de obras;
- requerem argamassa de assentamento e de revestimento de espessura mínima e uniforme;
- podem dispensar o uso de revestimento, desde que protegidos da ação direta da água;
- não consomem combustível na fabricação, por dispensarem a queima;
- utilizam, basicamente, mão-de-obra não especializada.

Os solos mais adequados para a fabricação de tijolos de solo-cimento são, segundo a ABCP (1985), os que possuem as seguintes características:

- porcentagem passando na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4): 100%;
- porcentagem passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200): 10 a 50%;
- limite de liquidez: $\leq 45\%$;
- índice de plasticidade: $\leq 18\%$.

A estabilização de solos lateríticos tratados com teores variáveis de 0% a 9% de cimento foi objeto de estudo de VILLAR FILHO *et al.* (1982), que realizaram ensaios de

compactação, de resistência à compressão simples, de resistência à tração na compressão diametral, e de durabilidade por perda de peso. Os testes de resistência à compressão simples indicaram a necessidade de um teor de cimento superior a 9% para se atingir a resistência mínima especificada pelas normas, enquanto que o teor de 5% se mostrou suficiente para estabilizar o solo, de acordo com o ensaio de durabilidade por molhamento e secagem.

Os tijolos de solo-cimento devem ser prensados, curados à sombra durante sete dias, e ensaiados de acordo com a norma NBR 08492 (Tijolo maciço de solo-cimento. Determinação da Resistência à Compressão) da Associação Brasileira de Normas Técnicas, para determinação da resistência à compressão e da absorção de água. As condições específicas para aceitação do material estão registradas na norma NBR 08491 (Tijolo maciço de solo-cimento) que estabelece como valor mínimo, para a média dos valores de resistência à compressão, 2,0 MPa, com idade mínima de 7 dias, sendo que nenhum valor individual deve ser inferior a 1,7 MPa; a média dos valores de absorção de água, por outro lado, não deve ser maior que 20% de seu volume, assim como nenhum valor individual deve ser superior a 22%.

Por sua vez, ASSIS (1995) descreveu a fabricação de blocos de solo-cimento chamados “tijolitos”, com detalhes especiais, de modo a permitir a eliminação de argamassa de assentamento pelo relacionamento dos mesmos, conseguido à custa de encaixes tipo macho e fêmea. Os tijolitos são peças de 11 x 6,2 x 22 cm³ (massa específica aparente seca de 16,9 a 18,6 kN/m³) e de 11 x 10 x 22 cm³ (massa específica aparente seca de 17,5 a 19 kN/m³). Sua resistência à compressão simples é $\geq 1,7$ MPa; a absorção de água é $\leq 17\%$; a abrasão do jateamento de areia é de 0,6 a 0,9 cm³/cm²; a condutibilidade térmica é da ordem de 0,6 a 0,9 W/m.°K; a permeabilidade (k = 20 °C) é de $0,5 \cdot 10^{-5}$ cm/s; as retrações lineares são $3,0 \times 10^{-5}$ mm/mm (mínima, com imersão em água) e $1,2 \times 10^{-3}$ mm/mm (máxima, à temperatura de 35 °C). Utilizando uma prensa manual de fabricação de tijolos de solo-cimento, o autor afirmou que tais prensas não apresentam uma produtividade contínua e economicamente viável, lamentando que *“os fabricantes destes equipamentos vendem verdadeiras fantasias para pesquisadores e empresas públicas e privadas. Como relativamente o custo não é muito alto, muitos caem no conto do fabricante”*.

BARBOSA e MATTONE (1996) desenvolveram estudos visando o aproveitamento de solos locais para a fabricação de tijolos prensados. Para tanto, os autores utilizaram dois solos diferentes contendo, respectivamente, 44,0% e 31,6% de silte + argila, e um terceiro

obtido pela mistura de dois outros solos (35,0% de silte + argila). Experimentando a adição aos solos de doses crescentes de cimento, da ordem de 2%, 4% e 6%, em relação ao peso do solo seco, os autores confeccionaram tijolos moldados com o auxílio de uma prensa manual e, no caso do solo-mistura, com uma prensa mecânica, e concluíram que tal medida permite a obtenção de tijolos de resistência muitíssimo superior àquela necessária para pequenas construções, assegurando, ainda, maior durabilidade.

ROLIM *et al.* (1999) estudaram a resistência à compressão simples do material solo-cimento, através da determinação experimental em corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e painéis. Foram confeccionados tijolos de solo-cimento (5 x 11 x 23 cm³) usando solo arenoso tratado com 8% de cimento Portland. O valor médio obtido para a resistência à compressão simples dos tijolos foi de 2,2 MPa. Esse resultado ficou acima do exigido pela NBR 08491.

3.2.4. TIJOLOS SÍLICO-CALCÁRIOS

Tijolo sílico-calcário é uma unidade de alvenaria composta por uma mistura homogênea e adequadamente proporcionada de cal e areia quartzosa, moldada por prensagem e curada por vapor a alta pressão, e difere do bloco sílico-calcário apenas dimensionalmente (SABBATINI, 1985).

De origem relativamente recente (a primeira patente mundial foi de Van Derburgh, na Inglaterra, em 1866), os tijolos e blocos sílico-calcários são confeccionados com 5% a 9% de cal virgem em pó, em relação à quantidade de areia quartzosa.

O processamento industrial, segundo o autor, inicia-se com a mistura da cal e areia, num pré-misturador, onde em seguida é adicionada a água, sendo a mistura final homogeneizada e transportada até os reatores (silos verticais isolados termicamente e aquecidos por vapor de água). Nestes reatores processa-se a completa hidratação da cal, entre 4 h e 8 h, sendo a argamassa conduzida aos pós-misturadores, onde novamente é homogeneizada. Levada, então, às prensas hidráulicas, os tijolos ou blocos são moldados sob pressão de 10 N/mm² a 45 N/mm², conduzidos à autoclave (vasos cilíndricos horizontais de 25 m a 30 m de comprimento e 2,0 m a 2,5 m de diâmetro, hermeticamente fechados) onde, sob pressão de vapor d'água injetado à razão de 0,8 N/mm² a 1,5 N/mm² (8 atm a 15 atm), se dá a

cura do produto, entre 4 h a 8 h, ocorrendo a formação dos hidrossilicatos de cálcio nos blocos, responsáveis pelo endurecimento e cor branca do produto final.

Ao final, o bloco sílico-calcário nada mais é do que um esqueleto granular de areia cimentado por silicatos de cálcio hidratados, com formatos e dimensões os mais variados, caracterizando-se por apresentar, de acordo com SABBATINI (1985), elevada resistência à compressão, uniformidade nas características dimensionais e grande durabilidade; como desvantagem, o autor destacou sua elevada retração na secagem que se manifesta na forma de fissuras.

As características e propriedades mais importantes de diferentes tipos de tijolos e blocos comercializados na Inglaterra, estão mostradas na **Tabela 6**.

Tabela 6. Principais características e propriedades comparativas de tijolos e blocos.

Propriedades	Tijolos de barro cozidos	Tijolos sílico-calcários	Blocos de concreto adensados	Blocos de concreto aerado	Blocos de concreto leve	Blocos de solo estabilizado
Resistência à compressão na condição úmida (MPa)	1,0 a 6,0	1 a 5,5	7 a 50	2 a 6	2 a 20	0,1 a 4,0
Retração na secagem (%)	0 a 0,02	0,01 a 0,035	0,02 a 0,05	0,05 a 0,10	0,04 a 0,08	0,02 a 0,20
Peso específico aparente (g/cm ³)	1,4 a 2,4	1,6 a 2,1	1,7 a 2,2	0,4 a 0,9	0,6 a 1,6	1,5 a 1,9
Condutibilidade térmica (W/m°C)	0,7 a 1,3	1,1 a 1,6	1,0 a 1,7	0,1 a 0,2	0,15 a 0,7	0,5 a 0,7
Durabilidade sob exposição natural severa	Excelente a muito pobre	Boa a moderada	Boa a pobre	Boa a moderada	Boa a pobre	Boa a muito pobre

Fonte: ILO (1990).

3.2.5. TIJOLOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS

DA FONSECA (1993) estudou a estabilização de solos com adição de cimento e materiais silicosos, notadamente pozolanas do tipo cinza de carvão mineral e cinza de casca de

arroz, visando a produção de tijolos moldados em prensa manual daquelas comumente usadas para confecção de tijolos de solo-cimento. Buscava a autora a redução do teor de cimento (mínimo de 10%) adotado na fabricação de tijolos de solo-cimento nas zonas próximas à cidade de Pelotas, Rio Grande do Sul, pela substituição parcial desse componente por cinza de carvão mineral (resíduo resultante da queima do carvão mineral) e cinza de casca-de-arroz (resíduo resultante da queima da casca de arroz). Trabalhando com um solo arenoso (72% de areia, 24% de silte mais argila e aproximadamente 4% de pedregulho), adicionado de cimento e cinzas, os resultados indicaram que os melhores traços de mistura foram: (Traço I) 50% de cinza de carvão mineral + 40% de solo + 10% de cimento; (Traço II) 25% de cinza de carvão mineral + 25% de cinza de casca de arroz + 40% de solo + 10% de cimento; (Traço III) 40% de cinza de casca de arroz + 50% de solo + 10% de cimento. Com esses traços foram alcançados valores de resistência à compressão simples, aos 28 dias, da ordem de 8,5 MPa, 4,1 MPa, e 5,3 MPa, para os traços I, III e II, respectivamente, muito superiores àqueles obtidos para tijolos de solo-cimento apenas (3,1 MPa). A absorção de água, para todos os traços, esteve sempre abaixo de 20%, valor máximo indicado pela NBR 08491.

Da queima nas caldeiras do bagaço de cana-de-açúcar, para fins de geração de energia nas indústrias sucro-alcooleiras, são produzidas cinzas como material residual. Do total de bagaço queimado, cerca de 2,5% se transformam em cinzas.

CINCOTTO (1983) analisou a atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar e concluiu que ela se comporta como um cimento pozolânico, muito embora a viabilidade de seu uso dependa ainda de outras verificações e novos estudos.

MESA VALENCIANO (1999) pesquisou os efeitos da adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar sobre a resistência à compressão simples e absorção de água de tijolos confeccionados com solo melhorado com cimento.

As cinzas utilizadas foram primeiramente moídas em moinho de bolas e, posteriormente, passadas em peneira nº 100 (# 0,15 mm), antes de serem adicionadas a dois tipos de solo: um arenoso (16% de silte + argila) e outro argiloso (49% de silte + argila), em substituição parcial do cimento Portland CP II-E-32, usado na quantidade de 3%, em relação à massa do solo seco, para melhorar as características de resistência do material formado.

Foram então confeccionados tijolos com misturas de solo mais 3% de cimento (80% de cimento Portland + 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar), prensados em máquina

manual de fabricação de tijolos de solo-cimento e moldados no teor de umidade ótima de compactação.

Os tijolos foram curados em câmara úmida, durante sete dias, e, após, conservados ao ar livre e à sombra até o momento de serem rompidos à compressão simples com as idades de 7, 28 e 60 dias. Alguns exemplares, após 7 dias de cura em câmara úmida, foram submetidos a ensaios de absorção de água.

Os resultados mostraram que os tijolos moldados com solos arenoso ou argiloso, adicionados de 3% de cimento Portland (com 20% de substituição por cinza de bagaço de cana-de-açúcar), apresentaram baixíssimos valores de resistência à compressão simples, em qualquer idade considerada, e valores satisfatórios de absorção de água (ao redor de 13%) apenas para o solo arenoso (no caso do solo argiloso, o valor médio de absorção de água foi de aproximadamente 22%).

Tais resultados insatisfatórios foram atribuídos ao baixo teor de cimento empregado (3%), ainda assim substituído parcialmente por cinza de bagaço de cana, que, no caso, funcionou como carga mineral, reduzindo mais ainda, proporcionalmente, o teor de cimento na mistura.

3.2.6. TIJOLOS DE CINZAS VOLANTES E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Como resíduo da queima do carvão pulverizado na câmara de combustão das Usinas Termoelétricas, em temperatura variável entre 1300 °C e 1600 °C, são produzidos dois tipos de cinzas, a partir dos componentes não combustíveis do carvão e também de partículas não queimadas devido à combustão incompleta: a cinza volante (“Fly-Ash”) que, por ser leve, é arrastada pelos gases de exaustão, e a cinza pesada (“Bottom-Ash”) que se aglomera no fundo da câmara.

Tanto a cinza volante como a cinza pesada, são materiais pozolânicos, ou seja, materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, apresentam pouco ou nenhum valor cimentante, mas que, na forma finamente dividida e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, em temperatura ordinária, para formar compostos que apresentam propriedades cimentantes.

As reações químicas que ocorrem entre o hidróxido de cálcio e os minerais de alumínio e sílica presentes nas cinzas volante e pesada, levam à produção de silicatos e aluminatos de cálcio.

Trabalhando com cinzas volantes (68% de SiO_2 e 19,1% de Al_2O_3) e cinzas pesadas (61,6% de SiO_2 e 18,6% de Al_2O_3), CHIES *et al.* (1993) moldaram tijolos com a mistura de cinza, areia e cal, sendo os mesmos curados sob duas condições: em câmara com temperatura constante ($21\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$), durante 7, 14, 28 e 60 dias, e cura em autoclave, durante 4 h e 6 h, sob três pressões de autoclavagem e duas umidades ótimas de moldagem. Cinco traços diferentes foram empregados, com diferentes proporções de cinzas volantes, cal, cinza pesada e areia. Ao final, os autores concluíram que, para os tijolos curados em câmara com temperatura constante, o tempo de cura foi o fator mais importante responsável pela variabilidade da resistência à compressão simples; com o aumento do tempo de cura, crescia também a resistência dos tijolos, devido ao desenvolvimento das reações químicas entre os silicatos e aluminatos com o hidróxido de cálcio. Para os tijolos curados em autoclave, a parcela mais significativa da resistência foi atribuída ao desenvolvimento das reações entre silicatos e aluminatos da cinza com o hidróxido de cálcio, favorecidas pelo aumento de pressão e temperatura.

Trabalhando com misturas de cinzas volantes, escória de alto-forno, e solução de silicato de sódio, FREIDIN e ERELL (1995) procuraram desenvolver uma nova porém eficiente tecnologia para produção de materiais de construção, principalmente tijolos, que pudessem ser curados ao ar livre, ou seja, em condições naturais de temperatura variáveis de $15\text{ }^\circ\text{C}$ a $30\text{ }^\circ\text{C}$. As cinzas volantes, assim como a escória de alto-forno, por terem composição química semelhante, tornam-se ativas quando misturadas com produtos tais como o NaOH , Na_2CO_3 e Na_2SiO_3 , que contêm álcalis, assumindo propriedades pozolânicas. Os autores exploraram a possibilidade de que a combinação de silicato de sódio e materiais contendo sílica na fase vítrea possa, sob certas condições, formar materiais estruturalmente estáveis em água. Segundo eles, na primeira etapa do processo de cura, os ânions sílica-oxigênio encontrados na cinza volante, na fase vítrea, se dispersam na solução e formam polímeros que começam a coagular no líquido. O álcali do silicato de sódio reage com a sílica presente na cinza volante, na fase vítrea, e reforça este processo de polimerização e coagulação, terminando com a geração de um ligante contendo sílica, estável em água, principalmente na

forma de um gel. Na segunda etapa ocorre a desidratação da sílica-gel, acompanhada pela consolidação da estrutura e um acréscimo na resistência das ligações. Inicialmente, estes processos se desenvolvem sucessivamente, então simultaneamente, resultando na criação de um duro material sólido.

FREIDIN e ERELL (1995) utilizaram cinzas volantes que tinham em sua composição 45,8% de SiO_2 e 33,5% de Al_2O_3 ; escória de alto-forno com 48,1% de SiO_2 e 34,4% de Al_2O_3 ; solução de silicato de sódio de densidade 1,44 g/cm³ e módulo de sílica igual a 2,3; e um produto hidrofóbico, no caso a siloxane (polimetilhidrogêniosiloxane). A cinza volante foi lavada cinco vezes com água destilada, antes da preparação dos corpos-de-prova, com a finalidade de eliminar a influência dos sais solúveis usualmente encontrados nas cinzas. A quantidade de silicato de sódio usada foi limitada pela trabalhabilidade da mistura, que se tornava muito líquida quando o teor de silicato de sódio excedia a 30%; em função disso, foram usados teores de 10 % e 20% para corpos-de-prova confeccionados com misturas de cinzas volantes e silicato de sódio, em várias proporções, e misturas de cinzas volante e escória de alto-forno (em iguais proporções), adicionadas de variáveis quantidades de silicato de sódio. Moldados os corpos-de-prova sob pressão de compactação de 40 kgf/cm², curados ao ar livre durante 28 dias à temperaturas de 20 °C a 23 °C ou em câmara hermeticamente fechada, conforme o caso, foram os mesmos submetidos a ensaios de compressão em condições seca ou úmida, determinando-se também a marcha de absorção de água e a capacidade de absorção de água capilar das diferentes misturas. Ao final, os resultados mostraram que materiais de construção estáveis em água podem ser obtidos a partir de misturas de cinzas volantes e escória de alto-forno, adicionadas de silicato de sódio e curadas ao ar livre. Suas resistência (2,0 MPa a 20,0 MPa) e estabilidade em água são atribuídas pelos autores principalmente à formação de um ligante estável em água consistindo de sílica gel e silicato de potássio de alto módulo de sílica. A adição de pequenas quantidades de um produto hidrofóbico, tal como a siloxane, reduz a alta capacidade de absorção de água (de até 40%) a níveis aceitáveis, comparáveis aos de outros materiais de construção utilizados para a mesma finalidade; esta medida, no entanto, reduz, também, consideravelmente a resistência à compressão dos tijolos. Alternativamente, pode se impregnar parcialmente a superfície dos tijolos acabados com o mesmo produto hidrofóbico, processo este que reduz a absorção de água a cerca de 6 % a 10%, sem perda da resistência mecânica.

Lima (1992), apud GEYER *et al.* (1995), referiu-se à fabricação de tijolos de escória de alto-forno desenvolvidos pela USIMINAS. Tais tijolos apresentam características de alta qualidade, baixo custo, resistência à compressão elevada (maior, ainda, se em contato com água) e dispensam reboco e pintura. São fabricados com uma mistura de escória granulada de alto-forno, argila, cimento, corante e água, e são comercializados com o nome de Usimix, sendo projetados de forma a permitir a modulação do projeto e a racionalização da construção. Os fabricantes apresentam como vantagens desses materiais: (1) a conformidade com as normas técnicas da ABNT; (2) a economia de argamassa e mão-de-obra no assentamento; (3) a diminuição de quebras desde o transporte até sua utilização; (4) a facilidade na modulação da construção; (5) o excelente acabamento dispensando revestimento; (6) a melhor regularidade no prumo e no alinhamento da parede; (7) a redução dos custos de mão-de-obra e material. Os tijolos Usimix podem ser usados na execução de alvenaria estrutural e de vedação aparente, tanto em casas quanto em prédios, e são apresentados na forma de tijolos laminados e tijolinhos laminados.

Melhores resultados para a resistência mecânica de misturas de solo e cinzas volantes podem ser obtidos com a adição de cimento. Nesse caso, o ganho de resistência aumenta com o acréscimo do conteúdo de cimento e diminui com o da cinza volante (KANIRAJ e HAVANAGI, 1999).

3.2.7. TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

FREITAS (1996) estudou as cinzas resultantes da queima do bagaço de cana em mistura com solo-cimento visando a obtenção de tijolos para uso em construção civil. No seu trabalho, a autora propõe que a fração utilizável seja aquela que compreenda:

- cinzas semi-beneficiadas, pelo simples peneiramento, para retirada do material não-queimado, utilizando-se a fração passante na peneira ABNT n° 16, cuja abertura nominal é de 1,2 mm;

- cinzas beneficiadas, passadas primeiro pelo moinho de bolas, seguido de peneiramento, utilizando-se a fração passante na peneira ABNT n° 200, que possui abertura nominal de 0,075 mm.

A composição granulométrica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar utilizada pela autora, está apresentada na **Tabela 7**.

Tabela 7. Composição granulométrica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Abertura das malhas das peneiras (mm)	Total acumulado (%)	
	Retido	Passante
4,8	0,00	100,00
2,4	0,30	99,70
1,2	0,60	99,40
0,6	2,10	97,90
0,3	7,10	92,90
0,15	23,10	76,90
< 0,15	100,00	0,00

Fonte: FREITAS (1996).

Com as cinzas semi-beneficiadas, FREITAS (1996) adotou o método proposto pela ABCP em seu Boletim Técnico BT-111 para a realização dos ensaios de resistência à compressão e de absorção d'água. Os tijolos foram confeccionados com traços 1:0:12, 1:1:11, 1:2:10, 1:3:9 e 1:4:8 (cimento, cinza e solo), em volume.

A autora relatou que, no preparo das misturas, o solo foi destorroado e peneirado em peneira de malha de abertura nominal igual a 4,8 mm sendo em seguida submetido à secagem natural em uma bancada, e, das cinzas, foi retirado o bagaço não-queimado, material este retido na peneira ABNT n° 16 cuja abertura nominal é 1,2 mm.

O cimento, a cinza e o solo, foram misturados manualmente até se obter uma coloração uniforme. Após a mistura seca, e para a verificação da umidade ideal, a água foi adicionada aos poucos, sendo em seguida aplicado o teste de esfrelamento no chão (conforme indicado no Boletim Técnico 111). Após a adição da água, a mistura era novamente peneirada para completar a homogeneização dos seus componentes. Os resultados destes ensaios estão apresentados na **Tabela 8**.

Tabela 8. Valores médios de resistência à compressão e absorção de água de tijolos de solo-cimento com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Traço	Resistência à compressão simples, aos 28 dias (MPa)	Absorção de água (%)
1:0:12	2,2	20,0
1:1:11	2,6	19,5
1:2:10	3,1	19,2
1:3: 9	3,6	18,6
1:4: 8	1,9	22,3

Fonte: FREITAS (1996).

Com as cinzas beneficiadas, FREITAS (1996) pesquisou os seguintes traços: 1:0:10, 1:0:11, 1:0:12, 1:1:10, 1:1:11, 1:1:12, 1:2:10, 1:2:11 e 1:2:12 (cimento, cinza e solo), em volume. O procedimento adotado para a confecção dos tijolos foi semelhante ao anterior. Após as cinzas serem moídas em moinhos de bolas, separava-se a fração passante na peneira ABNT n° 200, cuja abertura nominal é 0,075 mm. Os resultados destes ensaios estão apresentados na **Tabela 9**.

Em suas conclusões, FREITAS (1996) ressaltou que os ensaios realizados com tijolos, moldados a partir de misturas de solo-cimento e cinzas de bagaço semi-beneficiadas, indicaram aumentos de até 58% na resistência à compressão, ao mesmo tempo em que houve diminuição no grau de absorção de água em até 7%.

A autora chamou a atenção, também, para o fato de que, nos tijolos moldados a partir de misturas de solo-cimento e cinzas de bagaço beneficiadas, a adição de cinza foi satisfatória em todos os traços estudados (isto é, os corpos-de-prova atenderam as condições de aceitação das normas brasileiras). Por outro lado, para cada relação solo-cimento, existe uma razão a partir da qual a adição de cinza no solo passa a ser excessiva e ocorrem decréscimos de valores nas propriedades mecânicas do material.

Como conclusão final, a autora destacou que a fabricação de tijolos feitos com a mistura cimento-cinza-solo, utilizando-se de cinzas de bagaço, representa uma redução no consumo de cimento e, conseqüentemente, no custo final do tijolo, tendo em vista que as cinzas utilizadas são um resíduo agroindustrial e o custo do solo é, também, inferior ao custo do cimento.

Tabela 9. Ensaio realizados com tijolos de solo-cimento com adição de cinzas beneficiadas.

Traços	Peso específico seco (kN/m ³)	Resistência � compressão simples aos 10 dias (MPa)	Resistência � compressão simples aos 28 dias (MPa)	Absorção mínima de água (%)
1:0:10	17,38	2,69	4,73	17,72
1:0:11	17,06	2,41	4,40	17,65
1:0:12	17,25	1,94	4,23	17,87
1:1:10	17,29	2,74	5,51	18,54
1:1:11	16,77	2,78	4,81	18,56
1:1:12	17,00	2,30	4,61	18,24
1:2:10	16,75	2,40	4,25	18,70
1:2:11	16,90	2,60	4,57	19,10
1:2:12	16,63	2,65	4,02	19,35

Fonte: (FREITAS, 1996).

4.2.8. TIJOLOS DE SOLO-VINHAÇA CONCENTRADA

Tradicionalmente, a vinhaça concentrada vem sendo utilizada na composição de ração para animais, como componente substituto do melaço, e na adubação de soqueiras, após o corte da cana-de-a   ar, ou por ocasião do plantio. Entretanto, pesquisas vêm demonstrando sua viabilidade para fins de obtenção de um material estável e resistente, ao qual se convencionou chamar de solo-vinhaça, sendo possível sua utilização para fins de fabricação de tijolos de construção (FREIRE e CORTEZ, 2000).

Trabalhando com vinhaça de cana-de-a   ar concentrada a 19% de sólidos totais, ROLIM (1996) estudou suas características físico-mecânicas com o objetivo de utiliz -la para fins de fabricação de tijolos. O autor utilizou, para tal, dois tipos de solo, a saber: um solo arenoso A₂₋₄₍₀₎, outro argiloso A₇₋₅₍₈₎, tratados com 0%, 12%, 16% e 20% de vinhaça concentrada.

O referido autor relacionou em seu trabalho todos os ensaios aos quais foram submetidos os solos e as misturas de solo-vinhaça concentrada. Depois de moldados os corpos-de-prova para a determinação da resistência   compressão simples aos 7, 30 e 90 dias,

e analisados e interpretados os resultados obtidos, foi escolhida a dose de 12% de vinhaça concentrada para a confecção dos tijolos de solo-vinhaça. Os resultados do ensaio de compressão simples dos tijolos estão apresentados na **Tabela 10**.

Tabela 10. Resistência à compressão simples de tijolos confeccionados com solos tratados com 12% de vinhaça concentrada, em MPa.

Amostra	Resistência à compressão simples (MPa)	
	Solo arenoso	Solo argiloso
1	2,11	1,45
2	2,02	1,55
3	1,92	1,71
4	1,90	1,96
5	1,76	1,80
6	1,67	1,71
7	1,90	1,86
8	1,65	2,00
9	1,78	1,88
10	1,86	1,96
11	2,13	1,65
12	2,05	2,00
13	2,00	1,96
14	1,65	1,61
15	2,13	1,45
16	2,11	2,09
Média	1,92	1,79
Desvio	0,17	0,21
CV(%)	9,01	11,52

Fonte: ROLIM (1996).

ROLIM (1996) afirmou que os tijolos confeccionados com solos arenoso e argiloso, tratados com 12% de vinhaça concentrada, não apresentaram diferenças significativas no que se refere à resistência à compressão simples, cujos valores ficaram abaixo daqueles preconizados para tijolos de solo-cimento. Por outro lado, com relação ao ensaio de absorção de água, o autor explicou que não foi possível a aplicação deste ensaio aos tijolos de solo-vinhaça concentrada, pois os mesmos se desmanchavam poucas horas após sua imersão total em água, motivo pelo qual o autor destacou o fato de que, tendo em vista estes resultados alcançados, os tijolos podem ser recomendados para uso em ambientes protegidos ou em paredes revestidas e tratadas com produtos hidrofugantes.

3.2.9. TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-FIBRA

A incorporação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar ao solo melhorado com cimento foi pesquisada por MESA VALENCIANO (1999), visando à produção de tijolos prensados, moldados no teor de umidade ótima de compactação, utilizando para tal uma máquina manual para fabricação de tijolos de solo-cimento, marca SOLOTEST.

Foram utilizadas fibras de bagaço de cana-de-açúcar quimicamente “mineralizadas” com silicato de sódio a 5% e sulfato de alumínio a 30%, nas dosagens de 10% e 20%, em relação à massa do solo seco.

Ao solo arenoso empregado (16% de silte + argila) foram adicionados 3% de cimento Portland CP II-E-32.

Após moldagem e cura em câmara úmida durante sete dias, os tijolos foram dela retirados e deixados ao ar livre e à sombra, até o momento de serem ensaiados à compressão simples, aos 7, 28 e 60 dias de idade. Outros exemplares foram submetidos ao ensaio de absorção de água, após cura úmida de 7 dias, que consistiu em colocá-los em um recipiente com uma lâmina d'água de 3 cm de altura, durante 24 horas, após o que eram enxutos, pesados, e, por diferença de peso, determinado o seu teor de umidade, conforme preconizado por NEUBAUER e QUINTERO (1966), para tijolos de solo-cimento.

Um dia antes de serem rompidos à compressão simples, os tijolos foram imersos em água. Os resultados dos ensaios estão apresentados na **Tabela 11**.

Tabela 11. Resistência à compressão simples e absorção de água de tijolos de solo melhorado com cimento e adicionado de fibras de bagaço de cana-de-açúcar (médias de 3 repetições), em MPa.

Tratamentos	Resistência à compressão (MPa)		Absorção de água (%)
	7 dias	28 dias	7 dias
T ₁	0,35	0,79	13,09
T ₂	0,46	1,69	22,75
T ₃	0,50	1,89	30,05

T₁ = solo + 3% de cimento

T₂ = idem + 10% de fibras

T₃ = idem + 20% de fibras

Fonte: MESA VALENCIANO (1999).

A adição de 10% e 20% de fibras “mineralizadas” de bagaço de cana-de-açúcar ao solo arenoso estudado levou a aumentos estatisticamente significativos de resistência à compressão simples, tanto maiores quanto maiores os teores de fibra empregados e as idades de ruptura consideradas. Por outro lado, o acréscimo do teor de fibras aumentou significativamente a capacidade de absorção de água dos tijolos ensaiados.

De um modo geral, os tijolos moldados com misturas de solo-cimento-fibra apresentaram baixos valores de resistência e altos valores de absorção de água, se comparados com tijolos cerâmicos ou tijolos de solo-cimento.

3.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO

Os materiais de construção geralmente têm sua utilização vinculada às suas características de resistência, durabilidade e custo (PADILHA *et al.*, 2001). Entretanto, o conhecimento das propriedades termofísicas de um material de construção é de fundamental importância no estudo dos processos de transferência de calor (condução, convecção, radiação e condensação) em edificações destinadas tanto para moradia quanto para a produção animal e vegetal (LINDLEY e WHITAKER, 1997).

Além do conhecimento desses processos, para compreender as questões relativas ao conforto térmico em edificações é necessário, também, conhecer as propriedades dos materiais e componentes construtivos relacionadas aos processos de transferência de calor. O conhecimento dessas propriedades é essencial na elaboração de projetos de edificações que obedeçam aos princípios de condicionamento térmico natural e nas avaliações de desempenho térmico de edificações.

3.3.1. DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES

A condição essencial para a transmissão de calor é que os corpos tenham temperaturas diferentes. A **Figura 1** exemplifica esta afirmação.

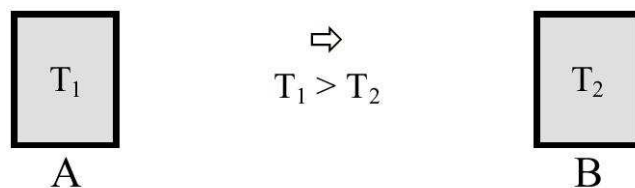


Figura 1. Condição para transferência de calor.

Fonte: LAMBERTS *et al.* (2003).

O corpo A cede parte de sua energia térmica, o que provoca um abaixamento de sua temperatura, enquanto que o corpo B, ao assimilar esta energia térmica, aumentará sua temperatura.

O processo continua até que as temperaturas se igualem ($T_1 = T_2$), ou seja, até que se atinja o equilíbrio térmico.

Para o caso de paredes, a **Figura 2** apresenta o sentido do fluxo de calor em função da diferença de temperatura externa e interna.

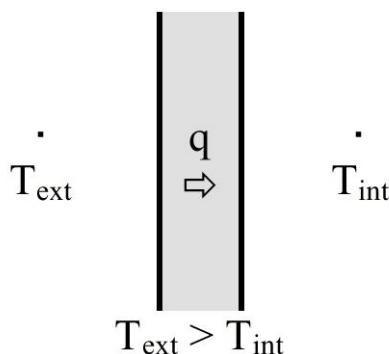


Figura 2. Transferência de calor em uma parede.

Fonte: LAMBERT *et al.* (2003).

A **Equação 1** representa a densidade de fluxo de calor que atravessa a parede.

$$q = U \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) = U \cdot \Delta T \quad (1)$$

onde:

U = transmitância térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$);

ΔT = diferença de temperatura entre os meios externo e interno (K);

q = densidade de fluxo de calor (W/m^2).

A transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico podem ser determinados através dos procedimentos apresentados pelo Projeto de Norma da ABNT (projeto 02:135.07-002 – 2003c): *Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da*

transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações.

Todas as propriedades térmicas calculadas pelo Projeto de Norma são para um regime estacionário de transmissão de calor, que se caracteriza por apresentar temperaturas constantes, que não variam com o tempo, e consequentemente a quantidade de calor transmitida por uma seção de área “A” é sempre igual. Já num regime transiente há variações do fluxo de calor que atravessa uma seção com o tempo, causado pela variação da temperatura em pelo menos uma das faces.

O fluxo de calor que incide no ambiente interno é dado pela **Equação 2**.

$$\phi = q.A = U.\Delta T.A \quad (2)$$

Porém, o fluxo de calor não é função apenas de ΔT . Ele é função, também, da radiação solar incidente na superfície. Assim, antes de incluir a radiação solar nos cálculos, faz-se a seguir uma breve revisão das formas de transmissão de calor.

3.3.2. FORMAS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

Condução

A condução se realiza por contato molecular, ou melhor, por contato entre as moléculas dos corpos. Ocorre em sólidos, líquidos e gases. No entanto, nos fluidos ocorrem fenômenos convectivos que alteram o processo original. Por esta razão, a condução refere-se aos sólidos. Poderá ser relacionada aos fluidos quando não se verificam movimentos convectivos.

Convecção

A convecção se verifica quando os corpos estão em contato molecular e um deles, pelo menos, é um fluido. O processo possui duas fases: na primeira o calor se transmite por condução, na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo.

Radiação

A radiação ocorre mediante uma dupla transformação da energia: uma parte do calor do corpo com maior temperatura se converte em energia radiante que chega até o corpo com menor temperatura, onde é absorvida numa proporção que depende das propriedades da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor.

As propriedades da superfície receptora são representadas pela emissividade ϵ (ou poder emissivo) do corpo (**Tabela 12**).

Tabela 12. Emissividade de superfícies.

Tipo de superfície	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25
Caiação nova	0,90
Concreto aparente	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,90 / 0,98
Vidro comum de janela	0,90 / 0,95
Pintura: branca	0,90
amarela	0,90
verde claro	0,90
“alumínio”	0,90
verde escuro	0,90
vermelha	0,90
preta	0,90

Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (2003b).

A emissividade está relacionada a fontes de baixa temperatura (ondas longas). Quando a superfície está exposta à radiação solar (fonte de alta temperatura – ondas curtas) as propriedades desta superfície são representadas pela absortividade α (**Tabela 13**).

Condensação

O ar, a uma temperatura determinada, pode conter apenas uma certa quantidade de vapor d'água. Esta quantidade aumenta à medida que aumenta a temperatura do ar. Quando se atinge o valor máximo diz-se que o ar está saturado e atingiu-se a temperatura de orvalho. Deste modo, qualquer abaixamento de temperatura em relação a este valor significará o começo da condensação.

Comportamento dos materiais opacos diante da radiação solar

Quando a energia radiante incide sobre um corpo opaco ela é parcialmente absorvida e refletida, como se pode observar na **Figura 3**.

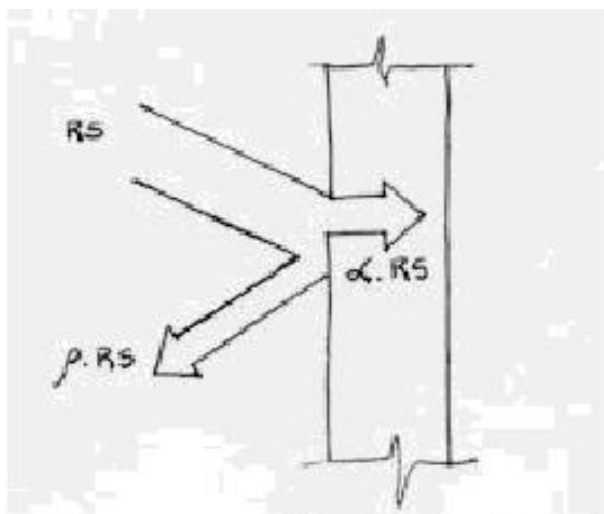


Figura 3. Radiação solar em superfícies opacas.

Fonte: LAMBERT *et al.* (2003).

A **Equação 3** mostra o balanço térmico para a **Figura 3**.

$$\alpha.RS + \rho.RS = RS \Rightarrow \alpha + \rho = 1 \quad (3)$$

onde:

α = absorptividade solar (função da cor);

ρ = refletividade solar.

A **Tabela 13** apresenta a absorptividade para alguns materiais utilizados na construção civil e algumas cores.

Tabela 13. Absortância de cores e superfícies.

Tipo de superfície	α
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15
Concreto aparente	0,65 / 0,80
Telha de barro	0,75 / 0,80
Tijolo aparente	0,65 / 0,80
Reboco claro	0,30 / 0,50
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98
Vidro comum de janela	Transparente
Pintura: - branca	0,20
- amarela	0,30
- verde claro	0,40
- “alumínio”	0,40
- verde escuro	0,70
- vermelha	0,74
- preta	0,97

Fonte: Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-002 (2003b).

A energia radiante absorvida se transforma em energia térmica ou calor; a refletida não sofre modificação alguma.

Desta forma, a radiação solar será incluída no cálculo do fluxo de calor através de uma temperatura equivalente ou, como é comumente chamada, temperatura sol-ar. Portanto, a **Equação 2** pode ser rescrita na forma da **Equação 4**.

$$\phi = U.\Delta T.A = U.A.(T_{\text{sol-ar}} - T_{\text{int}}) \quad (4)$$

A temperatura sol-ar ($T_{\text{sol-ar}}$) representa o efeito combinado da radiação solar incidente no fechamento e dos intercâmbios de energia por radiação e convecção entre a superfície e o meio envolvente; nestes processos intervêm a absorptância (α) e a emissividade (ε) do material. A temperatura sol-ar é dada pela **Equação 5**.

$$T_{\text{sol-ar}} = T_{\text{ext}} + \alpha.RS.R_{\text{se}} - \varepsilon.\Delta R_L.R_{\text{se}} \quad (5)$$

onde:

RS = radiação total incidente na superfície (W/m^2);

R_{se} = resistência superficial externa; representa os intercâmbios de calor por convecção e radiação entre a superfície e o meio;

ΔR_L = diferença entre a radiação de onda longa emitida e recebida pela superfície.

Para planos verticais, a diferença entre a radiação de onda longa emitida e recebida pela superfície (ΔR_L) é nula, pois as perdas ficam compensadas pela radiação de onda longa recebida do solo e das superfícies do meio. Portanto, para paredes, a **Equação 5** pode ser reescrita na forma da **Equação 6**.

$$T_{\text{sol-ar}} = T_{\text{ext}} + \alpha.RS.R_{\text{se}} \quad (6)$$

Assim, substituindo-se a temperatura sol-ar na **Equação 4**, o fluxo de calor em planos verticais (paredes) será dado pela **Equação 7**.

$$\phi = U.A.(T_{\text{ext}} + \alpha.RS.R_{\text{se}} - T_{\text{int}}) \quad (7)$$

Existe uma forte dependência da capacidade térmica, calor específico e atraso térmico em relação à massa específica aparente dos materiais de construção. O mesmo se pode dizer com relação à condutibilidade térmica. De acordo com RIVERO (1986), essa dependência é explicável quase sempre pelo conteúdo de ar do material, elemento muito leve e mau condutor

de calor, quando não há movimentos convectivos. Esta característica é importante pois fornece uma indicação aproximada do provável comportamento térmico de um material qualquer quanto à transmissão de calor por condução.

A **Tabela 14** apresenta valores de condutibilidade térmica e calor específico para diversos materiais de construção em função de sua massa específica aparente.

A **Tabela 15** apresenta valores de transmitância, capacidade térmica e atraso térmico para paredes comumente utilizadas em edificações brasileiras. A **Tabela 16** apresenta as propriedades térmicas dos materiais utilizados nos componentes da **Tabela 15**.

A **Tabela 17** apresenta as recomendações e diretrizes construtivas para adequação de edificações unifamiliares de interesse social ao clima local relativas à transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar para paredes externas.

Tabela 14. Massa específica aparente (ρ), condutibilidade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais de construção.

Material	ρ (kg/m ³)	λ [W/(m.K)]	c [kJ/(kg.K)]
Argamassas			
Argamassa comum	1800 - 2100	1,15	1,00
Argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,70	0,84
Argamassa celular	600 - 1000	0,40	1,00
Cerâmica			
Tijolos e telhas de barro	1000 – 1300	0,70	0,92
	1300 – 1600	0,90	0,92
	1600 – 1800	1,00	0,92
	1800 – 2000	1,05	0,92
Cimento-amianto			
Placas de fibro-cimento	1800 – 2200	0,95	0,84
	1400 - 1800	0,65	0,84

Continua ...

Continuação ...

Material	ρ (kg/m³)	λ [W/(m.K)]	c [kJ/(kg.K)]
Concreto (com agregados de pedra)			
Concreto normal	2200 – 2400	1,75	1,00
Concreto cavernoso	1700 – 2100	1,40	1,00
Concreto com pozolana ou escória expandida com estrutura cavernosa (ρ inertes ~ 750 kg/m³)			
Com finos	1400 – 1600	0,52	1,00
Sem finos	1000 – 1200		1,00
Concreto com argila expandida			
Dosagem de cimento > 300 kg/m ³ (ρ dos inertes > 350 kg/m ³)	1600 – 1800	1,05	1,00
	1400 – 1600	0,85	1,00
	1200 – 1400	0,70	1,00
	1000 – 1200	0,46	1,00
Dosagem de cimento < 250 kg/m ³ (ρ dos inertes < 350 kg/m ³)	800 – 1000	0,33	1,00
	600 – 800	0,25	1,00
	< 600	0,20	1,00
Concreto de vermiculita (3 a 6 mm) ou perlita expandida fabricado em obra	600 – 800	0,31	1,00
	400 – 600	0,24	1,00
Dosagem (cimento/areia) 1:3	700 – 800	0,29	1,00
Dosagem (cimento/areia) 1:6	600 – 700	0,24	1,00
	500 – 600	0,20	1,00
Concreto celular autoclavado	400 - 500	0,17	1,00
Gesso			
Projetado ou de massa aparente elevada	1100 – 1300	0,50	0,84
Placa de gesso; gesso cartonado	750 – 1000	0,35	0,84
Com agregado leve (vermiculita ou perlita expandida)			
Dosagem gesso : agregado = 1:1	700 – 900	0,30	0,84
Dosagem gesso : agregado = 1:2	500 – 700	0,25	0,84
Granulados			
Brita ou seixo	1000 - 1500	0,70	0,80
Argila expandida	< 400	0,16	
Areia seca	1500	0,30	2,09
Areia (10% de umidade)	1500	0,93	
Areia (20% de umidade)	1500	1,33	
Areia saturada	2500	1,88	
Terra argilosa seca	1700	0,52	0,84
Imperbeabilizantes			
Membranas betuminosas	1000 - 1100	0,23	1,46
Asfalto	1600	0,43	0,92
Asfalto	2300	1,15	0,92
Betume asfáltico	1000	0,17	1,46

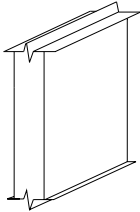
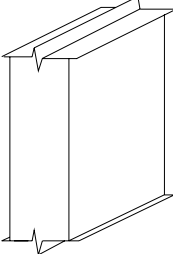
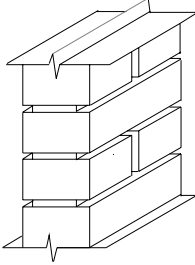
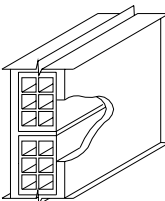
Continua ...

