

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA DO**  
**MEIO AMBIENTE – PPGEMA**

**WILSON MARQUES SILVA**

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**  
**NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E TERMOFÍSICAS DE**  
**TIJOLOS MODULARES DE SOLO-CIMENTO**

Goiânia

2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

WILSON MARQUES SILVA

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS  
NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E TERMOFÍSICAS DE  
TIJOLOS MODULARES DE SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricito Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

**Área de concentração:** Recursos hídricos e saneamento.

**Orientador:** Prof. Dr. Regis de Castro Ferreira

**Co-orientador:** Prof. Dr. Edgar Bacarji

Goiânia

2007

## **Dedico**

Para minha mãe, Maria de Fátima e meu pai, Welson, pelo amor e educação destinados à minha formação.

Para minha irmã, Adriana, pelo amor, amizade e companheirismo.

Para meu saudoso e inesquecível amigo, *in memoriam*, Vanderley Divino.

## **Agradecimentos**

A Deus, pois é dele toda honra e toda glória alcançada em minha vida.

Ao Prof. Dr. Regis de Castro Ferreira pelo conhecimento, dedicação e competência transmitida durante todo este trabalho. Orientador por definição e amigo por consideração.

Ao corpo docente da EEC-UFG, em especial aos professores Edgar Bacarji e Lúcia Helena de Oliveira pelo companheirismo e ensinamentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Osni do Instituto de Física da UFG, pela disponibilidade de realizar alguns ensaios.

A equipe do Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Construtivos em FURNAS S/A, Simone, Rodrigo e Mário, pela realização de ensaios em seu laboratório.

Aos amigos do PPGEMA, em especial Frederico, João Luís, Rogério, Rita, Elza e Fabíolla pelas dificuldades que juntos superamos.

Aos meus familiares e amigos.

*“Quando achamos que já  
chegamos, paramos de  
avançar.”*

**Mark W. Baker**

## **RESUMO**

Visando oferecer alternativas de destinação de resíduos agrícolas a presente pesquisa estudou composições da mistura de solo-cimento-resíduo agrícola, tendo como objetivo principal determinar os teores máximos de resíduos a serem incorporados em substituição ao estabilizante, obtendo-se, assim, materiais mais leves e, portanto, de menor condutividade térmica, sem o comprometimento das suas características mecânicas. Foram utilizados dois tipos de resíduos vegetais (cascas de arroz e de braquiária) e utilizou-se o cimento Portland CP II-F-32 para a composição dos tratamentos. O teor de cimento usado na estabilização do solo foi de 10%. Já os teores de resíduo foram de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% incorporados em substituição ao cimento. Assim, foram variados os teores de cimento e resíduo desde 100% de cimento e 0% de resíduo, até 60% de cimento e 40% de resíduo. Corpos-de-prova cilíndricos e tijolos foram avaliados sob compressão simples e absorção de água. Os resultados sugerem o uso destes resíduos no teor de 10% em substituição ao cimento, sem o comprometimento de suas propriedades mecânicas. Foram determinadas as principais propriedades termofísicas de tijolos confeccionados com esta mistura através dos ensaios da caixa quente protegida e do calor específico, seguidos da verificação da adequação em relação ao zoneamento bioclimático brasileiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** resíduos, compressão simples, eficiência energética.

## **ABSTRACT**

The aim of this research was to study the effect of the vegetable wastes addition under the physical and mechanical properties of soil-cement bricks. It were used two types of wastes (rice husk and *Brachiaria brizantha* one). The cement Portland content used on the soil stabilization was 10%. The vegetable wastes contents were 0%, 10%, 20%, 30% and 40% added in substitution to the cement. The specimens and bricks were submitted to the compression tests and water absorption tests. The best results, in terms of compression strength were reached by the 10% addition of vegetable wastes in substitution to the cement. The results suggest the promising use of these wastes, at the 10% content, without the compromising of the mechanical properties related to the compressive strenght and to the durability. It were determined the main thermophysical properties of bricks molded with that soil-cement-waste through the hot box method and the specific heat one and so it will be verified their adequacy to the Brazilian bioclimatic zoning.

**KEYWORDS:** agriculture wastes, compressive strength, energetic efficiency.



## SUMÁRIO

	Página
Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
Lista de Abreviaturas e Siglas	
Lista de Símbolos	
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1. OBJETIVOS</b>	<b>19</b>
<b>1.1.1. Objetivo geral</b>	<b>19</b>
<b>1.1.2. Objetivos específicos</b>	<b>19</b>
<b>1.2. JUSTIFICATIVA</b>	<b>20</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Solos</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Estabilização do solo</b>	<b>24</b>
<b>2.3. Cimento</b>	<b>25</b>
<b>2.4. Solo como material de construção</b>	<b>26</b>
<b>2.5. Solo-cimento</b>	<b>28</b>
<b>2.6. Tijolos prensados de solo-cimento</b>	<b>31</b>
<b>2.7. Uso da biomassa vegetal na obtenção de materiais de construção</b>	<b>34</b>
<b>2.7.1. Casca de arroz</b>	<b>34</b>
<b>2.7.2. Casca da semente do capim <i>Brachiaria</i></b>	<b>35</b>
<b>2.7.3. Incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento</b>	<b>37</b>
<b>2.7.4. Tratamentos para minimizar a incompatibilidade entre a biomassa e o produto cimentante</b>	<b>39</b>
<b>2.7.5. Classificação dos resíduos agroindustriais quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública</b>	<b>41</b>
<b>2.8. Clima, conforto e desempenho térmico de materiais de construção</b>	<b>41</b>
<b>2.9. Zoneamento Bioclimático Brasileiro</b>	<b>44</b>
<b>2.10. Propriedades Térmicas dos Materiais e Componentes de Construção</b>	<b>45</b>
<b>2.10.1. Desempenho térmico de paredes</b>	<b>51</b>
<b>2.10.2. Formas de transmissão de calor</b>	<b>53</b>

2.10.2.1	Condução	53
2.10.2.2	Convecção	53
2.10.2.3	Radiação	53
2.10.2.4	Condensação	53
<b>2.10.3</b>	<b>Comportamento dos materiais opacos diante da radiação solar</b>	<b>55</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>65</b>
<b>3.1.</b>	<b>MATERIAIS</b>	<b>65</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>Solo</b>	<b>65</b>
<b>3.1.2.</b>	<b>Cimento</b>	<b>65</b>
<b>3.1.3.</b>	<b>Água</b>	<b>65</b>
<b>3.1.4.</b>	<b>Resíduos vegetais</b>	<b>66</b>
<b>3.1.5.</b>	<b>Equipamentos de laboratório</b>	<b>66</b>
3.1.5.1.	Caracterização do solo e dos resíduos agroindustriais	66
3.1.5.2.	Ensaio mecânicos	67
3.1.5.3.	Fabricação dos tijolos	67
3.1.5.4.	Ensaio termofísicos	67
<b>3.2.</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>68</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Procedimentos aplicados ao solo</b>	<b>68</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Procedimentos aplicados aos resíduos</b>	<b>69</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>Determinação dos tratamentos</b>	<b>70</b>
<b>3.2.4.</b>	<b>Aplicação dos tratamentos</b>	<b>71</b>
<b>3.2.5.</b>	<b>Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento -resíduo</b>	<b>71</b>
<b>3.2.6.</b>	<b>Ensaio de compressão axial simples dos corpos-de-prova cilíndricos de solo- cimento-resíduos</b>	<b>72</b>
<b>3.2.7.</b>	<b>Ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos de solo- cimento-resíduos</b>	<b>73</b>
<b>3.2.8.</b>	<b>Moldagem e cura dos tijolos de solo-cimento-resíduo</b>	<b>74</b>
<b>3.2.9.</b>	<b>Ensaio de compressão simples dos tijolos modulares de solo-cimento e solo-cimento-resíduo</b>	<b>76</b>
<b>3.2.10.</b>	<b>Ensaio de absorção de água dos tijolos modulares de solo-cimento e solo-cimento-resíduo</b>	<b>77</b>
<b>3.2.11.</b>	<b>Confecção das paredes de solo-cimento e solo-cimento-resíduo para os ensaios de condutividade térmica</b>	<b>78</b>

3.2.12.	Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de calor específico	79
3.2.13.	Determinação das propriedades termofísicas	82
3.2.14.	Adequação de alvenaria de solo-cimento-resíduo ao zoneamento bioclimático brasileiro	84
3.3.	Planejamento experimental	85
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	86
4.1.	Caracterização dos resíduos	86
4.1.1.	Casca de arroz	86
4.1.2.	Casca da semente do capim braquiária	87
4.2.	Caracterização do solo	89
4.2.1.	Massa específica dos sólidos	90
4.2.2.	Limites de consistência	90
4.2.3.	Análise granulométrica	91
4.2.4.	Ensaio de compactação do solo	91
4.2.5.	Análise química do solo	95
4.3.	Procedimentos aplicados aos corpos-de-prova cilíndricos	96
4.3.1.	Análise estatística	97
4.3.2.	Resistência à compressão e absorção de água	97
4.4.	Procedimentos aplicados aos tijolos de solo-cimento-resíduos	99
4.4.1.	Análise estatística	99
4.5.1.	Resistência à compressão e absorção de água	101
4.6.	Ensaio termofísicos	103
5.	<b>CONCLUSÕES</b>	106
5.1.	Caracterização físico-mecânica das misturas de solo-cimento-resíduo agroindustrial	106
5.2.	Propriedades termofísicas	106
5.3.	Conclusões gerais	106
6.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	107
	<b>ANEXOS</b>	118

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1	Estrutura do solo. 21
Figura 2.2	Zoneamento bioclimático brasileiro – NBR 15220-3 (ABNT, 2005a). 44
Figura 2.3	Condição para transferência de calor. 51
Figura 2.4	Transferência de calor em uma parede. 52
Figura 2.5	Radiação solar em superfícies opacas. 55
Figura 3.1	Resíduo casca de arroz. 66
Figura 3.2	Resíduo casca de capim braquiária. 66
Figura 3.3	Máquina universal de ensaios. 67
Figura 3.4	Máquina para fabricação de tijolos (marca GTW). 67
Figura 3.5	Caixa quente protegida – vista lateral. 68
Figura 3.6	Calorímetro. 68
Figura 3.7	Resíduo casca de arroz após o tratamento. 69
Figura 3.8	Resíduo casca da semente do capim braquiária após tratamento. 69
Figura 3.9	Teor de cimento em função da densidade seca e da percentagem de silte e argila (ABCP, 1972). 70
Figura 3.10	Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão. 73
Figura 3.11	Corpos-de-provas cilíndricos imersos em água por 24 h. 74
Figura 3.12	Corpos-de-prova cilíndricos secos em estufa a 105° C. 74
Figura 3.13	Mistura manual do solo-cimento-resíduo. 75
Figura 3.14	Colocação da mistura solo-cimento-resíduo na fôrma 75
Figura 3.15	Fabricação dos tijolos. 75
Figura 3.16	Tijolos após serem prensados submetidos à cura. 75
Figura 3.17	Tijolo sendo serrado ao meio. 77
Figura 3.18	Tijolo sob compressão. 77
Figura 3.19	Tijolos secos em estufa. 77
Figura 3.20	Tijolos imersos em água. 77
Figura 3.21	Confecção das paredes. 78
Figura 3.22	Acabamento na superfície da parede. 78
Figura 3.23	Fixação dos termopares. 79
Figura 3.24	Cilindros prontos. 80
Figura 3.25	Vista superior dos cilindros prontos. 80

Figura 3.26	Tijolo sendo serrado.	80
Figura 3.27	Acabamento superficial do cilindro.	80
Figura 3.28	Arranjo esquemático da montagem da caixa quente protegida (adaptado de ABNT, 1980): (a) vista superior; (b) vista lateral.	83
Figura 4.1	Distribuição granulométrica da casca de arroz no estado natural.	87
Figura 4.2	Distribuição granulométrica da casca de arroz, após ser triturada e tratada.	87
Figura 4.3	Distribuição granulométrica da casca da semente de braquiária no estado natural.	88
Figura 4.4	Distribuição granulométrica da casca da semente de braquiária, após ser triturada e tratada.	89
Figura 4.5	Distribuição granulométrica do solo estudado.	91
Figura 4.6	Curvas de compactação de solo-cimento-casca de arroz.	93
Figura 4.7	Curvas de compactação do solo-cimento-casca de braquiária.	94
Figura 4.8	Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos em função da idade de cura.	99
Figura 4.9	Absorção de água em função de cada tipo de tratamento aos 7 dias de idade de cura.	99
Figura 4.10	Resistência à compressão simples dos tijolos em função da idade de cura.	102
Figura 4.11	Absorção de água em função de cada tipo de tratamento aos 7 dias de idade de cura.	103

## LISTA DE TABELAS

	Página	
Tabela 2.1	Recomendações construtivas para vedações externas para cada zona bioclimática brasileira.	45
Tabela 2.2	Resistência térmica superficial interna e externa.	48
Tabela 2.3	Emissividade de superfícies.	54
Tabela 2.4	Absortância de cores e superfícies.	54
Tabela 2.5	Massa específica aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico de materiais ( $c$ ).	57
Tabela 2.6	Transmitância ( $U$ ), capacidade térmica ( $C_T$ ) e atraso térmico ( $\phi$ ) para algumas paredes.	60
Tabela 2.7	Propriedades térmicas dos materiais utilizados nos componentes da Tabela 4.6.	64
Tabela 2.8	Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.	64
Tabela 3.1	Número total de corpos-de-prova cilíndricos moldados e ensaiados.	72
Tabela 3.2	Quantidade de tijolos de solo-cimento e de solo-cimento-resíduo moldados e ensaiados.	76
Tabela 3.3	Quantidade de tijolos confeccionados para cada parede.	79
Tabela 4.1.	Distribuição granulométrica da casca de casca de arroz.	86
Tabela 4.2	Distribuição granulométrica do resíduo casca da semente braquiária.	88
Tabela 4.3	Características físicas do solo estudado.	90
Tabela 4.4.	Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima do ensaio de compactação das composições de solo-cimento-resíduo.	92
Tabela 4.5.	Valores médios do grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos para os três períodos de cura estudados.	94
Tabela 4.6	Análise química total do solo.	95
Tabela 4.7	Análise química – determinação dos principais parâmetros compostos do solo.	95
Tabela 4.8	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos	

	sobre a variável resposta resistência à compressão simples para os corpos-de-prova cilíndricos, em MPa.	96
Tabela 4.9.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta capacidade de absorção de água para os corpos-de-prova cilíndricos, em %.	96
Tabela 4.10	Valores médios dos resultados de resistência à compressão simples e absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos.	97
Tabela 4.11	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta resistência à compressão simples para os tijolos modulares, em MPa.	100
Tabela 4.12.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta capacidade de absorção dos tijolos modulares, em %.	100
Tabela 4.13	Valores médios dos resultados de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos.	101
Tabela 4.14	Principais propriedades termofísicas do tijolo.	103
Tabela 4.15	Fator de umidade.	104
Tabela 4.16	Correção dos valores da condutividade térmica em função do teor de umidade.	104
Tabela 4.17	Principais valores das propriedades termofísicas da parede.	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABCTerra	Associação Brasileira dos Construtores em Terra
ABMTENC	Associação Brasileira de Materiais e Tecnologias não Convencionais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAC	Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
BNH	Banco Nacional de Habitação
CEPED	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
PCA	Portland Cement Association
CINVA	Centro Interamericano de la Vivienda
GO	Goiás
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
UFG	Universidade Federal de Goiás



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Absortância à radiação solar
$\Delta T$	Diferença de temperatura entre as faces
$\varepsilon$	Emissividade de superfície
$\varphi$	Atraso térmico
$\gamma_c$	Massa específica aparente seca do corpo-de-prova
$\gamma_s$	Massa específica aparente seca máxima do solo
$\lambda$	Condutividade térmica
$\rho$	Massa específica aparente
A	Área
AlCl <sub>3</sub>	Cloreto de alumínio
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Sulfato de alumínio
c	Calor específico
C <sub>T</sub>	Capacidade Térmica
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de cálcio
CaO	Cal livre
CHOS	Carboidratos solúveis
DEA	Diethanolamine
e	Espessura
FeCl <sub>3</sub>	Cloreto de ferro
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Nitrato de ferro
FS	Fator de calor solar
GC	Grau de compactação
MgCl <sub>2</sub>	Cloreto de magnésio
Na <sub>2</sub> S	Sulfato de sódio
Q	Fluxo de calor por condução
R	Resistência térmica
RS	Radiação solar
R <sub>se</sub>	Resistências superficial externa
R <sub>si</sub>	Resistências superficial interna
R <sub>t</sub>	Resistência térmica de superfície a superfície
U	Transmitância térmica

## 1. INTRODUÇÃO

Há algum tempo já se faz presente em inúmeros setores produtivos a preocupação com a sustentabilidade, que deve envolver uma visão ecológica, social e econômica. O uso de tecnologias apropriadas em construções 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, portanto, considerado.

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.

A operacionalização dessas tecnologias pode ser feita através do uso isolado ou combinado de materiais e técnicas construtivas, convencionais ou não, tais como: terra crua, solo-cimento, argamassa armada, paredes monolíticas, elementos pré-fabricados, bambu, compósitos biomassa vegetal-cimento, etc. Entretanto, a escolha do material ou técnica mais apropriado vai depender, dentre outros aspectos, dos recursos disponíveis no local, da mão-de-obra a ser empregada e da finalidade e durabilidade preconizadas para a construção (FERREIRA, 2003).

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, principalmente sob a forma de tijolos ou blocos prensados e não queimados. Mas, para se atingir condições mínimas de resistência e durabilidade, os tijolos de terra crua devem ser estabilizados. Como alternativa de estabilização tem-se o uso de aditivos químicos como o cimento.

As características de resistência e durabilidade, 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. Todavia, resistência e baixa condutividade térmica são propriedades antagônicas, fazendo-se necessária a compatibilização dessas duas características (ADAM; JONES, 1995).

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

No meio rural, ou nas agroindústrias, é notória a geração de uma grande quantidade de resíduos, para os quais ainda não se encontrou uma adequada destinação. Normalmente, tais resíduos são dispostos na natureza, agredindo-a, ou então, são queimados sem nenhum tipo de controle.

O uso da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar “in-natura” ou sob a forma de cinzas têm sido recentemente objeto de diversas pesquisas. Esses esforços têm ou tiveram o objetivo de melhorar as características físico-mecânicas de argamassas e/ou de tijolos de terra-crua através da substituição parcial do cimento e/ou como material de enchimento (MESA-VALENCIANO; FREIRE, 1999; AKASAKI; SILVA, 2001). Tais resíduos, quando disponíveis próximos das áreas em que são produzidos e associados à utilização de solos locais, podem produzir soluções de baixo custo para a fabricação de materiais de construção baseados em terra crua (MEDEIROS *et al.*, 2002).

Em Goiás, estado cujo setor produtivo ligado ao agronegócio experimenta grande expansão, a produção de resíduos agrícolas e/ou agroindustriais é intensa. Um setor que merece destaque é o do comércio de sementes certificadas e/ou fiscalizadas para a formação de pastagens. Resíduos oriundos das usinas de beneficiamento durante as etapas de pré-limpeza, secagem, limpeza e peneiramento dessas sementes como as do capim braquiária (*Brachiaria brizantha*) podem ser utilizados e, portanto, aproveitados. A casca que envolve a semente, na maioria das vezes, pela inexistência de um aproveitamento mais adequado, é descartada. O volume de casca após o beneficiamento varia de acordo com o grau de pureza que a semente possui ao vir do campo de produção, e também com o grau de pureza que se quer dar ao produto (semente comercial) beneficiado.

Portanto, fazem-se necessários mais estudos sobre a incorporação de resíduos vegetais, na confecção de materiais não convencionais de construção.

Neste contexto, a presente pesquisa torna-se de grande importância para a obtenção de novos produtos que acompanhem o processo tecnológico e minimizem a degradação ambiental. Pretende-se com este trabalho desenvolver tijolos de solo-cimento de baixa condutividade térmica pela incorporação de resíduos agrícolas, promovendo, assim, a redução da transferência de calor e menor consumo energético para o controle da temperatura interna de edificações sem comprometer seu desempenho mecânico.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

- Pesquisar o efeito da adição de cimento e resíduos vegetais “in natura” ao solo e, com a mistura, moldar corpos-de-prova cilíndricos e tijolos modulares tendo suas características mecânicas e termofísicas investigadas em laboratório e seu comportamento tecnicamente avaliado.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Proceder à caracterização física das cascas de arroz e de braquiária “in natura”;
- Determinar as características físicas e mecânicas das misturas de solo-cimento-resíduos, buscando identificar as combinações que apresentem melhores resultados em termos de estabilização mecânica;
- Experimentar diferentes doses de resíduos e idades de cura, visando à obtenção de materiais solo-cimento-resíduos mais resistentes e duráveis;
- Confeccionar corpos-de-prova cilíndricos com as misturas de solo-cimento-resíduos e determinar suas características de resistência mecânica e absorção de água;
- Confeccionar tijolos moldados com as misturas de solo-cimento-resíduos e determinar suas características de resistência mecânica e absorção de água, verificando seu enquadramento dentro dos critérios de aceitação definidos pelas normas vigentes;
- Confeccionar tijolos moldados a partir de misturas de solo-cimento resíduos e determinar suas principais propriedades termofísicas, verificando seu enquadramento dentro dos critérios de aceitação definidos pelas normas vigentes;
- Definir e recomendar, para fins de fabricação de tijolos prensados modulares não queimados, os tratamentos mais adequados em termos do teor de resíduo vegetal, idade de cura, resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água.
- Utilizar resíduos agroindustriais na confecção de tijolos modulares de sol-cimento evitando assim seus descartes no meio ambiente sem nenhum tipo de controle ambiental.

- Enfim, determinar os teores máximos de resíduos a serem incorporados em substituição ao cimento, obtendo-se, assim, materiais mais leves e, portanto, de menor condutividade térmica, sem o comprometimento das suas características mecânicas.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

Considerando-se que a extração indiscriminada dos recursos naturais e que a poluição gerada pelos resíduos promovem impactos sobre o meio ambiente são motivos de grande preocupação e que se faz presente em todos os setores da economia a busca por processos manufatureiros que impliquem em menor consumo energético, os materiais compósitos à base de cimento e biomassa vegetal são promissores nos âmbitos ambiental, socioeconômico e funcional. Sua utilização pode contribuir no sentido de baixar os custos envolvidos em pequenas construções, possibilitando a inserção de tecnologias apropriadas, a obtenção de um produto menos poluente que os convencionais, de baixo consumo energético, gerando processos de reaproveitamento de resíduos agroindustriais e suprimindo as necessidades construtivas de moradias de interesse social.