Continuação ...

Material	ρ (kg/m³)	λ [W/(m.K)]	c [kJ/(kg.K)]
Isolantes térmicos			
Lã de rocha	20 – 200	0,045	0,65
Lã de vidro	10 – 100	0,045	0,70
Poliestireno expandido moldado	15 – 35	0,040	1,42
Poliestireno expandido	25 – 40	0,035	1,42
Espuma rígida de poliuretano extrudado	30 – 40	0,030	1,67
Madeiras e derivados			
Madeiras com massa específica elevada	800 – 1000	0,29	1,34
Carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus	600 – 750	0,23	1,34
	450 – 600	0,15	1,34
	300 – 450	0,12	1,34
Aglomerado de fibras de madeira (denso)	850 – 1000	0,20	2,30
Aglomerado de fibras de madeira (leve)	200 – 250	0,058	2,30
Aglomerado de partículas de madeira	650 – 750	0,17	2,30
	550 – 650	0,14	
Placas prensadas	450 – 550	0,12	2,30
	350 – 450	0,10	2,30
Placas extrudadas	550 – 650	0,16	2,30
Compensado	450 – 550	0,15	2,30
	350 - 450	0,12	2,30
Aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica	450 – 550	0,15	2,30
	350 – 450	0,12	2,30
	250 – 350	0,10	2,30
Palha (capim Santa Fé)	200	0,12	
Metais			
Aço, ferro fundido	7800	55	0,46
Alumínio	2700	230	0,88
Cobre	8900	380	0,38
Zinco	7100	112	0,38
Pedras (incluindo junta de assentamento)			
Granito, gnaiss	2300 – 2900	3,00	0,84
Ardósia, xisto	2000 – 2800	2,20	0,84
Basalto	2700 – 3000	1,60	0,84
Calcários/mármore	> 2600	2,90	0,84
Outras	2300 – 2600	2,40	0,84
	1900 – 2300	1,40	0,84
	1500 – 1900	1,00	0,84
	< 1500	0,85	0,84
Vidros			
Chapa de vidro comum	2700	1,10	

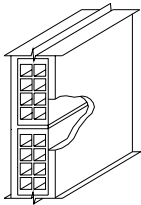
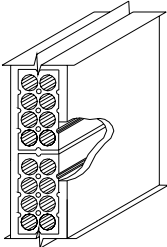
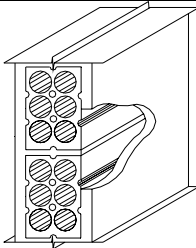
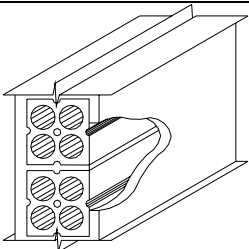
Fonte: Projeto de Norma 02:135.07-002 (ABNT, 2003b).

Tabela 15. Transmitância (U), capacidade térmica (C_T) e atraso térmico (φ) para algumas paredes.

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ (horas)
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 5,0 cm	5,04	120	1,3
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 10,0 cm	4,40	240	2,7
	Parede de tijolos maciços aparentes Dimens. tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura total da parede: 10,0 cm	3,70	149	2,4
	Parede de tijolos 6 furos quadrados, assentados na menor dimensão Dimens. tijolo: 9,0x14,0x19,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 14,0 cm	2,48	159	3,3

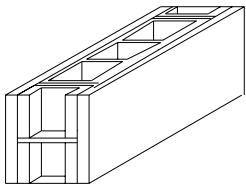
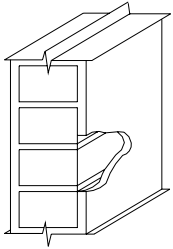
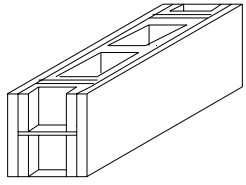
Continua ...

... Continuação

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ (horas)
	Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão Dimens. tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 14,0 cm	2,49	158	3,3
	Parede de tijolos de 8 furos circulares, assentados na menor dimensão Dimens. tijolo: 10,0x20,0x20,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 15,0 cm	2,24	167	3,7
	Parede de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão Dimens. tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 15,0 cm	2,28	168	3,7
	Parede com 4 furos circulares Dimensões do tijolo: 9,5x9,5x20,0 cm ³ Espessura arg. De assentamento: 1,0 cm Espessura arg. De emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 14,5 cm	2,49	186	3,7

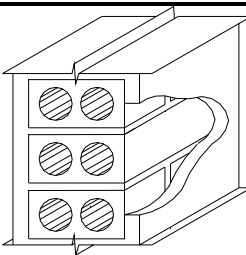
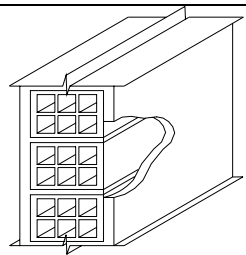
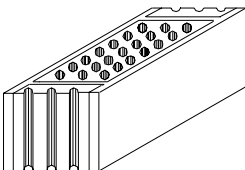
Continua ...

Continuação ...

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ (horas)
	Parede de blocos cerâmicos de 3 furos Dimensões do bloco: 13,0x28,0x18,5 cm ³ Espessura arg. Assentam.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 18,0 cm	2,43	192	3,8
	Parede de tijolos maciços, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm ³ Espessura arg. de assentamento: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 15,0 cm	3,13	255	3,8
	Parede de blocos cerâmicos de 2 furos Dimensões do bloco: 14,0x29,5x19,0 cm ³ Espessura arg. de assentamento: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 19,0 cm	2,45	203	4,0

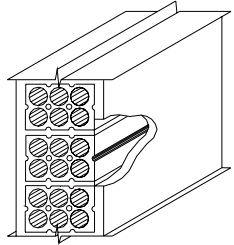
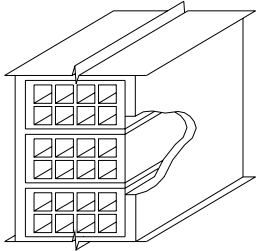
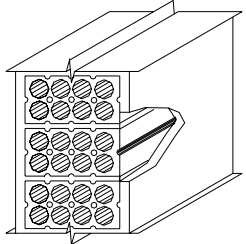
Continua ...

Continuação ...

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ (horas)
	Parede de tijolos com 2 furos circulares Dimensões do tijolo: 12,5x6,3x22,5 cm ³ Espessura arg. de assentamento: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 17,5 cm	2,4340	220	4,2
	Parede de tijolos de 6 furos quadrados, assentados na maior dimensão Dimens. tijolo: 9,0x14,0x19,0 cm ³ Espessura arg. assentam.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 19,0 cm	2,02	192	4,5
	Parede de tijolos de 21 furos circulares, assentados na menor dimensão Dimens. tijolo: 12,0x11,0x25,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 17,0 cm	2,31	227	4,5

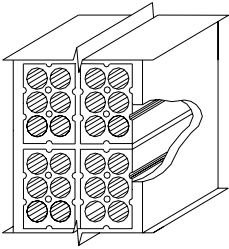
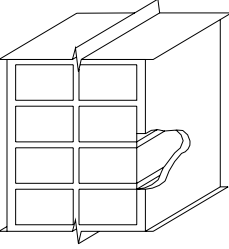
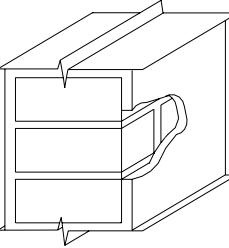
Continua ...

Continuação ...

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ (horas)
	Parede de tijolos de 6 furos circulares, assentados na maior dimensão Tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 20,0 cm	1,92	202	4,8
	Parede de tijolos de 8 furos quadrados, assentados na maior dimensão Dimens. tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 24,0 cm	1,80	231	5,5
	Parede de tijolos de 8 furos circulares, assentados na maior dimensão Dimens. tijolo: 10,0x20,0x20,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 25,0 cm	1,61	232	5,9

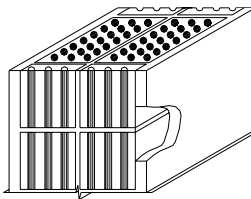
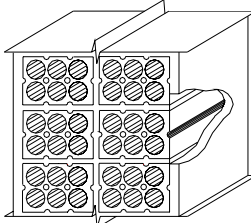
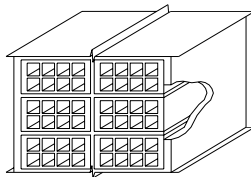
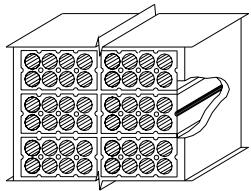
Continua ...

Continuação ...

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ (horas)
	Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão Tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	1,52	248	6,5
	Parede dupla de tijolos maciços, assentados na menor dimensão Dimens. tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	2,30	430	6,6
	Parede de tijolos maciços, assentados na maior dimensão Dimens. tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 27,0 cm	2,25	445	6,8

Continua ...

Continuação ...

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ (horas)
	Parede dupla de tijolos de 21 furos circulares, assentados na menor dimensão Tijolo: 12,0x11,0x25,0 cm ³ Espessura. arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 30,0 cm	1,54	368	8,1
	Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares, assentados na maior dimensão Dimens. tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 36,0 cm	1,21	312	8,6
	Parede dupla de tijolos de 8 furos Quadrados, assentados na maior dimensão Dimens. tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm ³ Espessura arg. de assent.: 1,0 cm Espessura arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 44,0 cm	1,12	364	9,9
	Parede dupla de tijolos de 8 furos circulares, assentados na maior dimensão Tijolo: 10,0x20,0x20,0 cm ³ Espess. arg. assent.: 1,0 cm Espess. arg. de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 46,0 cm	0,98	368	10,8

Fonte: Projeto de Norma 02:135.07-003 (ABNT, 2003c).

Tabela 16. Propriedades térmicas dos materiais dos componentes da Tabela 15.

Material	ρ (kg/m ³)	λ [W/(m.K)]	c [kJ/(kg.K)]
Cerâmica	1600	0,90	0,92
Argamassa de emboço ou assentamento	2000	1,15	1,00
Concreto	2400	1,75	1,00

Fonte: Projeto de Norma 02:135.07-003 (ABNT, 2003c).

Tabela 17. Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.

Vedações externas		Transmitância Térmica - U W/m ² .K	Atraso Térmico - ϕ Horas	Fator de Calor Solar - FCS %
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FCS \leq 5,0$
	Leve Refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FCS \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FCS \leq 3,5$
Coberturas	Leve Isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$FCS \leq 6,5$
	Leve Refletora	$U \leq 2,30$	$\phi \leq 3,3$	$FCS \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	$FCS \leq 6,5$

Fonte: Projeto de Norma 02:135.07-003 (ABNT, 2003c).

3.4. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO ATRAVÉS DE TESTES NÃO-DESTRUTIVOS.

A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material, sem alterar suas capacidades de uso. Várias técnicas podem ser consideradas como sendo não destrutivas, desde o exame visual até os ensaios químicos, os testes mecânicos e o uso de técnicas de vibração, propagação de ondas, emissões acústicas, raios-X, etc. (ROSS *et al.*, 1998).

Os testes não-destrutivos foram inicialmente propostos para detectar defeitos em metais e suas ligas. Os resultados obtidos são geralmente reproduzíveis e as diferenças porventura encontradas devem-se à presença de defeitos internos como, por exemplo, fissuras (JONES, 1967).

Atualmente, esses métodos são bastante utilizados em países com avançada tecnologia para determinar as características mecânicas de diferentes materiais. Os testes não-destrutivos podem se diferenciar de acordo com sua origem e suas aplicações. Dentre eles podem ser citados os métodos acústicos ou ultra-sônicos, o método mecânico de superfície, o método atômico, o método eletromagnético, e métodos combinados (BERALDO, 2000).

A vantagem dos testes não-destrutivos reside no fato de que eles avaliam corretamente a qualidade do material, sem haver a necessidade de analisar os resultados obtidos em corpos-de-prova, que nem sempre são representativos do material original

Outras vantagens atribuídas aos testes não-destrutivos, comparadas aos testes destrutivos, são sumarizadas a seguir (QASRAWI, 2000):

- redução do tempo e trabalho para a realização dos testes;
- ausência ou pequena quantidade de danos em estruturas durante os testes;
- possibilidade de teste de resistência “in loco” em estruturas;
- uso de equipamentos de baixo custo.

No caso do concreto e da madeira, o método acústico do ultra-som já vem sendo utilizado há vários anos para a determinação de diversos parâmetros, tais como resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico, além da detecção de patologias e defeitos (BERALDO, 2000).

Mais recentemente, o uso do ultra-som tem sido relacionado à avaliação da qualidade técnica de diferentes materiais de construção. Da mesma forma, métodos de avaliação de qualidade de materiais através da combinação de ensaios destrutivos e não-destrutivos estão em constante desenvolvimento.

CULTRONE *et al.* (2001) avaliaram a influência de diferentes matérias-primas e temperaturas do forno na qualidade de tijolos queimados. A mensuração da qualidade foi realizada por meio do parâmetro quantitativo proposto pelos autores e denominado de resistência anisotrópica (**Equação 15**) que combina os resultados da resistência à compressão simples e anisotropia total dos tijolos para a mensuração da qualidade. De acordo com CAZALLA *et al.* (1999), a anisotropia total (**Equação 14**) é um parâmetro qualitativo obtido de forma não destrutiva que expressa a estrutura anisotrópica de um material.

O uso da resistência anisotrópica como um parâmetro para mensurar a qualidade de um tijolo é baseado na relação entre o estresse físico produzido no tijolo e um parâmetro matemático (sua estrutura anisotrópica). Assim, para um estresse físico constante a qualidade do tijolo fica condicionada à sua anisotropia estrutural. Dessa forma, CULTRONE *et al.* (2001) afirmaram que, quanto maior o valor da resistência anisotrópica, melhor será a qualidade do material.

O método acústico do ultra-som também vem sendo usado para se avaliar o comportamento mecânico de materiais de construção submetidos a estresses mecânicos. Nesse sentido, PAPARGYRIS, *et al.* (2001) relacionaram o comportamento acústico de tijolos cerâmicos em relação ao seu comportamento mecânico. Segundo os autores, a emissão acústica pelo ultra-som é um teste promissor para se monitorar a integridade de materiais e seus mecanismos de fraturas durante ensaios de compressão simples. Além disso, por ser a emissão acústica um processo dinâmico, o comportamento da onda ultra-sônica pode ser estudado quando o material é submetido ao estresse mecânico, fornecendo informações úteis a respeito de sua resistência e estrutura.

3.4.1. ASPECTOS TEÓRICOS RELATIVOS À PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE ULTRA-SOM

Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em sólidos homogêneos

Os fundamentos da propagação do ultra-som em sólidos homogêneos foram apresentados por MCSKIMIN (1964), JONES (1967) e PAPADAKIS (1990), dentre outros. A velocidade de propagação da onda do ultra-som em função da frequência é dada pela **Equação 8**:

$$V = \lambda \cdot f \quad (8)$$

onde:

V = velocidade de propagação da onda (m.s^{-1});

λ = comprimento de onda (m);

f = frequência da onda de ultra-som (Hz).

Sistemas de medida da propagação da onda ultra-sônica

O método acústico do ultra-som permite conhecer a velocidade de propagação do som através de diversos materiais ou objetos. O método consiste na impulsão de vibrações longitudinais através de pulsos periódicos em frequências entre 20 kHz a 100 kHz usando um transdutor eletro-acústico (emissor) acoplado à superfície do corpo-de-prova. A seguir, a impulsão vibratória é convertida em um sinal elétrico por um segundo transdutor eletro-acústico (receptor), o que permite a medida do tempo de propagação da onda através do material. O tempo (μs) decorrido da emissão à recepção é então medido, obtendo-se a velocidade (m.s^{-1}) (QASWARI, 2000). Uma perfeita junção entre o corpo-de-prova e os transdutores torna-se necessária. Para tal, pode-se utilizar a vaselina ou uma pasta constituída de caulim e glicerol (JONES e FÄCÄOARU, 1969, *apud* BERALDO, 1994).

Este método é interessante pois permite avaliar mudanças nas características de um material como o concreto, por exemplo, de acordo com vários parâmetros, tais como, a idade, a composição e o condicionamento após a fabricação. No estudo das propriedades elásticas, tais como o módulo de elasticidade dinâmico ou módulo dinâmico de Young e o coeficiente

de Poisson, métodos combinando a impulsão ultra-sônica e a frequência de ressonância têm sido utilizados (JONES e FÄCÄOARU, 1971, *apud* BERALDO, 1994).

O uso de métodos acústicos permite avaliar de forma rápida e segura as características dos corpos-de-prova. Pode-se acompanhar as mudanças ocorridas ao longo do tempo, ou estudar a heterogeneidade das amostras através de medições efetuadas em diferentes pontos da mesma. No caso de ensaios convencionais, no entanto, torna-se difícil a separação entre os efeitos decorrentes da fabricação dos corpos-de-prova, daqueles provenientes dos tratamentos aos quais eles foram submetidos (BERALDO, 2000).

O esquema de funcionamento de um aparelho de ultra-som está representado na **Figura 4**.

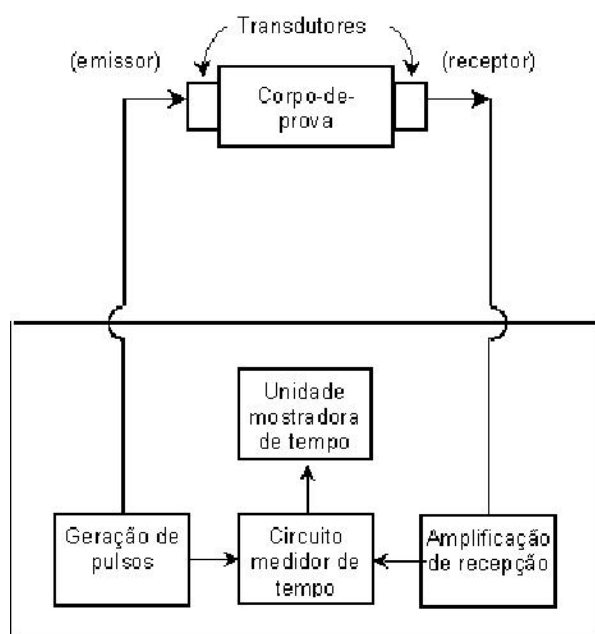


Figura 4. Esquema de funcionamento do aparelho de ultra-som.

Fonte: adaptado de HAMASSAKI (1987).

Frequência do equipamento de ultra-som

Estudos realizados por diferentes autores demonstram não haver consenso sobre a influência da frequência (kHz) na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas. Sabe-se, no entanto, que essa influência também depende das dimensões do corpo-de-prova adotado para o ensaio (PUCCINI, 2002).

Quando se utiliza corpos-de-prova que apresentam pequenas dimensões (comprimento e espessura) em relação ao comprimento de onda (λ), as condições de propagação das ondas de ultra-som são afetadas.

Assim, um aspecto relacionado com a adoção das dimensões do corpo-de-prova para o ensaio com ultra-som é a relação L/λ , ou seja, a relação entre a distância (L) a ser percorrida pela onda e o seu comprimento. O comprimento da onda é dado pela **Equação 8**.

No caso da madeira, BUCUR, citado por PUCCINI (2002), analisou a variação de velocidade de ondas longitudinais em função da relação L/λ , em corpos-de-prova de Faia (*Fagus sylvatica*), obtendo os resultados apresentados na **Figura 5**.

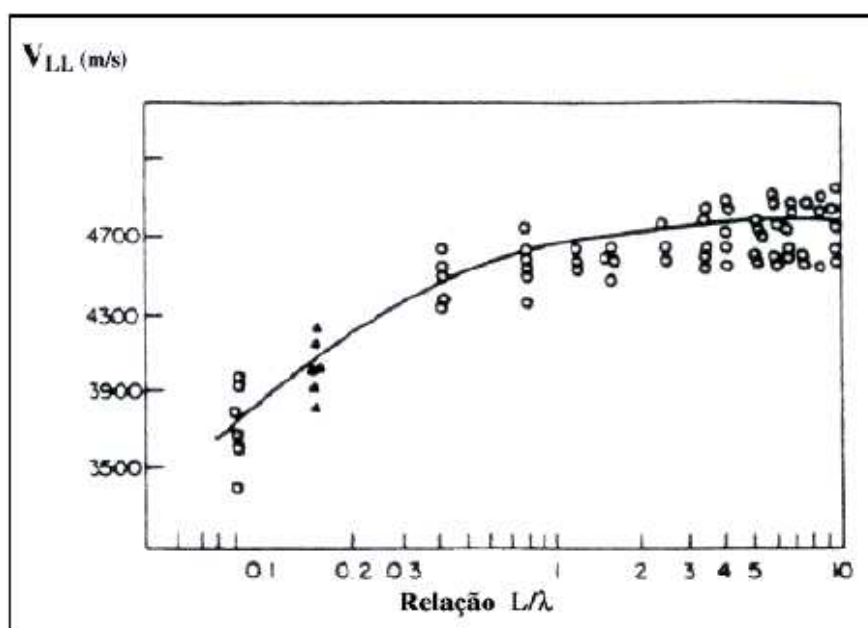


Figura 5. Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em função da relação L/λ em corpos-de-prova de faia (*Fagus sylvatica*)

Fonte: BUCUR, citado por PUCCINI (2002).

Nota-se, na **Figura 5**, que a velocidade apresentou uma taxa mais acentuada entre as relações $L/\lambda = 0,1$ e $L/\lambda = 1$, ou seja, uma variação da velocidade de aproximadamente 30%, enquanto que, entre as relações $L/\lambda = 1$ e $L/\lambda = 10$, a variação ficou em 2,6%. Assim, conclui-se que a estabilização dos valores da velocidade de propagação das ondas longitudinais ocorre a partir da relação L/λ em torno de três, mantendo-se, portanto, as mesmas condições de propagação da onda. Tal critério ($L/\lambda > 3$) tem sido adotado como referência para diferentes tipos de materiais sólidos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Materiais e Estruturas da FEAGRI (Faculdade de Engenharia Agrícola) e no Laboratório de Estruturas da FEC (Faculdade de Engenharia Civil), ambas da UNICAMP.

4.1. MATERIAL

4.1.1. SOLO

Foram estudados dois tipos de solo, representativos de duas classes texturais distintas, uma predominantemente arenosa e outra predominantemente argilosa. Procurou-se trabalhar com um tipo de solo que atendesse às condições ideais, tais como aquelas preconizadas pela ABCP (1985), para solo-cimento, e outro, do próprio local (FEAGRI), que não satisfizesse àquelas condições. Em ambos os casos, as amostras de solo foram coletadas à profundidade de 1,00 metro de modo a evitar-se a camada superficial, geralmente imprópria para uso devido à presença de matéria orgânica em excesso e alteração na quantidade de finos por lixiviação.

4.1.1.1. Solo arenoso

O solo arenoso foi coletado em uma área pertencente ao Assentamento Rural Sumaré II, município de Sumaré, a 25 km de Campinas-SP. O valor médio anual de precipitação, característico da região, é de 1.297 mm e a temperatura média anual, de 20,9°C (Instituto Agrônomo de Campinas, Nova Odessa, SP). O tipo climático é definido como Cwa (mesotérmico de inverno seco), de acordo com a classificação de Köppen, com altitude média de 690 metros.

4.1.1.2. Solo argiloso

O solo argiloso foi coletado em uma área pertencente ao Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP, no município de Campinas-SP, a sudeste do Estado de São Paulo. Os

valores médios anuais de precipitação e temperatura, característicos da região, são, respectivamente, 1.364 mm e 20,6 °C. O tipo climático é definido como Cwa (mesotérmico de inverno seco), de acordo com a classificação de Köppen, com altitude média de 690 metros.

4.1.2. ADITIVOS QUÍMICOS ESTABILIZADORES DE SOLO

4.1.2.1. Silicato de sódio

Foi utilizado o silicato de sódio alcalino sob as formas pura para análise e comercial. O silicato de sódio, sob a forma pura, apresentava composição química de 63% de SiO_2 e 18% de Na_2O e uma relação sílica : álcali de 3,5 : 1. Já o silicato de sódio comercial era constituído de 37% de SiO_2 e 16% de Na_2O e relação sílica : álcali de 2,3 : 1.

4.1.2.2. Cal

Foi utilizada cal cálcica hidratada CH-I, de acordo com a NBR 7175 (ABNT, 1992), da marca SUPERCAL, adquirida em casa comercial do ramo de material de construção.

4.1.2.3. Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CP II-E-32, de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1991), da marca VOTORAN, adquirido, também, em casa comercial do ramo de material de construção.

4.1.3. Equipamentos

Para a realização dos ensaios mecânicos e acústicos foram utilizados equipamentos do Laboratório de Materiais e Estruturas, do Laboratório de Instrumentação e Controle, ambos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, e do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

As análises de micro-caracterização foram realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP, Campinas-SP.

Os ensaios termofísicos foram realizados no Laboratório de Higrotermia e Iluminação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

4.1.3.1. Máquina Universal

Para os ensaios de compressão simples dos corpos-de-prova, tijolos e mini-painéis, foi utilizada uma máquina universal da marca DYNATEST, com dispositivo de controle de velocidade de carregamento e capacidade de 250.000 kN (**Figura 6**).

4.1.3.2. Máquina para fabricação de tijolos

Os tijolos foram moldados com o auxílio de uma máquina de fabricação de tijolos da marca SOLOTEST, de acionamento manual, para compactação da mistura fresca. Esta máquina, usualmente utilizada na confecção de tijolos de solo-cimento, tem capacidade de fabricação de três tijolos por prensagem, tijolos tipo II ($23 \times 11 \times 5 \text{ cm}^3$), de acordo com a norma NBR 08491 (ABNT, 1992) (**Figura 7**).

4.1.3.3. Aparelho de ultra-som

Para os ensaios acústicos foi utilizado um aparelho portátil de ultra-som *Ultrasonic tester* (Steinkamp/BP7), com emissão do impulso na frequência de 45 kHz e dotado de dois transdutores de contato (seção plana), um emissor e outro receptor da onda ultra-sonora (**Figura 8**).

4.1.3.4. Umidificador

Para a cura úmida dos corpos-de-prova, tijolos e mini-painéis, foi usado um aparelho umidificador da marca ARSEC, dotado de umidostato e termostato digitais (**Figuras 09 e 10**).

4.1.3.5. Aparelhos para a micro-caracterização dos tijolos

- Difratorômetro de Raios-X, usado para a caracterização mineralógica das amostras de solo-mistura;
- Microscópio eletrônico de varredura, usado para o estudo das transformações microestruturais ocorridas nas amostras de solo-mistura.

4.1.3.6. Aparelhos para os ensaios termofísicos

- Placa quente protegida (**Figura 11**), usado durante o ensaio de condutibilidade térmica dos tijolos;
- Calorímetro, usado durante os ensaios de calor específico dos tijolos.

Outros materiais e equipamentos de laboratório, como estufa de temperatura regulável para a determinação do teor de umidade; câmara úmida para a cura dos corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e painéis; moldes cilíndricos, soquetes e peneiras para o ensaio de compactação; balança analítica de precisão, etc., foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.



Figura 6. Máquina universal de ensaios



Figura 7. Máquina para fabricação de tijolos



Figura 8. Aparelho de ultra-som



Figura 09. Aparelho umidificador.



Figura 10. Detalhes do umidostato/termostato digital mostrando a umidade relativa (a) e a temperatura (b) da câmara-úmida.



Figura 11. Placa quente protegida.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. PROCEDIMENTOS APLICADOS AOS SOLOS

Após a coleta dos solos, os mesmos foram encaminhados ao Laboratório de Ensaio de Materiais, onde foram passados em peneira nº 4 (abertura de malha igual a 4,76 mm), e acondicionados em caixas especiais até o momento de serem utilizados.

Amostras de ambos os solos foram submetidas a ensaios de caracterização, a saber:

- determinação dos seus teores de umidade pelo método da estufa a 105 °C, durante 24 h;
- análise granulométrica, por sedimentação e peneiramento, para se determinar a distribuição em tamanho das partículas do solo, de acordo com a norma NBR 07181 (ABNT, 1984a);
- determinação da massa específica dos sólidos do solo, de acordo com a norma NBR 07251 (ABNT, 1982);
- determinação dos limites de liquidez e de plasticidade dos solos, de acordo com as normas NBR 06459 (ABNT, 1984b) e NBR 07180 (ABNT, 1984c), respectivamente;
- ensaio de compactação normal de Proctor, para a determinação da massa específica aparente seca máxima do solo natural e das misturas solo-cal e solo-cimento (6% e 10% de cal e cimento, respectivamente) e da umidade ótima correspondente, de acordo com a norma NBR 07182 (ABNT, 1986).

4.2.2. DEFINIÇÃO DOS TRATAMENTOS

Para a realização desta pesquisa, foram definidos os seguintes tratamentos:

- T₁ – solo arenoso, sem nenhuma adição (testemunha do solo argiloso);
- T₂ – solo arenoso + 6% de cimento;
- T₃ – solo arenoso + 10% de cimento;
- T₄ – solo arenoso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio;

- T₅ – solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio;
- T₆ – solo arenoso + 6% de cal;
- T₇ – solo arenoso + 10% de cal;
- T₈ – solo arenoso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio;
- T₉ – solo arenoso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio;
- T₁₀ – solo argiloso, sem nenhuma adição (testemunha do solo arenoso);
- T₁₁ – solo argiloso + 6% de cimento;
- T₁₂ – solo argiloso + 10% de cimento;
- T₁₃ – solo argiloso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio;
- T₁₄ – solo argiloso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio;
- T₁₅ – solo argiloso + 6% de cal;
- T₁₆ – solo argiloso + 10% de cal;
- T₁₇ – solo argiloso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio;
- T₁₈ – solo argiloso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio.

Os teores de 6% de cal e 6% de cimento foram escolhidos em função das recomendações de SHERWOOD (1993) que define um teor mínimo de 4% de estabilizante para a estabilização química de solos. De acordo com o autor, para teores menores que 4%, o termo “estabilização de solos” se torna inadequado, devendo ser adotado o termo “solo melhorado”. Os teores de 10% de cal e 10% de cimento foram escolhidos em função das recomendações de ROLIM *et al.* (1999) que adotaram o teor de 8% de cimento para solos com características similares ao arenoso estudado. Como margem de segurança, arbitrou-se o teor de 10%. A adição de 4% de silicato de sódio associado aos teores de cal e cimento baseou-se nas recomendações de RUFF e DAVIDSON (1961) e FREIRE (1981).

4.2.3. APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS

Os aditivos químicos foram aplicados ao solo que, em todos os casos, compreendeu a fração menor que 4,76 mm (100% passando em peneira nº 4), no seu teor de umidade natural, e a ele incorporados.

Solo-Cal

Os dois teores de cal (6% e 10%), tomados em relação ao peso do solo seco, foram a ele adicionados e misturados até perfeita homogeneização. A quantidade de silicato de sódio (4%) foi obtida inicialmente em peso e depois transformada em volume, para então ser diluída na água de amassamento cuja quantidade correspondeu à diferença entre o teor de umidade ótima de compactação e o teor de umidade natural do solo. O silicato de sódio sob a forma pura para análise foi usado nas misturas destinadas à confecção dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-aditivo. Já a forma comercial foi usada nas misturas destinadas à confecção dos tijolos e painéis de solo-aditivo.

Solo-Cimento

Os dois teores de cimento (6% e 10%) e a dose de 4% de silicato de sódio foram aplicados ao solo exatamente da mesma maneira como o foram a cal e o silicato de sódio no caso anterior.

4.2.4. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA DE SOLO-ADITIVO

Os corpos-de-prova cilíndricos de solo natural, solo-cal e solo-cimento, foram moldados de acordo com os procedimentos indicados pela norma NBR 12024 (ABNT, 1990a) que dispõe sobre a forma como são moldados e curados os corpos-de-prova de solo-cimento.

A mistura dos componentes foi feita manualmente, sendo com ela confeccionados corpos-de-prova de 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura em moldes cilíndricos apropriados. Foi exigido um grau de compactação (GC) não menor que 95,00% e não maior que 105,00% em relação aos valores de massa específica aparente seca máxima obtidos nos ensaios de

Proctor Normal, de acordo com as recomendações de BUENO e VILAR (1999). Os valores do GC (%) foram obtidos pela **Equação 9**.

$$GC(\%) = \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_s} \right) \times 100 \quad (9)$$

onde:

γ_c = massa específica aparente seca do corpo-de-prova, em g.cm⁻³;

γ_s = massa específica aparente seca máxima do solo obtida pelo ensaio de compactação normal de Proctor, em g.cm⁻³.

Após a moldagem, os corpos-de-prova, salvo os de solo-natural, foram curados em câmara úmida durante períodos de 7, 28 e 56 dias, após os quais foram rompidos à compressão simples; quatro horas antes do rompimento, foram os mesmos imersos totalmente em água, conforme a NBR 12025 (ABNT, 1990b). No caso dos corpos-de-prova de solo-cal, estes foram conservados ensacados em sacos plásticos, durante todo o período de cura, para evitar sua carbonatação. A quantidade de corpos-de-prova moldada e ensaiada encontra-se sumarizada na **Tabela 18**.

Tabela 18. Número total de corpos-de-prova de solo-aditivo moldados e ensaiados.

TRATAMENTOS	Quantidade de corpos-de-prova				Total Geral
	Ensaio de compressão simples e de ultra-som			Ensaio de absorção de água	
	7 dias	28 dias	56 dias	Somente aos 7 dias	
T ₁ – solo arenoso, sem nenhuma adição (testemunha do solo argiloso)	3	3	3	-	9
T ₂ – solo arenoso + 6% de cal	3	3	3	3	12
T ₃ – solo arenoso + 10% de cal	3	3	3	3	12
T ₄ – solo arenoso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
T ₅ – solo arenoso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
T ₆ – solo arenoso + 6% de cimento	3	3	3	3	12
T ₇ – solo arenoso + 10% de cimento	3	3	3	3	12
T ₈ – solo arenoso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
T ₉ – solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
T ₁₀ – solo argiloso, sem nenhuma adição (testemunha do solo argiloso)	3	3	3	-	9
T ₁₁ – solo argiloso + 6% de cal	3	3	3	3	12
T ₁₂ – solo argiloso + 10% de cal	3	3	3	3	12
T ₁₃ – solo argiloso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
T ₁₄ – solo argiloso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
T ₁₅ – solo argiloso + 6% de cimento	3	3	3	3	12
T ₁₆ – solo argiloso + 10% de cimento	3	3	3	3	12
T ₁₇ – solo argiloso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
T ₁₈ – solo argiloso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	12
Totais de corpos-de-prova	54	54	54	48	210

4.2.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS-DE-PROVA DE SOLO ADITIVO

A determinação da resistência à compressão simples foi feita de acordo com a norma NBR 12025 (ABNT, 1990b), que descreve a maneira como são ensaiados à compressão simples os corpos-de-prova de solo-cimento (**Figura 12**).

A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo. A resistência média foi determinada pela média aritmética de 3 repetições.



Figura 12. Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão.

4.2.6. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA NOS CORPOS-DE-PROVA DE SOLO ADITIVO

Para o ensaio de absorção de água, os corpos-de-prova cilíndricos (salvo os de solo natural) foram imersos totalmente em água, durante 24 horas, após um período de cura, em câmara úmida, de 7 dias completos (**Figura 13**).

Os corpos-de-prova foram pesados antes e depois da imersão em água, anotando-se suas massas úmida e saturada. Posteriormente, foram os mesmo secos em estufa a 105 °C,

até constância de massa, para a determinação de suas massas secas. A diferença percentual entre a massa saturada e a massa úmida do corpo-de-prova correspondeu ao valor de sua capacidade parcial de absorção de água; já a diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca correspondeu ao valor de sua capacidade total de absorção de água (**Equação 10**).



Figura 13. Corpos-de-prova cilíndricos imersos em água.

4.2.7. CONFECCÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-ADITIVO

Os tijolos referentes a cada tratamento foram moldados de acordo com a norma NBR 08491 (ABNT, 1992a) que fixa o modo como são confeccionados tijolos maciços de solo-cimento.

Uma vez preparada a mistura de solo-aditivo, os tijolos foram moldados no teor de umidade ótima de compactação normal de Proctor, adicionando-se aos poucos a água de amassamento até se obter uniformidade de mistura para colocação nas fôrmas.

A fim de garantir que os tijolos fossem submetidos à energia de compactação semelhante à do Proctor normal, procedeu-se à regulagem da prensa manual de fabricação de tijolos, baseando-se na relação entre a massa do tijolo e a massa do corpo-de-prova, partindo-se do pressuposto de que ambos, tijolo e corpo-de-prova, tivessem a mesma massa específica aparente seca máxima e a mesma umidade ótima de compactação.

Após tais providências, as misturas de solo-aditivo correspondentes a cada tratamento foram colocadas nos moldes da máquina e então realizadas as prensagens, de acordo com os

procedimentos indicados pela norma NBR 10832 (ABNT, 1992b), que dispõe sobre a maneira como são fabricados tijolos maciços de solo-cimento com a utilização de prensa manual (**Figura 14**).

A fim de se garantir a uniformidade da prensagem, foi usada somente a fôrma central (das três existentes) da máquina de fabricação de tijolos. Após a prensagem, os tijolos foram levados à câmara úmida para cura durante os períodos de 7, 28 e 56 e 91 dias, após os quais foram rompidos à compressão simples. A cura foi realizada obedecendo às recomendações da norma NBR 10832 (ABNT, 1992b) que indica uma temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $90\% \pm 2\%$. Para a manutenção dessas condições foi usado um aparelho umidificador. A **Figura 15** mostra os tijolos dentro da câmara úmida.

A quantidade de tijolos moldados e ensaiados encontra-se sumarizada na **Tabela 19**.



Figura 14. Fabricação dos tijolos.



Figura 15. Tijolos na câmara úmida.

Tabela 19. Número total de tijolos de solo-aditivo moldados e ensaiados.

TRATAMENTOS	Quantidade de tijolos					Total Geral
	Ensaio compressão simples e ultra-som				Ensaio de absorção de água	
	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	Somente aos 7 dias	
T ₁ – solo arenoso, sem nenhuma adição (testemunha do solo argiloso)	3	3	3	3	-	12
T ₂ – solo arenoso + 6% de cal	3	3	3	3	3	15
T ₃ – solo arenoso + 10% de cal	3	3	3	3	3	15
T ₄ – solo arenoso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
T ₅ – solo arenoso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
T ₆ – solo arenoso + 6% de cimento	3	3	3	3	3	15
T ₇ – solo arenoso + 10% de cimento	3	3	3	3	3	15
T ₈ – solo arenoso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
T ₉ – solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
T ₁₀ – solo argiloso, sem nenhuma adição (testemunha do solo argiloso)	3	3	3	3	-	12
T ₁₁ – solo argiloso + 6% de cal	3	3	3	3	3	15
T ₁₂ – solo argiloso + 10% de cal	3	3	3	3	3	15
T ₁₃ – solo argiloso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
T ₁₄ – solo argiloso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
T ₁₅ – solo argiloso + 6% de cimento	3	3	3	3	3	15
T ₁₆ – solo argiloso + 10% de cimento	3	3	3	3	3	15
T ₁₇ – solo argiloso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
T ₁₈ – solo argiloso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	3	3	15
Totais de tijolos	54	54	54	54	48	274

4.2.8. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES DOS TIJOLOS DE SOLO-ADITIVO

Os tijolos foram preparados de acordo com os procedimentos indicados pela norma NBR 08492 (ABNT, 1992b), que dispõe sobre a forma como é determinada a resistência à compressão simples de tijolos maciços. Para tal, foram os mesmos serrados ao meio e as duas metades superpostas, tendo suas faces ligadas com uma camada fina de pasta de cimento, de 1 mm a 2 mm de espessura, aplicada com o auxílio de uma espátula. Em seguida, procedeu-se o capeamento das faces superior e inferior e das reentrâncias dos tijolos, com a mesma pasta de cimento.

Após o endurecimento da pasta de cimento, os tijolos foram imersos em água durante 24 h, antes de serem rompidos à compressão simples.

As **Figuras 16 a 20** apresentam a sequência das etapas preparatórias para o ensaio de compressão simples aplicado aos tijolos.



Figura 16. Tijolo sendo serrado ao meio.



Figura 17. União das duas metades e capeamento do prisma.



Figura 18. Aspecto dos prismas após o capeamento das superfícies superior e inferior.



Figura 19. Prismas sob imersão em água.

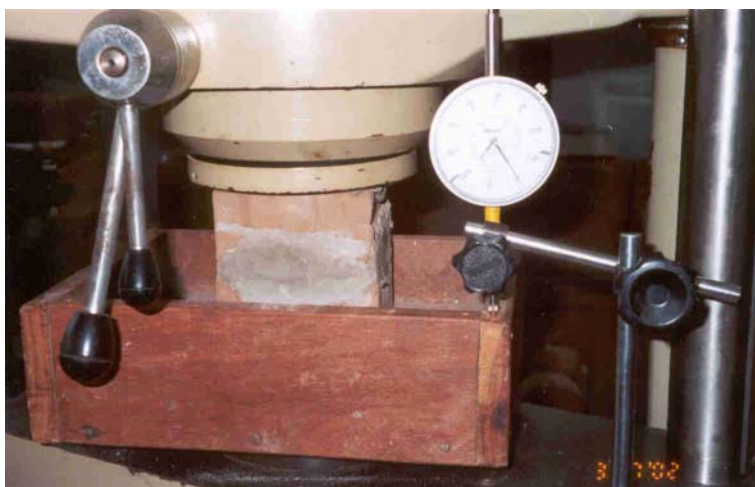


Figura 20. Tijolo sob compressão.

4.2.9. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS TIJOLOS DE SOLO-ADITIVO

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 08492 (ABNT, 1992b). Os tijolos foram levados à estufa, entre 105 °C e 110 °C, até constância de massa, obtendo-se assim a massa do tijolo seco em estufa, em gramas. Em seguida, os tijolos foram imersos em água durante 24 h. Após este período, os tijolos foram

retirados, enxugados superficialmente e novamente pesados, anotando-se sua massa saturada, em gramas (**Figura 21**).

Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela **Equação 10**.

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} 100 \quad (10)$$

onde:

M_1 = massa do tijolo seco em estufa, em gramas

M_2 = massa do tijolo saturado, em gramas

A = absorção de água, em porcentagem



a)



b)

Figura 21. Ensaio de absorção de água aplicado aos tijolos: a) tijolos secos em estufa; b) tijolos imersos em água.

4.2.10. CONFECÇÃO DOS MINI-PAINÉIS DE TIJOLOS DE SOLO-ADITIVO

Os mini-painéis foram confeccionados obedecendo aos procedimentos dispostos na ASTM C-1388 (1997), que dispõe sobre o ensaio de compressão simples de prismas de alvenaria.