Deve-se levar em consideração, também, a importância da disseminação desta tecnologia no meio produtivo, tentando assim melhorar a aceitabilidade e o emprego do material pelo usuário.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Solos

Os solos são materiais que resultam do intemperismo das rochas por desintegração mecânica e química. A água é o principal agente para a modificação química ou mineralógica das rochas e os mais importantes mecanismos de ataque são: a oxidação, a hidratação, a carbonatação e os efeitos químicos da vegetação (CAPUTO, 2003).

Segundo Pinto (1998) os solos podem ser definidos por um conjunto de partículas sólidas provenientes da desagregação de rochas por ações físicas e químicas, com água (ou outro líquido) e ar, ou ainda ambos, em seus espaços intermediários. Configura-se assim, uma estrutura porosa, sendo que as partículas, de maneira geral, se encontram livres para se deslocarem. O comportamento dos solos depende dessa movimentação das partículas sólidas entre si, o que altera as porcentagens em volume das suas fases constituintes (sólidos, ar e água) e isto faz com que o solo se afaste dos sólidos idealizados na Mecânica dos Sólidos Deformáveis, na qual se fundamenta a Mecânica das Estruturas. Tem-se na Figura 2.1 uma ilustração da estrutura do solo.

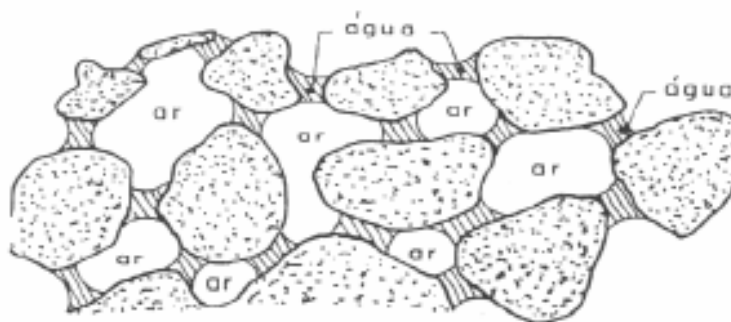


Figura 2.1-Estrutura do solo.

Fonte: Grande (2003).

A superfície de cada partícula possui cargas, em geral, eletricamente negativas e, assim, se a água é pura, duas partículas não ficam em contato porque têm cargas iguais que se repelem mutuamente. Diz-se que a amostra está no estado de dispersão completa. Com o tempo, as partículas maiores sedimentam e formam um depósito em que as forças de repulsão e gravidade estão em equilíbrio. As partículas mais finas permanecem em suspensão. Se uma gota da suspensão é examinada ao microscópio, vê-se que as partículas se locomovem com

um movimento desordenado chamado movimento Browniano. Cada partícula segue um caminho em ziguezague, mas não colide com as demais (TERZAGHI; PECK, 1961).

Houben e Guillaud <sup>1</sup> apud GRANDE (2003) descrevem o corte em seção do solo da seguinte forma:

- O horizonte A (solo superficial) é subdividido em:
  - A0 – caracteriza-se por ser uma camada orgânica;
  - A1 – uma mistura de materiais orgânicos (em concentrações inferiores a 30%) e minerais;
  - A2 – camada resultante da eluviação, pobre em materiais orgânicos, apresentando argila e óxido de ferro geralmente separados;
  - A3 – resultante da eluviação e iluviação, onde se começa a concentração de colóides;
- O horizonte B (subsolo) é subdividido em:
  - B1 – camada ferrosa que contém materiais orgânicos e óxidos de ferro e de alumínio;
  - B2 – camada com acúmulo de argila e óxidos ferrosos;
  - B3 – faixa de transição com o horizonte C
- O horizonte C é o material de origem residual;
- Finalmente, o horizonte chamado R, de “rock” que é a rocha-mãe propriamente dita.

O conhecimento do perfil do solo e de sua subdivisão em horizontes permite algumas observações relevantes no uso prático do solo-cimento, quanto ao emprego dos solos provenientes desses perfis.

O horizonte A, conforme Azambuja (1979), possui, em geral, pequena espessura, algo em torno de 20 cm e 30 cm e sua cor é cinza-escura. Podem ocorrer no perfil de intemperismo de arenito, camadas de espessuras de até 2 m. Nesse horizonte pode existir celulose e húmus. A celulose é inerte, porém o húmus é um ácido orgânico que tem grande afinidade química com a cal livre (CaO) liberada na hidratação do cimento e, mesmo em baixas concentrações, pode afetar a resistência do material.

---

<sup>1</sup> HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. Earth construction: a comprehensive guide. Intermediate Technology Publications, London, 1994, 362 pp.

Em alguns casos, quando não há mais alternativas, é recomendável adicionar cal nos solos do horizonte A antes da adição do cimento, porém esse procedimento envolve outras variáveis como o teor de cal necessário e o custo dessa operação.

Os solos do horizonte B são, em geral, argilosos com predominância da caulinita, uma vez que esse horizonte se forma em ambientes de boa drenagem. São solos de difícil pulverização (destorroamento) e isso é um grande problema na homogeneização da mistura do solo-cimento.

No horizonte C os solos são arenosos e de fácil pulverização, o que indica sua preferência para emprego no solo-cimento. Mesmo assim, devido à sua composição mineralógica de origem, que pode conter partículas friáveis, há a necessidade de um estudo de dosagem antes da utilização.

Usando como critério o diâmetro médio das partículas, os solos são assim classificados de acordo com a NBR 7181 (ABNT 1984a):

- pedregulho: partículas de dimensões entre 4,8 e 50 mm;
- areia: partículas finas com dimensões entre 50  $\mu\text{m}$  e 4,8 mm;
- silte: partículas finas entre 5  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ ;
- argila: partículas com dimensões inferiores a 5 $\mu\text{m}$ .

Em 1933, R. Proctor publicou uma série de artigos sobre métodos de controle da compactação. Seus estudos enunciaram um dos mais importantes princípios da Mecânica dos Solos, ou seja, que a densidade do solo compactado é função do teor de umidade no momento de sua compactação. Proctor percebeu que para uma energia de compactação constante, ao se adicionar água ao solo, sua densidade aparente aumentava até certo ponto, chamado umidade ótima. Ao acrescentar teores de umidade acima do ótimo, a densidade aparente reduzia, pois o excesso de água absorvia parte da energia de compactação e a redistribuía ao sistema, afastando as partículas sólidas (GRANDE, 2003).

Na verdade, o teor ótimo promove uma lubrificação das partículas facilitando, quando se imprime uma energia de compactação, o preenchimento de todos vazios possíveis.

Entende-se, portanto, que solos com maiores quantidades de finos, quando compactados demandam maiores teores de água para atingirem a umidade ótima devido a maior área superficial do solo.

A nova configuração do solo após a compactação afeta significativamente as características mecânicas e, conseqüentemente, a porosidade e a permeabilidade do solo (LINS, 1994; ROCHA, 1996; SILVA, 2001).



## 2.2. Estabilização do solo

Conforme Inglês e Metcalf (1972), os princípios que regem a estabilização dos solos tendem a conferir ao produto final uma melhor estabilidade dimensional, aumento de resistência mecânica para patamares definidos pela utilização, diminuição da permeabilidade, controle da fissuração por retração devido à secagem, resistência à erosão e abrasão superficial e, conseqüentemente, aumento da durabilidade do material. Silva (2001) acrescenta que todo processo de estabilização modifica as propriedades do sistema solo-água-ar e conclui que a estabilização pode ser direcionada para apenas duas características do solo: a textura (grau de finura do solo) e a estrutura. De fato, a estabilização, de qualquer forma, promove:

- redução do volume dos vazios, o que promove influência sobre a porosidade;
- preenchimento dos vazios que não podem ser eliminados por completo, alterando as características de permeabilidade do solo;
- melhoria da aderência entre os grãos, conferindo maior compactidade, ou densidade, ao solo, influenciando diretamente a resistência mecânica.

Abiko (1983) relata que desde as eras mais remotas, o homem utilizou diversas técnicas para conferir melhor comportamento ao solo, tornando-o mais resistente ao intemperismo. Cita-se o emprego de asfalto, cal, palha e diversas outras fibras vegetais, urina e excremento de gado, melação, goma arábica, gordura de baleia e resinas diversas.

Houben e Guillaud (1994) apud Grande (2003) citam que são três os principais métodos de estabilização do solo:

- estabilização mecânica;
- estabilização física;
- estabilização química.

A estabilização mecânica consiste em compactar o solo por meio de uma ação (aplicação de uma energia) mecânica. Os resultados desse método afetam a densidade, a resistência mecânica, a compressibilidade, a permeabilidade e a porosidade.

A estabilização física atua diretamente sobre a textura do solo, ou seja, adicionam-se frações de grãos de diferentes granulometrias e, portanto, otimizam-se as proporções entre areia, silte e argila, fato que causa um melhor empacotamento dos grãos.

A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (1960) divulgou que a composição granulométrica é determinante na estabilização do solo com cimento, pois traça parâmetros que correlacionam o teor de cimento a ser adicionado e com isso analisa-se a viabilidade econômica da sua aplicação.

Ocorre estabilização química “quando outros materiais são adicionados ao solo, modificando suas propriedades ou por reação físico-química entre os grãos e o material, ou criando uma matriz que aglutina e cobre os grãos” (SILVA, 2001, p.104). É oportuno comentar que os materiais mais utilizados para esse tipo de estabilização são: cimento Portland, cal, betume e fibras.

Na estabilização do solo com cimento ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo a ele resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado. Devido a esta troca, o solo torna-se mais granular, a adesividade é reduzida e a sensibilidade à variação de umidade e a variação volumétrica se tornam menores. Além destas modificações iniciais, Abiko (1980) afirmou que, ao longo do tempo, formam-se compostos cimentantes que contribuem para o melhoramento de propriedades do material relacionadas à resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica.

A opção, conforme Guimarães (1998), pelo tipo adequado de estabilização é influenciada por uma série de fatores como: viabilidade econômica, finalidade da obra, características dos materiais e as propriedades do solo que se deseja corrigir ou adequar.

### **2.3. Cimento**

O cimento Portland é uma substância alcalina, composta, em sua maior parte, por 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<sub>4</sub> e incorporando íons de cálcio livre à superestrutura formada pelos grupamentos de SiO<sub>4</sub> (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 objetivos de regulamentar, pesquisar e fomentar o uso e aplicação do solo-cimento (FEEREIRA, 2003).

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 elevação no teor de cimento.

Os solos finos necessitam de mais cimento que os solos granulares, pelo fato de apresentarem maior superfície específica. Todavia, conforme asseguraram Armam e Saifan (1967), o 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.

#### **2.4. Solo como material de construção**

A terra é um dos materiais mais abundantes do planeta, sendo que sua utilização como material de construção, remota dos tempos mais primitivos. As construções podem ser feitas completas 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 serem erguidas de forma monolítica ou não, neste último caso utilizando-se elementos construtivos na forma de tijolos, blocos ou painéis.

Segundo Dethier<sup>2</sup> apud Silva (2001) as primeiras notícias de pesquisas sobre a construção com terra ocorreram no final do século XVIII.

O desenvolvimento científico do uso do solo (e também do solo estabilizado) em habitações ocorreu a partir de 1806, quando S. W. Johnson escreveu um tratado sobre a construção de terra compactada ou paredes monolíticas (pise) para construções rurais. Posteriormente na Inglaterra, período pós Primeira Guerra Mundial, a construção com solo compactado foi amplamente divulgada como alternativa frente à escassez de recursos energéticos e materiais de construção (MERRIL<sup>3</sup> apud CUNHA, 1978).