Os mini-painéis foram obtidos por meio do assentamento de 4 (quatro) fiadas de tijolos, sendo cada fiada constituída de 1 tijolo. As juntas de assentamento tiveram a espessura constante de aproximadamente 1cm (**Figura 22**).

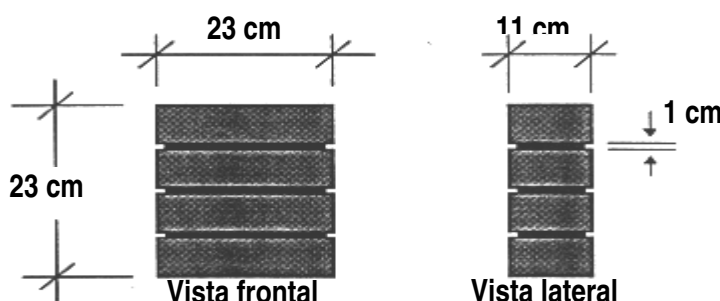


Figura 22. Características geométricas dos mini-painéis.

Foi empregada argamassa de assentamento composta de cimento, cal e solo (arenoso), no traço 1:1:5, em função das recomendações de NASCIMENTO e HELENE (1988) e FRANCO (1988). Tal argamassa, segundo esses autores, minimiza os efeitos da fissuração.

O assentamento dos tijolos foi realizado aos 14 dias após a moldagem dos mesmos. Para a preparação da argamassa de assentamento foi utilizada uma argamassadeira mecânica. Foi usada uma guia de madeira para garantir a mesma espessura a todas as juntas de assentamento. Um nível de pedreiro foi empregado para o controle do paralelismo entre as quatro fiadas de tijolos. A seqüência de assentamento foi a seguinte:

- Mistura mecânica dos componentes em argamassadeira, conforme as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1991) (**Figura 23**);
- Assentamento dos tijolos (**Figura 24**);
- Controle da espessura das juntas de assentamento com o auxílio da guia de madeira (**Figura 25**); e
- Controle do paralelismo entre as fiadas dos tijolos com auxílio de um nível de pedreiro (**Figura 26**).



Figura 23. Mistura mecânica.



Figura 24. Assentamento dos tijolos.



Figura 25. Retirada da guia.

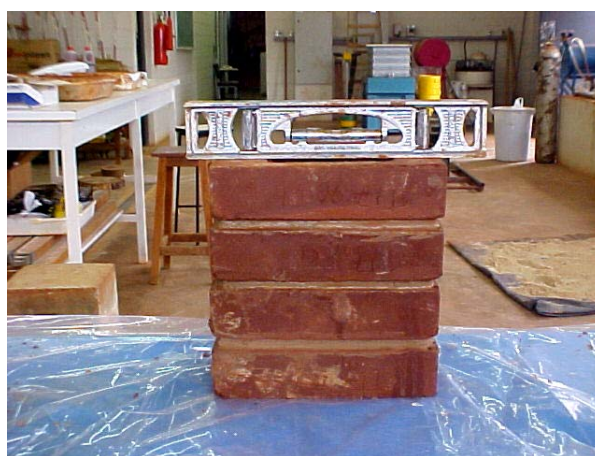


Figura 26. Verificação do paralelismo.

Uma vez confeccionados, os mini-painéis foram levados à câmara úmida (**Figura 27**) sob temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $90\% \pm 2\%$. Os mesmos permaneceram na câmara úmida por períodos de 28, 56 e 91 dias, quando então foram submetidos aos ensaios de ultra-som e compressão simples. A quantidade de mini-painéis confeccionada e ensaiada encontra-se sumarizada na **Tabela 20**.



Figura 27. Mini-painéis na câmara úmida.

Com a finalidade de caracterizar a argamassa de assentamento, foram realizados ensaios de consistência (*flow-table*) e compressão simples.

O ensaio de consistência normal foi realizado com o intuito de determinar a quantidade da água de amassamento para uma argamassa de consistência normal, através da determinação do índice de consistência normal.

Para isso, foram seguidos os procedimentos recomendados pelos anexos 1, 2, 3, 4 e 5, descritos pela norma NBR 7215 (ABNT, 1991). Foram preenchidas fôrmas em formato tronco de cone com a argamassa a ser ensaiada. Após seu enchimento, foi retirada imediatamente a fôrma contendo a argamassa, levantando-a verticalmente com cuidado e, em seguida, a manivela do aparelho (*flow table*) foi movimentada para a medida de consistência, fazendo com que a mesa caísse 30 vezes em aproximadamente 30 segundos, o que provocou o abatimento do tronco de cone da argamassa. A medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa, após o abatimento, foi feita com auxílio de um paquímetro e expressa em milímetros (**Figura 28**).



a)



b)

Figura 28. Ensaio de consistência da argamassa: (a) mesa de abatimento com o corpo-de-prova tronco-cônico antes do ensaio; (b) medida da base do corpo-de-prova tronco-cônico após o ensaio.

Foi também determinada a resistência à compressão simples da argamassa de assentamento, procedendo-se a confecção de corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1991) (**Figura 29**). Após a moldagem, corpos-de-prova de argamassa foram curados em câmara úmida e rompidos após os períodos de 14, 42 e 77 dias (**Figura 30**). Tais idades de cura foram escolhidas a fim de coincidirem com as idades de ruptura dos painéis (28, 56 e 91 dias).



Figura 29. Corpos-de-prova de argamassa.

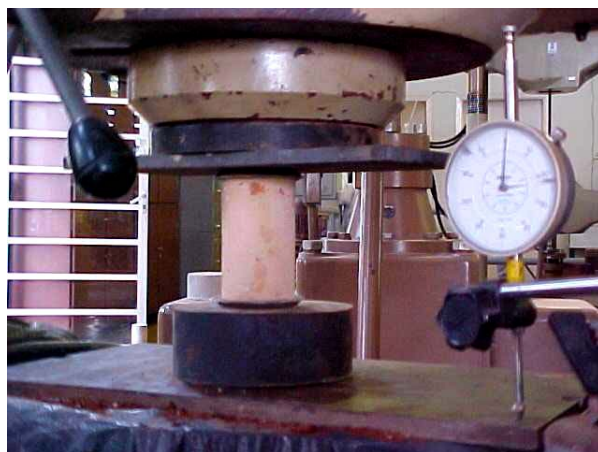


Figura 30. Corpos-de-prova de argamassa sob compressão.

Tabela 20. Número total de tijolos de solo-aditivo moldados e total de mini-painéis ensaiados.

TRATAMENTOS	Quantidade de mini-painéis			Total Geral
	Ensaio de compressão simples e de ultra-som			
	28 dias	56 dias	91 dias	
T ₁ – solo arenoso, sem nenhuma adição (testemunha do solo argiloso)	3	3	3	9
T ₂ – solo arenoso + 6% de cal	3	3	3	9
T ₃ – solo arenoso + 10% de cal	3	3	3	9
T ₄ – solo arenoso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
T ₅ – solo arenoso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
T ₆ – solo arenoso + 6% de cimento	3	3	3	9
T ₇ – solo arenoso + 10% de cimento	3	3	3	9
T ₈ – solo arenoso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
T ₉ – solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
T ₁₀ – solo argiloso, sem nenhuma adição (testemunha do solo argiloso)	3	3	3	9
T ₁₁ – solo argiloso + 6% de cal	3	3	3	9
T ₁₂ – solo argiloso + 10% de cal	3	3	3	9
T ₁₃ – solo argiloso + 6% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
T ₁₄ – solo argiloso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
T ₁₅ – solo argiloso + 6% de cimento	3	3	3	9
T ₁₆ – solo argiloso + 10% de cimento	3	3	3	9
T ₁₇ – solo argiloso + 6% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
T ₁₈ – solo argiloso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio	3	3	3	9
Totais de mini-painéis	54	54	54	162
Totais de tijolos	216	216	216	648

4.2.11. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES DOS MINI-PAINÉIS DE SOLO-ADITIVO.

Os procedimentos foram conduzidos de acordo com a norma ASTM C-1388 (1997).

A **Figura 31** mostra um painel sendo submetido ao ensaio de compressão simples.



Figura 31. Mini-painel sob compressão simples.

4.2.12. ENSAIO DE ULTRA-SOM APLICADO AOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS, TIJOLOS E MINI-PAINÉIS DE SOLO-ADITIVO.

4.2.12.1. Escolha da frequência de emissão da onda

A escolha da frequência baseou-se nas recomendações de BUCUR (citado por PUCCINI, 1995), buscando a frequência que resultasse em uma relação L/λ igual ou superior a três, conforme a **Figura 5**.

Para tal, foram escolhidos transdutores de contato para a emissão e recepção da onda-ultra-sônica na frequência de 45 kHz (**Figura 8**). Em seguida foram realizados testes preliminares durante os quais a velocidade de propagação da onda foi medida nos corpos-de-prova cilíndricos apresentados na **Tabela 18**. A partir dos valores de velocidade foi calculado o comprimento da onda pela **Equação 8**.

A **Figura 32** mostra um corpo-de-prova cilíndrico sendo submetido ao teste preliminar para a escolha da frequência de ressonância da onda ultra-sônica.



Figura 32. Teste preliminar para a escolha da frequência de ressonância.

4.2.12.2. Evolução da velocidade em função da idade

A evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função das idades de cura foi realizado somente para os corpos-de-prova cilíndricos durante os períodos de 0, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56 dias após a moldagem dos mesmos. Para tal foram medidos os tempos de propagação da onda através de sua seção longitudinal. Para os tijolos e painéis, a onda ultra-sônica foi emitida na posição axial momentos antes do ensaio de compressão simples (**Figura 33**). A transmissão do impulso foi feita de forma direta.

A velocidade da onda ultra-sônica foi obtida pela **Equação 11** (QASRAWI, 2000).

$$V = \frac{d}{t} 1000 \quad (11)$$

onde:

V = velocidade da onda ultra-sônica (m.s^{-1});

d = distância percorrida pela onda (mm);

t = tempo transcorrido no percurso (μs).

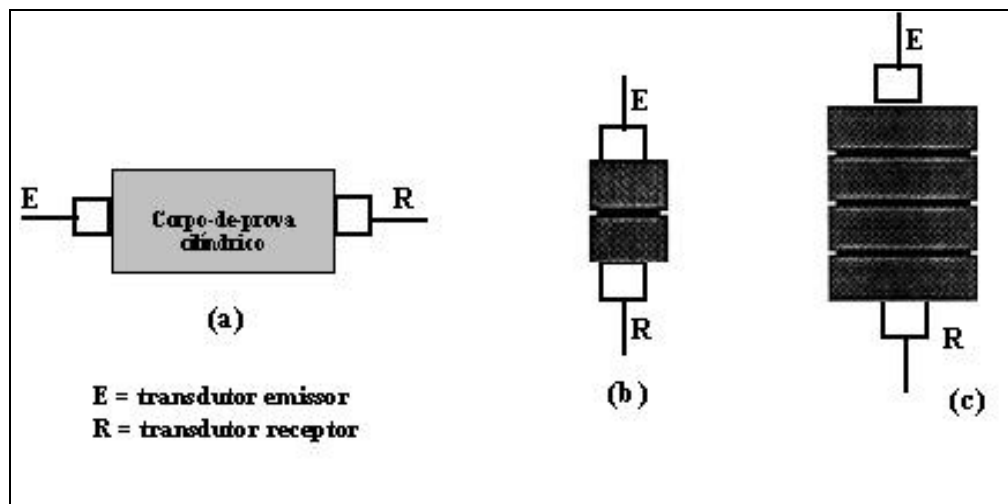


Figura 33. Esquema da transmissão direta do impulso ultra-sônico nos corpos-de-prova cilíndricos (a), tijolos (b) e mini-painéis (c).

4.2.13. CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E VELOCIDADE DA ONDA ULTRA-SÔNICA

Para o estudo das relações entre a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e a resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos foram obtidos os pares de valores (resistência e velocidade) e confeccionados os gráficos $R = f(v)$, onde:

R = resistência à compressão simples dos corpos-de-prova, em MPa;

v = velocidade de propagação da onda ultra-sônica, em m.s^{-1} .

4.2.14. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS

As propriedades elásticas dos corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e mini-painéis foram obtidas por meio de método não-destrutivo mediante a determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido mediante a orientação do *American Society for Testing Materials*, pelo método de ensaio C-597 – “Pulse Velocity Through

Concrete” (ASTM, 1983) que relaciona a velocidade de ondas ultra-sônicas num sólido, com algumas propriedades físicas desse sólido através da **Equação 13**.

$$E_d = \rho V^2 . 10^{-6} \quad (13)$$

onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

ρ = massa específica aparente do sólido (kg.m^{-3});

V = velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m.s^{-1}).

4.2.15. COMBINAÇÃO DE MÉTODOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS TIJOLOS DE SOLO-ADITIVO

4.2.15.1. Anisotropia total

A anisotropia total é um parâmetro qualitativo que expressa a estrutura anisotrópica de um material, e foi calculado pela **Equação 14** (CAZALLA *et al.*, 1999).

$$\Delta M = 100 \left[1 - \frac{2V_1}{(V_2 + V_3)} \right] \quad (14)$$

onde:

ΔM = anisotropia total, em %;

V_1 = velocidade obtida através da menor distância do tijolo, em m.s^{-1} ;

V_2 = velocidade obtida através da distância média do tijolo, em m.s^{-1} ;

V_3 = velocidade obtida através do comprimento do tijolo, em m.s^{-1} .

A **Figura 34** ilustra os diferentes eixos de leitura da onda ultra-sônica nos tijolos de solo-aditivo.

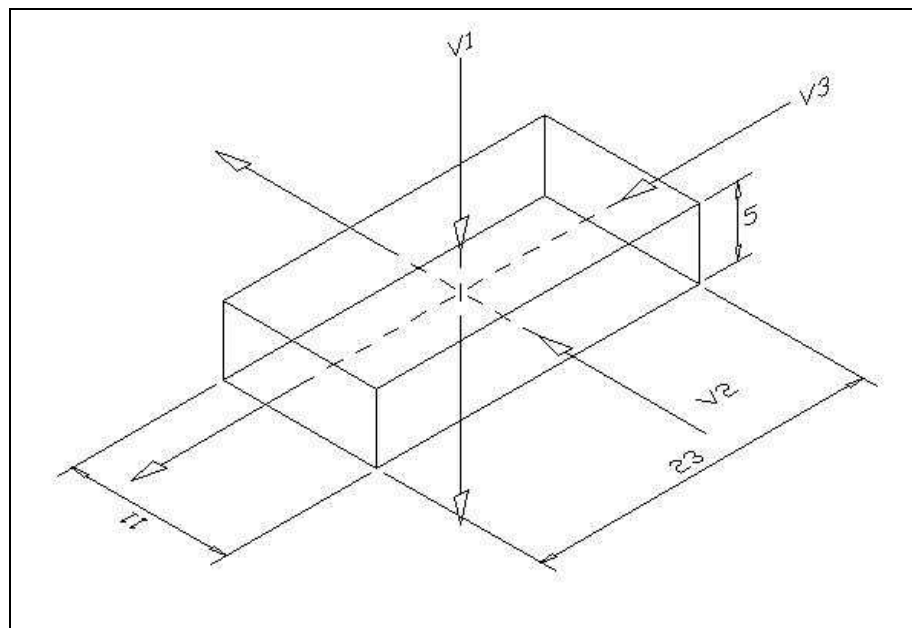


Figura 34. Eixos de leitura da velocidade nos tijolos (dimensões em centímetros).

4.2.15.2. Resistência anisotrópica

Através da combinação dos resultados da resistência à compressão simples e da anisotropia total, foi calculado o parâmetro quantitativo proposto por CULTRONE *et al.* (2001) denominado de resistência anisotrópica expressa pela **Equação 15**.

$$R_A = \frac{R_C}{\Delta M} \quad (15)$$

onde:

R_C = resistência à compressão simples, MPa;

ΔM = anisotropia total, %

R_A = resistência anisotrópica, MPa.%⁻¹.

4.2.16. ANÁLISES DE MICRO-CARACTERIZAÇÃO

A fim de se obter informações para um estudo mais preciso do grau de estabilização das misturas solo-aditivo foram usadas técnicas analíticas de caracterização de materiais em complemento aos testes mecânicos e ao ultra-som. Essas análises foram realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP.

Para tal, foram coletadas amostras dos mini-painéis logo após sua ruptura (aos 91 dias de idade). Foram escolhidos somente dois tratamentos para serem analisados:

- 1) o que proporcionou o melhor desempenho físico-mecânico em termos de resistência à compressão simples e absorção de água, representado pela mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento associado ao silicato de sódio);
- 2) e a mistura T3 (solo arenoso + 10% de cimento), nesse caso correspondente à testemunha da mistura T5.

4.2.16.1. Difração de raios-X (DRX)

A DRX foi útil na identificação mineralógica e evolução da hidratação dos compostos formados após a cura dos tijolos.

As análises foram realizadas em um difratômetro de raios-X (marca e modelo Shimadzu – XRD 600), com tubo de alvo de cobre, usando um filtro de níquel de massa específica superficial de $0,019 \text{ g.cm}^{-2}$ (0,021 mm de espessura), transmitindo um comprimento de onda de $1,5406 \text{ \AA}$, movendo a uma velocidade de $3,49^\circ.\text{min}^{-1}$, em arco de círculo, com voltagem de 40 kV e corrente de 20 mA; os ângulos de varredura situaram-se entre 4° e 64° .

4.2.16.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O emprego da MEV permitiu evidenciar a morfologia dos compostos hidratados. Acoplada à aquisição da imagem, foi realizada a análise dos elementos presentes na mistura solo-aditivo através da espectrometria de dispersão de energia (EDS). Primeiramente, as amostras foram secadas em lâminas de vidro, sendo, logo após, submetidas a um processo de metalização em ouro / paládio na proporção de 80:20 pela técnica “sputtering”. As imagens foram obtidas por um microscópio eletrônico marca e modelo Jeol JSM – 6360 LV e a análise de EDS foi realizada pelo equipamento Jeol JSM – TM 300.

4.2.17. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Foram ensaiados somente tijolos obtidos a partir da mistura solo-aditivo que proporcionou os melhores resultados em termos de desempenho físico-mecânico, ou seja, a mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento e 4% de silicato de sódio). Os ensaios foram realizados em tijolos com 91 dias de idade.

Os procedimentos foram conduzidos de acordo com o Projeto de Norma 02:135.07-004 (ABNT, 2003d) que trata da medição da resistência térmica [(m.K/W)] e da condutibilidade térmica [W/(m.K)] pelo princípio da placa quente protegida. O calor específico [kJ/(kg.K)] foi obtido mediante os procedimentos da ASTM C-351-92b (ASTM, 1999).

Para os efeitos do Projeto de Norma 02:135.07-004 (ABNT, 2003d), foram adotados as definições, símbolos e abreviaturas constantes no Projeto de Norma 02:135.07-001 (ABNT, 2003a) e as seguintes definições:

a) Condutibilidade térmica (λ)

A condutibilidade térmica [W/(m.K)] é o quociente do fluxo de calor pelo gradiente de temperatura nos corpos-de-prova, conforme **Equação 16**.

$$\lambda = \frac{q / A}{\Delta T / e} \quad (16)$$

onde:

q = fluxo de calor por condução através do corpo-de-prova, em regime permanente (em W);

e = espessura (em metros);

A = área (em metros);

ΔT = diferença de temperatura entre as faces (em K).

O fluxo de calor é calculado pela **Equação 17**.

$$q = \frac{\lambda \cdot A}{e} \Delta T \quad (17)$$

b) Resistência térmica (R)

A resistência térmica [(m.K)/W] de uma camada homogênea de material sólido é o valor obtido pela **Equação 18**.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (18)$$

c) Resistência térmica de um componente (parede)

c.1. Componentes com camadas homogêneas

A resistência térmica total de um componente plano constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pelas **Equações 19 e 20**.

c.1.1. Superfície a superfície (R_t)

A resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano sólido constituído de camadas homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela **Equação 19**.

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} \quad (19)$$

onde:

$R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{tn}$ = resistências térmicas das n camadas homogêneas, determinadas pela **Equação 18**;

c.1.2. Ambiente a ambiente (R_T)

A resistência térmica de ambiente a ambiente é dada pela **Equação 20**.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (20)$$

onde:

R_t = resistência térmica de superfície a superfície, determinada pela **Equação 19**;

R_{se} e R_{si} = resistências superficiais externa e interna, respectivamente, obtidas da **Tabela 21**.

De acordo com o Projeto de Norma 02:135.07-002 (ABNT, 2003b), a resistência térmica superficial varia de acordo com vários fatores tais como: emissividade, velocidade do ar sobre a superfície e temperaturas da superfície, do ar e superfícies próximas. A **Tabela 21** apresenta valores médios recomendados.

Tabela 21. Resistência térmica superficial interna e externa.

$R_{si} (m^2.K)/W$			$R_{se} (m^2.K)/W$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: Projeto de Norma 02:135.07-002 (ABNT, 2003b).

c.2. Componentes com camadas homogêneas e não homogêneas

A resistência térmica total de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas (exemplo: paredes argamassadas em ambas as faces), perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pelas **Equações 21 e 22**.

c.2.1. Superfície a superfície (R_t)

A resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela **Equação 21**.

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (21)$$

onde:

$R_a, R_b, \dots, R_n$ = resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela **Equação 19**;

$A_a, A_b, \dots, A_n$ = áreas de cada seção.

c.2.2. Ambiente a ambiente (R_T)

A resistência térmica de ambiente a ambiente é dada pela **Equação 22**.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (22)$$

onde:

R_t = resistência térmica de superfície a superfície, determinada pela **Equação 21**;

R_{se} e R_{si} = resistências superficiais externa e interna, respectivamente, obtidas da **Tabela 21**.

d) Transmitância térmica ou coeficiente global de transmissão de calor (U)

A transmitância térmica [$W/(m.K)$] corresponde ao inverso da resistência térmica total (R_T) e é dada pela **Equação 23**.

$$U = 1 / R_T \quad (23)$$

e) Capacidade térmica (C_T)

Refere-se à quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema, nesse caso do componente em estudo.

e.1. Componentes com camadas homogêneas

A capacidade térmica [$kJ/(m^2.K)$] de um componente plano constituído de

camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pela **Equação 24**.

$$C_T = e.c.\rho \quad (24)$$

onde:

e = espessura do material, em metros;

c = calor específico, em kJ/(kg.K);

ρ = massa específica aparente, em kg/m³.

e.2. Componentes com camadas homogêneas e não homogêneas

A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela **Equação 25**.

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \text{ em kJ/(m}^2\text{.K)} \quad (25)$$

onde:

$C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$ = capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela **Equação 24**;

$A_a, A_b, \dots, A_n$ = áreas de cada seção.

f) Calor específico (c)

Corresponde à quantidade de calor necessária para variar em uma unidade de temperatura uma unidade de massa de um material.

g) Atraso térmico de um componente (ϕ)

É o tempo (em horas) transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor

g.1 Caso de elemento homogêneo

Em uma placa homogênea (constituída por um único material), com espessura “e” e submetida a um regime térmico variável e senoidal com período de 24 horas, o atraso térmico pode ser estimado pelas **Equações 26 e 27**.

$$\varphi = 1,382.e.\sqrt{\frac{\rho.c}{3,6.\lambda}} \quad (26)$$

$$\varphi = 0,7284.\sqrt{R_t.C_T} \quad (27)$$

onde:

φ = atraso térmico, em horas;

e = espessura da placa, em metros;

λ = condutibilidade térmica do material, em W/(m.K);

ρ = densidade de massa aparente do material, em kg/m³;

c = calor específico do material, em kJ/(kg.K);

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do componente, em (m².K)/W;

C_T = capacidade térmica do componente, em kJ/(m².K).

g.2. Caso de elemento heterogêneo

No caso de um componente formado por diferentes materiais superpostos em “n” camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), o atraso térmico varia conforme a ordem das camadas.

Para calor específico quando em kJ/(kg.K), o atraso térmico é determinado através da **Equação 28**.

$$\varphi = 1,382.R_t.\sqrt{B_1 + B_2} \quad (28)$$

onde

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do componente;

B_1 é dado pela **Equação 29**;

B_2 é dado pela **Equação 30**.

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t} \quad (29)$$

onde:

B_0 é dado pela **Equação 31**.

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_t} \right) \cdot \left(R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right) \quad (30)$$

$$B_0 = C_T - C_{\text{Text}} \quad (31)$$

onde:

C_T = capacidade térmica total do componente ;

C_{Text} = capacidade térmica da camada externa do componente.

Notas:

- 1) Nas **Equações 30 e 31**, o índice "ext" se refere à última camada do componente, junto à face **externa**.
- 2) Considerar B_2 nulo caso seja negativo.

h) Fator de calor solar (FS)

O fator de calor solar (ou apenas fator solar) é o quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo. O fator solar é dado pela **Equação 32**.

$$FS = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} \quad (32)$$

onde:

FS = fator solar em percentagem ;

U = transmitância térmica do componente;

α = absorptância à radiação solar – função da cor;

R_{se} = resistência superficial externa, dada pela **Tabela 21**.

Como R_{se} é admitido constante e igual a 0,04, a **Equação 32** pode ser rescrita na forma da **Equação 33**.

$$FS = 4.U.\alpha \quad (33)$$

Quando deve-se respeitar um limite de fator solar para uma determinada região, pode-se determinar o máximo valor de α em função do fator solar e da transmitância térmica, conforme mostra a **Equação 34**.

$$\alpha \leq FS / (4.U) \quad (34)$$

A partir dos valores da condutibilidade térmica e do calor específico obtidos durante os ensaios, foram determinadas as seguintes propriedades termofísicas dos tijolos:

- resistência térmica, em $(m^2.K)/W$ (**Equação 18**);
- capacidade térmica, em kJ/kg (**Equação 24**);
- atraso térmico, em horas (**Equação 26**);

A partir da simulação teórica de uma parede de tijolos obtidos da mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio) foram determinadas as seguintes propriedades termofísicas:

- resistência térmica total, em $(m^2.K)/W$ (**Equação 22**);
- transmitância térmica, em $W/(m^2.K)$ (**Equação 23**);
- capacidade térmica da parede; em $kJ/(m^2.K)$ (**Equação 25**);
- atraso térmico da parede, em horas (**Equação 27**);
- fator de calor solar, em % (**Equação 33**).

Essas determinações foram realizadas de acordo com os exemplos de cálculo constantes no Projeto de Norma 02:135:07-002 (ABNT, 2003b).

4.2.17.1. Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de condutibilidade térmica

Para o ensaio de condutibilidade térmica o Projeto de Norma da ABNT 02:135.07-004 (2003d) recomenda o uso de corpos-de-prova (placas) com espessura variando de 25 mm a 75 mm. Foi adotada uma espessura de 25 mm. Já a largura e o comprimento do corpo-de-prova foram escolhidos em função das dimensões das placas quente e fria do aparato experimental, ou seja, 305 mm x 305 mm.

Dessa forma, foram selecionados tijolos moldados exclusivamente para esse fim. Após sua escolha os tijolos (230 mm x 110 mm x 50mm) foram serrados longitudinalmente até a obtenção de peças nas dimensões de 230 mm x 110 mm x 25 mm (**Figura 35**).

Posteriormente as peças obtidas tiveram sua superfície regularizada com o auxílio de lixa (**Figura 36**) seguida de sua colagem (adesivo de contato à base de policloropreno, marca comercial CASCOLA) (**Figura 37**) para a obtenção das placas nas dimensões de 305 mm x 305 mm x 25 mm. Foram confeccionadas duas placas para o ensaio de condutibilidade térmica, uma para a placa quente e outra para a placa fria (**Figura 38**).



Figura 35. Tijolo serrado longitudinalmente.



Figura 36. Superfície do tijolo serrado longitudinalmente sendo lixada.



Figura 37. Colagem dos tijolos para obtenção da placa.

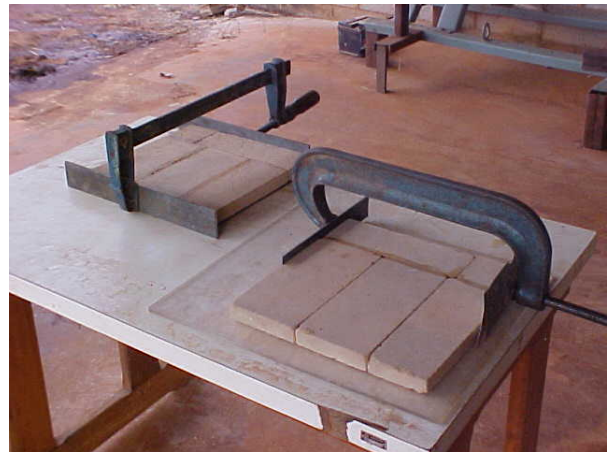


Figura 38. Placas prontas para o ensaio de condutibilidade térmica.

Princípios gerais do ensaio

A determinação da condutibilidade térmica por este método envolve a medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo-de-prova, a partir de um certo fluxo de calor e em condições de regime permanente.

Foi usada uma *Guarded Hot Plate* (placa quente protegida) da marca Holometrix, modelo GHP 300. O equipamento é composto de um módulo de ensaio com três placas aquecedoras, dois dissipadores de calor com circulação de água, termopares, fios de alimentação e dispositivo eletro-mecânico para movimentação das placas.

Na **Figura 39** está representado um esquema indicando os corpos-de-prova posicionados entre as placas para o ensaio.

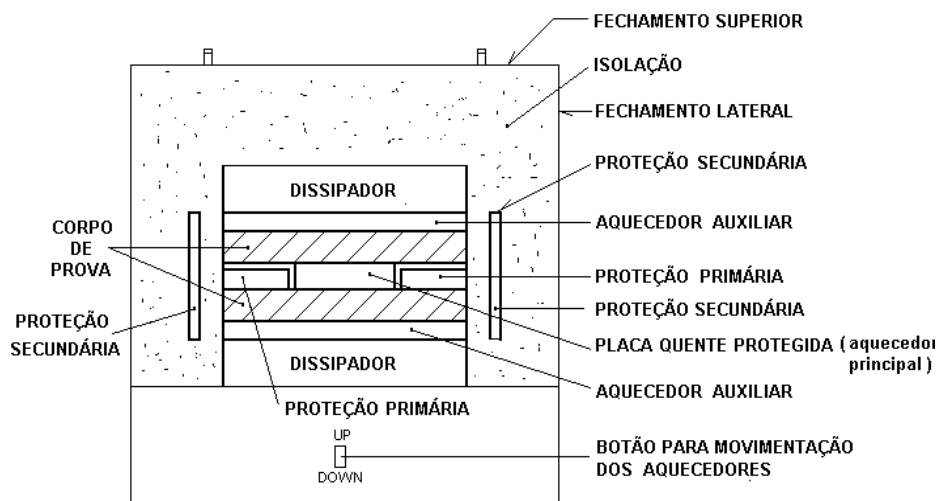


Figura 39. Esquema dos corpos-de-prova entre as placas de ensaio.

4.2.17.2. Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de calor específico

De acordo com a ASTM C 351/92b (ASTM, 1999), a execução do ensaio de calor específico é realizado em cilindros obtidos a partir do material a ser analisado. Os cilindros devem possuir as seguintes características geométricas: 24 mm de diâmetro por 49 mm de altura com um furo central de 4,5 mm de diâmetro e 20 mm de profundidade (**Figuras 40 e 41**).



Figura 40. Cilindros prontos.



Figura 41. Vista superior dos cilindros prontos.

Para tal foram seleccionados tijolos moldados para esse fim. Após sua escolha os mesmos foram serrados até a obtenção de cubos, a partir dos quais os cilindros foram obtidos. As **Figuras 42 a 45** mostram a seqüência para a confecção dos cilindros.



Figura 42. Tijolo sendo serrado para a obtenção do cubo.



Figura 43. Detalhe do tijolo sendo serrado para a obtenção do cubo.



Figura 44. Acabamento superficial do cilindro.



Figura 45. Confecção do furo central.

Princípios gerais do ensaio

Neste tipo de ensaio é usado um calorímetro que mede o calor absorvido por ele. O calorímetro tem uma capacidade de calor bem definida, isto é, a quantidade de energia pode ser calculada a partir do aumento da temperatura registrada pelo aparelho.

Os material em estudo é colocado dentro de cápsulas com superfície externa e interna espelhadas (frasco de Dewar). São introduzidos termopares no interior dos furos dos cilindros. As cápsulas contendo os cilindros são aquecidas até temperatura em torno de 95°C a 98°C e posteriormente mergulhadas em um recipiente contendo água deionizada a temperatura ambiente. O calor proveniente das cápsulas é então transferido para a água e através de um termômetro diferencial (tipo Beckmann) é traçada a curva do aumento de temperatura da água até o ponto de equilíbrio. O calor específico é então obtido por uma seqüência de cálculos que leva em consideração diversos parâmetros relacionados à curva de temperatura da água, massa específica do frasco e da água, massa dos cilindros, etc.

4.2.18. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram conduzidos em um delineamento inteiramente casualizado (DIC) montados em esquema fatorial 2 x 9x 3 e 2 x 9 x 4. Foram estudadas as interações entre os dois tipos de solo, as nove combinações de mistura solo-aditivo (incluindo as testemunhas) e os três períodos de cura, para o caso dos corpos-de-prova cilíndricos e mini-painéis e os quatro períodos de cura, para o caso dos tijolos, através de Análise de Variância (ANOVA) (**Tabelas 22 e 23**). Cada tratamento foi conduzido com três repetições.

As variáveis respostas analisadas estatisticamente corresponderam aos valores médios de resistência à compressão simples, capacidade de absorção de água, resistência anisotrópica e módulo de elasticidade dinâmico obtidos dos corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e mini-painéis de solo-aditivo. Foi aplicado o teste de Tukey para a comparação das médias, ao nível de 5% de significância estatística.

O estudo das interações entre os fatores foi realizado com o auxílio do pacote estatístico *Statgraphics Plus 2.1®*. Já a comparação das médias pelo teste de Tukey foi realizada pelo programa *ESTAT* – Sistema para análises estatísticas (versão 2.0) (UNESP / FCAV – Deptº de Ciências Exatas – Campus de Jaboticabal-SP).

Tabela 22. Análise de variância de acordo com o esquema fatorial 2x9x3 aplicada para os corpos-de-prova cilíndricos e mini-painéis de solo-aditivo.

Causas de variação	GL.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A	1	SQ_A	SQ_A/GL_A	$QM_A/QM_{Resíduo}$
Fator B	8	SQ_B	SQ_B/GL_B	$QM_B/QM_{Resíduo}$
Fator C	2	SQ_C	SQ_C/GL_C	$QM_C/QM_{Resíduo}$
Fator A x B	8	SQ_{AXB}	SQ_{AXB}/GL_{AXB}	$QM_{AXB}/QM_{Resíduo}$
Fator A x C	2	SQ_{AXC}	SQ_{AXC}/GL_{AXC}	$QM_{AXC}/QM_{Resíduo}$
Fator B x C	16	SQ_{BXC}	SQ_{BXC}/GL_{BXC}	$QM_{BXC}/QM_{Resíduo}$
Fator A x B x C	16	SQ_{AXBXC}	SQ_{AXBXC}/GL_{AXBXC}	$QM_{AXBXC}/QM_{Resíduo}$
Tratamentos	53	SQ_{TRAT}	SQ_{TRAT}/GL_{TRAT}	
Resíduos	108	$SQ_{TOT}-SQ_{TRAT}$	$SQ_{Resíduo}/GL_{Resíduo}$	
Total	161	SQ_{TOT}		

Fator A = tipo de solo; Fator B = adições; Fator C = período de cura.

Tabela 23. Análise de variância de acordo com o esquema fatorial 2x9x4 aplicada para os tijolos de solo-aditivo.

Causas de variação	GL.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A	1	SQ_A	SQ_A/GL_A	$QM_A/QM_{Resíduo}$
Fator B	8	SQ_B	SQ_B/GL_B	$QM_B/QM_{Resíduo}$
Fator C	3	SQ_C	SQ_C/GL_C	$QM_C/QM_{Resíduo}$
Fator A x B	8	SQ_{AXB}	SQ_{AXB}/GL_{AXB}	$QM_{AXB}/QM_{Resíduo}$
Fator A x C	3	SQ_{AXC}	SQ_{AXC}/GL_{AXC}	$QM_{AXC}/QM_{Resíduo}$
Fator B x C	24	SQ_{BXC}	SQ_{BXC}/GL_{BXC}	$QM_{BXC}/QM_{Resíduo}$
Fator A x B x C	24	SQ_{AXBXC}	SQ_{AXBXC}/GL_{AXBXC}	$QM_{AXBXC}/QM_{Resíduo}$
Tratamentos	71	SQ_{TRAT}	SQ_{TRAT}/GL_{TRAT}	
Resíduos	144	$SQ_{TOT}-SQ_{TRAT}$	$SQ_{Resíduo}/GL_{Resíduo}$	
Total	215	SQ_{TOT}		

Fator A = tipo de solo; Fator B = adições; Fator C = período de cura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

A **Tabela 24** sumariza os resultados dos ensaios preliminares de caracterização aplicados aos solos arenoso e argiloso tão logo foram coletados.

Tabela 24. Características físico-mecânicas dos solos estudados.*

Índices físicos		ARENOSO	ARGILOSO
Umidade natural (%)		3,75	17,01
Massa específica dos sólidos (g.cm ⁻³)		2,65	2,90
Limite de Liquidez (%)		NP	44,67
Limite de Plasticidade (%)		NP	36,28
Índice de Plasticidade (%)		NP	8,39
Distribuição granulométrica (%)			
Pedregulho (>2mm)		0,00	0,00
Areia (0,05 – 2 mm)		68,35	39,35
Silte (0,005 – 0,05 mm)		20,25	30,55
Argila (< 0,005 mm)		11,50	30,10
Porcentagem que passa na peneira 200 (0,074 mm)		33,30	63,80
Compactação Proctor Normal			
Massa específica aparente seca máxima (g.cm ⁻³)	0% (nenhuma adição)	1,96	1,60
	6% de cimento	1,97	1,62
	10% de cimento	1,97	1,61
	6% de cal	1,91	1,57
	10% de cal	1,83	1,55
Umidade ótima de compactação (%)	0% (nenhuma adição)	10,98	25,05
	6% de cimento	11,14	24,49
	10% de cimento	11,13	22,95
	6% de cal	11,67	25,00
	10% de cal	13,15	26,60
Descrição visual do solo		Areia siltosa	Silte areno-argiloso
Classificação Bureau of Public Roads (HRB)		Arenoso	Siltoso
Classificação AASHTO		A ₂₋₄₍₀₎	A ₅₍₆₎
Classificação USAD		Franco-arenoso	Franco-argiloso

* Resultados de três repetições.

5.1.1. MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Esse índice físico foi determinado conforme a NBR 07251 (ABNT, 1982), encontrando-se os valores de $2,650 \text{ g.cm}^{-3}$ e $2,900 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente para os solos arenoso e argiloso (**Tabela 24**).

Os valores obtidos encontram-se dentro do esperado, já que para um solo arenoso a massa específica dos sólidos é sempre menor que a de um solo argiloso. ROLIM *et al.* (1999) e LOPES (2002) encontraram, respectivamente, os valores de $2,662 \text{ g.cm}^{-3}$ e $2,665 \text{ g.cm}^{-3}$, para solos arenosos de características similares.

5.1.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os limites de liquidez e de plasticidade foram determinados obedecendo a NBR 06459 (ABNT, 1984b) e NBR 07180 (ABNT, 1984c), respectivamente.

O solo arenoso foi considerado como sendo não plástico, característica de solos com alta porcentagem de fração arenosa. Conforme BRADY (1989), as partículas de areia não possuem a capacidade de serem moldadas, não apresentando plasticidade, ao contrário do que ocorre com as argilas.

Para o solo argiloso foram obtidos os valores de 44,67%, para o limite de liquidez, e 36,28%, para o limite de plasticidade. O índice de plasticidade obtido foi de 8,34% correspondendo à diferença numérica entre os valores dos limites de liquidez e de plasticidade.

O solo argiloso foi considerado como sendo plástico. De acordo com LOPES (2002), a plasticidade de um solo é influenciada por sua textura e pela natureza mineralógica das argilas presentes. Quanto maior o índice de plasticidade mais o material estará sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo quando úmido e de sua retração, quando seco.

5.1.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica, por peneiramento e sedimentação, foi realizada com o intuito de se determinar a distribuição em tamanho das partículas dos solos em estudo de acordo com a NBR 07181 (ABNT, 1984a).

As **Figuras 46 e 47** apresentam as curvas de distribuição granulométrica dos solos estudados.

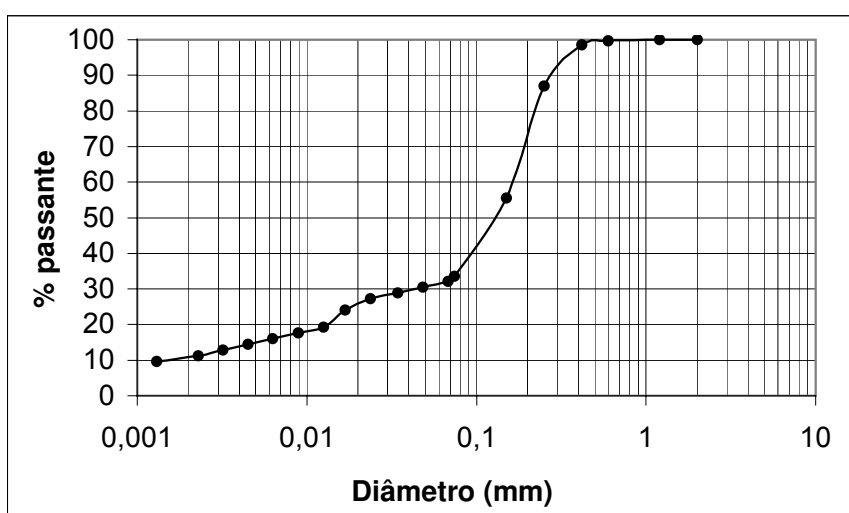


Figura 46. Curva granulométrica do solo arenoso.

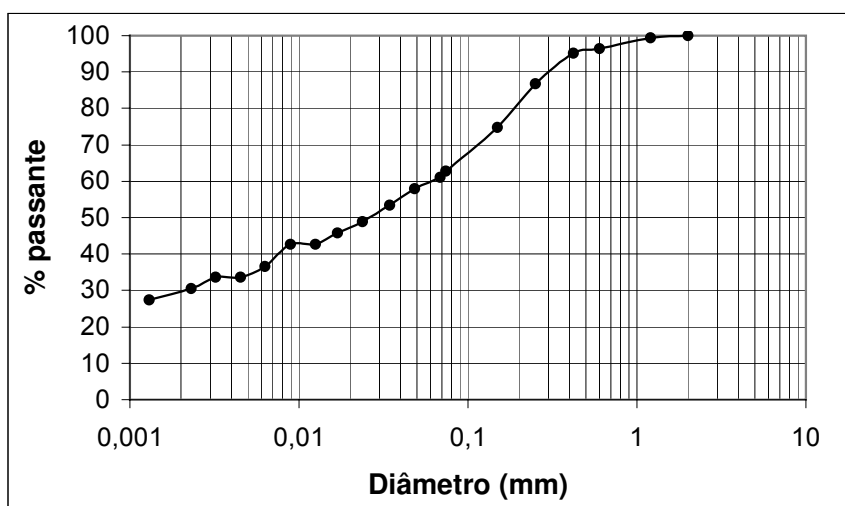


Figura 47. Curva granulométrica do solo argiloso.

5.1.4. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Os valores da massa específica seca aparente máxima e da umidade ótima de compactação, fornecidos pelos ensaios de compactação normal de Proctor, encontram-se na **Tabela 24**. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986). As **Figuras 48 e 49** apresentam a influência da adição dos teores de 6% e 10% de cimento e cal no comportamento das curvas de compactação dos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

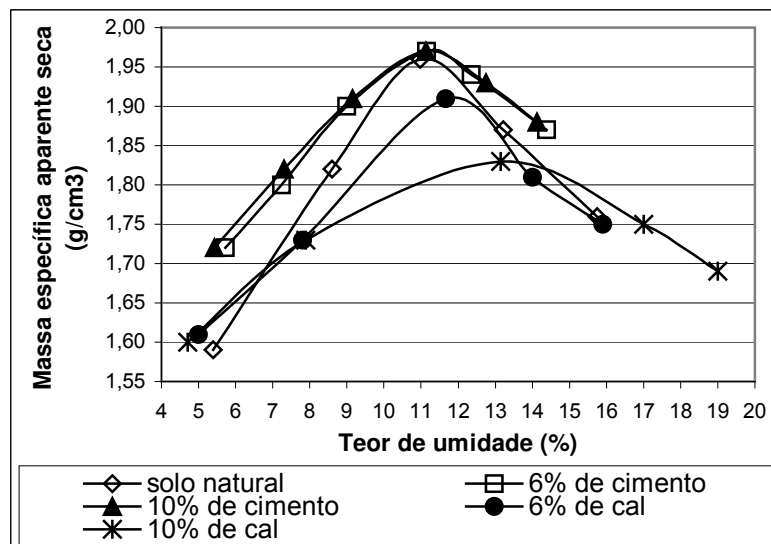


Figura 48. Curvas de compactação do solo arenoso.

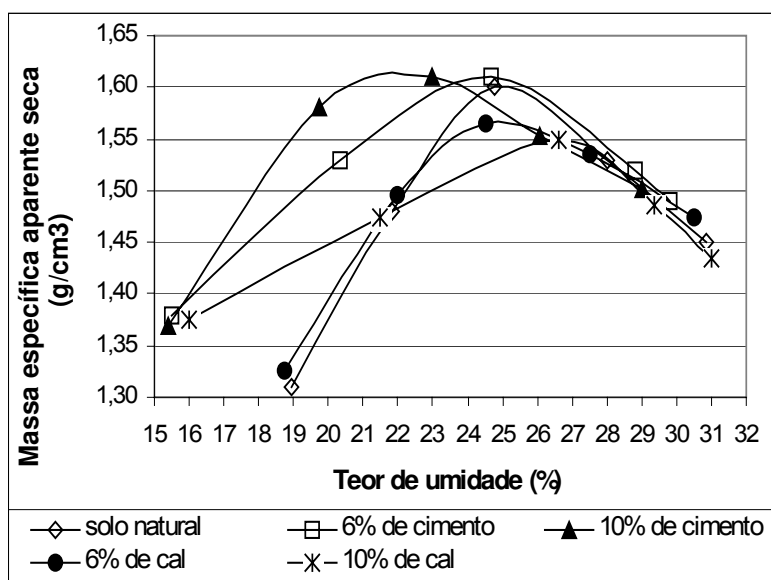


Figura 49. Curvas de compactação do solo argiloso.

Independentemente do tipo de solo, ocorreu uma leve redução nos valores da umidade ótima de compactação em função do aumento do teor de cimento (**Figuras 48 e 49**).

Os valores da massa específica aparente seca, variaram, principalmente, em função do conteúdo de argila dos solos, e foram relativamente independentes do conteúdo de cimento. Dessa forma, as misturas com cimento apresentaram os valores de massa específica aparente seca máxima mais próximos daqueles do solo sem aditivo, mantendo os mesmos níveis de porosidade.

Como era de se esperar, a adição de cal promoveu valores mais elevados de umidade ótima. Para ambos os solos foi verificada uma tendência de redução da massa específica seca máxima, evidenciando que à medida que os teores de cal aumentaram, a mistura compactada tendeu a se apresentar mais porosa (MENDONÇA e LIMA, 1998).

As curvas de compactação das misturas solo-cal (**Figuras 48 e 49**) se apresentaram sempre abaixo daquelas dos solos sem aditivo e os teores ótimos de umidade se deslocaram para valores mais altos acompanhando o aumento do teor de cal das misturas.

GUTIERREZ *et al.* (1998), estudando os efeitos da adição de cal e cimento nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso obtiveram o mesmo padrão de comportamento para a umidade ótima de compactação e a massa específica aparente seca máxima. Os autores encontraram 33,20% e 34,50% de umidade ótima e $1,38 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,30 \text{ g.cm}^{-3}$ de massa específica aparente seca máxima para os teores de 7% e 9% de cal, respectivamente.

Tanto para o solo arenoso quanto para o argiloso, a adição de 10% de cimento promoveu uma leve diminuição nos valores da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima de compactação. Já a adição de 10% de cal, resultou em uma diminuição da massa específica aparente seca máxima e um aumento da umidade ótima de compactação, para ambos os solos.

Além da natureza e do teor do aglomerante adicionado, também a energia de compactação, o teor de umidade e a textura do solo são fatores que influenciam os resultados de compactação do solo. De acordo com HOUBEN e GUILLAUD (1994) à medida que se aumenta a energia de compactação, cresce a massa específica aparente seca e reduz-se a umidade ótima. Geralmente, com o aumento da energia de compactação, as curvas obtidas

pelo ensaio de Proctor são mais pronunciadas, enquanto que são mais achatadas quando a energia de compactação é menor (**Figura 50**).

Um baixo teor de umidade dificulta a compactação do solo, obtendo-se baixos valores de massa específica aparente e alto volume de vazios. O aumento do teor de umidade lubrifica o solo e o torna mais trabalhável, proporcionando, dessa forma, valores mais altos de massa específica e reduzindo o volume de vazios, até atingir a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótima. De acordo com LOPES (2002), quando a distribuição em tamanho das partículas do solo é uniforme, a porosidade é mais alta e a sensibilidade à umidade é reduzida, apresentando então uma curva de compactação mais achatada, características de solos finos. Porém, quando a distribuição em tamanho das partículas é mais ampla e o solo é bem graduado, a curva será mais pontiaguda, características de solos de textura arenosa (**Figura 51**).

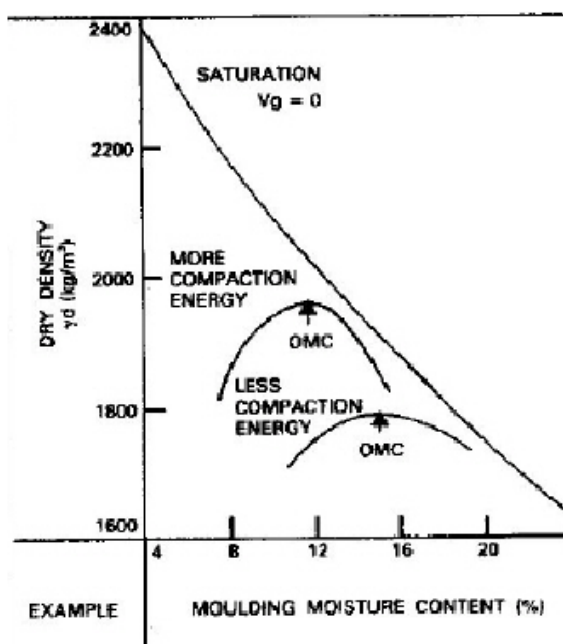


Figura 50. Exemplos de curvas obtidas em ensaios de compactação em relação à energia de compactação.

Fonte: HOUBEN e GUILLAUD (1994).

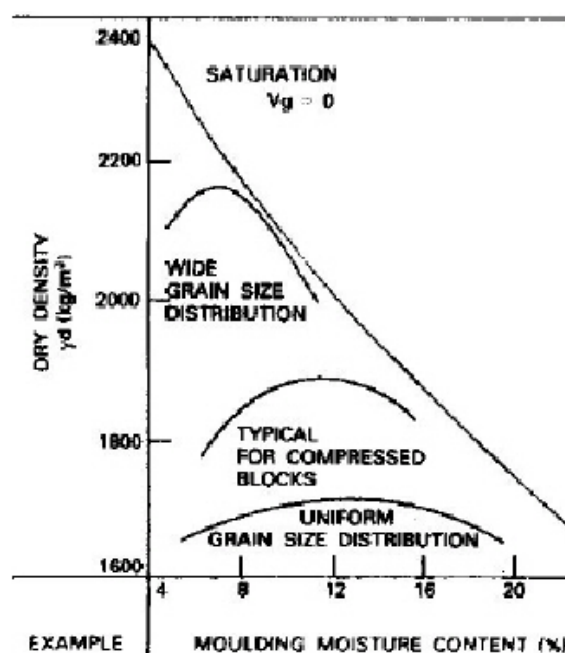


Figura 51. Exemplos de curvas obtidas em ensaios de compactação em relação à distribuição das partículas do solo.

Fonte: HOUBEN e GUILLAUD (1994).

5.1.5. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

A partir dos resultados de granulometria e limites de consistência, os solos arenoso e argiloso foram classificados como $A_{2-4(0)}$ e $A_{5(6)}$, respectivamente, de acordo com o sistema da “American Association of State Highway and Transportation Officials” - AASHTO (BUENO e VILAR (1999)).

De acordo com as normas do “Bureau of Public Roads”, o solo arenoso pertence à classe textural arenosa, enquanto que o argiloso pertence à classe textural argilosa. Já pelo método do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USAD) (BRADY, 1989) o solo arenoso foi classificado como sendo um solo franco-arenoso, de textura moderadamente grossa e o argiloso como sendo um solo franco argiloso (**Figura 52**).

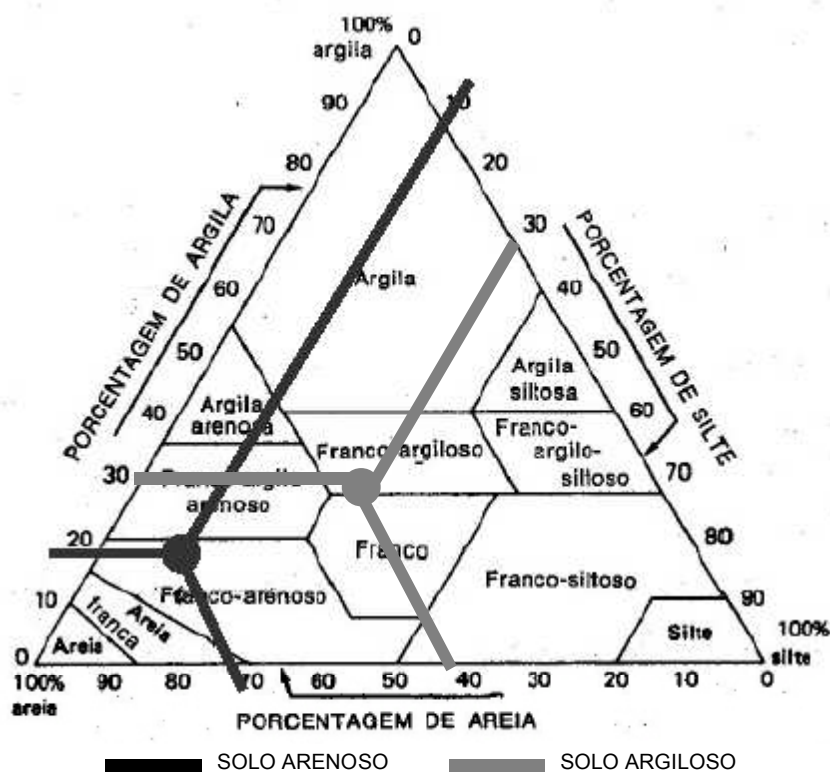


Figura 52. Classificação trilinear dos solos estudados (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos).
Fonte: adaptado de BRADY (1989).

De acordo com a ABCP (1985), os solos mais adequados para a confecção de tijolos e, conseqüentemente, para o uso em alvenaria de tijolos prensados são os que possuem as seguintes características: 100% passando na peneira ABNT 4,8mm (nº 4); 50% passando na peneira ABNT 0,075mm (nº 20); limite de liquidez $\leq 45\%$; e índice de plasticidade $\leq 18\%$.

Dessa forma, os resultados dos ensaios preliminares de caracterização (**Tabela 24**) mostraram que os dois tipos de solos estão de acordo com os pré-requisitos exigidos pela ABCP (1985).

5.2. PROCEDIMENTOS APLICADOS AOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS.

5.2.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA E GRAU DE COMPACTAÇÃO

A **Tabela 25** apresenta os valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação (**Equação 9**) alcançados pelos corpos-de-prova cilíndricos arenosos e argilosos destinados aos ensaios destrutivos e não-destrutivos.

De acordo com BUENO e VILAR (1999), a fim de se garantir condições de compactação semelhantes às obtidas durante o ensaio de compactação normal de Proctor, os valores do grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos não devem ser superiores a 105% e nem inferiores a 95%.

Pela **Tabela 25** verifica-se que os valores do grau de compactação estão de acordo com as recomendações de BUENO e VILAR (1999).

5.2.2. ESCOLHA DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DA ONDA ULTRA-SÔNICA

A **Tabela 26** apresenta os resultados dos testes preliminares para a escolha da frequência de emissão da onda ultra-sônica.

Para a frequência de 45kHz, os valores obtidos para a relação L/λ mantiveram-se sempre superiores a 3,0 (três), conforme sugerido por BUCUR (citado por PUCCINI, 2002).

Desta forma, adotou-se esse valor de frequência de ressonância para todas as demais medições efetuadas durante o decorrer do trabalho.

5.2.3. EVOLUÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

A **Tabela 27** apresenta os resultados da evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função da idade de cura para os corpos-de-prova cilíndricos arenoso e argiloso.

As **Figuras 53 e 54** apresentam as curvas de evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para os corpos-de-prova cilíndricos arenoso e argiloso, respectivamente.

Pelas **Tabela 27 e Figuras 53 e 54**, nota-se que os valores da velocidade mostraram um considerável aumento nos primeiros dias de cura independentemente do tipo de solo.

A partir do terceiro dia, houve uma tendência de estabilização da velocidade, exceto para os corpos-de-prova arenosos tratados com 6% e 10% de cimento (T4 e T5) e cal (T7 e T8) associados ao Na_2SiO_3 (**Figura 53**).

Nesse caso, houve um aumento gradativo da velocidade em função do tempo, devido à formação de uma maior quantidade de silicatos de cálcio hidratados resultantes das reações entre o Na_2SiO_3 e os óxidos de silício e alumínio do solo arenoso, que por sua vez preencheram os vazios resultando em uma estrutura cristalina de melhor qualidade. De acordo com WALKER (1995) e WEBB (1992) uma estrutura cristalina de melhor qualidade se deve, principalmente, pelo preenchimento dos vazios pelos silicatos, aluminatos e carbonatos provenientes da hidratação do cimento e das reações de floculação e carbonatação entre a cal e a fração argila do solo.

Tabela 25. Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos.

Trat°	Massa específica aparente seca (g.cm ⁻³)			Grau de compactação (%)*		
	7 dias*	28 dias	56 dias	7 dias	28 dias	56 dias
T1	1,94 ± 0,00 (0,00)	1,94 ± 0,00 (0,00)	1,94 ± 0,01 (0,68)	98,90 ± 0,27 (0,27)	98,77 ± 0,15 (0,16)	98,69 ± 0,63 (0,64)
T2	1,88 ± 0,01 (0,38)	1,88 ± 0,01 (0,68)	1,90 ± 0,01 (0,44)	95,57 ± 0,45 (0,47)	95,60 ± 0,65 (0,68)	96,23 ± 0,42 (0,44)
T3	1,88 ± 0,01 (0,38)	1,89 ± 0,01 (0,36)	1,87 ± 0,02 (0,85)	95,49 ± 0,36 (0,38)	95,79 ± 0,35 (0,36)	94,77 ± 0,81 (0,85)
T4	1,94 ± 0,01 (0,49)	1,93 ± 0,01 (0,33)	1,92 ± 0,01 (0,28)	98,26 ± 0,48 (0,49)	98,04 ± 0,33 (0,33)	97,59 ± 0,28 (0,28)
T5	1,95 ± 0,01 (0,61)	1,94 ± 0,02 (1,22)	1,94 ± 0,01 (0,66)	98,96 ± 0,60 (0,61)	98,53 ± 1,20 (1,22)	98,64 ± 0,65 (0,66)
T6	1,83 ± 0,00 (0,24)	1,83 ± 0,01 (0,77)	1,82 ± 0,00 (0,21)	95,72 ± 0,00 (0,00)	95,89 ± 0,65 (0,69)	95,37 ± 0,25 (0,27)
T7	1,78 ± 0,01 (0,56)	1,80 ± 0,01 (0,55)	1,79 ± 0,01 (0,30)	97,08 ± 0,51 (0,53)	98,18 ± 0,68 (0,69)	97,99 ± 0,26 (0,26)
T8	1,90 ± 0,01 (0,35)	1,89 ± 0,00 (0,13)	1,89 ± 0,00 (0,16)	99,48 ± 0,43 (0,43)	98,95 ± 0,00 (0,00)	99,13 ± 0,25 (0,25)
T9	1,87 ± 0,00 (0,00)	1,85 ± 0,01 (0,35)	1,87 ± 0,01 (0,39)	102,37 ± 0,25 (0,25)	101,27 ± 0,26 (0,26)	102,19 ± 0,44 (0,44)
T10	1,69 ± 0,01 (0,55)	1,64 ± 0,01 (0,39)	1,66 ± 0,01 (0,58)	104,83 ± 0,57 (0,55)	101,78 ± 0,39 (0,39)	103,39 ± 0,60 (0,58)
T11	1,54 ± 0,04 (2,57)	1,55 ± 0,02 (1,10)	1,55 ± 0,02 (1,49)	95,38 ± 2,40 (2,57)	95,34 ± 1,03 (1,10)	95,65 ± 1,38 (1,49)
T12	1,53 ± 0,01 (0,46)	1,53 ± 0,01 (0,46)	1,53 ± 0,00 (0,25)	95,00 ± 0,42 (0,46)	95,22 ± 0,43 (0,46)	95,29 ± 0,23 (0,25)
T13	1,56 ± 0,03 (1,61)	1,56 ± 0,01 (0,37)	1,55 ± 0,02 (1,02)	96,51 ± 1,55 (1,61)	96,57 ± 0,36 (0,37)	95,63 ± 0,97 (1,02)
T14	1,59 ± 0,05 (2,85)	1,56 ± 0,05 (2,93)	1,57 ± 0,05 (3,25)	98,80 ± 2,82 (2,85)	96,86 ± 2,84 (2,93)	97,26 ± 3,16 (3,25)
T15	1,50 ± 0,01 (0,50)	1,50 ± 0,00 (0,29)	1,50 ± 0,00 (0,20)	95,65 ± 0,46 (0,50)	95,79 ± 0,27 (0,29)	95,41 ± 0,18 (0,20)
T16	1,47 ± 0,02 (1,19)	1,49 ± 0,02 (1,18)	1,48 ± 0,01 (1,02)	95,01 ± 1,11 (1,19)	95,89 ± 1,09 (1,18)	95,63 ± 0,93 (1,02)
T17	1,50 ± 0,02 (1,62)	1,50 ± 0,03 (1,90)	1,49 ± 0,03 (1,83)	95,84 ± 1,51 (1,62)	95,28 ± 1,78 (1,90)	95,23 ± 1,69 (1,83)
T18	1,50 ± 0,01 (0,97)	1,49 ± 0,01 (0,58)	1,49 ± 0,01 (0,58)	96,61 ± 0,94 (0,97)	96,26 ± 0,56 (0,58)	95,98 ± 0,55 (0,58)

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

Tabela 26. Relação L/λ nos corpos-de-prova cilíndricos para a frequência de 45 kHz.

Tratº	Velocidade da onda ultra-sônica (m/s)			Comprimento da onda (cm)			L/λ		
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	28 dias	56 dias
T1	1326,73 ± 32,49 (2,45)	1482,37 ± 35,83 (2,42)	1555,77 ± 25,76 (1,66)	2,95 ± 0,07 (2,45)	3,29 ± 0,08 (2,42)	3,46 ± 0,06 (1,66)	7,13 ± 0,18 (2,49)	6,38 ± 0,16 (2,46)	6,08 ± 0,10 (1,67)
T2	1617,50 ± 48,67 (3,01)	1780,03 ± 6,31 (0,35)	1847,37 ± 11,82 (0,64)	3,59 ± 0,11 (3,01)	3,96 ± 0,01 (0,35)	4,11 ± 0,03 (0,64)	5,85 ± 0,18 (3,00)	5,31 ± 0,02 (0,35)	5,12 ± 0,03 (0,64)
T3	2311,00 ± 57,54 (2,49)	2334,83 ± 26,43 (1,13)	2510,47 ± 26,55 (1,06)	5,14 ± 0,13 (2,49)	5,19 ± 0,06 (1,13)	5,58 ± 0,06 (1,06)	4,09 ± 0,10 (2,50)	4,05 ± 0,05 (1,13)	3,76 ± 0,04 (1,05)
T4	2296,67 ± 12,49 (0,54)	2628,17 ± 43,90 (1,67)	2891,37 ± 16,95 (0,59)	5,10 ± 0,03 (0,54)	5,84 ± 0,10 (1,67)	6,43 ± 0,04 (0,59)	4,11 ± 0,02 (0,54)	3,60 ± 0,06 (1,67)	3,27 ± 0,02 (0,58)
T5	2407,10 ± 147,67 (6,13)	2821,07 ± 129,27 (4,58)	3063,07 ± 152,64 (4,98)	5,35 ± 0,33 (6,13)	6,27 ± 0,29 (4,58)	6,81 ± 0,34 (4,98)	3,94 ± 0,25 (6,39)	3,36 ± 0,15 (4,46)	3,09 ± 0,15 (4,83)
T6	849,17 ± 5,56 (0,66)	691,86 ± 150,77 (21,79)	836,20 ± 32,36 (3,87)	1,89 ± 0,01 (0,66)	1,54 ± 0,34 (21,79)	1,86 ± 0,07 (3,87)	11,13 ± 0,07 (0,66)	14,28 ± 2,88 (20,18)	11,32 ± 0,43 (3,78)
T7	800,27 ± 15,80 (1,97)	810,17 ± 41,58 (5,13)	815,18 ± 20,50 (2,51)	1,78 ± 0,04 (1,97)	1,80 ± 0,09 (5,13)	1,81 ± 0,05 (2,51)	11,81 ± 0,23 (1,98)	11,70 ± 0,62 (5,32)	11,60 ± 0,29 (2,47)
T8	916,17 ± 1,24 (0,14)	1137,98 ± 25,50 (2,24)	1625,91 ± 236,51 (14,55)	2,04 ± 0,00 (0,14)	2,53 ± 0,06 (2,24)	3,61 ± 0,53 (14,55)	10,31 ± 0,01 (0,14)	8,31 ± 0,18 (2,21)	5,95 ± 0,94 (15,78)
T9	912,36 ± 3,67 (0,40)	1230,74 ± 53,67 (4,36)	1849,05 ± 47,18 (2,55)	2,03 ± 0,01 (0,40)	2,73 ± 0,12 (4,36)	4,11 ± 0,10 (2,55)	10,36 ± 0,04 (0,40)	7,69 ± 0,34 (4,47)	5,11 ± 0,13 (2,51)
T10	700,10 ± 18,85 (2,69)	830,23 ± 27,25 (3,28)	813,17 ± 41,72 (5,13)	1,56 ± 0,04 (2,69)	1,84 ± 0,06 (3,28)	1,81 ± 0,09 (5,13)	13,51 ± 0,36 (2,65)	11,39 ± 0,37 (3,23)	11,65 ± 0,61 (5,23)
T11	1250,18 ± 122,38 (9,79)	1512,05 ± 61,39 (4,06)	1497,23 ± 35,06 (2,34)	2,78 ± 0,27 (9,79)	3,36 ± 0,14 (4,06)	3,33 ± 0,08 (2,34)	7,63 ± 0,72 (9,48)	6,26 ± 0,26 (4,17)	6,32 ± 0,15 (2,30)
T12	1570,80 ± 31,00 (1,97)	1798,50 ± 3,50 (0,19)	1705,28 ± 5,22 (0,31)	3,49 ± 0,07 (1,97)	4,00 ± 0,01 (0,19)	3,79 ± 0,01 (0,31)	6,02 ± 0,12 (1,95)	5,25 ± 0,01 (0,19)	5,54 ± 0,02 (0,31)
T13	1470,22 ± 65,86 (4,48)	1640,79 ± 18,62 (1,14)	1714,86 ± 47,03 (2,74)	3,27 ± 0,15 (4,48)	3,65 ± 0,04 (1,14)	3,81 ± 0,10 (2,74)	6,44 ± 0,30 (4,60)	5,76 ± 0,07 (1,14)	5,51 ± 0,15 (2,69)
T14	1957,67 ± 34,89 (1,78)	2079,28 ± 52,21 (2,51)	2141,32 ± 73,72 (3,44)	4,35 ± 0,08 (1,78)	4,62 ± 0,12 (2,51)	4,76 ± 0,16 (3,44)	4,83 ± 0,09 (1,78)	4,55 ± 0,12 (2,56)	4,42 ± 0,15 (3,42)
T15	1480,97 ± 52,73 (3,56)	1503,73 ± 25,55 (1,70)	1517,98 ± 9,64 (0,64)	3,29 ± 0,12 (3,56)	3,34 ± 0,06 (1,70)	3,37 ± 0,02 (0,64)	6,39 ± 0,23 (3,54)	6,29 ± 0,11 (1,69)	6,23 ± 0,04 (0,63)
T16	1562,30 ± 12,72 (0,81)	1581,42 ± 25,25 (1,60)	1613,27 ± 9,41 (0,58)	3,47 ± 0,03 (0,81)	3,51 ± 0,06 (1,60)	3,59 ± 0,02 (0,58)	6,05 ± 0,05 (0,81)	5,98 ± 0,09 (1,58)	5,86 ± 0,03 (0,59)
T17	1533,58 ± 36,67 (2,39)	1627,78 ± 13,25 (0,81)	1631,62 ± 21,37 (1,31)	3,41 ± 0,08 (2,39)	3,62 ± 0,03 (0,81)	3,63 ± 0,05 (1,31)	6,17 ± 0,15 (2,38)	5,81 ± 0,05 (0,82)	5,79 ± 0,08 (1,30)
T18	1750,12 ± 6,98 (0,40)	1868,09 ± 29,99 (1,61)	1876,31 ± 11,91 (0,63)	3,89 ± 0,02 (0,40)	4,15 ± 0,07 (1,67)	4,17 ± 0,03 (0,63)	5,40 ± 0,02 (0,40)	5,06 ± 0,08 (1,61)	5,04 ± 0,03 (0,64)

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

Tabela 27. Velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função da idade de cura para os corpos-de-prova cilíndricos.

Trat°	Velocidade (m.s ⁻¹)*							
	0 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	35 dias	42 dias	56 dias
T1	473,06 ± 9,42 (1,99)	1489,27 ± 20,41 (1,37)	1340,54 ± 15,58 (1,16)	1398,40 ± 1,20 (0,09)	1477,68 ± 9,81 (0,66)	1482,85 ± 1,91 (0,13)	1557,03 ± 73,23 (4,70)	1555,78 ± 31,52 (2,03)
T2	894,46 ± 131,76 (14,73)	1635,01 ± 38,18 (2,33)	1684,04 ± 68,94 (4,09)	1674,27 ± 24,28 (1,45)	1690,07 ± 43,93 (2,60)	1748,44 ± 44,72 (2,56)	1780,53 ± 6,81 (0,38)	1840,47 ± 22,25 (1,21)
T3	941,36 ± 31,80 (3,38)	2117,12 ± 24,79 (1,17)	2413,66 ± 89,27 (3,70)	2257,59 ± 90,85 (4,02)	2305,57 ± 15,11 (0,66)	2331,94 ± 4,09 (0,18)	2446,66 ± 34,48 (1,41)	2510,48 ± 32,54 (1,30)
T4	569,87 ± 18,18 (3,19)	2145,53 ± 45,34 (2,11)	2288,96 ± 10,90 (0,48)	2474,77 ± 66,42 (2,68)	2562,84 ± 21,07 (0,82)	2656,85 ± 37,65 (1,42)	2836,39 ± 127,05 (4,48)	2898,99 ± 33,71 (1,16)
T5	532,95 ± 7,35 (1,38)	2334,43 ± 27,63 (1,18)	2432,88 ± 27,07 (1,11)	2640,21 ± 47,65 (1,80)	2678,51 ± 28,35 (1,06)	2805,51 ± 21,99 (0,78)	2920,19 ± 169,15 (5,79)	3063,54 ± 198,68 (6,49)
T6	805,45 ± 35,28 (4,38)	938,32 ± 77,42 (8,25)	909,41 ± 87,83 (9,66)	852,86 ± 90,11 (10,57)	867,24 ± 120,88 (13,94)	766,76 ± 105,93 (13,82)	775,47 ± 35,76 (4,61)	836,20 ± 39,64 (4,74)
T7	778,16 ± 59,78 (7,68)	863,96 ± 75,14 (8,70)	859,55 ± 71,35 (8,30)	856,44 ± 53,14 (6,20)	899,58 ± 79,73 (8,86)	842,47 ± 45,68 (5,42)	773,61 ± 40,50 (5,23)	815,18 ± 2,10 (3,08)
T8	534,45 ± 43,96 (8,22)	866,73 ± 37,33 (4,31)	924,22 ± 7,71 (0,83)	1029,05 ± 57,12 (5,55)	1133,09 ± 48,65 (4,29)	1241,14 ± 145,89 (11,75)	1589,71 ± 41,37 (2,60)	1625,91 ± 289,67 (17,82)
T9	398,84 ± 60,31 (15,12)	792,95 ± 99,38 (12,53)	912,14 ± 21,47 (2,35)	940,27 ± 99,82 (10,62)	1018,29 ± 113,83 (11,18)	1178,98 ± 73,21 (6,21)	1355,56 ± 282,30 (10,83)	1849,05 ± 57,79 (3,13)
T10	326,56 ± 15,14 (4,640)	678,59 ± 12,32 (1,82)	712,63 ± 12,55 (1,76)	748,03 ± 13,63 (1,82)	788,13 ± 12,44 (1,58)	816,08 ± 20,01 (2,45)	786,26 ± 6,75 (0,86)	813,17 ± 51,10 (6,28)
T11	1067,40 ± 24,17 (2,26)	1449,99 ± 28,33 (1,95)	1395,03 ± 9,10 (126,97)	1518,75 ± 42,33 (2,79)	1541,35 ± 41,66 (2,70)	1548,64 ± 51,75 (3,34)	1545,76 ± 28,97 (1,87)	1497,23 ± 42,94 (2,87)
T12	1151,80 ± 35,62 (3,09)	1633,74 ± 19,03 (1,17)	1634,98 ± 60,98 (3,73)	1718,78 ± 30,84 (1,79)	1754,15 ± 24,15 (1,38)	1786,70 ± 16,68 (0,93)	1758,61 ± 10,33 (0,59)	1705,28 ± 6,39 (0,37)
T13	993,41 ± 11,66 (1,17)	1420,92 ± 16,24 (1,14)	1460,96 ± 16,86 (1,15)	1501,52 ± 10,14 (0,68)	1569,10 ± 17,35 (1,11)	1626,97 ± 19,53 (1,20)	1682,97 ± 57,40 (3,41)	1714,86 ± 57,60 (3,36)
T14	877,91 ± 11,78 (1,34)	1819,43 ± 7,40 (0,41)	1846,79 ± 18,96 (1,03)	1900,97 ± 8,43 (0,44)	2033,45 ± 12,85 (0,63)	2095,55 ± 23,00 (1,10)	2135,64 ± 114,22 (5,35)	2141,32 ± 90,28 (4,22)
T15	1040,17 ± 25,84 (2,48)	1356,00 ± 16,58 (1,22)	1486,89 ± 9,84 (0,66)	1467,95 ± 2,86 (0,20)	1480,90 ± 2,43 (0,16)	1501,87 ± 2,63 (0,17)	1511,34 ± 10,54 (0,70)	1517,98 ± 11,81 (0,78)
T16	1013,99 ± 33,15 (3,31)	1376,42 ± 16,85 (1,22)	1544,73 ± 15,57 (1,01)	1579,74 ± 12,29 (0,78)	1563,92 ± 7,86 (0,50)	1587,23 ± 8,21 (0,52)	1600,39 ± 3,50 (0,22)	1613,27 ± 11,52 (0,71)
T17	988,74 ± 7,82 (0,79)	1509,26 ± 18,95 (1,26)	1543,54 ± 9,09 (0,59)	1576,03 ± 4,75 (0,30)	1595,52 ± 16,51 (1,03)	1621,98 ± 8,21 (0,51)	1617,13 ± 31,70 (1,96)	1631,62 ± 26,17 (1,60)
T18	988,74 ± 7,82 (0,79)	1690,33 ± 14,02 (0,83)	1761,76 ± 11,78 (0,67)	1806,58 ± 12,13 (0,67)	1820,45 ± 11,11 (0,61)	1873,13 ± 7,13 (0,38)	1863,44 ± 20,98 (1,13)	1876,31 ± 14,59 (0,78)

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

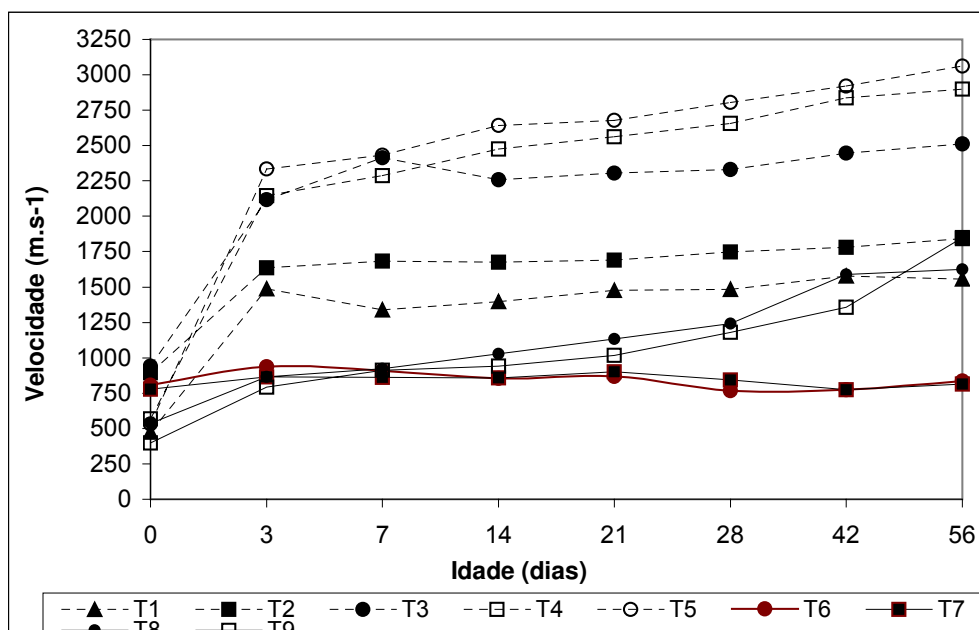


Figura 53. Velocidade da onda ultra-sônica em função da idade de cura para os corpos-de-prova arenosos.

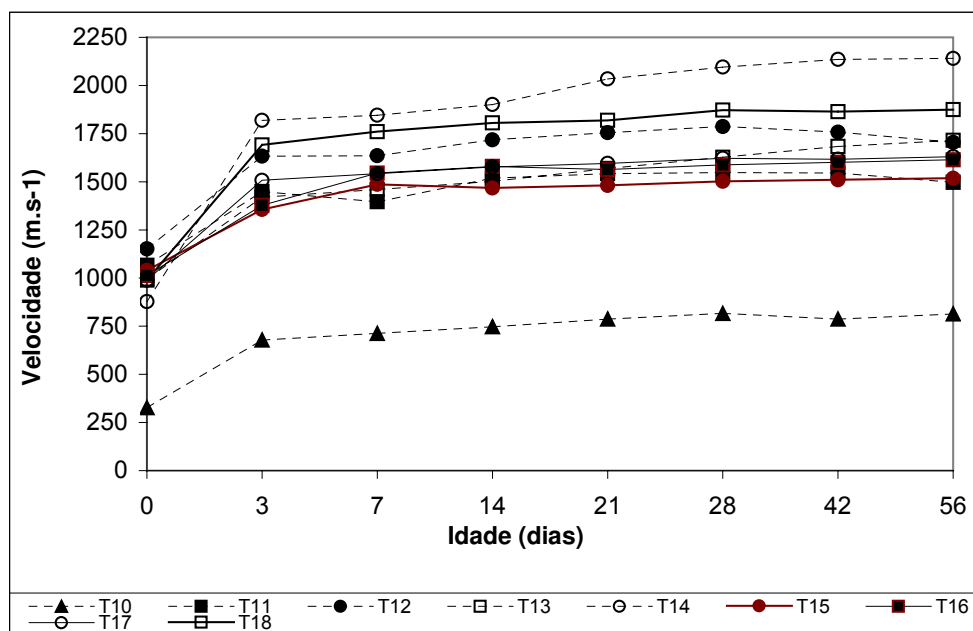


Figura 54. Velocidade da onda ultra-sônica em função da idade de cura para os corpos-de-prova argilosos.

5.2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores médios de resistência à compressão simples, capacidades total e parcial de absorção de água e módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova cilíndricos, foram analisados estatisticamente e suas respectivas análises de variância são apresentados nas Tabelas 28, 29 e 30.

Tabela 28. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta resistência à compressão simples para os corpos-de-prova cilíndricos, em MPa.

Fontes de variação	GL*	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: tipo de solo	1	9,10	9,10	126,50*
B: adições químicas	8	117,12	14,64	203,57*
C: idade	2	12,37	6,18	86,02*
Interações				
A x B	8	67,78	8,47	117,81*
A x C	2	5,28	2,64	36,69*
B x C	16	11,10	0,69	9,65*
A x B x C	16	6,45	0,40	5,61*
Resíduo	108	7,77	0,07	
Total	161	238,22		

* F significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 29. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova cilíndricos, em MPa.

Fontes de variação	GL*	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: tipo de solo	1	$1,88.10^{-8}$	$1,88.10^{-8}$	444,55*
B: adições químicas	8	$1,80.10^{-9}$	$2,25.10^{-8}$	532,79*
C: idade	2	$1,06.10^{-8}$	$5,31.10^{-7}$	125,91*
Interações				
A x B	8	$9,10.10^{-8}$	$1,14.10^{-8}$	269,55*
A x C	2	$3,87.10^{-7}$	$1,93.10^{-7}$	45,81*
B x C	16	$6,59.10^{-7}$	$4,12.10^{-6}$	9,76*
A x B x C	16	$4,08.10^{-7}$	$2,55.10^{-6}$	6,04*
Resíduo	108	$4,55.10^{-7}$	421.972	
Total	161	$3,20.10^{-9}$		

* F significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 30. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta capacidade de absorção parcial de água para os corpos-de-prova cilíndricos, em %.

Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: solo	1	62,88	62,88	1353,06*
B: adições químicas	7	116,92	16,70	359,39*
Interações				
AXB	7	47,93	6,85	147,33*
Resíduo	32	1,49	0,05	
Total	47	229,22		

* F significativo a 5% de probabilidade.

Pelas **Tabelas 28, 29 e 30**, pode-se afirmar que os fatores estudados, tipo de solo, adição química e idade de cura, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos ($p < 0,05$) nas variáveis resistência à compressão simples, absorção de água e módulo de elasticidade dinâmico.

As **Tabelas 31, 32 e 33** apresentam os resultados da análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples, módulo de elasticidade dinâmico e capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos, respectivamente.

Tabela 31. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos, em MPa.

Fatores	Níveis	Obs.*	Resistência (MPa)**
Solo	Arenoso	81	1,62 a
	Argiloso	81	1,14 b
Adição química	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	3,34 a
	10% de cimento	18	2,03 b
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	1,63 c
	solo natural (sem adições)	18	1,49 cd
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	18	1,28 d
	6 % de cimento	18	0,91 e
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	18	0,70 ef
	10% de cal	18	0,59 f
	6% de cal	18	0,46 f
Idade	56 dias	54	1,73 a
	28 dias	54	1,36 b
	7 dias	54	1,05 c

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo, adição química e idade).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 32. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios do módulo de elasticidade dinâmico (Ed) dos corpos-de-prova cilíndricos, em MPa.

Fatores	Níveis	Obs.*	Ed**
Solo	Arenoso	81	7145,89 a
	Argiloso	81	4988,75 b
Adição química	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	12617,50 a
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	9941,48 b
	10% de cimento	18	8706,56 c
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	18	5282,83 d
	6 % de cimento	18	5188,89 d
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	18	4146,28 e
	10% de cal	18	3040,06 f
	6% de cal	18	2903,62 f
	Solo natural (sem adições)	18	2778,67 f
Idade	56 dias	54	7038,26 a
	28 dias	54	6114,60 b
	7 dias	54	5049,33 c

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo, adição química e idade).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 33. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo e adição química nos valores médios da capacidade de absorção de água parcial dos corpos-de-prova cilíndricos, em %, avaliada aos 7 dias.

Fatores	Níveis	Obs.*	Absorção de água (%)
Solo	Arenoso	24	0,94 a
	Argiloso	24	3,23 b
Adição química	10% de cal	6	0,58 a
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	6	0,74 a
	6% de cimento	6	1,28 b
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	6	1,39 bc
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	6	1,55 bc
	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	6	1,75 c
	6% de cal	6	4,27 d
	10% de cimento	6	5,11 e

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo e adição química).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O solo arenoso foi superior ao argiloso em termos de resistência à compressão simples. A adição de 10% de cimento associado ao silicato de sódio proporcionou os melhores resultados. Valores mais elevados de resistência foram verificados à medida que se aumentou o período de cura (**Tabela 31**).

Conforme já mencionado, o módulo de elasticidade dinâmico depende fortemente da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, pois varia com o seu quadrado. Sendo assim, seus valores variaram de acordo com os resultados obtidos durante o acompanhamento da velocidade (**Tabela 27**), ou seja, os melhores resultados foram obtidos para o solo arenoso e para os teores de aglomerantes associados ao silicato de sódio. O período de cura também afetou fortemente os valores do módulo de elasticidade, sendo mais elevados para as maiores idades.

Em termos de absorção de água, novamente o solo arenoso se mostrou superior ao argiloso, promovendo menores valores de absorção de água.

5.2.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA

A **Tabela 34** apresenta os valores médios de resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos e argilosos.

As **Figuras 55 e 56** ilustram o desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos submetidos ao ensaio de compressão simples, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. As **Figuras 57 e 58** ilustram o desempenho dos corpos-de-prova cilíndricos submetidos ao ensaio de absorção de água, respectivamente para os solos arenoso e argiloso.

Tabela 34. Valores médios da resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos.