Desde então, diversos órgãos de pesquisa, arquitetos e engenheiros defendem a causa do uso da terra como material de construção de habitações, principalmente a partir da década de 70, quando começaram a ser discutidas as questões relativas ao impacto ambiental causado pela indústria da construção civil.

Dentre os órgãos internacionais de pesquisa destaca-se o CRATERRE, com sede em Genoble - França. No Brasil algumas entidades ligadas ao estudo dessa tecnologia são:

- ABCTerra – Associação Brasileira dos Construtores em Terra;
- CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia;
- ABMTENC – Associação Brasileira de Materiais e Tecnologias não Convencionais;
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

Várias obras de habitação social foram decorrentes do sucesso do emprego dessa tecnologia, sensibilizando programas governamentais e órgãos de pesquisa que visavam à transferência de tecnologia (CEPED, 1978; ABCP, 1985).

Lopes<sup>4</sup> apud Silva (2001) relata que as construções com terra costumam ser associadas à pobreza financeira, devido ao seu emprego em programas sociais. O surgimento

---

<sup>2</sup> DETHIER, J.; Arquiteturas de terra ou o futuro de uma tradição milenar. Europa Terceiro Mundo. Estados Unidos. 10ed. Lisboa: Litografia Tejo, 1993.

<sup>3</sup> MERRIL, A.F. Casas de tierra apisonada y suelo-cemento. Windsor, Buenos Aires, 1947.

<sup>4</sup> LOPES, W. G. Taipa de mão no Brasil: levantamento e análise de construções. São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado). SAP – EESC – USP, 1998.

de materiais de construção industrializados também contribuiu para que essa tecnologia ficasse à margem do mercado da habitação.

No domínio da construção com terra, é importante o conhecimento das dimensões das partículas que compõe o solo, pois seu comportamento mecânico depende delas.

Segundo a ABCP (1985), os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária a presença de argila na sua composição, visando dar, à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das formas. A possibilidade de utilização de solo do próprio local constitui-se numa das grandes vantagens do solo-cimento, sendo que, na mistura, o solo é o elemento que entra em maior proporção, devendo ser tal que permita o uso da menor quantidade possível de cimento.

Quanto mais fina a granulometria do solo, maior é sua área específica, o que significa que a área a ser envolvida pelo aglomerante é maior. De modo geral, solos de granulometria bem distribuída são ideais, pois além de requererem menor teor de estabilizante, os espaços existentes entre os grãos maiores são preenchidos por partículas menores do próprio solo e, neste caso, os produtos formados das reações de solo-aditivo, ao invés de preencher os vazios, agem de forma integral na ligação entre os grãos. Quando a granulometria do solo não é adequada, pode-se corrigi-la adicionando outros tipos de solo, tal como nos trabalhos realizados por Sousa e Barbosa (2000), quando dois tipos de solo caracterizados como arenosos foram corrigidos com a adição de finos (silte + argila), assim promovendo a coesão do solo para moldagem de tijolos prensados.

Felizmente, algumas iniciativas estão sendo retomadas, conseqüências de pesquisas, aprofundamento técnico de arquitetos e engenheiros e experiências bem sucedidas, assim como as crescentes preocupações ambientais que estão atraindo investimentos em construções de solo estabilizado (SILVA, 2001; MONTORO; SAWAYA, 2002).

## **2.5. Solo-cimento**

Solo-cimento é o material obtido pela mistura de solo, cimento Portland e água. Segundo Enteiche<sup>5</sup> apud Mercado (1990), trata-se de um processo físico-químico de estabilização, no qual as conseqüências decorrem de uma estruturação resultante da

---

<sup>5</sup> ENTEICHE, A. A. Suelo-cemento, su aplicacion en la edificación. Bogotá. CINVA, 1963.

reorientação das partículas sólidas do solo com a deposição de substâncias cimentantes nos contatos intergranulares, alterando, portanto, a quantidade relativa de cada uma das três fases (sólida, líquida e gasosa) que constituem o solo.

Este material foi empregado pela primeira vez em 1915 nos EUA, segundo Abiko (1983) pelo engenheiro Bert Reno, que pavimentou uma rua com uma mistura de conchas marinhas, areia de praia e cimento Portland, porém, só em 1935, a Portland Cement Association (PCA) iniciou pesquisas e estudos sobre essa tecnologia.

Desde então, o solo-cimento tem sido empregado principalmente na pavimentação. No entanto, Rocha (1996) relata que são conhecidas utilizações em camadas de fundações e base para pavimentos rígidos e flexíveis de estradas e aeroportos; valetas de drenagem; revestimentos de canais, diques, reservatórios e barragens de terra; estabilização e proteção superficial de taludes; fundações de edifícios; muros de arrimo e, finalmente, em alvenarias de tijolos e blocos prensados ou painéis de paredes monolíticas para construção de moradias.

Com o início dos anos 1960, o solo-cimento passou a ser estudado e aplicado com maior abrangência e no mundo todo. No Brasil, segundo Mercado (1990) a partir da década de 1970 o solo-cimento tornou-se objeto de intensas pesquisas principalmente da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia (CEPED) e no Instituto de Pesquisas e Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

A adição de cimento ao solo permite obter um material com as seguintes vantagens:

- a absorção e a perda de umidade do material não causam variações volumétricas consideráveis;
- o material não se deteriora quando submerso em água;
- aumento da resistência à compressão axial;
- em consequência de uma menor permeabilidade, é mais durável.

Abiko (1987) expõe dois processos para explicar as reações que ocorrem no mecanismo de interação entre o solo e o cimento:

- o processo primário: é constituído basicamente dos produtos das reações de hidratação do cimento Portland, ou seja, silicatos e aluminatos de cálcio hidratados;
- o processo secundário: se deve às reações entre os argilo-minerais existentes no solo e a cal (hidróxido de cálcio) liberada na hidratação do cimento.

Sabbag (1980)<sup>6</sup> apud Pinto (1998) descreveu que ocorre na interface gel-grão do solo uma combinação de ligações mecânicas com as superfícies minerais, que apresentam rugosidade, somada às ligações químicas dessa interface, pois na fração fina, a rugosidade das partículas é menor e a área superficial exposta à cimentação é infinitamente maior. Quando ocorre a formação da fase CH, os íons de cálcio encontram-se disponíveis na mistura e estes se associam à superfície dos argilo-minerais que possuem capacidade de troca de cátion. Instantes após a adição de cimento em solos argilosos, percebem-se mudanças nas propriedades do conjunto, como as alterações dos Limites de Atterberg e formação de material com aspecto granular, fato que facilita a pulverização do solo para a devida homogeneização da mistura. Tais fenômenos se devem à floculação promovida pelos íons cálcio, que atraem as partículas de argilo-minerais mantendo-as agrupadas por meio de fracas ligações químicas.

Bell e Coulthard (1990) afirmam que todos os tipos de argilo-minerais reagem com a cal livre, porém seus efeitos são mais significantes nas montmorilonitas, que são mais reativas.

O fenômeno da floculação influencia a capacidade de aglomeração do cimento segundo Sabbag (1980) apud Pinto (1998).

Além da floculação, que é um fenômeno instantâneo, ocorre que “a cal hidratada” provoca acentuada elevação da alcalinidade do solo (medida pelo pH), tornando instáveis alguns de seus constituintes. Pode ocorrer, então, o ataque parcial ao silício e ao alumínio dos minerais do solo e a combinação desses íons com o cálcio, formando compostos estáveis nessas condições, tais como silicatos e aluminatos hidratados de cálcio (GUIMARÃES, 1998).

Essa descrição se refere às reações pozolânicas, nas quais a cal, com a presença de água, e em contato com a sílica e a alumina, produz compostos estáveis e com propriedades ligantes. Herzog e Mitchel (1963) investigaram, por meio da difração de raios-X, que o solo não poderia ser classificado como um material quimicamente inerte, pois os resultados das análises apontavam um consumo gradativo do hidróxido de cálcio na presença de argilominerais.

Bell (1996) afirma que tais reações pozolânicas são dependentes do tempo transcorrido, conferindo ganho de resistência mecânica por longos períodos. Ingles (1987)

---

<sup>6</sup> SABBAG, P. Y.; Solo cimento: o estudo da retração e suas implicações - Dissertação de Mestrado São Paulo: Escola Politécnica, 1980.

relata que a cura intensa e altas temperaturas promovem reações pozolânicas e significantes desenvolvimentos da resistência mecânica.

Eades e Grim (1960) analisaram que em temperaturas maiores que 21°C, a alcalinidade pode inclusive atacar a sílica (proveniente do quartzo) da fração granular do solo, acelerando ainda mais as reações pozolânicas.

A carbonatação, combinação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente no ar atmosférico e que tende a produzir carbonato de cálcio, é outro fenômeno químico responsável pelo processo de estabilização. Embora de origem diferente da flocculação e da reação pozolânica, também tem a característica de ação imediata e está, normalmente, restrita à superfície exposta da mistura, ou da peça moldada. Guimarães (1998) e Sabbag (1980) concordam que a formação do carbonato de cálcio resulta em cimentações que acentuam a estabilidade da peça moldada, porém não desempenha papel fundamental nas características do solo-cimento.

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

- 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:  $\leq 18\%$ .

Segundo ABCP (1985), a dosagem do solo-cimento consiste em uma seqüência de ensaios seguida de uma interpretação por meio de critérios estabelecidos na experiência. O resultado de um estudo de dosagem seria a fixação de três quesitos básicos, a saber:

- o teor de cimento a ser adicionado ao solo;
- a umidade a ser incorporada na mistura;
- a massa específica desejada.

Desses três, o teor de cimento é o objetivo maior do método de dosagem, visto que a umidade e a massa específica passam a ser critérios de controle da mistura depois de fixados os seus valores.

## **2.6. Tijolos prensados de solo-cimento**

Os tijolos prensados de terra crua surgiram na década de cinquenta com o desenvolvimento da primeira prensa manual, a CINVA-Ram, na Colômbia, pelo chileno Raul



Ramirez que trabalhava no Centro Interamericano de la Vivienda (CINVA). Só mais recentemente, na década de oitenta, quando se tomou consciência de seu enorme potencial, estes produtos passaram a ser estudados mais profundamente (BARBOSA et al, 1997).

A partir da prensa manual CINVA-Ram, vários tipos de prensas, manuais e mecânicas, foram desenvolvidas e podem ser encontradas no mercado nacional e internacional (MUKERJI, 1988).

O objetivo da prensagem é reduzir o índice de vazios da mistura e aumentar sua resistência mecânica. A redução do índice de vazios é da ordem de 1:1,6 a 1:1,8 nas prensas manuais (BARBOSA, 1996).

As paredes construídas com tijolos de solo-cimento prensados têm comportamento térmico e durabilidade equivalente às construídas com tijolos ou blocos cerâmicos (CARVALHO; POROCA, 2001). Além disso, os tijolos de solo-cimento prensados podem ser utilizados em alvenaria de vedação ou estrutural, desde que atendam as resistências estabelecidas nos critérios de projeto, que devem ser os mesmos aplicados aos materiais de alvenaria convencional, bem como devem seguir as indicações de cuidados e manutenção do material.

Empregado no Brasil inicialmente na confecção de bases e sub-bases de pavimentos de rodovias, o solo-cimento começou a ser empregado em construções em 1948, quando residências feitas com paredes monolíticas foram construídas na Fazenda Inglesa, em Petrópolis (RJ). Um ano depois, foi construído o famoso Hospital Adriano Jorge, do Serviço Nacional de Tuberculose, em Manaus, edifício com 10.800 m<sup>2</sup> (BARBOSA et al, 1997).