Tratº	Resistência à compressão (MPa)			Absorção de água (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
T1	1,69 ± 0,04 (2,14) b A	1,36 ± 0,14 (10,21) cd A	1,41 ± 0,22 (15,38) de A	-
T2	0,73 ± 0,13 (17,31) cd C	1,31 ± 0,22 (16,59) cd B	2,04 ± 0,08 (4,13) cd A	1,66 ± 0,24 (14,49) def
T3	2,09 ± 0,38 (18,43) b C	2,74 ± 0,34 (12,45) b B	4,50 ± 0,40 (8,43) b A	2,41 ± 0,10 (4,33) g
T4	1,40 ± 0,25 (17,53) bc C	2,57 ± 0,50 (19,45) b B	3,89 ± 0,15 (3,81) b A	0,16 ± 0,01 (4,23) a
T5	3,17 ± 0,08 (2,62) a C	4,46 ± 0,88 (19,65) a B	5,74 ± 0,87 (15,18) a A	0,00 ± 0,00 (0,00) a
T6	0,27 ± 0,03 (10,52) d A	0,28 ± 0,01 (2,94) f A	0,24 ± 0,02 (6,50) h A	0,47 ± 0,04 (9,04) ab
T7	0,29 ± 0,01 (2,97) d B	0,29 ± 0,02 (7,48) f AB	0,29 ± 0,00 (1,24) h A	0,59 ± 0,07 (12,74) abc
T8	0,13 ± 0,02 (14,81) d B	0,39 ± 0,04 (9,98) ef B	0,71 ± 0,18 (25,86) efgh A	1,10 ± 0,07 (6,47) bcd
T9	0,21 ± 0,01 (6,75) d A	0,36 ± 0,07 (19,61) ef A	1,17 ± 0,08 (6,86) efg A	1,15 ± 0,11 (9,22) cd
T10	1,62 ± 0,09 (5,63) b A	1,45 ± 0,08 (5,24) c A	1,40 ± 0,09 (6,40) def A	-
T11	0,30 ± 0,13 (43,24) d A	0,44 ± 0,11 (24,49) ef A	0,67 ± 0,19 (27,76) fgh A	6,88 ± 0,40 (5,77) i
T12	0,67 ± 0,13 (19,05) d A	1,07 ± 0,10 (9,50) cde A	1,10 ± 0,16 (14,87) efg A	7,81 ± 0,31 (4,00) j
T13	0,46 ± 0,11 (23,58) d A	0,63 ± 0,13 (20,27) def A	0,85 ± 0,06 (6,72) efgh A	1,33 ± 0,20 (15,36) de
T14	2,00 ± 0,35 (17,50) b A	2,26 ± 0,21 (9,37) b A	2,41 ± 0,65 (27,12) c A	3,51 ± 0,43 (12,15) h
T15	0,61 ± 0,08 (12,40) d A	0,72 ± 0,12 (16,83) cdef A	0,65 ± 0,05 (7,69) gh A	2,09 ± 0,17 (8,18) fg
T16	0,85 ± 0,05 (6,42) cd A	0,89 ± 0,04 (4,87) cdef A	0,92 ± 0,03 (3,37) efgh A	0,58 ± 0,05 (8,78) abc
T17	0,81 ± 0,10 (12,36) cd A	1,05 ± 0,15 (14,47) cde A	1,11 ± 0,17 (15,66) efg A	1,68 ± 0,32 (19,32) def
T18	1,60 ± 0,10 (5,99) b B	2,28 ± 0,23 (10,11) b A	2,35 ± 0,18 (7,44) c A	1,95 ± 0,20 (10,36) efg

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).
- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Os valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova aumentaram com o acréscimo dos teores de cimento e de cal (**Tabela 34**). Os melhores resultados em termos de resistência foram obtidos para os teores de cimento associados ao silicato de sódio. O maior valor médio de resistência foi de 5,74 MPa obtido para o solo arenoso com a adição de 10% de cimento associada a 4% de silicato de sódio aos 56 dias de cura. Houve um ganho de resistência ao longo do tempo para todos os tratamentos, com exceção da testemunha.

Independentemente do tipo de solo, a adição de silicato de sódio associado tanto com cimento quanto com cal promoveu ganhos de resistência consideráveis comparando-se com as misturas sem a adição de silicato de sódio (**Tabela 35**).

Para o solo arenoso, a adição de silicato de sódio promoveu um ganho de resistência aos 7 dias de 91,78%, para o teor de 6% de cimento, e 51,67%, para o teor de 10% de cimento, em relação aos mesmos teores sem adição de silicato de sódio. Aos 28 dias, o ganho de resistência foi de 96,18% e 62,18%, para os teores de 6% e 10% de cimento, respectivamente. Finalmente, aos 56 dias, estes ganhos foram da ordem de 90,69% e 26,43%, para os teores de 6% e 10% de cimento, respectivamente. Aos 7 dias, as adições de 6% e 10% de cal promoveram decréscimos de 51,85% e 27,59%, respectivamente. Contudo, aos 28 dias foram verificados ganhos da ordem de 39,28% e 24,14% e aos 56 dias, 195,83% e 303,45%, para os teores de 6% e 10%, respectivamente.

Já para o solo argiloso a adição de silicato de sódio promoveu um ganho de resistência aos 7 dias de 53,33%, para o teor de 6% de cimento, e 198,50%, para o teor de 10% de cimento, em relação aos mesmos teores sem adição de silicato de sódio. Aos 28 dias, o ganho de resistência foi de 43,18% e 111,21%, para os teores de 6% e 10% de cimento, respectivamente. Já, aos 56 dias, estes ganhos foram da ordem de 26,87% e 119,10%, para os teores de 6% e 10% de cimento, respectivamente. No caso da cal, houve um ganho aos 7 dias de 32,79%, para o teor de 6%, e 88,23%, para o teor de 10%. Aos 28 dias, o ganho de resistência foi de 45,83% e 156,18%, para os teores de 6% e 10% de cimento, respectivamente. Finalmente, aos 56 dias, estes ganhos foram da ordem de 70,77% e 255,43%, para os teores de 6% e 10% de cimento, respectivamente.

Tabela 35. Ganhos de resistência proporcionados aos corpos-de-prova cilíndricos pela incorporação de silicato de sódio.

Solo	Teor de aglomerante		Ganho de resistência (%)		
			7 dias	28 dias	56 dias
Arenoso	Cimento	6%	89,19	96,18	90,69
		10%	51,67	62,18	26,43
	Cal	6%	-51,85	39,28	195,83
		10%	-27,59	24,14	303,45
Argiloso	Cimento	6%	53,33	43,18	26,87
		10%	198,50	111,21	119,10
	Cal	6%	32,79	45,83	70,77
		10%	88,23	156,18	255,43

Os elevados valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova de solo sem adição de cimento (testemunha) em relação aos valores de resistência do solo adicionado de 6% de cimento são explicados pelo fato dos mesmos não terem sido imersos em água antes de sua ruptura, promovendo, portanto, seu melhor comportamento mecânico.

Observou-se um aumento gradativo nos valores médios de absorção parcial de água à medida que se aumentou o teor de cimento adicionado (**Tabela 34**). Entretanto, a absorção parcial de água dos corpos-de-prova contendo silicato de sódio foi mínima. Isso se deve provavelmente pela menor presença de vazios devido à maior formação de silicatos de cálcio hidratados e conseqüente ocupação dos espaços vazios. O ensaio de absorção de água não foi realizado para os corpos-de-prova sem adições.

Em termos de resistência à compressão simples, somente os tratamentos referentes à adição de 10% de cimento associado ou não ao silicato de sódio, para o solo arenoso, e 10% de cimento com silicato de sódio, para o solo argiloso, atenderam às especificações da NBR 08492 (ABNT, 1992), empregada para tijolos prensados de solo-cimento. Essa norma estabelece, como mínimo, o valor médio de 2,0 MPa, e nenhum valor inferior a 1,7 MPa aos 7 dias de idade. Em termos de capacidade de absorção de água, somente os corpos-de-prova arenosos atenderam às especificações da NBR 08492, que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor superior a 22%.

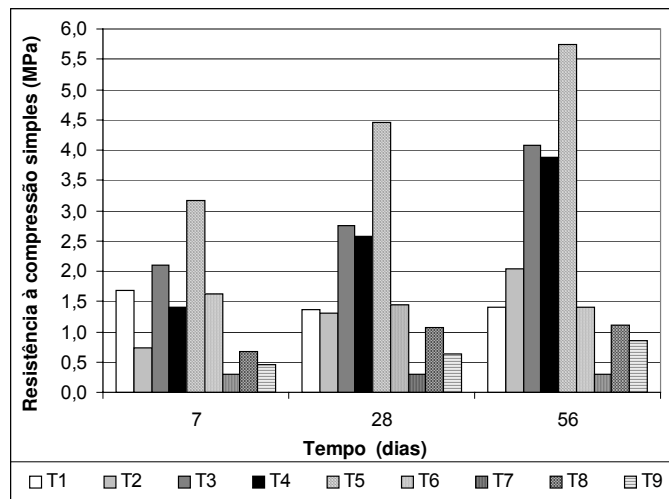


Figura 55. Desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos submetidos ao ensaio de compressão simples.

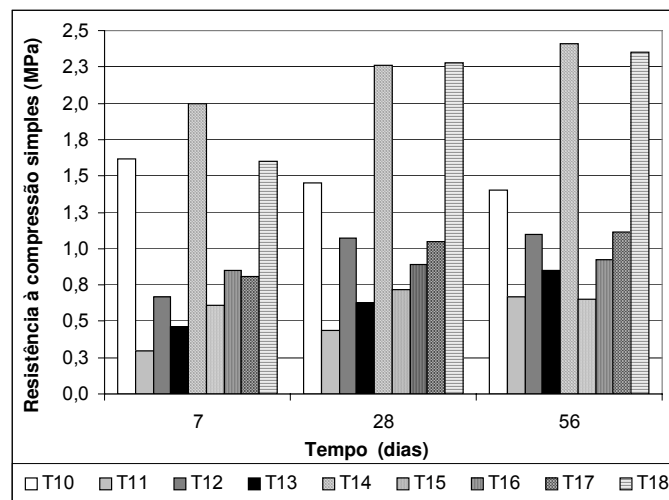


Figura 56. Desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos argilosos submetidos ao ensaio de compressão simples.

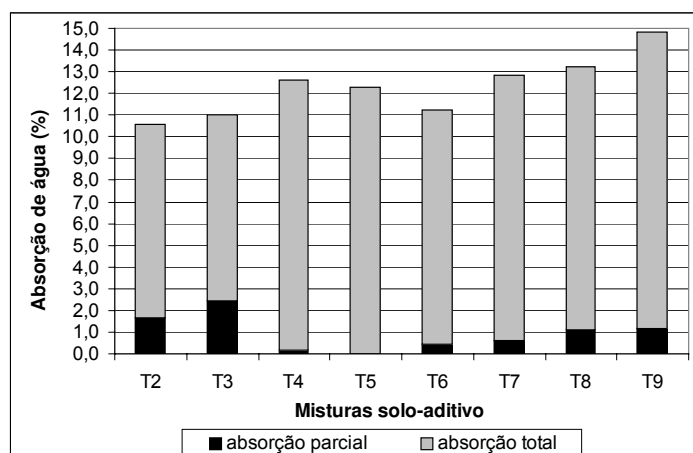


Figura 57. Capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos.

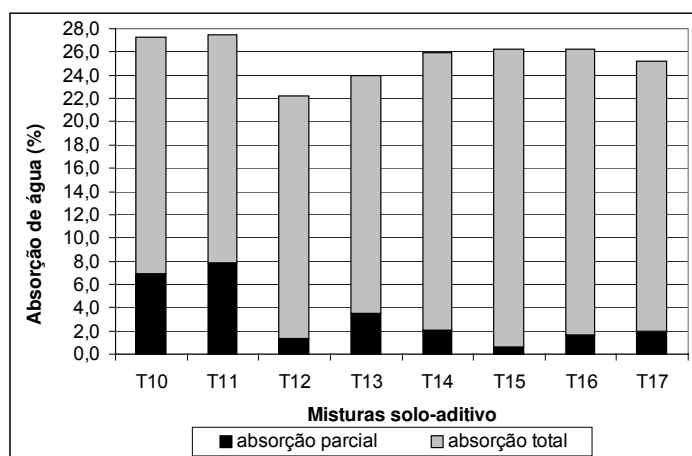


Figura 58. Capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos argilosos.

5.2.6. PROPRIEDADES ELÁSTICAS

A **Tabela 36** apresenta os valores médios da massa específica aparente e da velocidade de propagação da onda ultra-sônica dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos e argilosos. A **Tabela 37** apresenta os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos e argilosos.

Tabela 36. Valores médios da massa específica aparente e da velocidade de propagação da onda ultra-sônica dos corpos-de-prova.

Tratº	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)			Velocidade (m.s ⁻¹)		
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	28 dias	56 dias
T1	2161,47 ± 2,36 (0,11)	2153,36 ± 3,29 (0,15)	2157,52 ± 14,68 (0,68)	1326,73 ± 32,4 (2,45)	1482,37 ± 35,83 (2,42)	1555,77 ± 25,76 (1,66)
T2	2129,62 ± 33,44 (1,57)	2091,13 ± 13,45 (0,64)	2107,02 ± 9,22 (0,44)	1617,50 ± 48,57 (3,01)	1780,03 ± 6,31 (0,35)	1847,37 ± 11,82 (0,64)
T3	2090,18 ± 7,72 (0,37)	2099,07 ± 8,67 (0,41)	2074,84 ± 17,64 (0,85)	2311,00 ± 57,54 (2,49)	2334,83 ± 26,43 (1,13)	2510,47 ± 26,55 (1,06)
T4	2151,40 ± 10,50 (0,49)	2146,56 ± 7,16 (0,33)	2136,80 ± 6,08 (0,28)	2296,67 ± 12,49 (0,54)	2628,17 ± 43,90 (1,67)	2891,37 ± 16,95 (0,59)
T5	2166,60 ± 13,21 (0,61)	2157,10 ± 26,22 (1,22)	2159,53 ± 14,28 (0,66)	2407,10 ± 147,67 (6,13)	2821,07 ± 129,27 (4,60)	3063,07 ± 152,64 (4,98)
T6	2000,90 ± 4,77 (0,24)	1999,86 ± 15,36 (0,77)	1992,55 ± 4,13 (0,21)	849,17 ± 5,56 (0,66)	691,86 ± 150,77 (21,79)	836,20 ± 32,36 (3,87)
T7	2010,77 ± 11,19 (0,56)	2006,33 ± 11,13 (0,55)	2027,58 ± 6,08 (0,30)	800,27 ± 15,80 (1,97)	810,17 ± 41,58 (5,13)	815,18 ± 20,50 (2,51)
T8	2120,17 ± 8,33 (0,39)	2109,88 ± 2,84 (0,13)	2114,90 ± 3,31 (0,16)	916,17 ± 1,24 (0,14)	1137,98 ± 25,50 (2,24)	1625,91 ± 236,51 (14,55)
T9	2120,20 ± 4,67 (0,22)	2096,60 ± 7,37 (0,35)	2119,43 ± 8,26 (0,39)	912,36 ± 3,67 (0,40)	1230,74 ± 53,57 (4,36)	1849,05 ± 47,18 (2,55)
T10	1784,15 ± 502,48 (28,16)	2048,37 ± 7,89 (0,39)	2080,70 ± 12,06 (0,58)	700,10 ± 18,85 (2,69)	830,23 ± 27,25 (3,28)	813,17 ± 41,72 (5,13)
T11	1940,48 ± 26,86 (1,38)	1907,16 ± 11,67 (0,61)	1914,82 ± 16,82 (0,88)	1250,18 ± 122,38 (9,79)	1512,05 ± 61,39 (4,06)	1497,23 ± 35,06 (2,34)
T12	1916,49 ± 2,17 (0,11)	1938,77 ± 6,91 (0,36)	1906,13 ± 6,45 (0,34)	1570,80 ± 31,00 (1,97)	1798,50 ± 3,50 (0,19)	1705,28 ± 5,22 (0,31)
T13	2004,12 ± 21,83 (1,09)	2009,84 ± 11,52 (0,57)	1987,66 ± 16,69 (0,84)	1470,22 ± 65,86 (4,48)	1640,79 ± 18,62 (1,14)	1714,86 ± 47,03 (2,74)
T14	2020,41 ± 37,22 (1,84)	1996,81 ± 37,78 (1,89)	2004,33 ± 35,17 (1,75)	1957,67 ± 34,89 (1,78)	2079,28 ± 52,21 (2,51)	2141,32 ± 73,72 (3,44)
T15	1898,64 ± 6,14 (0,32)	1897,96 ± 3,10 (0,16)	1896,85 ± 2,93 (0,15)	1480,97 ± 52,73 (3,56)	1503,73 ± 25,55 (1,70)	1517,98 ± 9,64 (0,64)
T16	1902,20 ± 10,65 (0,56)	1885,79 ± 13,13 (0,70)	1891,50 ± 9,39 (0,50)	1562,30 ± 12,72 (0,81)	1581,42 ± 25,25 (1,60)	1613,27 ± 9,41 (0,58)
T17	1925,47 ± 15,89 (0,83)	1924,23 ± 20,69 (1,08)	1886,06 ± 8,95 (0,47)	1533,58 ± 36,67 (2,39)	1627,78 ± 13,25 (0,81)	1631,62 ± 21,37 (1,31)
T18	1960,30 ± 2,77 (0,14)	1943,63 ± 8,53 (0,44)	1906,66 ± 20,66 (1,08)	1750,12 ± 6,98 (0,40)	1868,09 ± 29,99 (1,61)	1876,31 ± 11,91 (0,63)

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).
- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 37. Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico em função do período de cura para os corpos-de-prova cilíndricos.

Tratº	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)								
	7 dias			28 dias			56 dias		
T1	3806,80 ± 182,00	(4,72)	de B	4734,48 ± 224,80	(4,75)	fghi A	5224,41 ± 201,21	(3,85)	fg A
T2	5581,70 ± 417,49	(7,48)	c B	6625,56 ± 11,01	(0,17)	ef AB	7191,21 ± 107,71	(1,50)	e A
T3	11171,72 ± 588,95	(5,27)	a B	11445,22 ± 296,65	(2,59)	c B	13077,53 ± 277,83	(2,12)	c A
T4	11348,33 ± 141,63	(1,25)	a C	14829,37 ± 446,63	(3,01)	b B	17863,76 ± 168,56	(0,94)	b A
T5	12598,16 ± 1493,64	(11,86)	a C	17188,93 ± 1435,98	(8,35)	a B	20312,51 ± 2065,48	(10,17)	a A
T6	1442,95 ± 22,24	(1,54)	fg A	999,60 ± 431,13	(43,13)	l A	1395,55 ± 113,20	(8,04)	h A
T7	1288,17 ± 49,05	(3,81)	fg A	1320,04 ± 129,80	(9,83)	kl A	1348,04 ± 64,98	(4,82)	h A
T8	1779,60 ± 9,32	(0,52)	efg B	2733,54 ± 120,23	(4,40)	jkl B	5709,88 ± 1573,64	(27,56)	efg A
T9	1764,90 ± 15,60	(0,88)	efg C	3182,14 ± 277,80	(8,73)	ijk B	7252,40 ± 400,79	(5,53)	e A
T10	862,03 ± 209,57	(24,31)	g A	1413,71 ± 97,78	(6,92)	kl A	1380,29 ± 147,80	(10,71)	h A
T11	3069,97 ± 650,87	(21,20)	def B	4368,54 ± 363,29	(8,32)	hij A	4296,31 ± 236,38	(5,50)	g AB
T12	4730,66 ± 189,47	(189,47)	cd B	6271,14 ± 33,33	(0,53)	efg A	5543,10 ± 50,64	(0,91)	efg AB
T13	4344,61 ± 425,08	(9,78)	cd B	5411,61 ± 128,48	(2,37)	efgh AB	5851,17 ± 354,54	(6,06)	efg A
T14	7748,34 ± 376,58	(4,86)	b B	8644,62 ± 558,95	(6,47)	d AB	9212,38 ± 799,62	(8,68)	d A
T15	4169,99 ± 304,83	(7,31)	cd A	4293,03 ± 150,23	(3,50)	hij A	4370,94 ± 49,08	(1,12)	g A
T16	4642,89 ± 59,70	(1,29)	cd A	4717,85 ± 169,20	(3,59)	ghi A	4923,35 ± 80,82	(1,64)	fg A
T17	4532,82 ± 254,55	(5,62)	cd A	5099,52 ± 125,49	(2,46)	efgh A	5022,33 ± 149,72	(2,98)	fg A
T18	6004,32 ± 45,27	(0,75)	bc A	6783,89 ± 198,54	(2,93)	de A	6713,41 ± 145,36	(2,17)	ef A

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).
- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

As **Figuras 59 e 60** mostram o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova cilíndricos arenosos e argilosos, respectivamente.

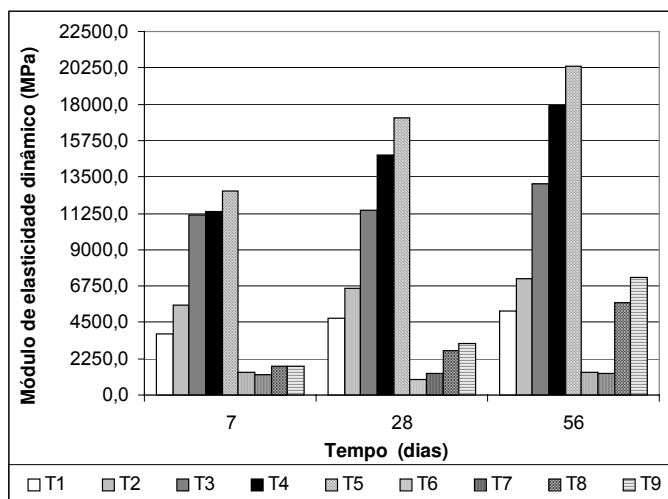


Figura 59. Módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova arenosos.

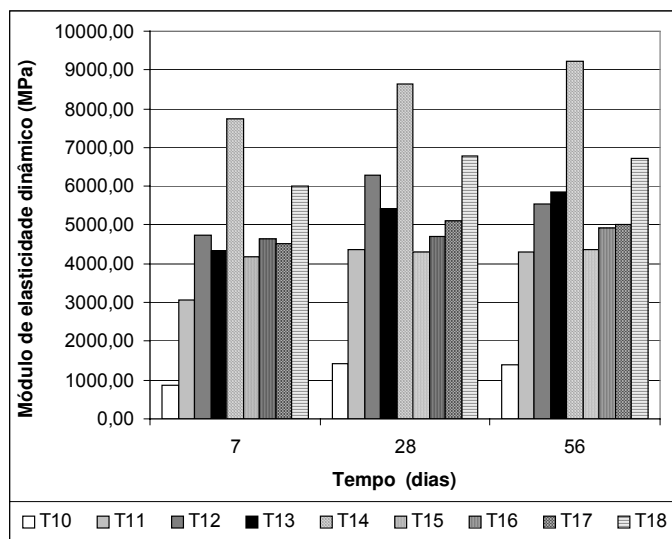


Figura 60. Módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova argilosos.

Os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico tenderam a aumentar com o período de cura (**Tabela 37**). O maior valor foi de 20.312,5 MPa observado aos 56 dias para o solo arenoso com um teor de cimento de 10% associado ao silicato de sódio.

5.2.7. RELAÇÕES ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA ULTRA-SÔNICA

Na **Tabela 38** são apresentadas as equações de regressão para os valores de resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para os corpos-de-prova arenosos e argilosos.

Tabela 38. Equações de regressão para os valores de resistência à compressão simples(R, em MPa) em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica (V, m.s⁻¹) dos corpos-de-prova arenosos e argilosos.

Tratamentos	Equações	R ²
T1 – Arenoso sem adições	$R = -0,0014V + 3,5154$	0,56
T2 – Arenoso + 6% de cimento	$R = 0,0009e^{0,0041V}$	0,92
T3 – Arenoso + 10% de cimento	$R = 0,0106V - 22,17$	0,86
T4 – Arenoso + 6% de ci + 4% de SS	$R = 0,0041V - 8,1623$	0,95
T5 – Arenoso + 10% de ci + 4% de SS	$R = 0,0034V - 5,0572$	0,78
T6 – Arenoso + 6% de cal	$R = 1,2086V^{-0,2284}$	0,20
T7 – Arenoso + 10% de cal	$R = 0,0003V - 0,040$	0,60
T8 – Arenoso + 6% de cal + 4% de SS	$R = 0,0008V - 0,53$	0,96
T9 – Arenoso + 10% de cal + 4% de SS	$R = 0,0011V - 0,82$	0,95
T10 – Argiloso sem adições	$R = -0,0015V + 2,69$	0,74
T11 – Argiloso + 6% de cimento	$R = 0,012e^{0,0025V}$	0,71
T12 – Argiloso + 10% de cimento	$R = 0,017e^{0,0023V}$	0,71
T13 – Argiloso + 6% de ci + 4% de SS	$R = 0,017e^{0,0022V}$	0,71
T14 – Argiloso + 10% de ci + 4% de SS	$R = 0,0036V - 5,09$	0,70
T15 – Argiloso + 6% de cal	$R = 0,0002e^{0,0056V}$	0,31
T16 – Argiloso + 10% de cal	$R = 0,0016V - 1,67$	0,83
T17 – Argiloso + 6% de cal + 4% de SS	$R = 0,016e^{0,0026V}$	0,56
T18 – Argiloso + 10% de cal + 4% de SS	$R = 0,0059V - 8,64$	0,92

As **Figuras 61, 62 e 63** ilustram as representações gráficas das equações de regressão para a resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo arenoso. As **Figuras 64, 65 e 66** ilustram as representações gráficas das equações de regressão para a resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo argiloso.

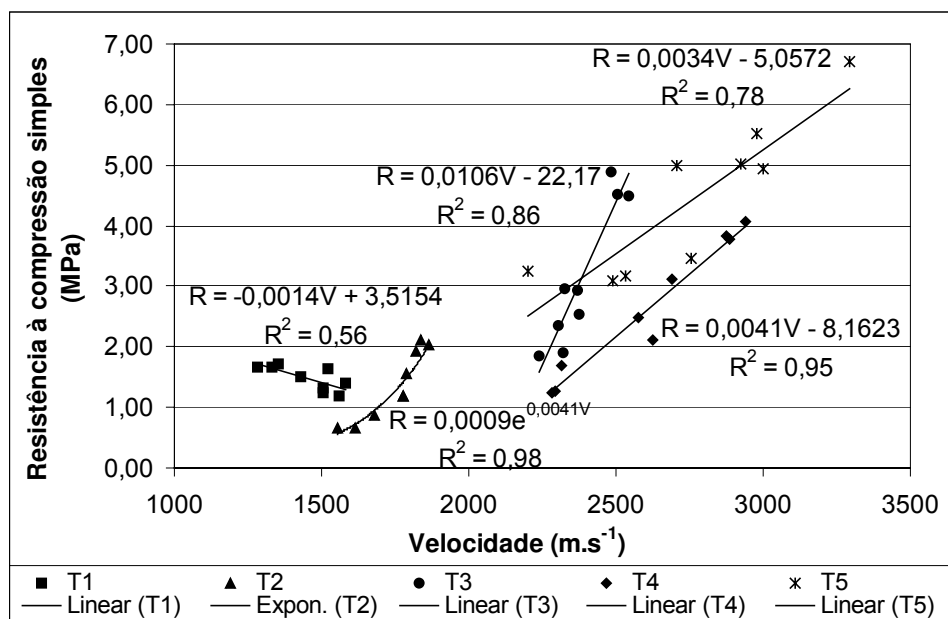


Figura 61. Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo arenoso natural e adicionado de cimento.

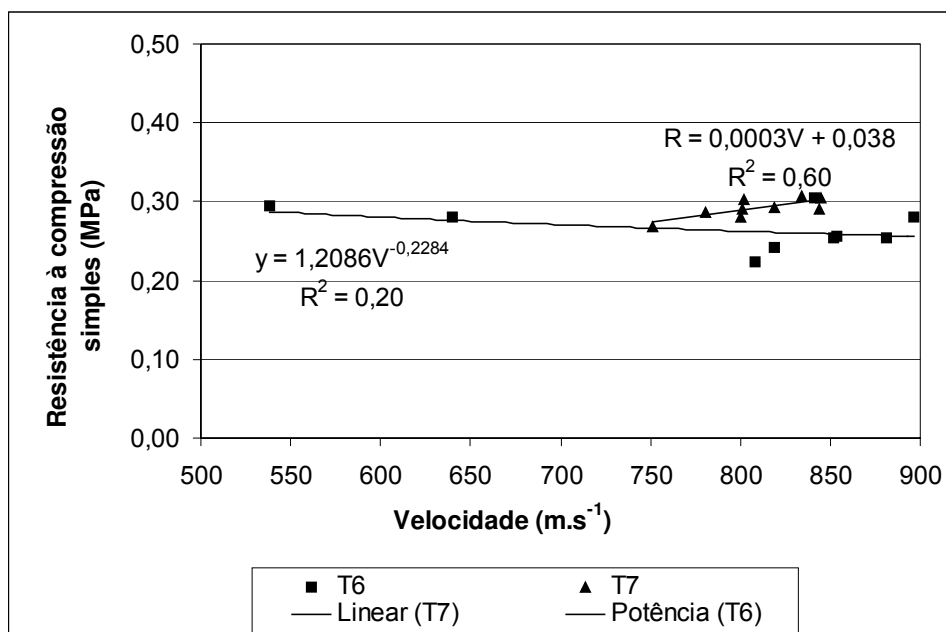


Figura 62. Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo arenoso adicionado de 6% e 10% de cal.

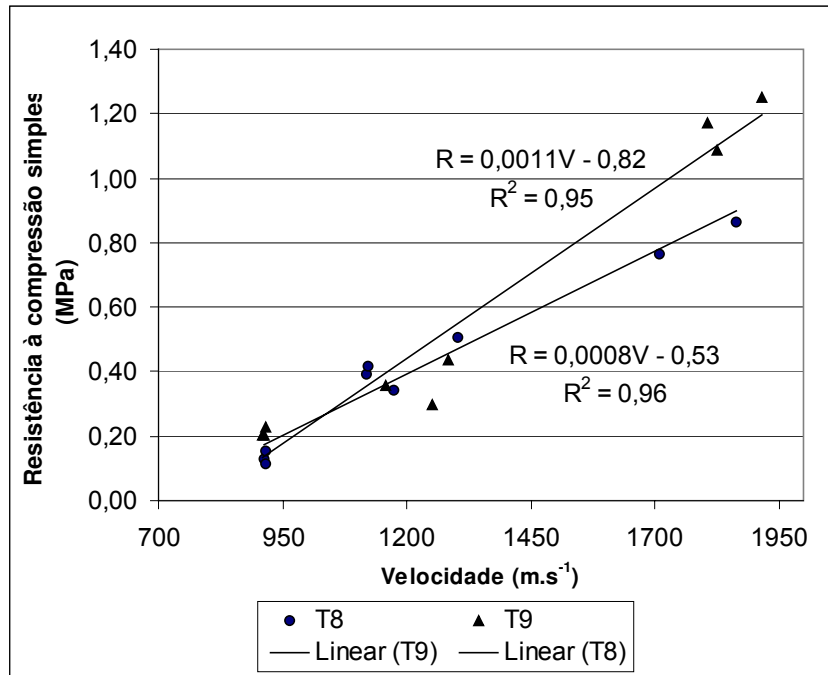


Figura 63. Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo arenoso adicionado de 6% e 10% de cal e associado a 4% de silicato de sódio.

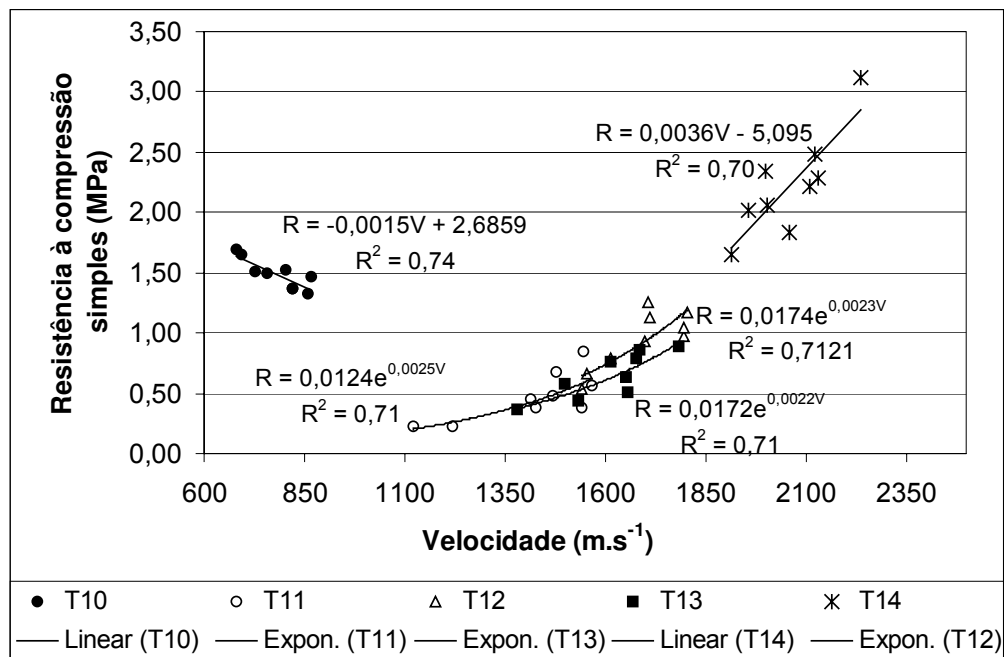


Figura 64. Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo argiloso natural e adicionado de cimento.

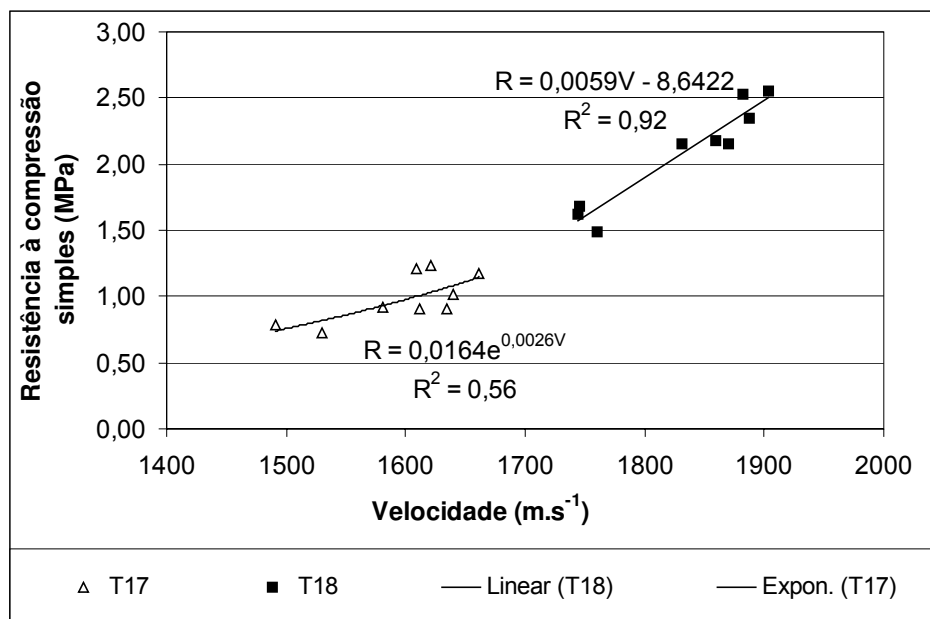


Figura 65. Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo argiloso adicionado de 6% e 10% de cal.

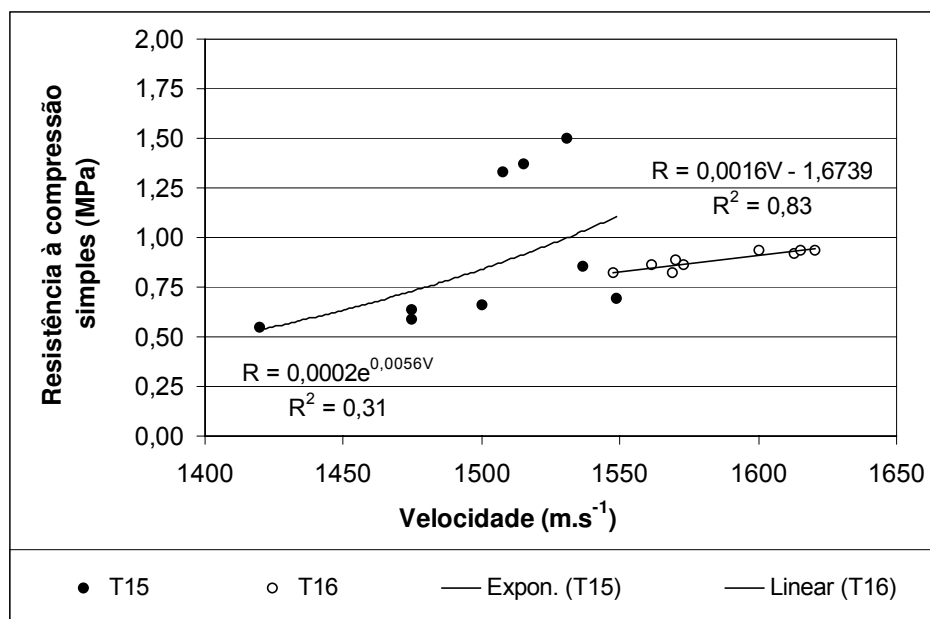


Figura 66. Resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para o solo argiloso adicionado de 6% e 10% de cal e associado a 4% de silicato de sódio.

Houve uma correlação linear negativa entre a resistência e a velocidade para as testemunhas, independentemente do tipo de solo. Com exceção da adição de 6% de cal os resultados demonstraram uma boa correlação entre essas duas variáveis, para todos os teores de cimento e cal estudados, tanto para o solo arenoso como para o argiloso. A adição de 6% de cal proporcionou os menores valores de r^2 , tanto para o solo arenoso ($r^2 = 0,20$) quanto para o argiloso ($r^2 = 0,31$).

Tais resultados sugerem haver uma forte dependência entre as variáveis resistência à compressão simples e velocidade da onda ultra-sônica do pulso ultra-sônico.

5.3. PROCEDIMENTOS APLICADOS AOS TIJOLOS

5.31. MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA E GRAU DE COMPACTAÇÃO

A **Tabela 39** apresenta os valores médios de massa específica aparente seca e grau de compactação dos tijolos arenosos e argilosos.

Os tijolos obtiveram valores de grau de compactação não inferiores a 95% e superiores à 105%, de acordo com as recomendações de BUENO e VILAR (1999).

Tabela 39. Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos tijolos.

Tratº	Massa específica aparente seca (g.cm ⁻³)			Grau de compactação (%)				
	7 dias*	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
T1	1,90 ± 0,02 (1,13)	1,90 ± 0,01 (0,52)	1,90 ± 0,01 (0,27)	1,90 ± 0,02 (0,84)	96,73 ± 0,89 (0,92)	96,70 ± 0,41 (0,42)	96,73 ± 0,21 (0,22)	96,85 ± 0,66 (0,68)
T2	1,95 ± 0,01 (0,50)	1,95 ± 0,01 (0,33)	1,95 ± 0,01 (0,43)	1,95 ± 0,00 (0,25)	99,18 ± 0,40 (0,41)	99,09 ± 0,27 (0,27)	98,74 ± 0,35 (0,35)	99,01 ± 0,20 (0,20)
T3	1,95 ± 0,01 (0,52)	1,95 ± 0,00 (0,22)	1,95 ± 0,01 (0,52)	1,95 ± 0,02 (0,93)	98,84 ± 0,42 (0,43)	99,15 ± 0,18 (0,18)	99,12 ± 0,42 (0,42)	98,83 ± 0,75 (0,76)
T4	1,89 ± 0,00 (0,16)	1,90 ± 0,01 (0,39)	1,89 ± 0,01 (0,55)	1,92 ± 0,01 (0,39)	96,11 ± 0,12 (0,13)	96,27 ± 0,31 (0,32)	1,89 ± 0,01 (0,55)	97,69 ± 0,31 (0,32)
T5	1,95 ± 0,01 (0,52)	1,95 ± 0,00 (0,22)	1,95 ± 0,01 (0,52)	1,95 ± 0,02 (0,93)	98,84 ± 0,42 (0,43)	99,15 ± 0,18 (0,18)	99,12 ± 0,42 (0,42)	98,83 ± 0,75 (0,76)
T6	1,96 ± 0,00 (0,00)	1,96 ± 0,00 (0,00)	1,96 ± 0,00 (0,00)	1,96 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)
T7	1,82 ± 0,00 (0,00)	1,82 ± 0,00 (0,00)	1,82 ± 0,00 (0,00)	1,82 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)
T8	1,96 ± 0,00 (0,00)	1,96 ± 0,00 (0,00)	1,96 ± 0,00 (0,00)	1,96 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)	102,54 ± 0,00 (0,00)
T9	1,82 ± 0,00 (0,00)	1,82 ± 0,00 (0,00)	1,82 ± 0,00 (0,00)	1,82 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)	99,27 ± 0,00 (0,00)
T10	1,66 ± 0,00 (0,00)	1,66 ± 0,00 (0,00)	1,66 ± 0,00 (0,00)	1,66 ± 0,00 (0,00)	104,02 ± 0,00 (0,00)	104,02 ± 0,00 (0,00)	104,02 ± 0,00 (0,00)	104,02 ± 0,00 (0,00)
T11	1,65 ± 0,00 (0,00)	1,65 ± 0,00 (0,00)	1,65 ± 0,00 (0,00)	1,65 ± 0,00 (0,00)	101,93 ± 0,00 (0,00)	101,93 ± 0,00 (0,00)	101,93 ± 0,00 (0,00)	101,93 ± 0,00 (0,00)
T12	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	99,84 ± 0,00 (0,00)	99,84 ± 0,00 (0,00)	99,84 ± 0,00 (0,00)	99,84 ± 0,00 (0,00)
T13	1,64 ± 0,00 (0,00)	1,64 ± 0,00 (0,00)	1,64 ± 0,00 (0,00)	1,64 ± 0,00 (0,00)	101,11 ± 0,00 (0,00)	101,11 ± 0,00 (0,00)	101,11 ± 0,00 (0,00)	101,11 ± 0,00 (0,00)
T14	1,59 ± 0,00 (0,00)	1,59 ± 0,00 (0,00)	1,59 ± 0,00 (0,00)	1,59 ± 0,00 (0,00)	99,04 ± 0,00 (0,00)	99,04 ± 0,00 (0,00)	99,04 ± 0,00 (0,00)	99,04 ± 0,00 (0,00)
T15	1,57 ± 0,00 (0,00)	1,57 ± 0,00 (0,00)	1,57 ± 0,00 (0,00)	1,57 ± 0,00 (0,00)	99,90 ± 0,00 (0,00)	99,90 ± 0,00 (0,00)	99,90 ± 0,00 (0,00)	99,90 ± 0,00 (0,00)
T16	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)
T17	1,63 ± 0,00 (0,00)	1,63 ± 0,00 (0,00)	1,63 ± 0,00 (0,00)	1,63 ± 0,00 (0,00)	103,91 ± 0,00 (0,00)	103,91 ± 0,00 (0,00)	103,91 ± 0,00 (0,00)	103,91 ± 0,00 (0,00)
T18	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	1,61 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)	103,92 ± 0,00 (0,00)

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação).

5.3.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores médios de resistência à compressão simples, módulo de elasticidade dinâmico, resistência anisotrópica e capacidade de absorção de água dos tijolos foram analisados estatisticamente e as respectivas análises de variância são apresentadas nas **Tabelas 40, 41, 42 e 43**.

Tabela 40. Análise de variância para a variável resposta resistência à compressão simples dos tijolos, em MPa.

Fontes de Variação	G. L.	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: solo	1	0,06	0,06	4,99*
B: adições químicas	8	16,02	2,00	152,64*
C: idade	3	1,08	0,36	27,44*
Interações				
AXB	8	26,91	3,36	256,37*
AXC	3	0,26	0,09	6,62*
BXC	24	4,89	0,20	15,54*
AXBXC	24	10,55	0,44	33,52*
Resíduo	144	1,89	0,13	
Total	215	61,67		

* F significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 41. Análise de variância para a variável resposta módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos, em MPa.

Fontes de Variação	G. L.	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: solo	1	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	1.127,06*
B: adições químicas	8	$4,07 \cdot 10^{-8}$	$5,09 \cdot 10^{-7}$	397,53*
C: idade	3	$1,61 \cdot 10^{-7}$	$5,35 \cdot 10^{-6}$	41,79*
Interações				
AXB	8	$2,27 \cdot 10^{-8}$	$2,84 \cdot 10^{-7}$	221,66*
AXC	3	$2,03 \cdot 10^{-7}$	$6,78 \cdot 10^{-6}$	52,92*
BXC	24	$6,44 \cdot 10^{-8}$	$2,68 \cdot 10^{-6}$	20,95*
AXBXC	24	$1,84 \cdot 10^{-8}$	$4,60 \cdot 10^{-6}$	35,95*
Resíduo	144		128,078,0	
Total	215	$1,84 \cdot 10^{-7}$		

*Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 42. Análise de variância para a variável resposta resistência anisotrópica dos tijolos, em MPa/%.

Fontes de Variação	G. L.	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: solo	1	3,98	3,98	408,13*
B: adições químicas	8	6,37	0,80	81,58*
C: idade	3	1,28	0,43	43,74*
Interações				
AXB	8	4,00	0,50	51,31*
AXC	3	0,25	0,08	8,45*
BXC	24	1,04	0,04	4,45*
AXBXC	24	4,44	0,18	18,97*
Resíduo	144	1,04	0,01	
Total	215	22,78		

*Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 43. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a capacidade de absorção de água dos tijolos, em %.

Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: solo	1	1417,45	1417,45	15228,75*
B: adições químicas	7	58,84	8,41	90,31*
Interações				
AXB	7	98,95	14,13	151,88*
Resíduo	32	2,98	0,09	
Total	47	1578,22		

*significativo a 5% de probabilidade.

Pelas **Tabelas 40, 41, 42 e 43** pode-se afirmar que os fatores estudados, tipo de solo, adição química e idade de cura, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos ($p < 0,05$) nas variáveis resistência à compressão simples, resistência anisotrópica, absorção de água e módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos.

As **Tabelas 44, 45 e 46** apresentam os resultados da análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples, módulo de elasticidade dinâmico e resistência anisotrópica dos tijolos, respectivamente.

Na **Tabela 47** são apresentados os resultados da análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo e adição química nos valores médios da capacidade de absorção de água dos tijolos, avaliada aos 7 dias.

Tabela 44. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos tijolos, em MPa.

Fatores	Níveis	Observações*	Médias
Solo	Argiloso	108	0,95 a
	Arenoso	108	0,92 b
Adição química	Solo natural (sem adições)	24	1,31 a
	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	24	1,22 ab
	10% de cimento	24	1,19 b
	10% de cal	24	1,14 b
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	24	0,90 c
	6% de cal	24	0,84 c
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	24	0,67 d
	6% de cimento	24	0,59 de
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	24	0,56 e
Idade	91 dias	54	1,02 a
	7 dias	54	0,98 a
	56 dias	54	0,89 b
	28 dias	54	0,84 c

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo, adição química e idade).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 45. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores do módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos, em MPa.

Fatores	Níveis	Observações*	Médias
Solo	Arenoso	108	3944,0 a
	Argiloso	108	2309,0 b
Adição química	10% de cimento	24	6002,58 a
	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	24	4125,42 b
	10% de cal	24	3816,14 bc
	6% de cimento	24	3565,33 c
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	24	2928,78 d
	6% de cal	24	2761,52 d
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	24	1937,77 e
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	24	1783,92 e
	Solo natural (sem adições)	24	1217,08 f
Idade	56 dias	54	3449,00 a
	91 dias	54	3254,54 b
	7 dias	54	3095,51 b
	28 dias	54	2706,98 c

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo, adição química e idade).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 46. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência anisotrópica dos tijolos, em MPa/%.

Fatores	Níveis	Observações*	Médias
Solo	Argiloso	108	0,61 a
	Arenoso	108	0,34 b
Adição química	10% de cimento	24	0,79 a
	Solo natural	24	0,72 a
	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	24	0,56 b
	10% de cal	24	0,54 b
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	24	0,43 c
	6% de cal	24	0,38 cd
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	24	0,31 de
	6% de cimento	24	0,31 de
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	24	0,25 e
Idade	7 dias	54	0,55 a
	28 dias	54	0,53 a
	56 dias	54	0,46 b
	91 dias	54	0,35 c

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo, adição química e idade).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 47. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo e adição química nos valores médios da capacidade de absorção de água dos tijolos, em %.

Fatores	Níveis	Observações*	Médias
Solo	Arenoso	24	13,79 a
	Argiloso	24	24,66 b
Adição química	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	6	16,90 a
	10% de cimento	6	18,37 b
	6% de cimento	6	18,97 c
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	6	19,08 c
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	6	19,78 d
	6% de cal	6	19,90 d
	10% de cal	6	20,25 de
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	6	20,56 e

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo e adição química).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Pela **Tabela 44** percebe-se que o solo argiloso foi ligeiramente superior ao arenoso em termos de resistência à compressão simples. Assim como ocorreu com os corpos-de-prova cilíndricos, a adição de 10% de cimento associado ao silicato de sódio proporcionou os melhores resultados em termos de resistência à compressão simples. Não houve diferença estatística entre os períodos de cura de 7 e 91 dias em relação à resistência.

O solo arenoso forneceu melhores resultados em termos do módulo de elasticidade dinâmico (**Tabela 45**), de acordo com a **Equação 13**. Os melhores resultados para essa variável foram proporcionados pela adição de 10% de cimento aos solos seguida pela mesma adição só que associada ao silicato de sódio, contrariando os resultados obtidos para os corpos-de-prova cilíndricos. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de, na média, a massa específica aparente dos tijolos tratados com 10% de cimento associado ao silicato de sódio ter sido inferior à aquela obtida para os tijolos tratados com somente 10% de cimento (sem silicato de sódio). Essa diferença nos valores de massa específica aparente foi devida aos menores valores do grau de compactação atingidos pelos tijolos tratados com somente 10% de cimento durante sua moldagem. O período de cura de 56 dias promoveu os maiores valores para o módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos.

Conforme será discutido no item adiante, o solo argiloso proporcionou melhores resultados em termos de resistência anisotrópica obtida pela combinação de ensaios destrutivos e não-destrutivos (**Equação 15**).

Os valores da anisotropia total tenderam a aumentar com o aumento da idade. Tal efeito leva a crer que o processo de cura favoreceu uma maior diferença entre as velocidades nas três direções dos tijolos (**Tabela 46**).

Em termos de absorção de água (total), novamente o solo arenoso se mostrou superior ao argiloso, proporcionando melhor comportamento frente à ação da água (**Tabela 47**).

5.3.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA

As **Tabelas 48 e 49** apresentam os valores médios de resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água dos tijolos, respectivamente.

Pela **Tabela 48**, verifica-se que em termos de resistência à compressão, somente a mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio), aos 28 dias, e a mistura T16 (solo argiloso + 10% de cal), aos 7 e 28 dias, atenderam às especificações da NBR 08491 (ABNT, 1992). Os elevados valores de resistência alcançados pela mistura T10 (solo argiloso natural) se justificam pelo fato dos tijolos não terem sido saturados em água durante 4 horas antes da ruptura, conforme recomendações da NBR 08492.

De uma maneira geral, os valores de resistência à compressão simples foram relativamente baixos e característicos de solos finos. Grandes quantidades de finos são responsáveis pelo enfraquecimento do efeito aglutinante entre a pasta de cimento e a fração arenosa do solo. Embora o cimento reaja até mesmo com solos finos e tenda a estabilizá-los, a resistência da estrutura colóide/cimento é significativamente mais fraca que a estrutura granular/cimento. Da mesma forma, as condições de saturação em água durante o ensaio de compressão simples podem reduzir os valores da resistência. Segundo WALKER (1995), essa redução é atribuída ao desenvolvimento de pressões de água nos poros e à liquefação dos minerais de argila não estabilizados na matriz do tijolo.

Em termos de capacidade de absorção de água, todos os tratamentos aplicados aos tijolos arenosos atenderam às especificações da NBR 08492, que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor superior a 22% (**Tabela 49**). Entretanto, para o solo argiloso, somente a adição de 10% de cimento e Na_2SiO_3 atendeu às especificações da NBR 08492. A principal explicação para esse comportamento é a alta porosidade dos tijolos argilosos, principalmente quando tratados com a cal, o que sugere outras estratégias de tratamento dos tijolos, como a impregnação e/ou adição de produtos hidrofugantes, como os estudados por REN e KAGI (1995). De acordo com esses autores, a adição de soluções de silicato de sódio, silicone e siloxane reduziu consideravelmente a absorção de água de tijolos moldados a partir de solos argilosos.

Tabela 48. Valores médios de resistência à compressão simples dos tijolos, em MPa.

Trat ^o	Resistência à compressão simples (MPa)							
	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias	
T1	0,94 ± 0,12 (12,26)	ef A	0,66 ± 0,10 (15,66)	ef B	0,64 ± 0,10 (16,27)	efg B	0,61 ± 0,04 (6,90)	efgh B
T2	0,77 ± 0,11 (13,82)	efgh A	0,83 ± 0,07 (8,12)	de A	0,72 ± 0,14 (19,35)	ef A	0,68 ± 0,06 (9,16)	efg A
T3	1,39 ± 0,13 (9,64)	cd B	1,84 ± 0,17 (9,50)	a A	1,83 ± 0,16 (8,87)	b A	1,40 ± 0,16 (11,09)	b A
T4	0,42 ± 0,01 (2,25)	i B	1,02 ± 0,17 (16,40)	cd A	1,22 ± 0,10 (8,22)	c A	1,02 ± 0,15 (14,53)	cd A
T5	1,84 ± 0,05 (2,89)	ab A	2,03 ± 0,20 (9,86)	a A	1,90 ± 0,08 (4,35)	b A	1,07 ± 0,13 (12,33)	bc B
T6	0,54 ± 0,04 (7,69)	ghi B	0,74 ± 0,08 (11,11)	de AB	0,79 ± 0,04 (5,26)	def A	0,67 ± 0,12 (18,61)	efg AB
T7	0,45 ± 0,05 (12,14)	hi B	0,76 ± 0,11 (14,07)	de A	0,92 ± 0,03 (3,60)	cde A	0,70 ± 0,05 (7,72)	defg A
T8	0,64 ± 0,03 (3,95)	fghi A	0,57 ± 0,09 (15,27)	efg AB	0,36 ± 0,06 (17,75)	g BC	0,30 ± 0,07 (22,71)	h C
T9	0,66 ± 0,02 (2,50)	fghi AB	0,53 ± 0,09 (17,03)	efg B	0,83 ± 0,05 (5,47)	de AB	0,76 ± 0,03 (4,35)	cdefg AB
T10	0,77 ± 0,13 (16,93)	efgh C	1,89 ± 0,17 (9,00)	a B	2,53 ± 0,17 (9,00)	a A	2,41 ± 0,16 (6,53)	a A
T11	0,50 ± 0,03 (5,04)	ghi A	0,39 ± 0,02 (6,10)	fg A	0,37 ± 0,07 (20,19)	g A	0,45 ± 0,05 (11,11)	gh A
T12	1,01 ± 0,15 (14,79)	e A	0,67 ± 0,02 (3,70)	ef B	0,60 ± 0,03 (4,81)	efg B	0,82 ± 0,15 (18,21)	cdef AB
T13	0,35 ± 0,06 (18,35)	i A	0,33 ± 0,03 (10,58)	g A	0,48 ± 0,02 (3,94)	fg A	0,51 ± 0,07 (14,06)	fgh A
T14	0,45 ± 0,02 (3,64)	hi B	0,76 ± 0,08 (10,52)	de A	0,81 ± 0,06 (7,41)	def A	0,89 ± 0,16 (17,67)	cde A
T15	1,52 ± 0,08 (5,04)	bc A	1,17 ± 0,11 (9,74)	bc B	0,60 ± 0,06 (10,02)	efg C	0,69 ± 0,04 (6,30)	defg C
T16	2,00 ± 0,05 (2,48)	a A	2,14 ± 0,05 (2,48)	a A	1,08 ± 0,11 (10,49)	cd B	1,08 ± 0,01 (0,88)	bc B
T17	0,83 ± 0,10 (11,67)	efg A	0,67 ± 0,01 (1,42)	ef A	0,82 ± 0,04 (4,63)	de A	0,30 ± 0,03 (8,33)	h B
T18	1,07 ± 0,09 (8,53)	de B	1,39 ± 0,08 (6,08)	b A	1,18 ± 0,10 (8,24)	c AB	0,76 ± 0,03 (4,25)	cdefg C

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).
- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 49. Capacidade de absorção de água dos tijolos, em %.

Tratamentos	Absorção de água (%)	
	Parcial	Total
T2	4,20 $\pm$ 0,20 (4,70)	11,86 $\pm$ 0,08 (0,65) a
T3	4,17 $\pm$ 0,46 (11,04)	11,53 $\pm$ 0,14 (1,24) a
T4	3,74 $\pm$ 0,27 (7,31)	14,43 $\pm$ 0,11 (0,74) c
T5	3,33 $\pm$ 0,50 (15,04)	13,84 $\pm$ 0,26 (1,85) bc
T6	4,10 $\pm$ 0,55 (13,53)	13,79 $\pm$ 0,33 (2,42) bc
T7	2,17 $\pm$ 0,50 (22,85)	13,40 $\pm$ 0,19 (1,25) b
T8	2,37 $\pm$ 0,41 (17,27)	15,43 $\pm$ 0,19 (1,25) d
T9	2,19 $\pm$ 0,41 (18,52)	16,06 $\pm$ 0,11 (0,66) d
T11	7,48 $\pm$ 0,98 (13,16)	26,09 $\pm$ 0,11 (0,43) h
T12	6,45 $\pm$ 0,60 (9,29)	25,21 $\pm$ 0,03 (0,10) g
T13	6,43 $\pm$ 1,08 (16,74)	23,72 $\pm$ 0,07 (0,31) f
T14	5,15 $\pm$ 0,08 (16,66)	19,97 $\pm$ 0,61 (3,05) e
T15	5,98 $\pm$ 0,69 (11,62)	26,01 $\pm$ 0,36 (1,39) gh
T16	3,82 $\pm$ 0,56 (14,63)	27,09 $\pm$ 0,58 (2,15) i
T17	5,74 $\pm$ 0,58 (10,17)	25,70 $\pm$ 0,52 (2,01) gh
T18	3,51 $\pm$ 0,25 (7,03)	23,50 $\pm$ 0,11 (0,48) f

*Valores médios $\pm$ desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).
- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As **Figuras 67 e 68** ilustram o desempenho mecânico dos tijolos submetidos ao ensaio de compressão simples, respectivamente para os solos arenoso e argiloso.

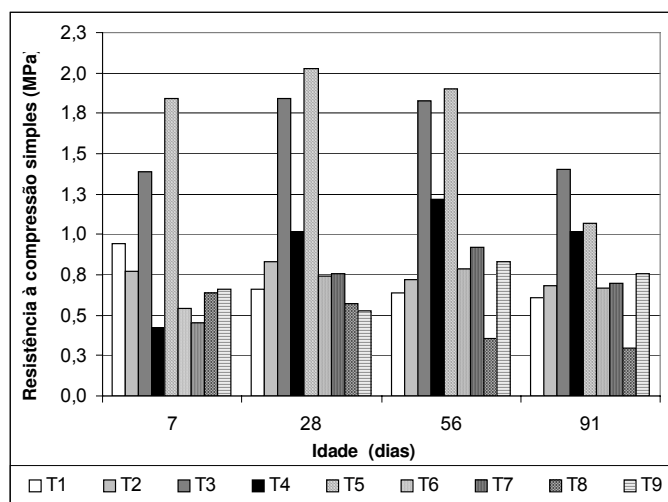


Figura 67. Resistência à compressão simples dos tijolos arenosos em função da idade de cura.

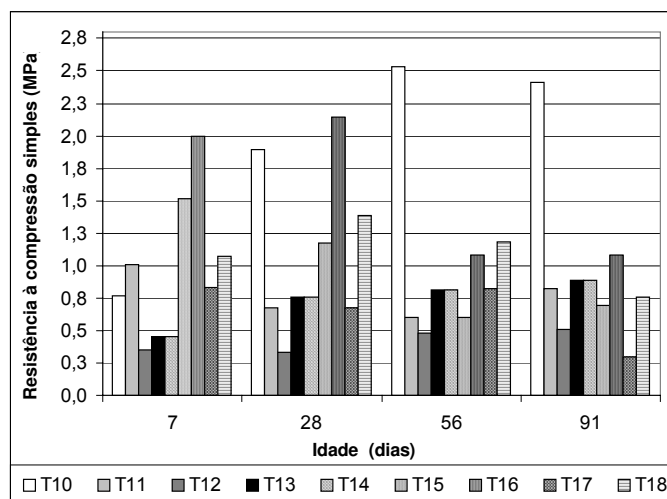


Figura 68. Resistência à compressão simples dos tijolos argilosos em função da idade de cura.

As **Figuras 69 e 70** ilustram o comportamento dos tijolos submetidos ao ensaio de absorção de água, respectivamente para os solos arenoso e argiloso.

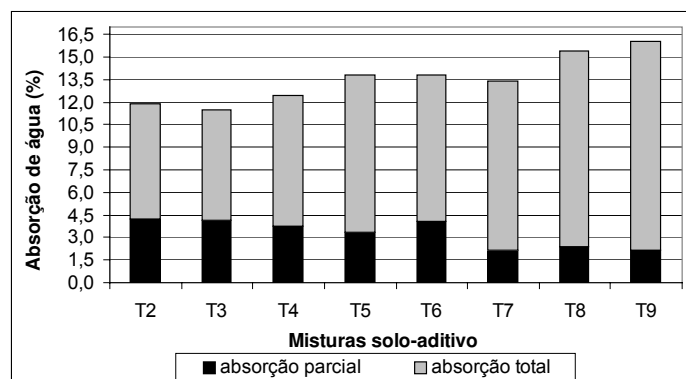


Figura 69. Capacidade de absorção de água dos tijolos arenosos.

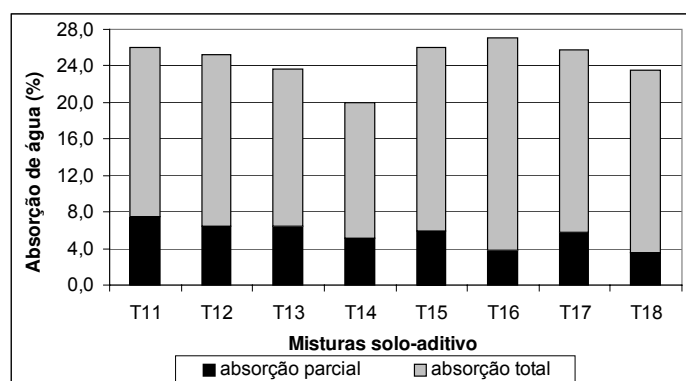


Figura 70. Capacidade de absorção de água dos tijolos argilosos.

5.3.4. COMBINAÇÃO DE MÉTODOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS TIJOLOS

A **Tabela 50** apresenta os valores da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para os três eixos de leitura nos tijolos.

A **Tabela 51** apresenta os valores da anisotropia total e resistência anisotrópica dos tijolos.

Tabela 50. Valores médios da velocidade da onda ultra-sônica nas três direções dos tijolos, em m.s⁻¹.

Trat ^{os}	Velocidade (m.s ⁻¹)											
	V ₁				V ₂				V ₃			
	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
T1	874,17	991,82	1017,43	951,48	937,37	1075,69	1119,83	1144,28	922,55	1080,55	1113,27	1127,90
Desvio	55,39	62,61	60,00	68,62	69,56	78,94	64,86	6,32	61,30	78,18	57,69	9,78
CV (%)	6,34	6,31	5,90	7,21	7,42	7,34	5,79	0,55	6,64	7,24	5,18	0,87
T2	1380,60	1418,16	1335,84	1234,83	1646,74	1696,70	1655,30	1575,24	1619,76	1651,93	1597,90	1530,04
Desvio	30,10	23,48	13,12	17,83	6,99	8,11	23,62	9,43	8,09	6,58	22,22	12,96
CV (%)	2,18	1,66	0,98	1,44	0,42	0,48	1,43	0,60	0,50	0,40	1,39	0,85
T3	1698,86	1856,60	1848,25	1851,92	1979,61	2142,95	2171,29	2203,87	1950,29	2120,53	2160,89	2143,64
Desvio	13,68	17,26	42,53	11,20	4,45	13,71	22,79	45,68	7,77	11,73	35,85	16,13
CV (%)	0,81	0,93	2,30	0,60	0,22	0,64	1,05	2,07	0,40	0,55	1,66	0,75
T4	889,16	1092,77	1103,00	950,24	1098,91	1407,14	1516,75	1240,62	1068,12	1318,17	1369,52	1184,00
Desvio	21,62	67,60	7,99	16,07	20,26	56,23	17,61	47,98	38,09	71,78	25,19	8,67
CV (%)	2,43	6,19	0,72	1,69	1,84	4,00	1,16	3,87	3,57	5,45	1,84	0,73
T5	1710,73	1822,93	1375,92	1196,67	2001,36	2159,69	1877,54	1824,64	2039,01	2213,05	1921,95	1714,74
Desvio	24,37	24,42	55,75	75,59	17,27	4,00	52,21	95,08	2,55	14,22	30,31	83,54
CV (%)	1,42	1,34	4,05	6,32	0,86	0,19	2,78	5,21	0,13	0,64	1,58	4,87
T6	1009,09	1210,66	1265,94	1213,93	1191,93	1494,70	1589,34	1516,59	1170,97	1463,56	1498,36	1462,66
Desvio	18,74	2,39	12,04	40,32	41,72	14,14	28,61	8,74	35,36	14,75	30,63	26,77
CV (%)	1,86	0,20	0,95	3,32	3,50	0,95	1,80	0,58	3,02	1,01	2,04	1,83

Continua...

...Continuação

Trat ^{os}	Velocidade (m.s ⁻¹)											
	V ₁				V ₂				V ₃			
	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
T7	988,87	1310,07	1396,74	1381,52	1147,71	1559,30	1650,02	1664,33	1096,16	1515,50	1621,79	1593,27
Desvio	26,90	5,82	11,53	20,35	40,69	27,97	5,82	17,53	15,60	4,63	16,36	13,20
CV (%)	2,72	0,44	0,83	1,47	3,55	1,79	0,35	1,05	1,42	0,31	1,01	0,83
T8	1069,86	1110,23	970,68	930,49	1243,26	1379,33	1188,95	1179,51	1254,98	1335,48	1172,24	1156,00
Desvio	27,60	88,13	31,65	66,74	31,56	99,43	34,90	60,84	37,71	100,48	33,41	52,82
CV (%)	2,58	7,94	3,26	7,17	2,54	7,21	2,94	5,16	3,00	7,52	2,85	4,57
T9	1057,48	1218,09	1249,13	1188,63	1199,01	1423,66	1492,07	1492,95	1197,79	1408,25	1445,11	1453,10
Desvio	20,46	26,11	14,59	6,63	19,56	5,68	17,57	24,88	9,59	10,72	10,79	15,26
CV (%)	1,93	2,14	1,17	0,56	1,63	0,40	1,18	1,67	0,80	0,76	0,75	1,05
T10	913,93	1108,26	1094,55	1032,20	2157,01	2855,40	2775,39	2750,10	461,74	638,05	613,90	614,21
Desvio	62,97	14,33	48,73	18,83	67,96	42,20	51,48	3,10	20,98	1,05	6,21	4,39
CV (%)	6,89	1,29	4,45	1,82	3,15	1,48	1,85	0,11	4,54	0,16	1,01	0,71
T11	1373,19	1450,32	1249,10	1137,95	2823,40	3121,18	2714,51	2703,21	629,46	696,82	586,54	590,61
Desvio	20,84	3,68	101,10	98,05	60,77	36,36	107,92	84,97	5,59	4,81	24,07	12,58
CV (%)	1,52	0,25	8,09	8,62	2,15	1,16	3,98	3,14	0,89	0,69	4,10	2,13
T12	1550,25	1518,29	1494,87	1485,18	3364,31	3350,26	3040,86	3193,63	743,58	756,38	697,35	617,48
Desvio	4,20	5,33	24,72	21,25	18,49	49,96	223,12	46,23	1,03	3,44	8,94	131,36
CV (%)	0,27	0,35	1,65	1,43	0,55	1,49	7,34	1,45	0,14	0,46	1,28	21,27
T13	857,79	1071,17	1082,96	1046,86	1811,69	2145,25	2285,43	2349,16	394,87	486,78	476,19	481,30
Desvio	12,76	21,98	8,79	18,91	45,66	29,31	82,67	57,41	9,55	4,93	1,46	4,47
CV (%)	1,49	2,05	0,81	1,81	2,52	1,37	3,62	2,44	2,42	1,01	0,31	0,93

Continua...

...Continuação.

Tratºs	Velocidade (m.s ⁻¹)											
	V ₁				V ₂				V ₃			
	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
T14	1103,82	1248,15	1333,45	1277,93	2579,04	2793,18	2987,32	2954,61	559,54	600,53	622,87	621,77
Desvio	44,87	9,50	12,36	20,38	80,19	47,21	69,32	98,79	16,70	7,60	12,11	6,47
CV (%)	4,07	0,76	0,93	1,60	3,11	1,69	2,32	3,34	2,98	1,26	1,94	1,04
T15	1425,22	1343,96	1065,39	1216,01	3028,19	3117,45	2698,08	3059,95	671,24	674,28	583,13	638,66
Desvio	24,62	49,67	17,71	44,98	40,73	84,76	42,30	93,34	8,03	16,37	10,62	19,50
CV (%)	1,73	3,70	1,66	3,70	1,34	2,72	1,57	3,05	1,20	2,43	1,82	3,05
T16	1517,25	1674,18	1501,52	1208,88	3216,46	3819,44	3532,51	3121,51	720,13	863,21	776,66	662,76
Desvio	24,61	32,48	13,87	71,76	93,33	107,20	67,20	48,56	13,07	2,72	2,70	8,69
CV (%)	1,62	1,94	0,92	5,94	2,90	2,81	1,90	1,56	1,82	0,32	0,35	1,31
T17	1123,55	1124,35	1082,96	1022,53	2565,82	2529,39	2757,19	2758,93	575,14	553,44	600,12	588,76
Desvio	31,63	12,37	8,79	41,60	44,37	13,06	37,01	10,21	13,76	3,56	8,42	1,42
CV (%)	2,82	1,10	0,81	4,07	1,73	0,52	1,34	0,37	2,39	0,64	1,40	0,24
T18	1297,57	1319,25	1375,57	1267,19	2927,88	2965,86	3183,58	3427,02	629,08	656,35	689,44	759,74
Desvio	26,21	6,06	22,40	130,46	35,68	44,44	54,27	58,39	9,56	3,87	7,17	17,70
CV (%)	2,02	0,46	1,63	10,30	1,22	1,50	1,70	1,70	1,52	0,59	1,04	2,33

Tabela 51. Valores médios da anisotropia total (ΔM) e resistência anisotrópica (R_A) dos tijolos.

Tratº	ΔM (%)				R_A (MPa/%)			
	7 dias*	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
T1	5,95 ± 0,70 (11,69)	7,94 ± 1,03 (12,97)	8,90 ± 0,84 (9,84)	16,25 ± 5,98 (36,77)	1,62 ± 0,28 a A (17,33)	0,86 ± 0,22 b B (26,00)	0,73 ± 0,17 b B (23,30)	0,43 ± 0,14 bcde C (32,02)
T2	15,47 ± 1,53 (9,88)	15,30 ± 1,44 (9,430)	17,87 ± 0,83 (4,63)	20,50 ± 0,96 (4,69)	0,51 ± 0,10 efg A (19,35)	0,55 ± 0,08 cd A (14,99)	0,40 ± 0,07 cdef A (18,31)	0,33 ± 0,03 bcde A (9,13)
T3	13,54 ± 0,69 (5,09)	12,91 ± 0,97 (7,53)	14,7 ± 0,88 (6,01)	14,79 ± 0,86 (5,84)	1,03 ± 0,04 bc B (4,02)	1,44 ± 0,22 a A (15,20)	1,26 ± 0,16 a A (12,90)	0,95 ± 0,05 a B (5,45)
T4	17,88 ± 2,87 (16,04)	19,86 ± 1,26 (6,36)	23,56 ± 0,56 (2,40)	21,61 ± 0,51 (2,36)	0,24 ± 0,05 gh B (19,15)	0,52 ± 0,10 cd A (18,59)	0,52 ± 0,05 bcde A (8,90)	0,47 ± 0,05 bcd AB (9,64)
T5	15,32 ± 1,00 (6,54)	16,62 ± 1,12 (6,75)	27,60 ± 1,39 (5,02)	32,42 ± 0,86 (2,66)	1,21 ± 0,09 b A (7,21)	1,23 ± 0,14 a A (11,07)	0,69 ± 0,05 bcd B (7,37)	0,33 ± 0,04 bcde C (12,20)
T6	14,55 ± 1,47 (10,07)	18,15 ± 0,70 (3,87)	18,00 ± 0,63 (3,50)	18,53 ± 1,90 (10,27)	0,38 ± 0,06 efgh A (16,90)	0,41 ± 0,05 de A (12,96)	0,44 ± 0,02 cdef A (4,46)	0,36 ± 0,02 bcde A (5,14)
T7	11,82 ± 2,87 (24,25)	14,78 ± 0,65 (4,40)	14,62 ± 0,47 (3,21)	15,19 ± 0,66 (4,37)	0,39 ± 0,08 efgh B (20,08)	0,51 ± 0,07 cde AB (12,75)	0,63 ± 0,02 bcd A (3,95)	0,46 ± 0,02 bc B (5,13)
T8	14,33 ± 1,54 (10,74)	18,24 ± 1,15 (6,29)	17,79 ± 0,79 (4,43)	20,40 ± 1,84 (9,02)	0,45 ± 0,05 efgh A (12,12)	0,31 ± 0,03 de AB (9,14)	0,20 ± 0,03 f B (12,95)	0,15 ± 0,04 de B (28,48)
T9	11,76 ± 1,00 (8,51)	13,97 ± 1,89 (13,51)	14,94 ± 1,37 (9,14)	19,30 ± 1,03 (5,36)	0,57 ± 0,06 def A (9,82)	0,38 ± 0,03 de A (6,60)	0,56 ± 0,08 bcde A (13,62)	0,39 ± 0,01 bcde A (2,21)
T10	36,55 ± 0,59 (1,62)	35,44 ± 2,01 (5,66)	38,64 ± 1,05 (2,73)	36,55 ± 0,59 (1,62)	0,23 ± 0,10 gh A (41,38)	0,52 ± 0,04 cd A (7,88)	0,72 ± 0,16 bc A (21,77)	0,62 ± 0,02 b B (3,37)
T11	24,02 ± 0,83 (3,45)	24,44 ± 3,47 (14,21)	31,00 ± 4,19 (13,51)	24,02 ± 0,83 (3,45)	0,25 ± 0,03 gh A (11,73)	0,16 ± 0,00 e A (2,35)	0,16 ± 0,05 f A (29,40)	0,15 ± 0,03 cde A (18,50)
T12	26,04 ± 1,15 (4,43)	19,67 ± 6,16 (31,34)	22,01 ± 2,35 (10,69)	26,04 ± 1,15 (4,43)	0,41 ± 0,05 efgh A (12,92)	0,26 ± 0,02 de A (7,08)	0,35 ± 0,16 def A (44,23)	0,38 ± 0,07 bcde A (17,96)
T13	18,61 ± 0,74 (4,00)	21,49 ± 2,83 (13,17)	26,02 ± 0,79 (3,04)	18,61 ± 0,74 (4,00)	0,16 ± 0,02 h A (10,41)	0,17 ± 0,02 e A (8,62)	0,23 ± 0,04 f A (15,42)	0,20 ± 0,02 cde A (8,41)
T14	26,44 ± 0,80 (3,03)	26,11 ± 0,97 (3,73)	28,51 ± 0,97 (3,41)	26,44 ± 0,80 (3,03)	0,15 ± 0,01 h A (3,32)	0,29 ± 0,03 de A (10,57)	0,31 ± 0,02 ef A (7,61)	0,31 ± 0,04 bcde A (12,23)
T15	29,12 ± 1,38 (4,74)	35,06 ± 0,85 (2,43)	34,26 ± 0,83 (2,43)	29,12 ± 1,38 (4,74)	0,67 ± 0,10 de A (14,69)	0,40 ± 0,04 de B (9,78)	0,17 ± 0,02 f C (10,71)	0,20 ± 0,01 cde C (5,65)
T16	28,42 ± 3,06 (10,76)	30,29 ± 1,71 (5,64)	36,11 ± 3,64 (10,08)	28,42 ± 3,06 (10,76)	0,87 ± 0,04 cd A (4,90)	0,76 ± 0,10 bc A (12,62)	0,36 ± 0,01 edf B (3,46)	0,30 ± 0,03 bcde B (9,35)
T17	27,06 ± 0,57 (2,11)	35,47 ± 1,25 (3,53)	38,91 ± 2,52 (6,48)	27,06 ± 0,57 (2,11)	0,29 ± 0,03 fgh A (9,49)	0,25 ± 0,01 de A (2,75)	0,23 ± 0,00 f A (0,29)	0,08 ± 0,00 e A (2,86)
T18	27,14 ± 1,14 (4,21)	28,95 ± 1,43 (4,94)	39,51 ± 5,71 (14,44)	27,14 ± 1,4 (4,21)	0,40 ± 0,03 efgh AB (8,03)	0,51 ± 0,03 cde A (6,05)	0,41 ± 0,05 cdef A (11,56)	0,20 ± 0,04 cde B (18,55)

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).
- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Houve um aumento gradativo da velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função da idade devido ao processo de estabilização química dos tijolos, resultando em uma estrutura cristalina de melhor qualidade, assim como ocorreu com os corpos-de-prova cilíndricos (**Tabela 50**).

Observa-se pelos valores da anisotropia total (**Tabela 51**), que os tijolos de solo arenoso foram menos anisotrópicos que os argilosos. Tais resultados podem ser explicados pela maior presença de espaços vazios nos tijolos argilosos que interferiram na propagação da onda ultra-sônica, originando diferenças significativas entre os valores de velocidade da onda ultra-sônica nas três direções dos tijolos. Contudo, apesar da menor anisotropia total dos tijolos arenosos, os baixos valores de resistência à compressão simples obtidos pelos mesmos acarretaram em um decréscimo nos valores da resistência anisotrópica, provocando, conseqüentemente, uma diminuição na qualidade dos tijolos.

As adições químicas que proporcionaram a maior e a menor resistência anisotrópica foram as de 10% de cimento e 6% de cal associadas ao silicato de sódio, respectivamente.

Assim, o uso da resistência anisotrópica como um parâmetro para avaliar a qualidade dos tijolos baseou-se na relação entre o estresse físico produzido no tijolo e um parâmetro matemático (sua anisotropia estrutural). Conforme CULTRONE *et al.* (2001), quanto maior o valor da resistência anisotrópica, melhor será a qualidade do material, ou seja, a qualidade do tijolo fica condicionada à sua estrutura anisotrópica para um estresse mecânico constante.

5.3.5. PROPRIEDADES ELÁSTICAS

A **Tabela 52** apresenta os valores médios da massa específica aparente e do módulo de elasticidade dinâmico em função do período de cura, conforme a ASTM C-597-02 (1983), calculados para os tijolos arenosos e argilosos.

As **Figuras 71 e 72** ilustram o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos em função do período de cura, respectivamente para os solos arenoso e argiloso.

Tabela 52. Massa específica aparente e módulo de elasticidade dinâmico em função do período de cura para os tijolos.

Tratº	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)				Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)			
	7 dias*	28 dias	56 dias	91 dias	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
T1	1887,47 ± 47,10 (2,50)	1923,59 ± 60,61 (3,15)	1923,98 ± 2,50 (0,13)	1973,80 ± 14,84 (0,74)	1046,38 ± 46,07 (4,07) ij A	1425,83 ± 208,73 (14,64) fgh A	1683,93 ± 298,88 (17,75) efgh A	1708,97 ± 66,95 (3,92) fgh A
T2	2277,45 ± 78,44 (3,44)	2199,27 ± 22,17 (1,01)	2178,85 ± 21,94 (1,01)	2211,06 ± 68,18 (3,08)	5226,02 ± 108,66 (2,08) bc B	8929,00 ± 801,41 (8,98) a A	3718,67 ± 235,50 (6,33) b C	1896,70 ± 52,74 (2,78) bc C
T3	2232,14 ± 16,33 (0,73)	2282,46 ± 56,01 (2,45)	2206,55 ± 22,50 (1,02)	2219,18 ± 3,41 (1,37)	8060,22 ± 230,59 (2,86) a B	8774,86 ± 196,88 (2,24) a B	8362,58 ± 484,45 (5,79) a B	4807,15 ± 291,26 (6,06) a A
T4	2174,64 ± 12,90 (0,59)	2164,56 ± 13,97 (0,65)	2159,45 ± 15,52 (0,72)	2202,05 ± 66,99 (3,04)	1553,78 ± 105,95 (6,82) ghij C	2251,55 ± 211,69 (9,40) ef BC	2655,95 ± 40,51 (1,53) cde B	1595,12 ± 145,09 (9,10) cd A
T5	2156,61 ± 15,90 (0,74)	2162,25 ± 21,95 (1,01)	2102,43 ± 43,77 (2,08)	2106,97 ± 25,17 (1,19)	7823,46 ± 219,88 (2,81) a A	8216,04 ± 122,82 (1,49) a A	3499,91 ± 33,23 (0,95) bc B	1373,60 ± 73,6 (5,35) cde B
T6	2058,90 ± 20,15 (0,98)	2098,65 ± 12,50 (0,60)	2107,14 ± 0,48 (0,02)	2181,64 ± 29,45 (1,35)	1798,34 ± 93,94 (5,22) fghi A	3769,01 ± 514,80 (13,66) c A	3301,21 ± 172,57 (5,23) bc A	3400,34 ± 397,77 (1,70) cde B
T7	2057,35 ± 60,76 (2,95)	2059,99 ± 10,92 (0,53)	2063,30 ± 37,08 (1,80)	2139,99 ± 32,18 (1,50)	1737,38 ± 250,33 (14,41) fghi C	3604,48 ± 200,73 (5,57) cd B	3799,53 ± 254,05 (6,69) b B	4866,52 ± 387,80 (7,97) b A
T8	2159,78 ± 34,06 (1,58)	2088,75 ± 143,7 (6,88)	2052,57 ± 30,15 (1,47)	2102,37 ± 15,64 (0,74)	2555,74 ± 132,90 (5,20) efg A	2175,76 ± 502,98 (23,12) ef AB	1460,22 ± 43,34 (2,97) gh B	2112,77 ± 244,68 (11,58) fgh AB
T9	2121,09 ± 16,42 (0,77)	2047,84 ± 7,37 (0,36)	2053,81 ± 7,09 (0,35)	2169,43 ± 53,75 (2,48)	2549,81 ± 70,87 (2,87) efg AB	2356,33 ± 168,16 (7,14) ef B	2916,37 ± 156,16 (5,35) bcd AB	3210,23 ± 631,79 (19,79) cde A
T10	2069,41 ± 48,90 (2,36)	2060,59 ± 45,51 (2,21)	2054,77 ± 17,78 (0,87)	2060,59 ± 45,51 (2,21)	984,48 ± 401,78 (40,81) j B	665,02 ± 41,38 (6,22) gh B	656,78 ± 52,85 (8,05) h B	1890,72 ± 536,22 (28,22) fgh A
T11	2134,48 ± 40,02 (1,87)	2109,90 ± 41,14 (1,95)	2032,09 ± 58,35 (2,87)	2109,90 ± 41,14 (1,95)	2004,77 ± 189,76 (9,47) fghi A	1700,07 ± 82,11 (4,83) efg A	1501,18 ± 61,29 (4,08) fgh A	1291,00 ± 312,84 (24,23) h A
T12	2170,53 ± 19,50 (0,90)	2143,80 ± 21,15 (0,99)	2066,10 ± 36,27 (1,76)	2143,80 ± 21,15 (0,99)	4459,96 ± 270,29 (6,06) bcd A	1839,79 ± 185,14 (10,06) ef B	2952,30 ± 103,86 (3,52) bcd B	3261,50 ± 86,21 (2,64) cde C
T13	2128,37 ± 25,38 (1,19)	2126,82 ± 19,31 (0,91)	2110,94 ± 10,80 (0,51)	2126,82 ± 19,31 (0,91)	1284,44 ± 139,95 (10,90) hij A	655,08 ± 69,63 (10,63) h A	1017,26 ± 44,29 (4,35) h A	1352,43 ± 148,43 (10,98) h A
T14	2126,18 ± 11,63 (0,55)	2127,88 ± 23,54 (1,11)	2108,17 ± 23,77 (1,13)	2127,88 ± 23,54 (1,11)	2139,51 ± 118,49 (5,54) fgh A	2586,00 ± 1,65 (0,00) de A	2526,80 ± 338,22 (13,39) cdef A	2741,21 ± 201,08 (7,34) def A
T15	2041,40 ± 28,58 (1,40)	2036,05 ± 37,33 (1,83)	2037,00 ± 46,24 (2,27)	2036,05 ± 37,33 (1,83)	4254,98 ± 121,63 (2,86) cd A	2072,03 ± 156,66 (7,56) ef B	1651,63 ± 173,72 (10,52) efgh B	1844,61 ± 138,08 (7,49) fgh B
T16	2056,67 ± 8,87 (0,43)	1832,11 ± 70,98 (3,87)	2022,28 ± 16,53 (0,82)	1832,11 ± 70,98 (3,87)	5396,11 ± 48,61 (0,90) b A	5250,26 ± 215,45 (4,10) b A	3438,78 ± 138,66 (4,03) bc B	2436,05 ± 78,85 (3,24) efg C
T17	2145,73 ± 20,81 (0,97)	2144,79 ± 27,23 (1,27)	2043,54 ± 4,83 (0,24)	2144,79 ± 27,23 (1,27)	2599,73 ± 183,61 (7,06) ef A	1637,08 ± 102,97 (6,29) efgh B	1493,14 ± 95,15 (6,37) fgh B	1467,73 ± 239,20 (16,30) gh B
T18	2107,45 ± 20,74 (0,98)	2102,21 ± 20,58 (0,98)	1992,46 ± 13,76 (0,69)	2102,21 ± 20,58 (0,98)	3432,03 ± 136,27 (3,97) de AB	4173,77 ± 556,46 (13,33) c A	2089,30 ± 69,59 (3,33) defg C	2702,39 ± 298,22 (11,04) def BC

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).
- m cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Os melhores resultados em termos de módulo de elasticidade dinâmico foram obtidos pela adição dos teores de 10% de cimento associado ou não ao silicato de sódio.

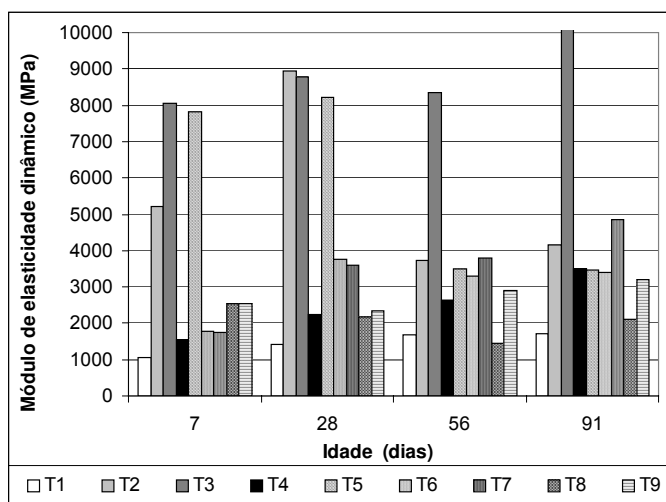


Figura 71. Módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos arenosos em função da idade.