No entanto, o solo-cimento só foi amplamente aplicado em moradias por volta de 1978, quando o antigo BNH (Banco Nacional de Habitação) aprovou a técnica para construções de habitações populares. Na época, estudos feitos pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e pelo Ceped (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento) comprovaram que, além do bom desempenho termoacústico, o solo-cimento aplicado em construções levava a uma redução de custos, se comparado com a alvenaria tradicional de tijolos de barro ou cerâmicos.

Carneiro et al. (2001) ressaltam outra vantagem dos tijolos prensados de solo-cimento: a possibilidade de incorporar outros materiais na sua fabricação, como por exemplo, agregados produzidos com entulho reciclado, rejeitos industriais (sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto forno) e resíduos agroindustriais (casca de arroz, bagaço de cana, fibras de coco e outros). Além disso, por não ser necessária a queima do tijolo, há uma expressiva

redução do consumo de energia e, por consequência, de danos ambientais para a sua fabricação.

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 solocimento) 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, não deve ser maior que 20% de seu volume, assim como nenhum valor individual deve ser superior a 22%.

Sistemas de construção de solo-cimento podem minimizar danos ambientais, baratear e dar mais agilidade às obras. A técnica é o resultado da mistura homogênea de solo, cimento e água em proporções previamente determinada, depois compactada na forma de tijolos, blocos ou paredes monolíticas. Desde que bem executado, o componente apresenta boa durabilidade e resistência à compressão.

As principais vantagens que os tijolos modulares, produzidos com controle tecnológico, apresentam em relação aos tijolos comuns são:

- texturas e medidas regulares, o que evita o desperdício de material para correções de imperfeições, além de proporcionar um bom acabamento à vista;
- seu sistema de encaixe auxilia a orientação no assentamento, evitando que a parede fique fora do prumo, e mantendo juntas regulares que evitam o surgimento de trincas e fissuras;
- o seu emprego reduz o peso da construção, pois necessita de uma menor quantidade de material para assentamento e revestimento;
- reduz o tempo para execução da obra, o que gera economia, principalmente com mão de obra;
- ajuda a manter o canteiro de obras mais limpo e organizado;
- seus furos, além de promoverem conforto termo-acústico, também formam condutores para as redes hidráulica e elétrica, evitando a quebra de paredes, além de permitirem o embutimento fácil e rápido das colunas de sustentação;

## **2.7. Uso da biomassa vegetal na obtenção de materiais de construção**

A utilização de materiais lignocelulósicos reforçando matrizes cimentícias data de longo tempo. Tais compósitos apresentam características interessantes, tais como, baixo custo, boa trabalhabilidade, boa capacidade de isolamento termo-acústico, excelente resistência ao ataque de agentes deterioradores, dentre outros (MANZANARES et al., 1988).

Outra grande vantagem desse tipo de material é que a matéria-prima vegetal pode ser proveniente de diversas fontes como da indústria canavieira, da exploração de madeira e no processamento de diversos produtos agroindustriais. Tais resíduos muitas vezes são descartados ao meio ambiente sem nenhum tipo de controle levando à poluição do solo, da água e do ar. Sendo assim esses resíduos ao serem utilizados reduzem a poluição ambiental.

Sarmiento (1996) definiu o termo geral biomassa vegetal como sendo as inúmeras variedades de matéria-prima vegetal resultantes das atividades agrícolas, florestais e agroindustriais, dentro das quais estariam compreendidas as partículas e fibras vegetais. Tal biomassa vegetal pode exercer a função de enchimento ou reforço da matriz.

A utilização da biomassa vegetal vem apresentando um grande potencial de reaproveitamento na área da construção civil, seja rural ou urbana, requerendo uma avaliação não só nos aspectos econômicos como nos aspectos tecnológicos (resistência mecânica, módulo de elasticidade, afinidade com os aglomerantes minerais, estabilidade química e geométrica, durabilidade e destino final do produto).

A idéia de se utilizar resíduos agroindustriais para a fabricação de tijolos de solo-cimento está associada, também, à baixa condutividade térmica na medida em que se aumenta o teor de resíduos (KHEDARI et al., 2005).

### **2.7.1. Casca de arroz**

Dentre as variedades da biomassa vegetal, a atividade agroindustrial de beneficiamento de arroz destaca-se pela elevada produção do resíduo casca de arroz. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2004) mostraram que o Brasil produziu cerca de 10,3 milhões de toneladas de arroz em casca no ano de 2003, o que equivale a cerca de 2,1 milhões de toneladas de casca de arroz (cascas de arroz representam cerca de 20% do peso do grão). A região sul do Brasil, no ano de 2003, foi a maior produtora nacional de arroz em casca, com aproximadamente 57% da produção total do país.

Ainda concernente à fabricação de materiais de menor impacto ambiental, a utilização conjunta de resíduos vegetais, como a casca de arroz e matrizes cimentantes, tem-se revelado uma alternativa em potencial.

Silveira et al. (1996) definiram a casca de arroz como sendo uma capa lenhosa oca, dura e altamente silicosa, composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra. Sob o aspecto econômico e tecnológico, a casca de arroz viabiliza a confecção de materiais de baixo custo, pois atua como material de enchimento ou até mesmo de substituição parcial da matéria prima (agregado miúdo) utilizada em materiais de construção convencionais. Já sob o aspecto ambiental, a utilização da casca de arroz permite o controle e a minimização do descarte, do lançamento ou da queima indiscriminada.

Um dos problemas principais da casca está relacionado à sua baixíssima densidade aparente, em torno de 0,12 a 0,14, sendo o primeiro valor o mais utilizado para cálculos práticos. Considerando que um metro cúbico comporta tão somente 120 kg de casca, pode-se imaginar a preocupação causada no armazenamento e no transporte (CONSELHO DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 1985).

Têm surgido alternativas, a exemplo das briquetadeiras que, mediante pressão exercida por um pistão, adensam a casca, gerando uma peça de forma cilíndrica de aproximadamente 10 cm de diâmetro por 1 m de comprimento. Outra alternativa é a moagem da casca. Através dessa operação dá-se a diminuição da casca, reduzindo assim sua densidade aparente.

Segundo o Conselho de Desenvolvimento Industrial (1985), a casca de arroz é correntemente queimada a céu aberto ou utilizada como combustível (queima da casca em fornalhas para secagem de grãos), produzindo toneladas de cinzas que acabam poluindo o meio ambiente.

Uma experiência industrial importante de adensamento pode permitir a existência de outros empreendimentos, dentro da idéia que o rejeito de uma indústria pode ser o insumo da outra.

### **2.7.2. Casca da semente do capim *Brachiaria***

O gênero *Brachiaria* vem impondo-se pela notável capacidade de domínio ecológico em solos ácidos e de baixa fertilidade, sendo que as espécies *B. decumbens* e,

recentemente, *B. brizantha* vem trazendo solução provisória para a produção animal nos cerrados (ROCHA 2005).

No Brasil, cerca de 40 milhões de hectares são cobertos por pastagens de braquiárias, que formam extensos monocultivos, especialmente na região central e na Amazônia. Observa-se uma expansão na área cultivada com *B. brizantha* cv. Marandu, e os resultados evidenciam características promissoras (MACEDO 1995). O processo mais apropriado para a formação de pastagens com esse tipo de braquiária é através de sementes (NUNES et al. 1984).

A espécie *Brachiaria brizantha* é uma gramínea perene originária na África, encontrada nas regiões tropicais, propagada por sementes, com hábito de crescimento cespitoso (ROCHA, 2005). A espécie apresenta potencial de produção, vigor de rebrota e qualidade de forragem muito satisfatória e boa relação folha/haste (SILVA, 1995). São plantas que se adaptam às diversas regiões de solo e clima, sendo pouco tolerantes a temperaturas baixas. Possui aproximadamente 88% de matéria seca, 7 % de proteína bruta, 22% de fibra em detergente neutro, 26% de açúcares, 1% de amido e 33% de fibra solúvel em detergente neutro (HALL, 2001).

Balsalobre et al. (2001) relataram que a maior parte das gramíneas tropicais tem potencial para ensilagem, entretanto, plantas com maior proporção de folhas devem ser preferidas. Essas plantas, além de melhor qualidade, apresentam maiores teores de matéria seca, em especial o gênero *Brachiaria*, que se constituem em opção favorável à elevada relação folha/caule.

A expansão das áreas com esta espécie tem aumentado consideravelmente devido a uma série de características favoráveis, com destaque para boa tolerância às cigarrinha-das-pastagens (BOTREL et al., 1998).

Segundo Nussio (2002a), no Brasil tropical são semeados anualmente cerca de 5,5 milhões de hectares de pastagens perenes, incluindo formação, renovação ou recuperação, e que nos anos mais recentes predomina o interesse pela *Brachiaria brizantha* cv. Marandu que contempla mais de 50% do mercado de sementes das gramíneas forrageiras tropicais.

Áreas de pastagens formadas principalmente por *Brachiaria decumbens* e *B. brizantha* vem sendo, alternativamente, utilizadas para a produção de silagens, com produção semelhante ao gênero *Panicum*, e valor nutritivo ligeiramente superior (NUSSIO et al., 2002b).

Resíduos oriundos das usinas de beneficiamento durante as etapas de pré-limpeza, secagem, limpeza e peneiramento de sementes como as do capim braquiária podem ser

utilizados e, portanto aproveitados. A casca que envolve a semente, na maioria das vezes, pela inexistência de um aproveitamento mais adequado, é descartada. O volume de casca após o beneficiamento varia de acordo com o grau de pureza que a semente possui ao vir do campo de produção, e também com o grau de pureza que se quer dar ao produto (semente comercial) beneficiado.

### **2.7.3. Incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento**

De acordo com diversos pesquisadores, as principais vantagens que o compósito apresenta na aplicação como material de construção são: leveza, bom isolamento térmico, relevante absorção acústica, considerável resistência à tração e grande disponibilidade de matéria-prima para sua confecção. Porém, segundo vários pesquisadores, a maior desvantagem está na incompatibilidade entre a biomassa vegetal e a matriz cimentante (MILANI, 2005).

As fibras vegetais são compostas por grande número de células fibrosas, aglomeradas por meio de substâncias intercelulares amorfas. Os principais constituintes das fibras são a celulose, a hemicelulose e a lignina. Além destes, as fibras contêm numerosas substâncias naturais tais como: taninos, resinas e extrativos. A biomassa vegetal se degrada em meio alcalino devido às substâncias presentes na mesma (principalmente lignina e hemicelulose) que sofrem decomposição química (hidrólise, lixiviação), e, em conseqüência, destroem o arranjo estrutural das fibras (AGOPYAN, 1991). Assim, a capacidade de reforço das fibras e a resistência mecânica do compósito diminuem e, conseqüentemente, o produto final apresenta instabilidade dimensional.

Além do problema da degradação da biomassa vegetal em meio alcalino, os constituintes das fibras vegetais (em particular os açúcares), em contato com a água de amassamento, solubilizam-se e inibem a pega do cimento, o que afeta negativamente as reações de hidratação do cimento (tempo e temperatura máxima de hidratação). Beraldo (1997a) afirmou que os fatores que afetam a compatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento são: escolha da natureza da biomassa vegetal, época de corte, tipo de estocagem e distribuição em tamanho (comprimento e diâmetro) das partículas vegetais.