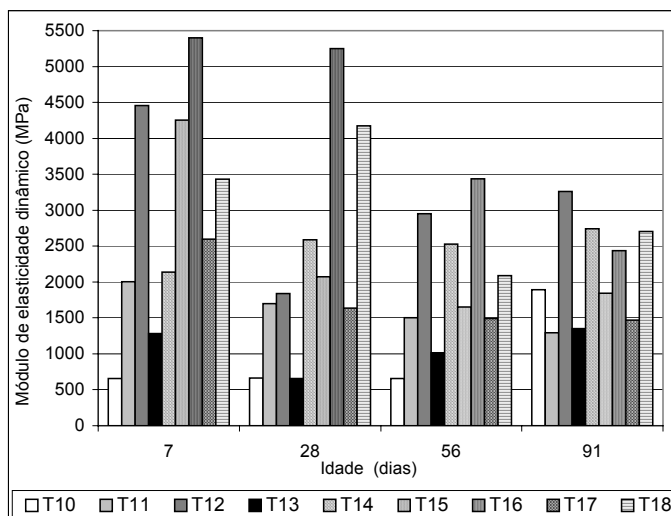


Figura 72. Módulo de elasticidade dinâmico dos tijolos argilosos em função da idade.

5.3.6. ANÁLISE VISUAL DOS TIJOLOS TRATADOS COM CIMENTO E SILICATO DE SÓDIO.

Foram observados depósitos esbranquiçados superficiais de carbonatos na superfície dos tijolos tratados com cimento e silicato de sódio (tratamentos T4, T5, T17 e T18) durante a cura úmida (**Figuras 73 e 74**).

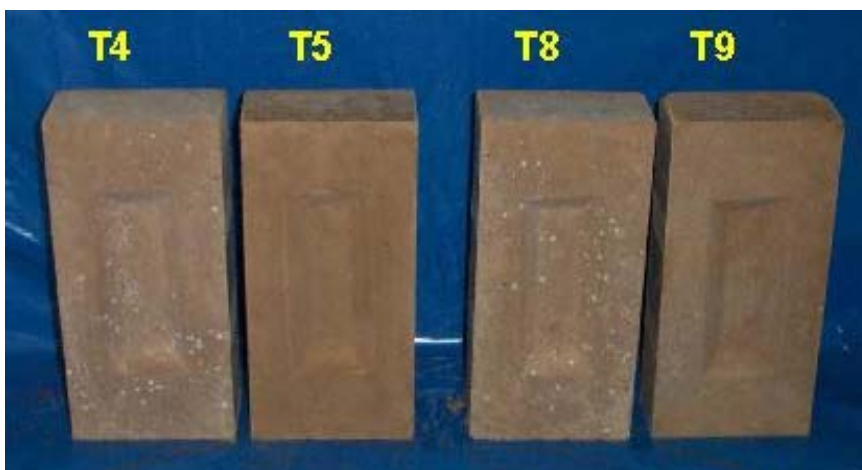


Figura 73. Eflorescência de CaCO_3 nos tijolos arenosos tratados com Na_2SiO_3 .



Figura 74. Eflorescência de CaCO_3 nos tijolos argilosos tratados com Na_2SiO_3 .

DOW e GLASSER (2003) afirmaram que esse tipo de eflorescência é bastante comum em construções novas baseadas em concreto de cimento Portland e em unidades de alvenaria, incluindo tijolos cerâmicos que foram argamassados com cimento. De acordo com os mesmos autores, esse tipo de eflorescência não promove nenhum dano à alvenaria, exceto pelo aspecto estético.

VICKERS e MOUKWA (1996) sugeriram que o aumento da permeabilidade dos materiais de construção aumenta a intensidade desse tipo de eflorescência. Contudo, segundo os mesmos autores, a redução pura e simples da permeabilidade não é necessariamente uma solução, pois alguns materiais, como é o caso de tijolos cerâmicos e argamassas de cimento, requerem uma permeabilidade controlada para alcançarem uma resistência ao congelamento e controle do movimento da umidade.

KUBAYASHI e UNO (1989 e 1990) correlacionaram o aumento da eflorescência com o aumento do conteúdo de álcalis, sódio e potássio no cimento. Eles explicaram que os álcalis solúveis aumentam a solubilidade do Ca(OH)_2 . Este aumento da solubilidade, juntamente com o transporte do cálcio solúvel em direção à superfície onde o CO_2 atmosférico está presente, é postulado como causa da precipitação do CaCO_3 .

A **Figura 75** representa a superfície do cimento, argamassa ou concreto em contato com a atmosfera. De acordo com DOW e GLASSER (2003), a água pode chegar à superfície do material sob a forma de orvalho, “fog”, chuva ou outras combinações. Independentemente da forma de se depositar sobre a superfície, a água sempre estará saturada de CO_2 .

A **Figura 75** se concentra na ocorrência do processo. A espessura da camada de água está exagerada, mas é importante notar que o sistema agora contém duas interfaces: ar-água e água-sólido. Neste caso, o termo “água” é usado para a fase aquosa que contém substâncias dissolvidas.

Para DOW e GLASSER (2003) a formação da eflorescência é controlada por seis processos (**Figura 76**). Assumindo-se que o filme de água já esteja umedecendo a superfície do material, substâncias presentes no cimento começam a dissolver-se na interface água-sólido (processos 3 e 4). Essas substâncias são de dois tipos: aquelas com solubilidade ilimitada, relacionadas à capacidade da fonte em suprir e saturar o filme de água, e aquelas cuja solubilidade é limitada, isto é, as substâncias podem reagir com formação de uma quantidade limitada de sais solúveis. Exemplos do primeiro grupo incluem o sódio e o potássio, enquanto

do segundo incluem o cálcio, o alumínio, o silício, etc. dos quais somente o cálcio exerce papel importante neste processo. Uma vez a água estando quimicamente modificada pela dissolução de componentes do cimento (processos 3 e 4), sua capacidade em comportar CO_2 é também afetada. Como resultado, um novo equilíbrio de dissolução é estabelecido, resultando em um aumento da dissolução do CO_2 . O CO_2 inicialmente se dissolve como CO_2 molecular mas dependendo da composição e do pH da solução, a especificação do CO_2 ajusta-se a um novo equilíbrio entre o CO_2 (aquoso), H_2CO_3 , H_2CO_3^- , CO_3^{2-} (processos 1 e 2). Finalmente, o Ca proveniente do cimento e o CO_3^{2-} reagem, precipitando o CaCO_3 uma vez que sua limitada solubilidade é atingida (processo 6).

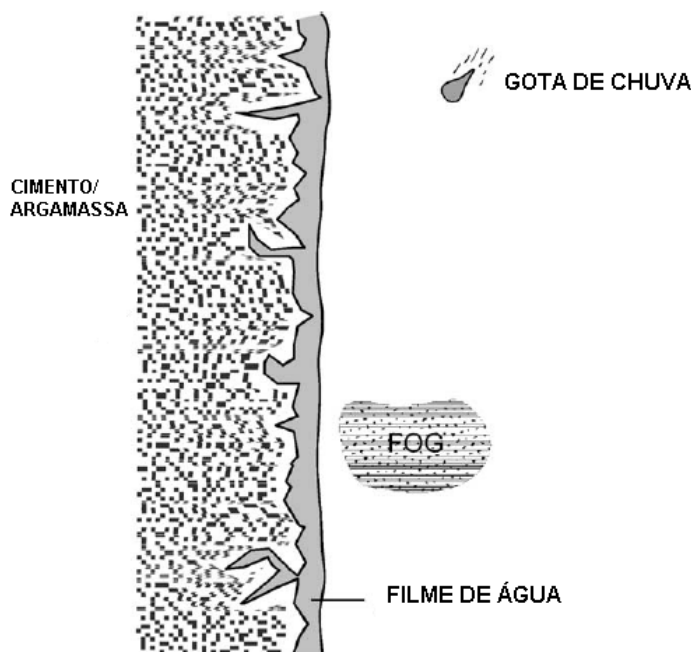


Figura 75. Esquema da formação do filme de água na superfície de cimento, argamassa ou concreto.

Fonte: adaptado de DOW e GLASSER (2003).

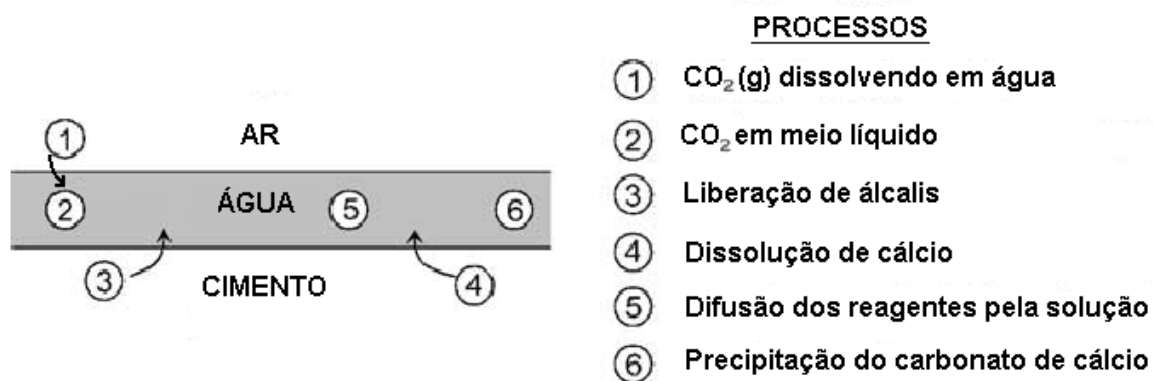


Figura 76. Esquema da formação da eflorescência.

Fonte: adaptado de DOW e GLASSER (2003).

5.4. PROCEDIMENTOS APLICADOS AOS MINI-PAINÉIS.

5.4.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA E GRAU DE COMPACTAÇÃO

As Tabelas 53 e 54 apresentam os valores médios da massa específica aparente seca dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis arenosos e argilosos, respectivamente. Cada mini-painel foi composto por quatro tijolos que foram identificados aleatoriamente pelas letras A, B, C e D.

Tabela 53. Valores médios da massa específica aparente seca dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis arenosos.*

Tratamentos	Massa específica aparente seca (g.cm ⁻³)											
	28 dias				56 dias				91 dias			
	Tijolos				Tijolos				Tijolos			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
T1	1,89	1,93	1,90	1,91	1,92	1,91	1,92	1,93	1,92	1,93	1,93	1,92
Desvio	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
CV (%)	1,00	1,15	0,49	0,47	0,32	0,58	0,82	0,67	0,93	0,62	0,64	0,38
T2	1,91	1,91	1,92	1,94	1,93	1,92	1,92	1,92	1,93	1,91	1,91	1,89
Desvio	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01
CV (%)	0,23	1,05	0,31	0,53	0,64	0,16	0,21	0,16	0,84	0,62	0,65	0,66
T3	1,94	1,94	1,91	1,92	1,93	1,93	1,92	1,92	1,93	1,93	1,92	1,93
Desvio	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
CV (%)	1,31	0,61	0,91	0,60	0,47	0,46	0,11	0,85	0,18	0,29	0,11	0,37
T4	1,91	1,92	1,90	1,88	1,89	1,90	1,89	1,90	1,90	1,89	1,89	1,90
Desvio	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CV (%)	0,35	0,17	0,84	0,65	0,19	0,18	0,41	0,37	0,33	0,42	0,41	0,46
T5	1,88	1,90	1,90	1,90	1,89	1,89	1,88	1,89	1,89	1,89	1,90	1,91
Desvio	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00
CV (%)	0,63	0,32	0,65	0,19	0,67	0,61	1,15	0,86	0,49	1,11	0,28	0,10
T6	1,89	1,88	1,87	1,87	1,89	1,88	1,88	1,86	1,88	1,85	1,87	1,88
Desvio	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,04	0,00	0,00
CV (%)	0,91	0,32	0,35	0,63	0,22	0,49	0,22	0,36	0,44	2,40	0,09	0,18
T7	1,85	1,88	1,88	1,89	1,89	1,88	1,89	1,88	1,90	1,87	1,89	1,89
Desvio	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
CV (%)	0,71	0,08	0,49	0,21	0,31	0,40	0,49	0,52	0,87	0,60	0,65	0,44
T8	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,88	1,88	1,87	1,89	1,88	1,88	1,88
Desvio	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
CV (%)	1,01	0,25	0,79	0,18	0,48	0,36	0,62	0,28	0,30	0,80	0,71	0,60
T9	1,88	1,88	1,86	1,87	1,87	1,87	1,87	1,86	1,86	1,85	1,87	1,87
Desvio	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00
CV (%)	0,19	0,58	0,54	0,41	0,52	0,21	0,11	0,66	0,52	1,42	0,14	0,21

*Média de três repetições.

Tabela 54. Valores médios da massa específica aparente seca dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis argilosos.*

Tratamentos	Massa específica aparente seca (g.cm ⁻³)											
	28 dias				56 dias				91 dias			
	Tijolos				Tijolos				Tijolos			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
T10	1,63	1,62	1,64	1,65	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,65	1,64
Desvio	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CV (%)	0,38	1,44	0,89	1,24	0,22	0,02	0,17	0,05	0,14	0,16	0,20	0,12
T11	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,66	1,65	1,64	1,65	1,65
Desvio	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
CV (%)	0,20	0,06	0,08	0,91	0,14	0,72	0,59	0,43	0,31	0,05	0,23	0,14
T12	1,68	1,67	1,67	1,68	1,67	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,67	1,68
Desvio	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
CV (%)	0,37	0,83	1,31	0,36	0,43	0,41	0,12	0,24	0,22	0,32	0,10	0,26
T13	1,64	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,66	1,66	1,66	1,65	1,66
Desvio	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
CV (%)	0,87	0,14	0,14	0,15	0,39	0,32	0,20	0,28	0,08	0,27	0,35	0,24
T14	1,68	1,68	1,68	1,67	1,67	1,67	1,67	1,68	1,68	1,67	1,67	1,68
Desvio	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
CV (%)	0,08	0,28	0,24	0,38	0,87	0,22	0,48	0,34	0,23	0,32	0,33	0,54
T15	1,58	1,59	1,58	1,57	1,58	1,59	1,59	1,58	1,59	1,59	1,59	1,59
Desvio	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
CV (%)	0,23	0,41	0,39	0,70	1,04	0,22	0,14	0,13	0,85	0,49	0,77	0,25
T16	1,57	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,57
Desvio	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
CV (%)	0,83	0,33	0,32	0,29	0,75	0,40	0,46	0,83	0,52	0,38	0,29	0,24
T17	1,57	1,58	1,58	1,58	1,58	1,56	1,58	1,59	1,58	1,58	1,58	1,59
Desvio	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
CV (%)	1,28	0,16	0,23	0,40	0,12	1,79	0,17	0,26	0,86	0,29	0,13	0,49
T18	1,55	1,56	1,55	1,57	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
Desvio	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
CV (%)	1,36	0,43	0,52	0,72	0,19	0,86	0,30	0,49	0,19	0,44	0,11	1,33

*Média de três repetições.

As **Tabelas 55 e 56** apresentam os valores médios do grau de compactação dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis arenosos e argilosos, respectivamente.

Tabela 55. Valores médios do grau de compactação dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis arenosos.*

Tratº	Grau de compactação (%)											
	28 dias				56 dias				91 dias			
	Tijolos				Tijolos				Tijolos			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
T1	95,27	98,88	96,58	97,30	97,78	97,59	97,88	98,28	97,74	98,28	98,34	97,98
Desvio	96,77	97,07	97,45	97,37	0,32	0,57	0,81	0,66	0,91	0,61	0,63	0,38
CV (%)	97,07	99,14	97,37	98,13	0,32	0,58	0,82	0,67	0,93	0,62	0,64	0,38
T2	97,17	97,19	97,67	98,31	98,21	97,70	97,29	97,61	97,76	97,19	96,77	96,11
Desvio	0,23	1,02	0,30	0,52	0,63	0,16	0,21	0,15	0,82	0,61	0,63	0,63
CV (%)	0,23	1,05	0,31	0,53	0,64	0,16	0,21	0,16	0,84	0,62	0,65	0,66
T3	98,23	98,33	97,08	97,40	98,07	97,74	97,70	97,29	97,74	97,77	97,40	97,92
Desvio	1,29	0,60	0,89	0,58	0,46	0,45	0,11	0,83	0,17	0,28	0,11	0,36
CV (%)	1,31	0,61	0,91	0,60	0,47	0,46	0,11	0,85	0,18	0,29	0,11	0,37
T4	96,94	97,46	96,33	95,64	95,92	96,23	96,12	96,41	96,34	95,78	95,79	96,31
Desvio	0,34	0,17	0,81	0,62	0,19	0,17	0,39	0,35	0,32	0,41	0,39	0,44
CV (%)	0,35	0,17	0,84	0,65	0,19	0,18	0,41	0,37	0,33	0,42	0,41	0,46
T5	95,60	96,26	96,33	96,30	96,04	95,74	95,44	95,78	95,93	96,11	96,48	96,77
Desvio	0,60	0,31	0,63	0,19	0,64	0,58	1,09	0,83	0,47	1,07	0,27	0,09
CV (%)	0,63	0,32	0,65	0,19	0,67	0,61	1,15	0,86	0,49	1,11	0,28	0,10
T6	98,72	98,62	98,02	97,83	98,74	98,53	98,36	97,55	98,41	96,89	98,08	98,40
Desvio	0,90	0,31	0,34	0,62	0,22	0,48	0,22	0,35	0,44	2,33	0,09	0,17
CV (%)	0,91	0,32	0,35	0,63	0,22	0,49	0,22	0,36	0,44	2,40	0,09	0,18
T7	101,12	102,96	102,48	103,08	103,31	102,67	103,25	102,86	103,74	102,39	103,54	103,01
Desvio	0,72	0,08	0,51	0,22	0,32	0,41	0,50	0,54	0,90	0,61	0,67	0,46
CV (%)	0,71	0,08	0,49	0,21	0,31	0,40	0,49	0,52	0,87	0,60	0,65	0,44
T8	99,19	99,14	98,96	98,83	98,85	98,64	98,37	97,93	98,82	98,27	98,22	98,44
Desvio	1,00	0,25	0,78	0,18	0,47	0,35	0,61	0,27	0,29	0,79	0,69	0,59
CV (%)	1,01	0,25	0,79	0,18	0,48	0,36	0,62	0,28	0,30	0,80	0,71	0,60
T9	102,61	102,75	101,85	102,30	102,08	102,23	102,43	101,77	101,61	101,09	101,92	102,06
Desvio	0,20	0,60	0,55	0,42	0,53	0,22	0,11	0,67	0,53	1,43	0,14	0,22
CV (%)	0,19	0,58	0,54	0,41	0,52	0,21	0,11	0,66	0,52	1,42	0,14	0,21

*Média de três repetições.

Tabela 56. Valores médios do grau de compactação dos tijolos destinados à confecção dos mini-painéis argilosos.*

Tratamentos	Grau de compactação (%)											
	28 dias				56 dias				91 dias			
	Tijolos				Tijolos				Tijolos			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
T1	102,15	101,09	102,37	103,43	102,76	102,63	102,48	102,62	102,36	102,30	102,91	102,47
Desvio	0,39	1,45	0,91	1,28	0,23	0,02	0,18	0,05	0,15	0,17	0,21	0,12
CV (%)	0,38	1,44	0,89	1,24	0,22	0,02	0,17	0,05	0,14	0,16	0,20	0,12
T2	101,97	101,82	101,90	101,84	101,84	101,71	101,67	102,19	101,99	101,54	101,74	101,86
Desvio	0,20	0,06	0,08	0,93	0,15	0,73	0,60	0,44	0,31	0,05	0,24	0,14
CV (%)	0,20	0,06	0,08	0,91	0,14	0,72	0,59	0,43	0,31	0,05	0,23	0,14
T3	104,26	103,95	103,61	104,38	103,89	104,20	104,25	104,26	104,36	104,18	103,77	104,49
Desvio	0,38	0,86	1,36	0,38	0,44	0,43	0,12	0,25	0,23	0,34	0,10	0,27
CV (%)	0,37	0,83	1,31	0,36	0,43	0,41	0,12	0,24	0,22	0,32	0,10	0,26
T4	101,39	101,84	101,80	102,14	102,04	101,97	101,99	102,16	102,33	102,22	102,00	102,23
Desvio	0,88	0,15	0,15	0,15	0,39	0,33	0,21	0,29	0,08	0,27	0,35	0,25
CV (%)	0,87	0,14	0,14	0,15	0,39	0,32	0,20	0,28	0,08	0,27	0,35	0,24
T5	104,32	104,22	104,13	103,97	103,71	103,93	103,97	104,11	104,20	104,00	103,85	104,49
Desvio	0,09	0,29	0,25	0,39	0,90	0,23	0,50	0,36	0,24	0,33	0,34	0,56
CV (%)	0,08	0,28	0,24	0,38	0,87	0,22	0,48	0,34	0,23	0,32	0,33	0,54
T6	100,75	101,16	100,91	99,83	100,36	101,09	101,42	100,74	101,34	101,26	101,29	100,96
Desvio	0,23	0,41	0,40	0,70	1,04	0,22	0,15	0,13	0,86	0,49	0,78	0,25
CV (%)	0,23	0,41	0,39	0,70	1,04	0,22	0,14	0,13	0,85	0,49	0,77	0,25
T7	101,27	100,74	100,67	100,89	100,57	100,76	100,72	100,68	100,74	100,82	100,85	101,00
Desvio	0,84	0,34	0,32	0,29	0,75	0,40	0,47	0,83	0,52	0,38	0,29	0,24
CV (%)	0,83	0,33	0,32	0,29	0,75	0,40	0,46	0,83	0,52	0,38	0,29	0,24
T8	100,07	100,70	100,78	100,64	100,70	99,54	100,43	101,01	100,84	100,91	100,42	101,08
Desvio	1,28	0,16	0,23	0,40	0,12	1,78	0,17	0,26	0,87	0,29	0,13	0,50
CV (%)	1,28	0,16	0,23	0,40	0,12	1,79	0,17	0,26	0,86	0,29	0,13	0,49
T9	99,80	100,69	100,30	101,18	100,86	100,88	100,63	100,75	100,96	100,88	100,51	100,88
Desvio	1,36	0,44	0,52	0,73	0,19	0,86	0,30	0,49	0,19	0,45	0,11	1,35
CV (%)	1,36	0,43	0,52	0,72	0,19	0,86	0,30	0,49	0,19	0,44	0,11	1,33

*Média de três repetições.

5.4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores médios de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis, obtidos a partir de 3 repetições, foram analisados estatisticamente e as respectivas análises de variância são apresentadas nas **Tabelas 57 e 58**.

As **Tabelas 59 e 60** apresentam os resultados da análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis, respectivamente.

Tabela 57. Análise de variância para a variável resposta resistência à compressão simples dos mini-painéis, em MPa.

Fontes de Variação	G. L.	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: solo	1	1,20	1,20	15,13*
B: adições químicas	8	120,88	15,10	190,03*
C: idade	2	33,30	16,65	209,38*
Interações				
AXB	8	49,04	6,13	77,10*
AXC	2	1,95	0,98	12,29*
BXC	16	26,20	1,64	20,59*
AXBXC	16	6,74	0,42	5,30*
Resíduo	108	8,59	0,08	
Total	161	247,26		

* F significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 58. Análise de variância para a variável resposta módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis, em MPa.

Fontes de Variação	G. L.	SQ	QM	F
Principais efeitos				
A: solo	1	$4,00.10^{-8}$	$4,00.10^{-8}$	616,29*
B: adições químicas	8	$4,00.10^{-8}$	$5,01.10^{-7}$	77,21*
C: idade	2	$2,12.10^{-7}$	$1,06.10^{-7}$	16,31*
Interações				
AXB	8	$2,53.10^{-8}$	$3,16.10^{-7}$	48,68*
AXC	2	$1,11.10^{-7}$	$5,53.10^{-6}$	8,52*
BXC	16	$2,56.10^{-7}$	$1,60.10^{-6}$	2,47*
AXBXC	16	$2,98.10^{-7}$	$1,86.10^{-6}$	2,87*
Resíduo	108	$7,01.10^{-7}$	649.173,0	
Total	161			

*Significativo a 5% de probabilidade.

A análise de variância realizada revelou que os fatores solo, adição química e idade de cura, bem como suas interações produziram efeitos estatisticamente significativos ($p < 0,05$) nos valores das variáveis resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico (Tabelas 57 e 58).

Tabela 59. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos mini-painéis, em MPa.

Fatores	Níveis	Observações*	Médias
Solo	Arenoso	81	2,26 a
	Argiloso	81	2,09 b
Adição química	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	3,71 a
	10% de cal + 4% de silicato de sódio	18	3,46 a
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	2,47 b
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	18	2,41 b
	10% de cimento	18	1,87 c
	Solo natural (sem adições)	18	1,64 cd
	10% de cal	18	1,52 d
	6% de cimento	18	1,48 d
	6% de cal	18	1,01 e
Idade	91 dias	54	2,61 a
	56 dias	54	2,36 b
	28 dias	54	1,55 c

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo, adição química e idade).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 60. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de solo, adição química e idade nos valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis, em MPa.

Fatores	Níveis	Observações*	Médias
Solo	Arenoso	81	5727,23 a
	Argiloso	81	2576,96 b
Adição química	10% de cal + 4% de silicato de sódio	18	7206,52 a
	10% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	6333,41 b
	6% de cimento + 4% de silicato de sódio	18	4535,72 c
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	18	4300,36 cd
	10% de cimento	18	3864,73 cd
	10% de cal	18	3482,59 de
	6% de cimento	18	2861,40 ef
	Solo natural (sem adições)	18	2426,54 f
	6% de cal	18	2357,59 f
Idade	91 dias	54	4530,11 a
	56 dias	54	4262,93 a
	28 dias	54	3663,24 b

* Número de observações correspondentes a três repetições para cada nível dentro de cada fator (solo, adição química e idade).

** Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em termos de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico, o solo arenoso foi estatisticamente superior ao solo argiloso (**Tabelas 59 e 60**). Tal como ocorreu com os corpos-de-prova cilíndricos e com os tijolos, a incorporação de silicato de sódio influenciou fortemente os resultados de resistência dos mini-painéis, principalmente quando este foi associado aos teores de 10% de cal e cimento. Como era esperado, os valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico aumentaram com a idade.

5.4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A **Tabela 61** apresenta os valores médios da resistência à compressão simples dos mini-painéis. As **Figuras 77 e 78** ilustram o desempenho dos mini-painéis submetidos ao ensaio de compressão simples, respectivamente para os solos arenoso e argiloso.

Tabela 61. Valores médios da resistência à compressão simples dos mini-painéis, em MPa.

Tratº	Resistência à compressão simples (MPa)						
	28 dias*			56 dias		91 dias	
T1	1,02 ± 0,11 (11,28)	ef A		0,58 ± 0,06 (10,41)	h B	1,03 ± 0,02 (1,92)	ij A
T2	0,67 ± 0,08 (11,94)	ef A		0,95 ± 0,13 (13,66)	h A	1,29 ± 0,06 (4,68)	hij A
T3	1,23 ± 0,01 (0,74)	de B		1,59 ± 0,06 (3,79)	g AB	1,90 ± 0,14 (7,51)	fgh A
T4	1,76 ± 0,20 (1,40)	cd C		2,93 ± 0,47 (15,87)	cd B	3,91 ± 0,26 (6,62)	c A
T5	2,54 ± 0,16 (6,28)	b C		5,45 ± 0,48 (8,79)	a B	6,06 ± 0,41 (6,79)	a A
T6	0,57 ± 0,01 (1,07)	f A		0,61 ± 0,06 (9,96)	h A	0,88 ± 0,01 (1,30)	j A
T7	1,04 ± 0,07 (6,46)	ef B		1,76 ± 0,11 (6,26)	g A	1,84 ± 0,15 (8,40)	fgh A
T8	1,23 ± 0,16 (2,87)	de C		3,23 ± 0,41 (12,56)	c B	4,45 ± 0,41 (9,12)	bc A
T9	3,58 ± 0,40 (1,09)	a B		4,33 ± 0,24 (5,57)	b A	4,74 ± 0,69 (14,49)	b A
T10	2,11 ± 0,00 (0,00)	bc B		2,50 ± 0,02 (0,91)	de AB	2,60 ± 0,13 (5,17)	de A
T11	2,01 ± 0,12 (6,01)	bc A		2,04 ± 0,11 (5,41)	efg A	1,67 ± 0,13 (7,59)	gh A
T12	2,14 ± 0,18 (8,38)	bc AB		2,42 ± 0,21 (8,82)	def A	1,96 ± 0,10 (5,34)	fg B
T13	1,38 ± 0,10 (7,14)	de C		2,00 ± 0,09 (4,54)	efg B	2,82 ± 0,33 (11,76)	de A
T14	1,58 ± 0,17 (10,83)	cde B		3,41 ± 0,22 (6,59)	c A	3,19 ± 0,22 (6,83)	d A
T15	0,97 ± 0,09 (8,90)	ef B		1,62 ± 0,12 (7,42)	g A	1,44 ± 0,13 (8,85)	ghij A
T16	1,02 ± 0,06 (5,59)	ef B		1,80 ± 0,09 (5,04)	fg A	1,65 ± 0,11 (6,93)	ghi A
T17	0,99 ± 0,07 (6,93)	ef B		2,21 ± 0,10 (4,72)	efg A	2,33 ± 0,21 (8,81)	ef A
T18	1,81 ± 0,08 (4,56)	cd B		2,97 ± 0,27 (8,93)	cd A	3,11 ± 0,11 (3,67)	d A

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).
- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Os valores de resistência à compressão simples dos mini-painéis aumentaram com o acréscimo do teor de aglomerante (**Tabela 61**). O maior valor médio de resistência foi de 6,06 MPa obtido para o solo arenoso com a adição de 10% de cimento associada a 4% de Na₂SiO₃, aos 91 dias de cura. Em geral, verificou-se um significativo ganho de resistência ao longo do tempo para todos os tratamentos.

Independentemente do tipo de solo, a incorporação do Na₂SiO₃ aos teores de 6% e 10% de cimento e cal promoveu ótimos ganhos de resistência à compressão simples se comparados aos valores de resistência dos tratamentos sem Na₂SiO₃.

Diferente do que ocorreu com os tijolos, a adição de 10% de cal associada ao Na₂SiO₃ promoveu ótimos resultados em termos de resistência à compressão simples dos mini-painéis.

Tal comportamento pode ser atribuído às condições não saturadas durante os ensaios, que de uma certa forma beneficiaram a estabilidade estrutural da mistura solo-cal. No ensaio de compressão simples dos mini-painéis não foi realizada a imersão em água por 4 horas como foi procedido para os tijolos.

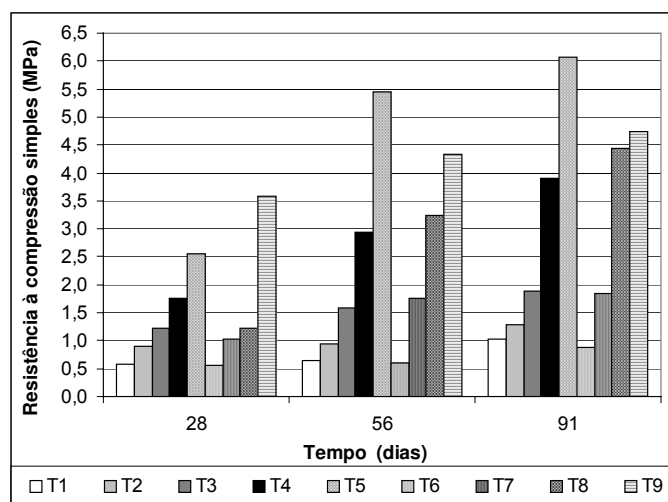


Figura 77. Resistência à compressão simples dos mini-painéis arenosos.

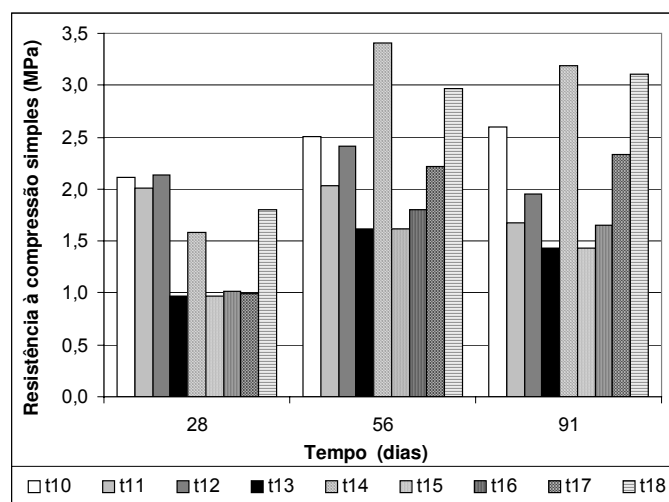


Figura 78. Resistência à compressão simples dos mini-painéis argilosos.

Os maiores incrementos de resistência foram obtidos pela incorporação de Na_2SiO_3 ao solo arenoso (**Tabela 62**). De acordo com FREIDIN e ERELL (1995), tal comportamento se deve pela maior presença das fases SiO_2 e Al_2O_3 no solo arenoso que se tornam ativas

quando são misturadas aos álcalis fortes, tais como NaOH, Na₂CO₃ e Na₂SiO₃. Assim, o cálcio livre, proveniente das reações de hidratação da cal e do cimento, reage com o Na₂SiO₃ adicionado ao solo dando origem aos silicatos e aluminatos de cálcio. Tais compostos, de ação cimentante e de comportamento pozolânico, são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica e melhor desempenho dos tijolos frente à ação da água.

Tabela 62. Ganhos de resistência proporcionados aos mini-painéis pela incorporação de silicato de sódio.

Solo	Teor de aglomerante		Ganho de resistência (%)		
			7 dias	28 dias	56 dias
Arenoso	Cimento	6%	162,69	208,42	203,10
		10%	106,00	246,77	218,95
	Cal	6%	115,79	429,51	405,68
		10%	244,23	146,02	157,61
Argiloso	Cimento	6%	-31,34	-1,96	68,86
		10%	-26,17	40,00	62,00
	Cal	6%	2,06	36,42	61,81
		10%	77,45	65,00	88,48

5.4.4. PROPRIEDADES ELÁSTICAS

A **Tabela 63** apresenta os valores de velocidade de propagação da onda ultra-sônica e massa específica aparente dos mini-painéis para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico. De acordo com a NBR 8802 (ABNT, 1984d), o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico leva em conta os valores da massa específica aparente (ρ , em kg.m⁻³) e velocidade de propagação da onda ultra-sônica (V , em m.s⁻¹). No caso do solo argiloso, os valores de ρ e V foram bem menores do que aqueles verificados para o solo arenoso. Dessa forma, os valores do módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis argilosos foram notadamente inferiores aos dos arenosos (**Tabela 64**).

Tabela 63. Valores médios da massa específica aparente e velocidade de propagação da onda ultra-sônica nos mini-painéis.

Tratº	Massa específica aparente (g.cm ⁻³)			Velocidade (m.s ⁻¹)		
	28 dias*	56 dias	91 dias	28 dias	56 dias	91 dias
T1	1870,62 ± 24,82 (1,33)	1866,86 ± 91,29 (4,89)	1777,88 ± 14,40 (0,81)	1185,20 ± 21,11 (1,78)	1164,92 ± 14,85 (1,27)	1235,83 ± 13,15 (1,06)
T2	1897,23 ± 8,54 (0,45)	1832,82 ± 5,49 (0,30)	1776,89 ± 27,29 (1,54)	1338,80 ± 0,00 (0,00)	1243,15 ± 6,66 (0,54)	1377,65 ± 39,67 (2,88)
T3	1898,41 ± 17,09 (0,00)	1857,45 ± 12,88 (0,69)	1815,48 ± 5,24 (0,29)	1485,17 ± 23,78 (1,60)	1620,38 ± 15,75 (0,97)	1715,44 ± 24,30 (1,42)
T4	1859,80 ± 17,78 (0,96)	1847,75 ± 4,04 (0,22)	1831,94 ± 19,75 (1,08)	1784,44 ± 43,32 (2,43)	1976,32 ± 53,04 (2,68)	1950,97 ± 12,77 (0,65)
T5	1887,37 ± 8,35 (0,44)	1869,01 ± 6,81 (0,36)	1866,75 ± 4,30 (0,23)	2120,78 ± 10,13 (0,48)	2307,14 ± 13,38 (0,58)	2357,17 ± 54,23 (2,30)
T6	1870,56 ± 0,00 (0,00)	1838,25 ± 8,57 (0,47)	1797,44 ± 8,77 (0,49)	977,87 ± 0,00 (0,00)	1290,52 ± 21,76 (1,69)	1270,00 ± 56,72 (4,47)
T7	1906,53 ± 11,86 (0,62)	1887,13 ± 8,23 (0,44)	1848,64 ± 10,32 (0,56)	1432,12 ± 15,10 (1,05)	1510,72 ± 15,17 (1,00)	1677,93 ± 20,76 (1,24)
T8	1877,47 ± 11,65 (0,62)	1877,55 ± 14,72 (0,78)	1869,42 ± 4,58 (0,25)	1333,91 ± 7,89 (0,59)	1984,43 ± 210,35 (10,60)	2215,81 ± 21,67 (0,89)
T9	1922,32 ± 9,48 (0,49)	1933,74 ± 14,30 (0,70)	1908,24 ± 4,36 (0,23)	2310,61 ± 19,10 (0,83)	2395,53 ± 32,26 (1,33)	2423,20 ± 36,13 (1,49)
T10	1855,40 ± 15,94 (0,86)	1829,46 ± 12,71 (0,69)	1769,07 ± 86,58 (4,89)	1060,92 ± 36,98 (3,49)	1118,32 ± 48,02 (4,29)	1140,67 ± 41,72 (3,66)
T11	1874,70 ± 12,74 (0,68)	1829,47 ± 8,63 (0,47)	1743,49 ± 10,16 (0,58)	1172,82 ± 53,88 (4,59)	1217,57 ± 16,49 (1,35)	1140,33 ± 3,07 (0,27)
T12	1852,97 ± 37,49 (2,02)	1862,54 ± 25,30 (1,36)	1766,55 ± 17,46 (0,99)	1229,82 ± 17,71 (1,44)	1260,85 ± 33,21 (2,63)	1298,95 ± 18,30 (1,41)
T13	1795,93 ± 28,72 (1,60)	1806,28 ± 9,76 (0,54)	1758,79 ± 13,55 (0,77)	929,80 ± 41,40 (4,45)	1081,79 ± 17,57 (1,62)	1395,67 ± 24,14 (1,73)
T14	1856,85 ± 11,94 (0,64)	1832,25 ± 17,91 (0,98)	1782,48 ± 9,20 (0,52)	1161,07 ± 46,35 (3,99)	1447,17 ± 21,27 (1,47)	1260,34 ± 55,93 (4,44)
T15	1808,01 ± 10,92 (0,60)	1777,22 ± 12,17 (0,68)	1712,76 ± 9,10 (0,53)	1145,45 ± 20,09 (1,75)	1102,05 ± 16,73 (1,52)	1041,28 ± 17,60 (1,69)
T16	1815,50 ± 28,89 (1,59)	1759,48 ± 7,53 (0,43)	1711,80 ± 24,55 (1,43)	1281,29 ± 29,97 (2,34)	1169,88 ± 35,95 (3,07)	1102,17 ± 26,17 (2,37)
T17	1798,71 ± 13,44 (0,75)	1792,63 ± 10,08 (0,56)	1772,62 ± 22,15 (1,25)	1044,71 ± 27,34 (2,62)	1040,81 ± 4,20 (0,40)	1032,44 ± 8,24 (0,80)
T18	1807,38 ± 0,47 (0,03)	1793,24 ± 7,17 (0,40)	1760,95 ± 41,70 (2,37)	1310,68 ± 66,95 (5,11)	1278,45 ± 5,37 (0,42)	1163,87 ± 92,06 (7,91)

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

Tabela 64. Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis.

Tratº	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)					
	28 dias*		56 dias		91 dias	
T1	2628,32 ± 93,13	(3,54) ghi A	2533,07 ± 102,03	(4,03) gh A	2715,42 ± 49,74	(1,83) efghi A
T2	3400,56 ± 12,49	(0,37) def A	2832,50 ± 24,15	(0,85) fgh A	3372,77 ± 152,72	(4,53) ef A
T3	4188,60 ± 142,48	(3,40) d B	4877,79 ± 113,82	(2,33) d A	5343,63 ± 153,64	(2,88) d A
T4	5923,29 ± 243,13	(4,10) c B	7222,80 ± 398,85	(5,47) c A	6972,92 ± 92,98	(1,33) c A
T5	8488,82 ± 60,69	(0,71) b B	9949,22 ± 143,99	(1,45) b A	10377,45 ± 478,23	(4,61) a A
T6	1788,67 ± 0,00	(0,00) ij B	3062,66 ± 112,03	(3,66) fg A	2905,33 ± 268,68	(9,25) efgh A
T7	3910,62 ± 82,77	(2,12) de B	4307,07 ± 71,43	(1,66) de B	5205,00 ± 105,28	(2,02) d A
T8	3340,90 ± 54,94	(1,64) def C	7485,28 ± 1665,79	(22,25) c B	9179,06 ± 161,63	(1,76) b A
T9	10264,40 ± 205,08	(2,00) a B	11100,46 ± 359,08	(3,23) a A	11207,94 ± 351,16	(3,13) a A
T10	2091,33 ± 152,16	(7,28) ghij A	2291,84 ± 189,57	(8,27) gh A	2299,25 ± 104,15	(4,53) ghi A
T11	2582,90 ± 221,44	(8,57) fghi A	2712,57 ± 71,84	(2,65) gh A	2267,13 ± 9,72	(0,43) ghi A
T12	2835,73 ± 72,85	(2,57) fgh A	2961,80 ± 134,63	(4,55) fgh A	2980,84 ± 71,06	(2,38) efg A
T13	1554,21 ± 123,23	(7,93) j B	2114,71 ± 77,63	(3,67) gh B	3426,39 ± 103,25	(3,01) e A
T14	2508,15 ± 215,05	(8,57) fghij B	3838,79 ± 137,43	(3,58) ef A	2838,02 ± 263,07	(9,27) efghi B
T15	2372,70 ± 76,81	(3,24) fghij A	2158,78 ± 60,53	(2,80) gh A	1857,38 ± 55,65	(3,00) i A
T16	2981,20 ± 123,56	(4,14) efgh A	2410,45 ± 150,43	(6,24) gh AB	2081,19 ± 113,65	(5,46) ghi B
T17	1964,97 ± 111,08	(5,65) hij A	1942,05 ± 24,60	(1,27) h A	1889,93 ± 49,69	(2,63) hi A
T18	3112,96 ± 311,62	(10,01) fg A	2931,01 ± 28,24	(0,96) fgh AB	2393,46 ± 337,40	(14,10) fghi B

*Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

- Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico tenderam a aumentar com o período de cura. Assim como foi verificado para a resistência à compressão simples, os maiores valores do módulo de elasticidade dinâmico foram obtidos para os teores de 10% de cimento e cal associados ao Na₂SiO₃ (misturas T5 e T9) (**Tabela 64**). Aos 91 dias, as misturas T5 e T9 forneceram, respectivamente, valores de 10.377,45 MPa e 11.207,94 MPa, para o módulo de elasticidade dinâmico.