Para se avaliar a compatibilidade entre a biomassa vegetal e o cimento, os ensaios laboratoriais mais utilizados são: a determinação do calor de hidratação e a verificação do

comportamento mecânico da mistura mediante ensaios de compressão simples ou de tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos (MILANI, 2005).

Pesquisas realizadas por Zucco (1999) confirmaram o efeito da granulometria de partículas vegetais nas características de hidratação do cimento. A mistura de casca de arroz moída, nas frações granulométricas definidas de 10 mm, 5 mm e 3 mm, com pasta de cimento (CP V-ARI) e 3% de cloreto de sódio, revelou que, quanto mais finas fossem as partículas utilizadas na mistura, maior seria o aumento no tempo necessário para ocorrer o pico de temperatura e, conseqüentemente, a diminuição substancial da temperatura máxima de hidratação.

Latorraca (2000), variando o tipo de cimento, espécies de madeira *Eucalyptus* e a granulometria de partículas do compósito cimento-madeira, concluiu que, dentro das características da termometria (temperatura máxima de hidratação e tempo para atingir máxima temperatura) e resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos, o cimento Portland ARI foi o mais adequado para o uso em chapas de cimento-madeira. Com relação às espécies de madeira, as *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus urophylla* foram as que apresentaram os melhores resultados em termos de temperatura e tempo de hidratação do cimento e compressão axial, dentre as espécies estudadas. Contudo, a granulometria das partículas teve influência significativa na resistência à compressão axial, tendo aquelas de tamanho intermediário proporcionado resistências mais elevadas.

Outro ensaio freqüentemente utilizado para a caracterização de compósitos é a aplicação de técnicas não destrutivas como ultra-som, que consiste na emissão de um impulso de vibração longitudinal, produzido por um transdutor eletroacústico que deve ser mantido em contato com o material. O impulso vibratório é, então, captado por outro transdutor, sendo convertido em sinal elétrico e em unidades de tempo. Este tempo de propagação do som no material (e a conseqüente velocidade) pode caracterizar o material, servindo de parâmetro para avaliação das suas propriedades mecânicas (BERALDO, 1997b). Segundo o autor, o ensaio revela grandes potencialidades sempre que venha acompanhado de correlações com outros ensaios preferencialmente destrutivos.

Martins (2002), estudando compósitos à base de argamassa reforçada com partículas de bambu, encontrou forte correlação matemática entre os dados de velocidade ultra-sônica e os de resistência à compressão simples, sendo a curva de potência o modelo de regressão que melhor se adequou à dispersão dos dados.

#### 2.7.4. Tratamentos para minimizar a incompatibilidade entre a biomassa e o produto cimentante

Diversos estudos visando minimizar o efeito negativo das substâncias inibidoras contidas na biomassa vegetal em presença do cimento apresentaram como solução, pré-tratamentos físicos e/ou químicos para as partículas vegetais.

Beraldo (1997a) indicou os seguintes tratamentos: lavagem das partículas em água quente ou solução aquosa, que permite a remoção de extrativos que se solubilizam na água, e a utilização de aceleradores de pega (como o cloreto de cálcio, sulfato de alumínio e silicato de sódio), que fazem com que o cimento se hidrate antes que os constituintes das partículas vegetais afetem a reação de hidratação do cimento. Alguns autores citados por Agopyan (1991) sugeriram a impregnação das partículas vegetais com agentes repelentes à água (como o neutrol) ou a impregnação das mesmas (“mineralização”) com agentes bloqueadores das reações de decomposição (como silicatos e sulfatos de sódio, magnésio ou alumínio).

Análises de resíduos agroindustriais, após lavagem a quente, mostraram que o teor de carboidratos solúveis (CHOS), presentes no bagaço de cana-de-açúcar, foi reduzido em 88%, enquanto óleos e resinas encontrados no pó de serra e casca de arroz foram eliminados, minimizando em grande parte as possíveis reações inibitórias com a matriz de cal (AKASAKI; SILVA, 2001).

Beraldo e Zucco (1998) estudaram a viabilidade do uso de casca de arroz em compósito à base de cimento Portland e verificaram a potencialidade apresentada pelo resíduo vegetal, já que a incompatibilidade entre a casca de arroz e o cimento pode ser contornada com o uso de técnicas simples, como a lavagem da biomassa vegetal em solução aquosa ou adição de aceleradores de pega do cimento.

Estudando a influência de aditivos químicos tais como o  $\text{SnCl}_2$ , sulfato de alumínio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)$ , cloreto de ferro  $\text{FeCl}_3$ , nitrato de zinco  $\text{Zn}(\text{NO}_3)$ , nitrato de ferro  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , cloreto de alumínio  $\text{AlCl}_3$ , Diethanolamine (DEA) e cloreto de cálcio  $\text{CaCl}_2$  nas reações de hidratação ocorrentes na mistura de madeira, cimento e água, Zhengtian e Moslemi (1985) concluíram que a utilização destes aceleradores resultou na redução significativa dos efeitos inibitórios de substâncias da madeira “western larch” (*Larix occidentalis*) na reação de hidratação do cimento, destacando-se o acelerador  $\text{CaCl}_2$  (5% em massa) que, dentre os aditivos estudados, provocou a elevação da temperatura máxima de hidratação em  $59^\circ\text{C}$  e a diminuição do tempo de reação em oito horas.



Para a melhoria do processo de hidratação do cimento em compósitos à base de cimento, areia e serragem, Rashwan et al. (1992) adicionaram às misturas os aceleradores químicos  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$  e  $\text{Na}_2\text{S}$ , e constataram que, dentre estes, o  $\text{CaCl}_2$  foi o que resultou em melhores efeitos positivos no processo de hidratação do cimento, além de apresentar o menor custo.

O comportamento compatível com os estudos realizados por Latorraca (2000) apontou que a adição de  $\text{CaCl}_2$  (4%) em compósitos de cimento e madeira (*Eucalyptus*) foi o aditivo que melhor desempenhou a função de acelerador de pega dentre os aditivos estudados.

Beraldo et al. (2000b) pesquisaram mais profundamente os efeitos da espécie vegetal, do tipo de cimento e do tratamento químico utilizado, sobre a resistência à compressão de compósitos. As espécies vegetais escolhidas para a mistura com pasta de cimento (CP V-ARI e CP II-E-32) foram provenientes de resíduos de fabricação de lápis (*Pinus caribaea*), de serrarias (*Eucalyptus saligna*, *Erisma uncinatum*, *Cedrela* sp) e bambu (*Dendrocalamus giganteus*). Estas passaram por seis tipos de tratamentos que consistiram: utilização natural das partículas vegetais; natural com adição de acelerador  $\text{CaCl}_2$ ; natural com adição de acelerador  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ; lavagem das partículas vegetais em água quente por um período de 2 h a  $80^\circ\text{C}$ ; lavagem e adição de  $\text{CaCl}_2$ ; lavagem e adição de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Dentre estes tratamentos, a combinação de lavagem das partículas vegetais e adição de 3% de cloreto de cálcio permitiu homogeneizar a resistência dos compósitos à compressão, independente da espécie vegetal utilizada.

Aplicando o pré-tratamento que compreendeu a imersão das fibras de bagaço de cana-de-açúcar em água fervente durante 30 minutos, e o tratamento químico de “mineralização”, que consistiu na imersão das fibras em solução de silicato de sódio e posteriormente em solução de sulfato de alumínio, Mesa-Valenciano e Freire (1999) conseguiram reduzir os teores de açúcar residual encontrados no bagaço e diminuir a capacidade de absorção d’água das fibras de bagaço de cana-de-açúcar após tratamento químico.

Zucco (1999) submeteu diferentes frações de casca de arroz a alguns tratamentos para minimizar a incompatibilidade química entre a matriz cimentante e a biomassa vegetal, visando à fabricação de placas de compósito à base de cimento Portland e casca de arroz. Após prensagem e cura das placas, essas foram submetidas a ensaios de compressão paralela, tendo os dados obtidos mostrado que os melhores resultados foram alcançados pelos compósitos fabricados com partículas de casca de arroz lavadas em solução de cal. Esse

tratamento permitiu a remoção de extrativos que solubilizam-se na água e inibem a hidratação do cimento.

### **2.7.5 Classificação dos resíduos agroindustriais quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública**

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

A casca de arroz e a casca do capim braquiária são consideradas como resíduos de classe II A, ou seja, não inertes e não perigosos à saúde humana e ao meio ambiente. O problema é que, quando incinerados em ambiente fechado (caldeiras e fornos, por exemplo), resultam em cinzas que podem ser tóxicas e prejudiciais ao homem. Assim, a utilização desses resíduos como matéria-prima de materiais de construção constitui uma alternativa para a diminuição da poluição no meio ambiente.

## **2.8. Clima, conforto e desempenho térmico de materiais de construção**

O clima, segundo Rivero (1986), é o conjunto de fenômenos meteorológicos que definem a atmosfera de um lugar determinado. O clima é guiado pela energia do sol, sendo que os fatores-chaves são: temperatura, umidade, pressão atmosférica, nuvem, velocidade do vento e nível das marés.

As condições climáticas variam ao longo das 24 horas do dia e ao longo do ano, dependendo da latitude, altitude e outras características locais que definem o clima da região (COSTA, 1982).

O clima interfere na vida do homem, assim se torna necessário conhecer os dados climáticos da região em que se pretendem desenvolver pesquisas que possam ter relação com estas variáveis. Conforme Cachine (2005), o estudo do tempo e do clima ocupa uma posição central e importante no campo da ciência ambiental, relacionando-os com biosfera, hidrosfera e litosfera. Assim, o clima influencia as plantas, os animais, o homem e o solo.

Givoni (1992) afirma que o clima de certa região é determinado pelas variações dos diversos elementos e suas combinações, e que os principais elementos que devem ser considerados no projeto de uma edificação são: radiação solar, comprimento da onda da radiação solar, temperatura do ar, umidade, ventos e chuvas.

Segundo Cunha (2004), os fatores climáticos são importantes para se definir o clima do local. A interação dos fatores é que define as variáveis e o desempenho térmico da edificação. As variáveis climáticas mais significativas para se definir o microclima em estudo são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar, condições de vento, precipitação, iluminância natural.

Segundo Evans e Schiller (1994), através do estudo do clima se avalia o impacto do mesmo no ser humano, definindo-se o grau de conforto ou desconforto, e identificando as modificações desejáveis para melhorar as condições de habitabilidade e conforto em um ambiente.

Como os estímulos que contribuem para a sensação de conforto térmico são em grande parte decorrentes da interação entre os componentes da edificação e os elementos climáticos, é indispensável uma avaliação acurada e sistemática dos mecanismos que comandam essa interação relacionada ao conforto. Assim sendo, torna-se importante realizar a identificação correta dos elementos que caracterizam o clima da localidade em estudo (SHALDERS NETO, 2003).

A sensação de conforto térmico é definida como o estado mental que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa (ASHRAE, 2004), ou seja, conforto térmico é a satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente.

O conforto térmico depende de variáveis físicas ou ambientais e também de variáveis subjetivas ou pessoais. As principais variáveis físicas que influenciam no conforto térmico são: temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade do ar e velocidade relativa do ar. As variáveis pessoais envolvidas são: atividade desempenhada pela pessoa e vestimenta utilizada pela pessoa. Ainda há as variáveis características individuais, aspectos psicológicos, culturais e hábitos (FANGER, 1970).

A avaliação de desempenho térmico de uma edificação pode ser feita tanto na fase de projeto, quanto após a construção. Em relação à edificação construída, a avaliação pode ser feita através de medições “in-loco” de variáveis representativas do desempenho, enquanto que na fase de projeto esta avaliação pode ser feita por meio de simulação computacional ou através da verificação do cumprimento de diretrizes construtivas.

Sendo o conforto térmico fundamental em uma habitação, várias instituições no mundo e pesquisadores iniciaram estudos nesta área, avaliando o desempenho térmico das habitações e definindo parâmetros de conforto.

Há pouco mais de vinte anos, no Brasil, se intensificaram os estudos com relação ao desempenho térmico de habitações, em especial das chamadas habitações de interesse social. Os grupos de pesquisadores que iniciaram estudos neste campo e podem ser destacados são: o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), de São Paulo, o grupo de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC) e o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE), da Universidade Federal de Santa Catarina (BARBOSA, 1997).

A eficiência energética de uma edificação está diretamente relacionada ao seu desempenho térmico.

Segundo dados do “Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica” PROCEL apud Grillo (2005), as edificações residenciais e comerciais são responsáveis por, aproximadamente, 48% do consumo de energia elétrica no país. Grande parte dessa energia é consumida na geração do conforto ambiental. Tal situação é atribuída ao fato de não serem considerados, desde o projeto arquitetônico, passando pela construção, até a utilização final, os importantes avanços ocorridos nas áreas de arquitetura bioclimática, materiais, equipamentos e tecnologias construtivas, vinculados à eficiência energética. Novos conceitos de projetos sustentáveis indicam as possibilidades de integração da natureza com os materiais e técnicas construtivas, resultando em ambientes confortáveis, energeticamente eficientes e com baixo custo de manutenção. Do mesmo modo, é possível encontrar soluções para reabilitação ambiental de edifícios existentes, otimizando a iluminação natural, com o uso de conceitos e tecnologias inovadoras e preservando sua arquitetura original.

Cabe salientar que no condicionamento de ar o desperdício é grande, e as maneiras de reduzir o consumo são factíveis e sem grandes investimentos. O emprego de materiais com maior resistência térmica pode representar uma grande redução no consumo de energia elétrica em edificações com climatização, e representar um maior conforto dos ocupantes em edificações sem condicionamento.

## 2.9. Zoneamento Bioclimático Brasileiro

Para caracterizar o clima das diversas regiões do globo, este é dividido em zonas de climas similares, chamadas regiões climáticas. No Brasil, dada a sua grande extensão territorial e a sua localização entre dois trópicos, vários tipos diferentes de clima são identificados (LAMBERTS, 1997).

A norma NBR 15220-3 da ABNT (2005a) estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro, visando embasar as recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social. Este zoneamento compreende oito diferentes zonas, conforme representado na Figura 2.2.

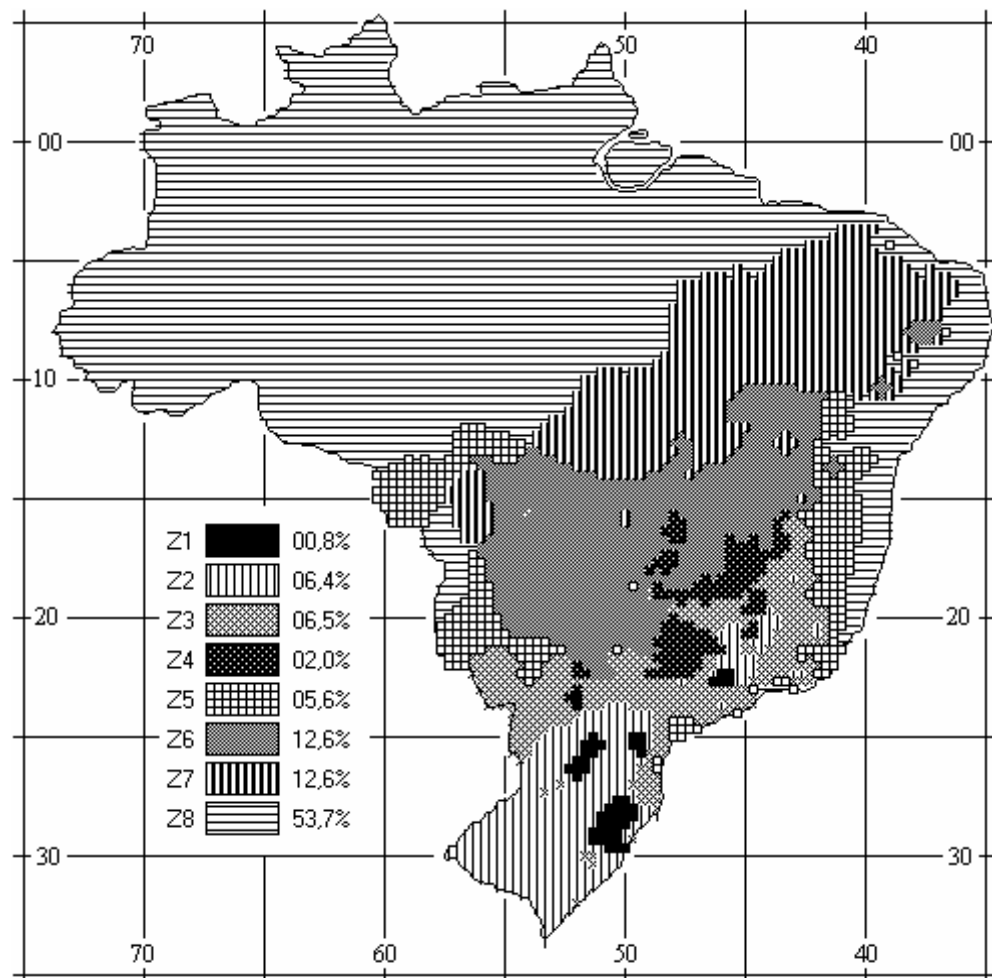


Figura 2.2 Zoneamento bioclimático brasileiro – NBR 15220-3 (ABNT, 2005a).

A Tabela 2.1 apresenta as recomendações construtivas para vedações externas para cada zona bioclimática brasileira e também algumas cidades que se enquadram. As vedações externas tidas como leve, leve refletora e pesada estão relacionadas à sua inércia térmica.

Tabela 2.1 Recomendações construtivas para vedações externas para cada zona bioclimática brasileira.

Zona bioclimática	Vedações externas (paredes)	Principais cidades e capitais
Zona 1	Leve	Curitiba-PR, Campos de Jordão-SP, Poços de Caldas-MG, São Joaquim-SC, Caxias do Sul-RS.
Zona 2	Leve	Pelotas-RS, Piracicaba-SP, Ponta Grossa-PR, São João Del Rei-MG, Nova Friburgo-RJ, Laguna-SC.
Zona 3	Leve refletora	Belo Horizonte-MG, Ponta Porã-MS, Petrópolis-RJ, São Paulo-SP, Porto Alegre-RS, Florianópolis-SC, Foz do Iguaçu-PR.
Zona 4	Pesada	Brasília-DF, Patos de Minas-MG, Ribeirão Preto-SP, São Carlos-SP, Luziânia-GO,
Zona 5	Leve refletora	Vitória da Conquista-BA, Governador Valadares-MG, Niterói-RJ, Araçatuba-SP.
Zona 6	Pesada	Goiânia-GO, Campo Grande-MS, Montes Claros-MG, Presidente Prudente-SP.
Zona 7	Pesada	Cuiabá-MT, Teresina-PI, Imperatriz-MA, Petrolina, PE, Porto-Nacional-TO.
Zona 8	Leve refletora	Manaus-AM, Salvador-BA, Fortaleza-CE, São Luiz-MA, Belém-PA, Recife-PE, Aracajú-SE, Natal-RN, Porto Velho-RO, Rio de Janeiro-RJ

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005a).

## 2.10. 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 obedecem aos princípios de condicionamento térmico natural e nas avaliações de desempenho térmico de edificações.

As principais propriedades termofísicas dos materiais e componentes de construção estão relacionadas à condutividade térmica, calor específico, resistência térmica, capacidade térmica, atraso térmico, transmitância térmica e fator de calor solar. A seguir são descritas essas principais propriedades de acordo com a NBR 10520-1 (ABNT, 2005b) e NBR 10520-2 (ABNT, 2005c).

### a) Condutividade térmica ( $\lambda$ )

A condutividade térmica (W/m.K) é o quociente do fluxo de calor pelo gradiente de temperatura nos corpos-de-prova, conforme a Equação 2.1:

$$\lambda = \frac{q/A}{\Delta T/e} \quad (2.1)$$

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);

$\Delta T$  = diferença de temperatura entre as faces (em K).

O fluxo de calor é calculado pela Equação 2.2:

$$q = \frac{\lambda \cdot A}{e} \Delta T \quad (2.2)$$

### b) Resistência térmica (R)

A resistência térmica (m.K)/W de uma camada homogênea de material sólido é obtido pela Equação 2.3.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (2.3)$$

### 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 2.4 e 2.5.

##### c 1.1. Resistência térmica de superfície a superfície (R<sub>t</sub>)

A resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano constituído de camadas homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela Equação 2.4.

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} \quad (2.4)$$

Onde:

$R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{tn}$  = resistências térmicas das n camadas homogêneas, determinadas pela Equação 2.6;

##### c 1.2. Resistência térmica de ambiente a ambiente (R<sub>T</sub>)

A resistência térmica de ambiente a ambiente é dada pela Equação 2.5.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (2.5)$$

onde:

$R_t$  = resistência térmica de superfície a superfície, determinada pela Equação 2.4;

$R_{se}$  e  $R_{si}$  = resistências superficiais externas e internas, respectivamente, obtidas da Tabela 2.2.

De acordo com NBR 15220 (ABNT, 2005), 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 2.2 apresenta valores médios recomendados.



Tabela 2.2 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: NBR 15220 (ABNT 2005).

### 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 2.6 e 2.7.

#### c.2.1 Resistência térmica de 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, são determinadas pela Equação 4.6.

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (2.6)$$

Onde:

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

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

#### c.2.2 Resistência térmica de ambiente a ambiente ( $R_T$ )

A resistência térmica de ambiente a ambiente é dada pela Equação 2.7.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (2.7)$$

Onde:

$R_t$  = a resistência térmica de superfície a superfície, determinada pela Equação 3.10;

$R_{se}$  e  $R_{si}$  = as resistências superficiais externa e interna, respectivamente, obtidas da Tabela 3.4.

#### 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 2.8.

$$U = 1 / R_T \quad (2.8)$$

#### 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 2.9.

$$C_T = e.c.\rho \quad (2.9)$$

Onde:

$e$  = espessura do material, em metros;

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

$\rho$  = massa específica aparente, em  $kg/m^3$ .

##### e.2. Componentes com camadas homogêneas e não homogêneas

A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogênea e não homogênea perpendicular ao fluxo de calor, é determinada pela Equação 2.10.

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (2.10)$$

Onde:

$CT_a, CT_b, \dots$  , = as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n);

$CT_n$

$A_a, A_b, \dots, A_n$  = as 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 ( $\varphi$ )

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 2.11 e 2.12.

$$\varphi = 1,382.e.\sqrt{\frac{\rho.c}{3,6.\lambda}} \quad (2.11)$$

$$\varphi = 0,7284.\sqrt{R_t.C_T} \quad (2.12)$$

onde

$\varphi$  = atraso térmico;

e = espessura da placa;

$\lambda$  = condutividade térmica do material;

$\rho$  = densidade de massa aparente do material;

c = calor específico do material;

$R_t$  = resistência térmica de superfície a superfície do componente;

$C_T$  = capacidade térmica do componente.