As **Figuras 79 e 80** mostram o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis em função do período de cura, respectivamente para os solos arenoso e argiloso.

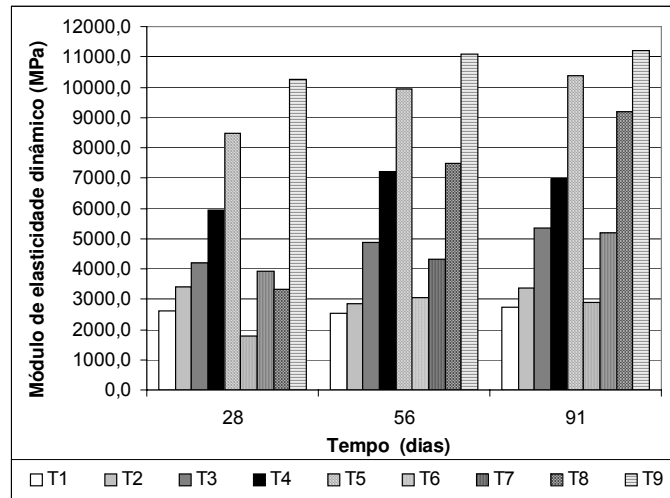


Figura 79. Módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis arenosos.

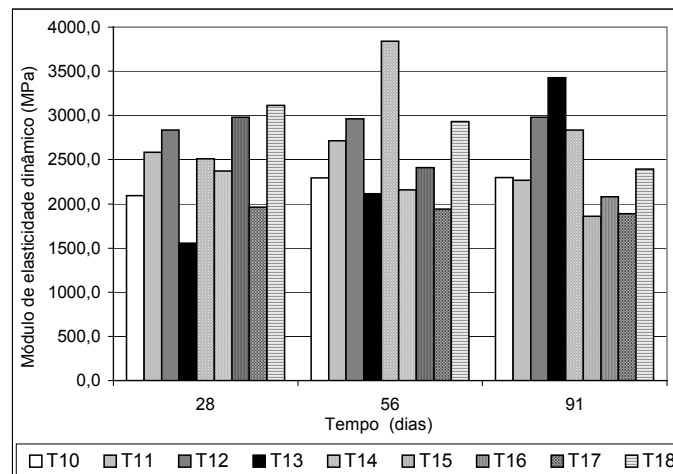


Figura 80. Módulo de elasticidade dinâmico dos mini-painéis argilosos.

5.4.5. ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Com a finalidade de se trabalhar com uma argamassa de consistência normal, foi usada uma relação água/aglomerante de 0,82. À medida que se executava o carregamento durante os ensaios de compressão simples dos mini-painéis, as primeiras fissuras se originavam na argamassa de assentamento e tendiam a se propagar horizontalmente ao longo dessa região e só depois ocorria a fissuração vertical (**Figura 81**). Tal comportamento

evidenciou a boa capacidade das argamassas plásticas em absorver as deformações, conforme demonstraram NASCIMENTO e HELENE (1993). As **Tabelas 65 e 66** apresentam os resultados dos ensaios de caracterização e de consistência normal da argamassa de assentamento dos mini-painéis, respectivamente.



Figura 81. Exemplo de fissuras verticais e horizontais nos mini-painéis após a ruptura.

Tabela 65. Resultados dos ensaios de caracterização da argamassa de assentamento dos mini-painéis.

Idade (dias)	Resistência à compressão simples (MPa)	Massa específica aparente (kg.m^{-3})	Velocidade da onda ultra-sônica (m.s^{-1})	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)
14	$2,39 \pm 0,13$ (5,63)*	$1929,38 \pm 79,59$ (4,13)	$2076,55 \pm 29,82$ (1,44)	$8313,81 \pm 105,93$ (1,27)
42	$4,86 \pm 0,24$ (4,96)	$1724,52 \pm 22,11$ (1,28)	$2330,93 \pm 64,23$ (2,76)	$9375,78 \pm 510,75$ (5,45)
77	$6,64 \pm 0,33$ (4,93)	$1789,46 \pm 72,57$ (4,06)	$2434,38 \pm 56,51$ (2,32)	$10619,86 \pm 762,76$ (7,18)

*Valores médios $\pm$ desvio padrão (coeficiente de variação)

Tabela 66. Resultado do ensaio de consistência normal da argamassa de assentamento dos mini-painéis*.

Traço da argamassa	Relação água/aglomerante	Medida do corpo-de-prova cone de tronco (mm)
1:1:5	0,82	160

*Média de 3 (três) repetições.

5.5. ANÁLISES DE MICRO-CARACTERIZAÇÃO

As **Figuras 82 e 83** apresentam, respectivamente, os difratogramas de raios-X para as misturas T3 (solo arenoso + 10% de cimento) e T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio).

A escala horizontal do difratograma (ângulo de difração) fornece informações a respeito do arranjo cristalino e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio difratado.

De um modo geral, os dois difratogramas se assemelham, apresentando picos de refração característicos para a fração C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) e aluminatos de cálcio hidratados, produtos característicos da hidratação do cimento Portland.

Todavia, nota-se uma ligeira diferença entre os difratogramas no que se refere à intensidade e quantidade dos picos de refração. Na **Figura 83** percebe-se uma maior quantidade e intensidade dos picos de silicatos de cálcio hidratados proporcionada pela incorporação do silicato de sódio.

As **Figuras 84 e 85** apresentam as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, respectivamente para as misturas T3 (solo arenoso + 10% de cimento) e T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio).

Percebe-se pelas imagens o efeito do silicato de sódio no que diz respeito ao aspecto geral da estrutura cristalina das amostras analisadas. Como já relatado, os silicatos de cálcio hidratados são agentes cimentantes e melhoram a estabilidade do solo preenchendo seus vazios e expulsando, conseqüentemente, a água do solo. Assim, na **Figura 85** nota-se uma menor quantidade de espaços vazios e concavidades evidenciando uma maior formação de silicatos de cálcio hidratados, resultando, portanto, em uma estrutura cristalina de melhor qualidade.

Os principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) foram o Al, Si, Ca e Fe para ambas as misturas.

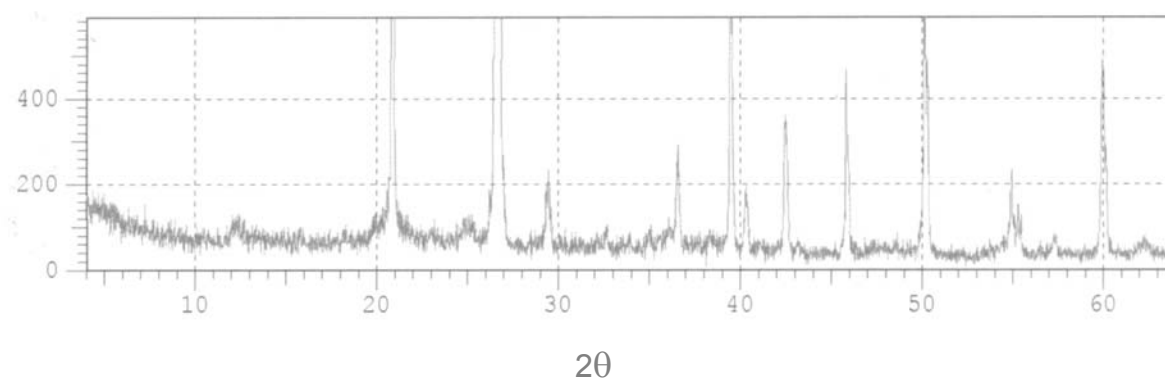


Figura 82. Difratoograma de raios-X da mistura T3 (solo arenoso + 10% de cimento).

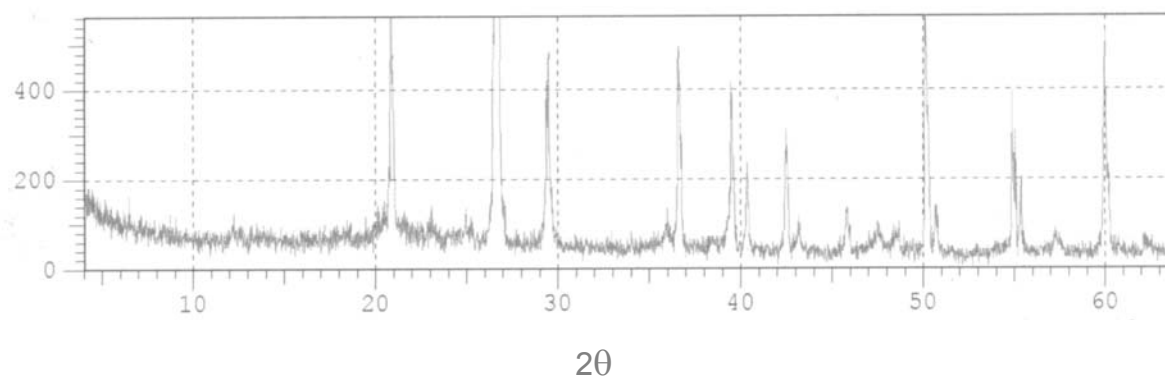


Figura 83. Difratoograma de raios-X da mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio).

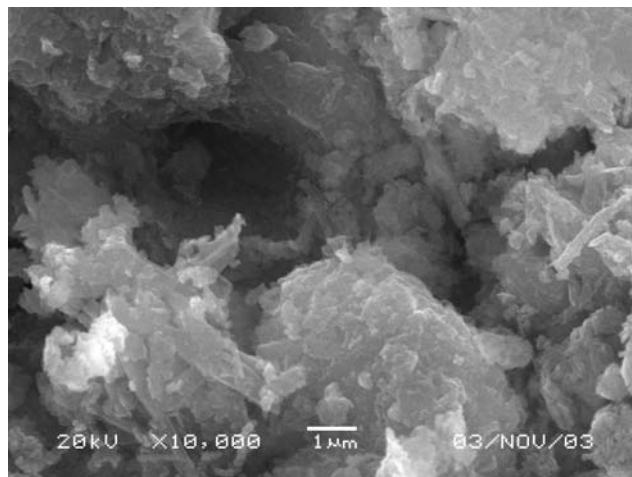


Figura 84. Imagem por microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 10.000 vezes para a mistura sem silicato de sódio (T3).

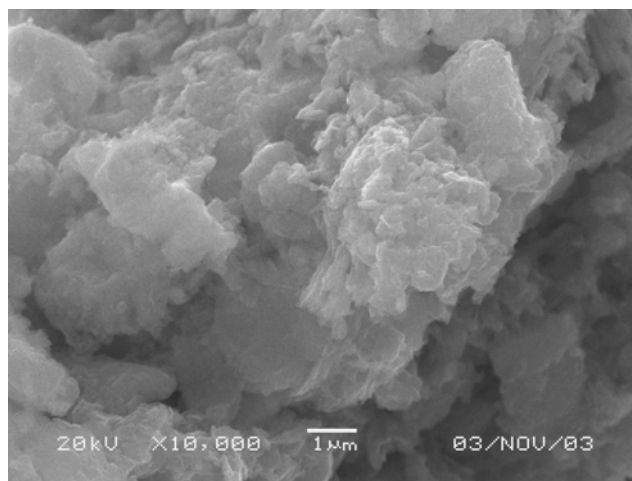


Figura 85. Imagem por microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 10.000 vezes para a mistura tratada com silicato de sódio (T5).

5.6. ENSAIOS TERMOFÍSICOS.

As **Tabelas 67 e 68** apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaio de condutibilidade térmica e calor específico aplicados aos corpos-de-prova confeccionados para tal fim.

A **Tabela 69** apresenta os valores das principais propriedades termofísicas calculadas a partir das **Equações 18, 24 e 26**.

Tabela 67. Resumo dos resultados do ensaio de condutibilidade térmica.

Massa* (kg)	ρ^{**} (kg.m ⁻³)	Temperaturas (°C)			Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
		Placa quente	Placa fria	Média	
4,34	1868,00	35,00	16,10	25,50	0,49

*Dimensões das placas: 30,5 cm x 30,5 cm de largura e comprimento e 2,5 cm de espessura.

** Massa específica aparente seca.

Tabela 68. Resumo dos resultados do ensaio de calor específico.

Corpos-de-prova cilíndricos	Temperatura média dos corpos-de-prova (°C)	Calor específico [(kJ/kg.K)]
1	61,20	0,80
2	61,00	0,77
3	61,20	0,69
Média	61,13 ± 0,12 (0,19)*	0,75 ± 0,06 (7,55)*

*Média ± desvio padrão (coeficiente de variação).

Tabela 69. Principais propriedades termofísicas do tijolo.*

Resistência térmica [(m.K)/W]	Capacidade térmica (kJ/m ² .K)	Atraso térmico (h)
0,22	154,11	4,3

*Considerando tijolo com 11 cm de largura e massa específica aparente seca de 1868 kg/m³.

A **Tabela 70** apresenta as propriedades termofísicas de uma parede de tijolos obtidos a partir da mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio). A sequência de cálculo para a determinação dessas propriedades é mostrada no **Anexo 1**.

Tabela 70. Principais propriedades termofísicas da parede.*

Resistência térmica total [(m ² .K)/W]	Capacidade térmica [kJ/(m ² .K)]	Transmitância térmica [W/(m ² .K)]	Atraso térmico (h)	Fator de calor solar (%)
0,3612	162,21	2,77	4,00	7,20%

*Parede assentada em meio-tijolo (dimensões do tijolo: 23 x 11 x 5 cm⁻³). Ver **Figura 86 (Anexo 1)**.

O Projeto de Norma 02:135.07-002 (ABNT, 2003b) relaciona os valores de 0,70 a 1,05 W/(m.K) para a condutibilidade térmica e 0,92 kJ/(kg.K) para o calor específico de tijolos e telhas cerâmicas com massa específica aparente variando de 1000 kg.m⁻³ a 2000 kg.m⁻³ (**Tabela 14**). Comparando o valor da condutibilidade térmica obtido durante o ensaio (**Tabelas 67**) com o valor relacionado na **Tabela 14** para materiais cerâmicos, verifica-se que essa propriedade térmica da mistura solo-aditivo estudada favorece a um bom desempenho com vistas ao conforto térmico. Vale ressaltar que o valor de condutibilidade térmica obtido foi de aproximadamente a metade do valor médio relacionado na **Tabela 14** para tijolos e cerâmicas. Por outro lado, diferentemente do que ocorreu para a condutibilidade térmica, o valor do calor específico obtido durante o ensaio (**Tabela 68**) comparado ao valor relacionado na **Tabela 14**, não favorece a um bom desempenho térmico. Nesse caso, o material necessitaria de uma menor quantidade de calor para elevar sua temperatura. Esse comportamento é devido, principalmente pela maior presença da fase vítrea em consequência da adição do silicato de sódio.

No caso de tijolos de terra crua tratada com aditivos químicos (cal e cimento) com características de solo similares às estudadas neste trabalho, ADAM e JONES (1995) encontraram valores de condutibilidade térmica entre 0,26 W/(m.K) e 0,41 W/(m.K) com uma massa específica aparente seca de 1540 kg.m⁻³ a 1860 kg.m⁻³, para tijolos estabilizados com cal. Para tijolos estabilizados com cimento, os valores de condutibilidade térmica ficaram

entre 0,41 W/(m.K) e 0,55 W/(m.K), com uma massa específica aparente seca de 1820 kg.m⁻³ a 1920 kg.m⁻³. Com o teor de 5% de cimento, foram obtidos valores médios de 0,55 W/(m.K) e 0,83 kJ/(kg.K), respectivamente para a condutibilidade térmica e calor específico para tijolos com massa específica aparente de 1920 kg.m⁻³.

Pelo fato dos ensaios termofísicos terem sido realizados somente para a mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio), não foi possível avaliar o efeito das diferentes misturas nos valores da condutibilidade térmica. Todavia, sabe-se que a condutibilidade térmica guarda uma estreita relação com a massa específica aparente seca do material. Dessa forma, devido sua menor massa específica aparente em comparação com os tijolos estabilizados com cimento, seria razoável afirmar que os tijolos estabilizados com cal alcançariam valores de condutibilidade térmica menores do que os alcançados pela mistura T5 (**Tabela 69**) dentro do mesmo tipo de solo e teor de aditivo químico.

Para o caso de paredes de tijolos maciços aparentes similares aos tijolos estudados nesse trabalho, o Projeto de Norma 02:135.07-003 (ABNT, 2003c) relaciona os valores de 3,70 W/(m².K), 149 kJ/(m².K) e 2,4 horas, respectivamente para a transmitância, capacidade térmica e atraso térmico (**Tabela 15**).

Da mesma forma, comparando os valores de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico calculados para a parede (**Tabela 70**) com os valores relacionados na **Tabela 15** para tijolos maciços aparentes, verifica-se que as propriedades térmicas da mistura solo-aditivo estudada favorecem um bom desempenho térmico de paredes com este tipo de material.

Considerando que paredes construídas com tijolos prensados de terra crua tratadas com aditivos químicos caracterizam-se como vedações externas leves, os valores da transmitância e atraso térmico calculados (**Tabela 70**) estão em conformidade com os limites admissíveis recomendados pelo Projeto de Norma 02:135.07-003 (ABNT, 2003c) para paredes externas (**Tabela 17**).

6. CONCLUSÕES

De acordo com as condições em que a pesquisa foi conduzida, e após análise e discussão dos dados experimentais obtidos, os resultados permitiram concluir que:

6.1. Corpos-de-prova cilíndricos de solo-aditivo

- a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-aditivo aumentou com o acréscimo do teor de aglomerante e idade de cura, alcançando um valor médio máximo de 5,74 MPa, aos 56 dias, para a mistura T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio);
- a mistura T5 também conferiu a menor capacidade de absorção de água (praticamente nula) e o maior valor do módulo de elasticidade dinâmico (20.312,51 MPa, aos 56 dias).

6.2. Tijolos de solo-aditivo

- somente a mistura T5 atendeu às especificações da NBR 08492 em termos de resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água;
- todos os tratamentos aplicados aos tijolos arenosos atenderam às especificações da NBR 08492 em termos de capacidade de absorção de água;
- para o solo argiloso, somente a mistura T14 (solo argiloso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio) atendeu às especificações da NBR 08492 no que refere à capacidade de absorção de água.

6.3. Mini-painéis de solo-aditivo

- a resistência à compressão simples dos mini-painéis de solo-aditivo aumentou com o acréscimo do teor de aglomerante e idade de cura, alcançando um valor médio máximo de 6,79 MPa, aos 91 dias, para a mistura T5;
- os valores médios máximos para o módulo de elasticidade dinâmico foram de 10.377,45 MPa e 11.207,94 MPa obtidos aos 91 dias para as misturas T5 e T9 (solo arenoso + 10% de cal + 4% de silicato de sódio), respectivamente;

- a argamassa plástica usada no assentamento dos tijolos se mostrou capaz de absorver as deformações impostas durante os ensaios de compressão simples.

6.4. Ensaios não-destrutivos

- com exceção dos teores de 6% de cal, ocorreram boas correlações entre a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico e a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos, para todos os teores de aglomerantes estudados, para ambos os solos, demonstrando haver uma forte dependência entre essas duas variáveis;
- a combinação de ensaios destrutivos e não-destrutivos mostrou que os tijolos arenosos foram, no geral, menos anisotrópicos que os argilosos, efeito devido principalmente a maior porosidade dos tijolos argilosos;
- todavia, a baixa anisotropia dos tijolos arenosos não confirmou sua melhor qualidade técnica, visto que seus valores de resistência mecânica foram relativamente baixos.

6.5. Propriedades termofísicas

- os valores de condutibilidade térmica (0,49 W/m.K) e calor específico (0,75 kJ/kg.K) obtidos pela mistura T5 foram menores do que os relacionados pelas normas para materiais cerâmicos;
- os valores da transmitância térmica (2,77 W/m².K) e atraso térmico (4 horas) calculados para a simulação da parede se situaram dentro dos limites recomendados pelas normas para paredes externas.

6.6. Micro-caracterização

- as análises de micro-caracterização permitiram evidenciar diferenças significativas entre as misturas T3 (solo arenoso + 10% de cimento) e T5 (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio) relativas ao efeito da incorporação do silicato de sódio sobre as características físico-mecânicas relacionadas à resistência e durabilidade dos tijolos prensados;

6.7. Conclusões gerais

- de uma forma geral, o solo arenoso foi superior ao argiloso em termos de desempenho mecânico, avaliado pela resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água;
- a incorporação de silicato de sódio afetou fortemente o comportamento mecânico de ambos os solos, promovendo ganhos consideráveis em sua resistência à compressão simples e melhorando o comportamento frente à ação da água;
- as propriedades termofísicas, obtidas para os tijolos confeccionados a partir da mistura de melhor desempenho mecânico (solo arenoso + 10% de cimento + 4% de silicato de sódio), apontam para um melhor desempenho térmico desse material se comparado ao dos tijolos maciços cerâmicos sob as mesmas condições de uso;
- os solos com características semelhantes àsquelas do arenoso estudado, tratado com cimento ou cal associados ou não ao silicato de sódio, mostram-se promissores no atendimento às demandas por tecnologias apropriadas com vistas à racionalização e otimização do uso da terra como material de construção, à redução de custos e ao uso de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIKO, A.K. - Solo-Cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas. IPT/Ded, *Tecnologia de Edificações*, 13:61-64, 1984.

ADAM, E.A.; JONES, P.J. Thermophysical properties of stabilized soil building blocks. *Building and Environment*. v. 30, n. 2, p. 245-253, 1995.

AFLITOS, A. O.; FERREIRA, H. C. Estabilização química de um solo laterítico com cal + traços de NaOH. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia de Fundações*, 8. Porto Alegre, RS, 1986. ABMS. *Anais*, vol. 2, p. 9-21.

ALCÂNTARA, M.A.M.; LIMA, D.C.; BUENO, B.S. e COSTA, L.M. Estabilização química dos solos em estradas agrícolas. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, XXIV, Viçosa, MG, 1995. CD ROM (Artigo 95-2-158). 9 p.

ALMEIDA, D.F. Patologia, terapia e profilaxia nas edificações de concreto. Parte 4 – Ensaio de caracterização. In: *Qualidade na Construção*. nº 17, ano II, p. 39-43, 1999.

ALVARENGA, M.A.A. A arquitetura de terra como instrumento de desenvolvimento social. In: *Workshop Arquitetura de Terra*, São Paulo, SP, 1995. *Anais*, p. 107-113.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIAL. *ASTM C-351-92b. Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation*. 1999.

_____. *ASTM C-597-02. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. 1983.

_____. *ASTM C-1388. Standard Test Method for Compressive Strength of Laboratory Constructed Masonry Prisms*. 1997.

AMORIM, L. A; NEVES, G. A; FERREIRA, H. C. Estabilização de solos vermelhos tropicais com cales pozolânicas. *In: Reunião Anual de Pavimentação*, 30. Salvador-BA, 1996. ABPv. *Anais*, vol. 1, p. 301-327.

ARMAN, A.; SAIFAN, F. The effect of delayed compactation on stabilized soil-cement. *Nat. Res. Council-Highway Res. Board. Res. Rec.* 198: 30-38. 1967.

ASSIS, J.B.S. Bloco intertravado de solo-cimento “Tijolito”. *In: Workshop Arquitetura de Terra*, São Paulo, SP, 1995. *Anais*, p. 149-162.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Curso de Solo-Cimento: Normas de dosagem e métodos de ensaios. Anexo 3.1. Dosagem das misturas de solo-cimento*. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1972. 44 p.

_____. *Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais*. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, Boletim Técnico 111, 1985. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 06459*. Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984b. 6p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 07175*. Solo: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 1992. 3p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 07180*. Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c. 3p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 07181*. Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a. 13p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 07182*. Solo: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 07215*. Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão Simples, 1991. 7p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 07251*. Agregado em Estado Solto. Determinação da Massa Específica Unitária. Rio de Janeiro, 1982. 3p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 08491*. Tijolo Maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1992a. 8p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 08492*. Tijolo Maciço de solo-cimento. Determinação da Resistência à Compressão e Absorção de Água. Rio de Janeiro, 1992c. 8p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 08802*. Concreto endurecido. Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1984d. 8p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 10832*. Fabricação de Tijolo Maciço de Solo-Cimento com a Utilização de Prensa Manual. Rio de Janeiro, 1992b. 8p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 11578*. Cimento Portland CII-E-32. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 12024*. Solo-Cimento. Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990a. 8p.

_____. Rio de Janeiro. *NBR 12025*. Solo-cimento. Ensaio de Compressão Simples de Corpos-de-Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990. 8p.

_____. *Projeto de Norma 02:135.07-001*. Desempenho térmico de edificações. Parte I: Definições, símbolos e unidades, janeiro de 2003, 10p.
<<http://www.labeee.ufsc.br/conforto/index.html>> 10/08/2003.

_____. *Projeto de Norma 02:135.07-002*. Desempenho térmico de edificações. Parte II: Métodos de cálculo da transmitância, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, janeiro de 2003. 27p. <<http://www.labeee.ufsc.br/conforto/index.html>> 10/08/2003.

_____. *Projeto de Norma 02:135.07-003*. Desempenho térmico de edificações. Parte III: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 28p, janeiro de 2003 <<http://www.labeee.ufsc.br/conforto/index.html>> 10/08/2003.

_____. *Projeto de Norma 02:135.07-004*. Desempenho térmico de edificações. Parte IV: Medição da resistência térmica e da condutibilidade térmica pelo princípio da placa quente protegida. 12p, janeiro de 2003 <<http://www.labeee.ufsc.br/conforto/index.html>> 10/08/2003.

BARBOSA, N.P.; MATTONE, R. Estudos sobre tijolos de terra crua desenvolvidos na Universidade Federal da Paraíba e no Politécnico de Torino. *In: Congresso de Engenharia Civil*, II. Juiz de Fora, MG, 1996. *Anais*, vol 1, p. 21-30.

BERALDO, A.L. Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variation dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité. *PhD These*, Université de Nancy I, Nancy, 230p, 1994.

BRADY, N.C. *Natureza e propriedade dos solos*. Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo Filho. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BUCUR, V. *Acoustics of Wood*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Inc., 1995 apud PUCCINI, C.T. Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som. *Tese de Doutorado*, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 158p., 2002.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. *Mecânica dos Solos – volume I*. São Carlos, SP. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1999, 131p.

BUYLE-BODIN, F.; CARBILLAC, R.; DUVAL, R. e LUHOWIAK, W. Stabilisation d'un torchis par liant hydraulique. In: Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials (RILEM *Proceedings of the Second International Symposium* - Salvador, BA, Brazil, September 1990). SOBRAL, H.S. (ed.). London, Chapman and Hall, 1990. p. 182-192.

CAMPICAL Tijolo de solo-cal. In: *Cal virgem Procampo*. Campinas, SP, novembro de 1994. p. 10.

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 & Concrete Research*, 29: 1749-1752. 1999.

CHADDA, L.R. The phenomenon of aggregation in the stabilization of soils with cement. India, Central Road Res. Inst. New Delhi. *Indian Concrete Journal* 44(5): 210-212. 1970.

CHIES, F.; MALLMANN, J.E.C. E ZWONOK, O. Características dos tijolos cinza/cal. In: *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 93*. EPUSP, ENTAC, São Paulo, SP, 1993. *Anais*, vol. 1, p. 161-170.

CINCOTTO, M. A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. São Paulo, *A Construção*. nº 1855, p. 27-30. 1983 (IPT Encarte TE nº 9).

CORRÊA, F. C.; FELEX, J. B. Solo-cal e CBR. In: *Reunião Anual de Pavimentação*, 21. Belém, PA, 1990. ABPV. *Anais*, v. 1, p. 118 - 129.

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; CAZALLA O.; NECHAR, M.; ROMERO, R.; BAGUR, M.R. Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality. *Ceramics International*, 27: 401-406. 2001.

DA FONSECA, M.G. Tijolos de cinzas. Cinza de carvão mineral e cinza de casca de arroz. Alternativas tecnológicas na fabricação de novos elementos construtivos para alvenarias. In: *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 93*. EPUSP/ANTAC, São Paulo, SP, 1993. *Anais*, vol. 1, p. 153-160.

DOW, C.; GLASSER, F.P. Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials. *Cement and Concrete Research*, v.33, p.147-147, 2002.

FANG, H.S. *Foundation Engineering Handbook*. 2ª ed. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991. 923 p.

FELT, E.J. *Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures*. Portland Cement Association B., Res. Develop. Lab. D5, 1955. 24 p.

FIORAVANTI, C. Uma casa de terra. *Globo Ciência*, p. 36-38, dezembro de 1984.

FRANCO, L.S. *Desempenho da alvenaria à compressão*. São Paulo: USP/POLITÉCNICA, 1988. 14p. BT-20/88.

FREIDIN, K.; ERELL, E. Bricks made of coal fly-ash and slag, cured in open air. *Cement & Concrete Composites*, 17: 289-300. 1995.

FREIRE, W.J. *Aditivos químicos e seus efeitos sobre a estabilidade de taludes e qualidade do material formado. Tese de Livre-Docência*. Faculdade de Ciências Agrônômica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 1981. 113 p.

_____. Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1976. 142 p.

FREIRE, W.J. e CORTEZ, L.A.B. *Vinhaça de cana-de-açúcar*. Guaíba: Ed. Livraria Agropecuária, 2000. 203p.

FREITAS, E.D.G.A. Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção civil. *Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 120 p. 1996.

GEYER, R.T.; MASUERO, A.B.; VILELA, A.C.F. e DAL MOLIN, D.C.C. Aproveitamento de escórias siderúrgicas na construção civil. *In: Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, XXVII, Tucumán, Argentina, 1995. *Anais*, p. 423-434.

GUIMARÃES, J.E.P. *Estabilização de solos com cal: princípios básicos*. Publicação da Associação Brasileira dos Produtores de Cal, São Paulo, 1992. 23 p.

GUIMARÃES, J.E.P. Tijolos solo-cal. *In: Reunião Aberta da Indústria da Cal*, V, São Paulo, 1985. *Anais*, p. 121-130.

_____. Solo-cal. *Revista de Tecnologia da Construção*, 3 (18). Ficha Técnica 18, 1995.

GUTIERREZ, N.H.M., KRÜGER, C.A.; NÓBREGA, M.T. Efeitos da adição de cal e cimento nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso laterítico. *In: Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica*, 11. Brasília, DF, 1998, ABMS. *Anais*, vol. 2.

HAMASSAKI, L.T. *Aspectos da aplicabilidade do ensaio do ultra-som em concreto*. Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil – Escola Politécnica da USP, São Paulo, n. 17, 1987. 17p.

HANDY, R.L. Cementation of soil, minerals with Portland cement or alkalies. *Highway Res. Board Bul.* 198: 55-64. 1958.

HANDY, R.L.; JORDAN, J.L.; MANFRE, L.E. e DAVIDSON, D.T. Chemical treatments for surface hardening of soil-cement and soil-lime-fly ash. *Highway Res. Board Bul.*, 241: 49-66. 1959.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. *Earth Construction: A compressive Guide*. London: Intermediate Technology Publications, 1994.

ILO. *Small-scale Brickmaking*. Genebra, Suíça, International Labour Office. Technology Series, Technical Memorandum n° 6, 1990. 210 p.

JAMISON, V.C. The effect of some soil conditioners on friability and compactibility of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 18: 391-394. 1954.

JONES, R. *Les essais non destructifs du béton*. Editions Eyrolles, 1967. 165p.

KANIRAJ, S.R., HAVANAGI, V.G. Compressive strength of cement stabilized fly-ash-soil mixtures. *Cement and Concrete Research*. v. 29, p. 673-677, 1999.

KUBAYASHI, K.; UNO, Y. Influence of alkali on carbonation of concrete. Part I, preliminary tests with mortar specimens. *Cement and Concrete Research*, vol. 19, p.821-826, 1989.

KUBAYASHI, K.; UNO, Y. Influence of alkali on carbonation of concrete. Part II. Influence of alkali in cement on the rate of carbonation of concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 20, p.619-622, 1990.

LAMBERTS, R.; GHISI, E; PAPST, A.L. *Desempenho térmico de edificações* <<http://www.labee.ufsc.br/publicacoes/publicacoes.html>>, 22/09/2003.

LAVINSKY, E.C.A.; SERÔDIO, R.S.; FERREIRA FILHO, E.M.; CUNHA, J. Fabrico manual de adobes no sul da Bahia. 1. Definição Técnica, forma e solo. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, XX, Londrina, PR, julho de 1991. *Anais*, vol. 1, p. 165-179.

LIMA, I.T. Efeitos da aplicação de vinhaça sobre a microflora do solo. *Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro*, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 100 p. 1981.

LINDLEY, J.A.; WHITAKER, J.H. *Agricultural Buildings and Structures*. Saint Joseph: ASAE, 1997. 636p.

LOPES, W.G.R. Solo-cimento reforçado com bambu: características físico- mecânicas. *Tese de Doutorado*, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 165 p., 2002.

MATEOS, M.; TAWES, R.H. e DAVIDSON, D.T. Effects of chemical additives on the strenght of soil-cement mixtures. In: *Congresso Pan-americano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, 2, 1963. *Anais*, vol. 1, p. 547-570.

MCSKIMIN, H. J. Ultrasonic methods for measuring the mechanical properties of liquids and solids. In: *Physical Acoustics*. Vol. 1, Part A, Mason, W. P. (Ed.). Academic Press, New York. 1964.

MENDONÇA, A.A.; LIMA, D.C. Caracterização tecnológica de misturas solo-cal: estudo de caso dirigido a dois solos de Viçosa-MG. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica*, 11. Brasília, DF, 1998, ABMS. *Anais*, vol. 2.

MENDONÇA, A. A.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S. e FONTES, M. P. F. Efeito da temperatura de cura na resistência à compressão simples de um Latossolo e de um solo saprolítico estabilizado com cal. In: *Simpósio Internacional de Rodovia de Baixo Volume de Tráfego*, 1. Rio de Janeiro, RJ, 1997. ABPv. *Anais*, vol. 1, p. 264-274.

MESA VALENCIANO, M. del C. Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento.

Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 102 p., 1999.

METCALF, J.B. The effect of high curing temperature on the unconfined compressive strength of a heavy clay stabilized with lime and with cement. In: *New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Sydnal Victoria, 1963. *Anais*, p. 126-130.

MOH, Z.C.; LAMBE, T.W. e MICHAELS, A. Improvement of soil-cement with chemical additives. *Highway Res. Board Bul.*, 309: 57-76. 1962.

NASCIMENTO, A.A.P., HELENE, P. *Estudos de fissuração em paredes de solo-cimento destinadas a edificações habitacionais*. São Paulo: USP/POLITÉCNICA, 1988. 26p. BT/PCC – 108.

NEUBAUER, L.W. e QUINTERO, J.E. High pressure for strengthening and stabilizing soil-cement and adobe bricks. *Trans. ASAE*, 9 (4): 507-508, 512. 1966.

NEVES, C.M.M. Inovações tecnológicas em construção com terra na Ibero-América. In: *Workshop Arquitetura de Terra*, São Paulo, SP, 1995. *Anais*, p. 49-60.

NGOWI, A.B. Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. *Construction and Building Materials*, v.11. n.1. p. 1-7. 1997.

PADILHA, J.A.S.; TOLÊDO FILHO, R.D., LIMA, P.R.L.; JOSEPH, K.; LEAL, A.F. Argamassa leve reforçada com polpa de sisal: compósito de baixa condutibilidade térmica para uso em edificações rurais. *Engenharia Agrícola*, v.21, n.1., p.1-11, 2001.

PAPADAKIS, E. P. The measurement of ultrasonic attenuation in “*Physical Acoustics*”. Vol. 19, Thurston, R. N. and Pierce, A.D. (Eds). Academic Press, New York, 108-155. 1990.

PAPARGYRIS, A.D.; COOKE, R.G., PAPARGYRI, S.A.; BOTIS, A.I. The acoustic behavior of bricks in relation to their mechanical behavior. *Construction and Building Materials*, v.15, p. 361-369, 2001.

PICCHI, F.A; CINCOTO, M.A. e BARROS, J.M.C. Tijolos de solo-cal. IPT/DEd, *Tecnologia de Edificações*, 90: 93-98. 1987.

PINTO, C.S. *Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento*. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1960. 19 p.

PUCCINI, C.T. Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som. *Tese de Doutorado*, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 158p., 2002.

QASRAWI, H.Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply e reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, v.30, p.739-746. 2000.

REN, K.B.; KAGI, D.A. Upgrading the durability of mud bricks by impregnation. *Building and Environment*, v.30, n.3, p.433-440. 1995.

RIVERO, R. *Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural*. D.C. Luzzato, E., Porto Alegre, 1986. 240p.

ROGERS, C.D.F., SMALLEY, I.J. The adobe reaction and the use of loess mud in construction. *Engineering Geology*. v. 40, p. 137-138. 1995.

ROLIM, M. M. Avaliação físico-mecânica do material solo-vinhaça concentrada e sua utilização para fins de fabricação de tijolos. *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 90 p.,1996.

ROLIM, M.M., FREIRE, W.J., BERALDO, A.L. Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos de prova, tijolos e painéis de solo cimento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.1, p.93-98, 1999.

ROSS, R. J.; BRASHWA, B. K.; PELLERIN, R. F. - Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, vol.48, n.1, p.14-19. 1994.

RUFF, C.G.; DAVIDSON, D.T. Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. *Highway Res. Board Bul.*, 304: 76-92. 1961.

SABBATINI, F.H. Os Blocos Sílico-Calcários. In: *Reunião Aberta de Indústria de Cal*, V. São Paulo, 1985. *Anais*. p. 131-150.

SILVEIRA, W.J.C. Habitações de interesse social em Santa Catarina. In: *Workshop Arquitetura de Terra*, São Paulo, SP, 1995. *Anais*, p. 73-80.

SINGH, R. A review on the use of synthetic soil conditioners. *Sci. and Cult.* 20 (10): 483-486. 1955.

SVENSON, M. Estudo de misturas solo-cal sob carregamento dinâmico. In: *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*. Rio de Janeiro, RJ, 1981. COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS. p. 385-414.

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

THOMPSON, M. R. Soil-lime mixture for construction of low-volume roads. *Transportation Research Record*, 160. TRB, Washington, D.C., 1967. p. 149-165.

TIMOTEO DE SOUSA, S.M.; MAGALHÃES, M.S.; BARBOSA, N.P. Experimentação de painéis de tijolos prensados de terra crua. In: *Congresso de Engenharia Civil*, II. Juiz de Fora, MG, 1996. *Anais*, vol. 1, p. 11-20.

U.S.D.A. *Building with adobe and stabilized-earth blocks*. Washington, United States Department of Agriculture, Leaflet nº. 535, 1965. 8 p.

VICKERS, T.; MOUKWA; M. Evaluation of test methods and environmental conditions to promote efflorescence formation under laboratory conditions. *Journal of Testing Evaluation*, vol. 24, p.80-83, 1996.

VILLAR FILHO, O. C.; LUCENA, F. B.; FERREIRA, H. C. Estabilização de solos lateríticos com cimento. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, 7. Olinda/Recife, PE, 1982, ABMS. *Anais*, vol. 5, p. 285 - 305.

WALKER, P.J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, v. 17, p.301-310, 1995.

WEBB, D.J.T. Lime stabilized soil blocks for third world housing. In: HILL, N., HOLMES, S., MATHER, D. *Lime and other alternative cements*. London: Intermediate Technology Publications, 1992. p. 246-257.

ANEXO 01

CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE UMA PAREDE DE TIJOLOS MACIÇOS APARENTE (Ver Figura 86)

Dados:

Dimensões do tijolo = 23 x 11 x 5 cm

ρ = 1868 kg/m³ (ver Tabela 67)

λ = 0,49 W/(m.K) (ver Tabela 67)

c = 0,75 kJ/(kg.K) (ver Tabela 68)

$\rho_{\text{argamassa}}$ = 2000 kg/m³ (ver Tabela 14)

$\lambda_{\text{argamassa}}$ = 1,15 W/(m.K) (ver Tabela 14)

$c_{\text{argamassa}}$ = 1,00 kJ/(kg.K) (ver Tabela 14)

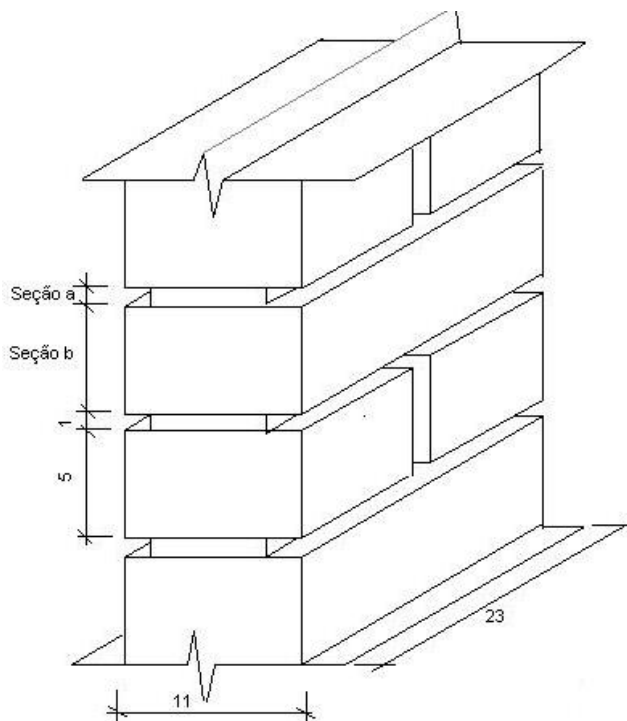


Figura 86. Parede de tijolos maciços aparentes.

a) Resistência térmica da parede (R_t):

Seção A (argamassa de assentamento):

$$A_a = 0,01 \times 0,23 = 0,0023 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,11}{1,15} = 0,0956 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

Seção B (tijolo):

$$A_b = 0,05 \times 0,23 = 0,0115 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{tijolo}}}{\lambda_{\text{tijolo}}} = \frac{0,11}{0,49} = 0,2245 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

Portanto, a resistência térmica da parede será:

$$R_t = \frac{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} = \frac{\frac{0,0023}{0,0956} + \frac{0,0115}{0,2245}}{\frac{0,0023}{0,0956} + \frac{0,0115}{0,2245}} = \frac{0,0144}{0,0753} = 0,1912 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

b) resistência térmica total (R_T):

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,1912 + 0,04 = 0,3612 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

c) transmitância térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,3612} = 2,77 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$$

d) capacidade térmica da parede (C_T):

Seção A (argamassa):

$$A_a = 0,0023 \text{ m}^2$$

$$C_{Ta} = e.c.\rho = 0,11 \times 1,00 \times 2000 = 220 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}$$

Seção B (tijolo):

$$A_b = 0,0115 \text{ m}^2$$

$$C_{Tb} = e.c.\rho = 0,11 \times 0,75 \times 1868 = 154,11 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$C_T = \frac{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}}}{\frac{0,0023}{220} + \frac{0,0115}{154,11}} = \frac{0,0023 + 0,0115}{\frac{0,0023}{220} + \frac{0,0115}{154,11}} = 162,21 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$$

e) atraso térmico da parede (φ):

$$R_t = 0,1912 \text{ (m}^2.\text{K)/W}$$

$$C_T = 162,21 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$$

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot C_T}$$

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{0,1912 \cdot 162,21} = 4,0 \text{ horas}$$

f) fator de calor solar (FS):

$$FS = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

Utilizando tijolo aparente ($\alpha = 0,65$), teremos:

$$FS = 4 \cdot 2,77 \cdot 0,65 = 7,2\%$$