### 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 2.13.

$$FS = 100.U.\alpha.R_{se} \quad (2.13)$$

onde:

FS = fator solar em percentagem;

U = transmitância térmica do componente;

$\alpha$  = absorptância à radiação solar – função da cor;

$R_{se}$  = resistência superficial externa, dada pela Tabela 2.2.

Como  $R_{se}$  é admitido constante e igual a 0,04, a Equação 2.13 pode ser rescrita na forma da Equação 2.14.

$$FS = 4.U. \alpha \quad (2.14)$$

Quando se deve respeitar um limite de fator solar para uma determinada região, pode-se determinar o máximo valor de  $\alpha$  em função do fator solar e da transmitância térmica, conforme mostra a Equação 2.15.

$$\alpha \leq FS / (4.U) \quad (2.15)$$

#### 4.10.1 Desempenho térmico de paredes

A condição essencial para a transmissão de calor é que os corpos tenham temperaturas diferentes. A Figura 2.3 exemplifica esta afirmação.

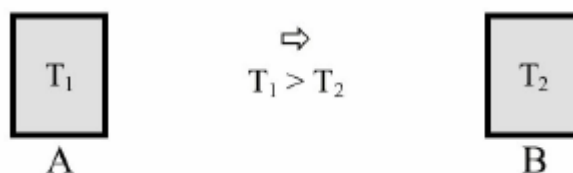


Figura 2.3 Condição para transferência de calor.

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 2.4 apresenta o sentido do fluxo de calor em função da diferença de temperatura externa e interna.

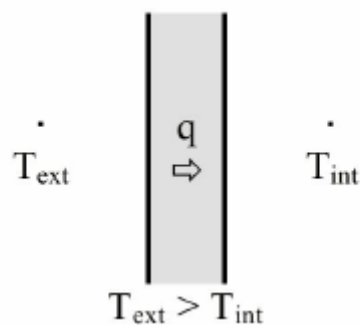


Figura 2.4 Transferência de calor em uma parede.

Fonte: Lamberts et al (2003).

A Equação 4.16 representa a densidade de fluxo de calor que atravessa a parede.

$$q = U \cdot (T_{ext} - T_{int}) = U \cdot T \quad (2.16)$$

onde:

$U$  = transmitância térmica ( $W/m^2.K$ );

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

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

Todas as propriedades térmicas calculadas são para um regime estacionário de transmissão de calor, que se caracteriza por apresentar temperaturas constantes, que não variam com o tempo, e conseqüentemente 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 2.17.

$$Q = q \cdot A \cdot \Delta T \cdot A \quad (2.17)$$

Porém, o fluxo de calor não é função apenas de  $\Delta T$ . 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.

## **2.10.2. Formas de transmissão de calor**

### 2.10.2.1 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 (FERREIRA, 2003).

### 2.10.2.2 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 (FERREIRA, 2003).

### 2.10.2.3 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 (FERREIRA, 2003).

As propriedades da superfície receptora são representadas pela emissividade ( $\epsilon$ ) (ou poder emissivo) do corpo (Tabela 2.3).

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 absorvidade ( $\alpha$ ) (Tabela 2.4).

### 2.10.2.4 Condensação

O ar, a uma temperatura determinada, pode conter apenas 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 (FERREIRA, 2003).

Tabela 2.3 Emissividade de superfícies.

Tipo de superfície	$\epsilon$
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,12
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”	0,50
verde escuro	0,90
- vermelha	0,90
- preta	0,90

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005a).

Tabela 2.4 Absortância de cores e superfícies.

Tipo de superfície	$\alpha$
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: NBR 15220 (ABNT, 2005a).

### 2.10.3 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 2.5.

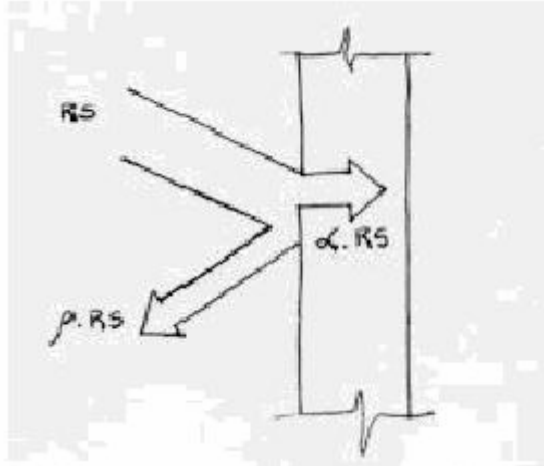


Figura 2.5 Radiação solar em superfícies opacas.

Fonte: Lamberts et al. (2003).

A Equação 4.18 mostra o balanço térmico para a Figura 2.5.

$$\alpha.RS + \rho.RS = RS \quad \alpha + \rho = 1 \quad (2.18)$$

onde:

RS = radiação solar;

$\alpha$  = absorvidade solar (função da cor);

$\rho$  = refletividade solar.

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 2.17 pode ser reescrita na forma da Equação 2.19.

$$Q = U.\Delta T.A = U.A.(T_{\text{sol-ar}} - T_{\text{int}}) \quad (2.19)$$



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 o absorvância ( $\alpha$ ) e a emissividade ( $\epsilon$ ) do material. A temperatura sol-ar é dada pela Equação 2.20.

$$T_{\text{sol-ar}} = T_{\text{ext}} + \alpha \cdot R_S \cdot R_{\text{se}} - \epsilon \cdot \Delta R_L \cdot R_{\text{se}} \quad (2.20)$$

onde:

$R_S$  = radiação total incidente na superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

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

$\Delta R_L$  = 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 ( $\Delta R_L$ ) 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 4.20 pode ser reescrita na forma da Equação 2.21.

$$T_{\text{sol-ar}} = T_{\text{ext}} + \alpha \cdot R_S \cdot R_{\text{se}} \quad (2.21)$$

Assim, substituindo-se a temperatura sol-ar na Equação 2.19, o fluxo de calor em planos verticais (paredes) será dado pela Equação 2.22.

$$Q = U \cdot A \cdot (T_{\text{ext}} + \alpha \cdot R_S \cdot R_{\text{se}} - T_{\text{int}}) \quad (2.22)$$

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 condutividade 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 quanto à transmissão de calor por condução.

Os valores de condutividade térmica e calor específico para diversos materiais de construção de uso corrente em função de sua massa específica aparente são encontrados na Tabela 2.5.

A Tabela 2.6 apresenta valores de transmitância, capacidade térmica e atraso térmico para paredes comumente utilizadas em edificações brasileiras. A Tabela 2.7 apresenta as propriedades térmicas dos materiais utilizados nos componentes da Tabela 2.6.

A Tabela 2.8 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 2.5 Massa específica aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico de materiais ( $c$ ).

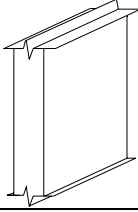
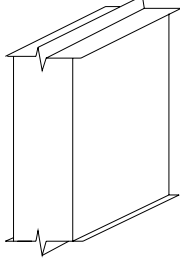
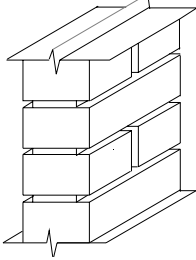
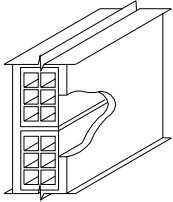
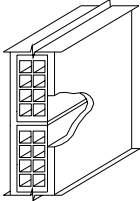
<b>Material</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\lambda</math> (W/(m.K))</b>	<b><math>c</math> (kJ/(kg.K))</b>
<b>Argamassas</b>			
argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,70	0,84
argamassa celular	600-1000	0,40	1,00
<b>Cerâmica</b>			
tijolos 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
<b>Cimento-amianto</b>			
placas de fibro-cimento	1800-2200	0,95	0,84
	1400-1800	0,65	0,84
<b>Concreto (com agregados de pedra)</b>			
concreto normal	2200-2400	1,75	1,00
concreto cavernoso	1700-2100	1,40	1,00
<b>Concreto com pozolana ou escória expandida com estrutura cavernosa (<math>\rho</math> dos inertes ~750 kg/m<sup>3</sup>)</b>			
com finos	1400-1600	0,52	1,00
	1200-1400	0,44	1,00
sem finos	1000-1200	0,35	1,00
<b>Concreto com argila expandida</b>			

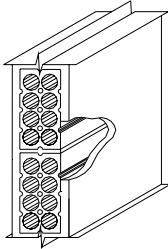
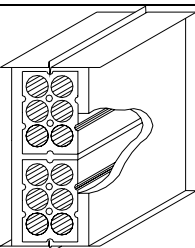
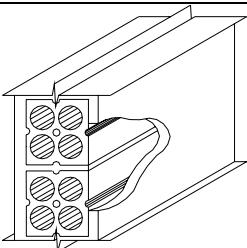
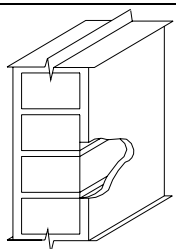
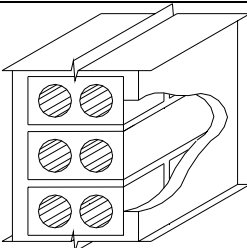
dosagem de cimento > 300 kg/m <sup>3</sup> , ρ dos inertes > 350 kg/m <sup>3</sup>	1600-1800	1,05	1,00
	1400-1600	0,85	1,00
	1200-1400	0,70	1,00
	1000-1200	0,46	1,00
dosagem de cimento < 250 Kg/m <sup>3</sup> , ρ dos inertes < 350 Kg/m <sup>3</sup>	800-1000	0,33	1,00
	600-800	0,25	1,00
	< 600	0,20	1,00
concreto de vermiculite (3 a 6 mm) ou perlite 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
<b>Gesso</b>			
Projetado ou de densidade massa aparente elevada placa de gesso; gesso cartonado	1100-1300	0,50	0,84
	750-1000	0,35	0,84
com agregado leve (vermiculita ou perlita expandida)	700-900	0,30	0,84
	dosagem gesso:agregado = 1:1	500-700	0,25
	dosagem gesso:agregado = 1:2		0,84
<b>Granulados</b>			
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
<b>Impermeabilizantes</b>			
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
<b>Isolantes térmicos</b>			
lã de rocha	20-200	0,045	0,75
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
<b>Madeiras e derivados</b>			
madeiras com densidade de massa aparente elevada	800-1000	0,29	1,34
	carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus	600-750	0,23
		450-600	0,15
		300-450	0,12
aglomerado de fibras de madeira (denso)	850-1000	0,20	2,30
aglomerado de fibras de madeira (leve)	200-250	0,058	2,30

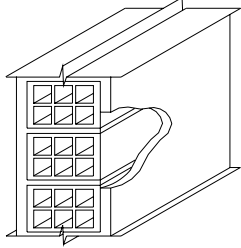
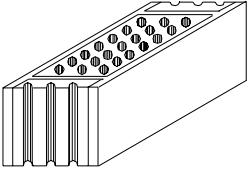
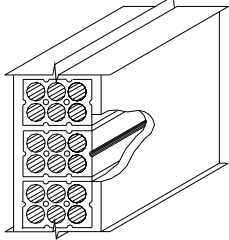
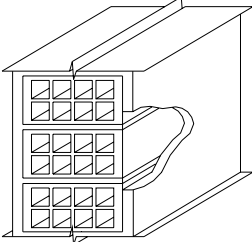
aglomerado de partículas de madeira	650-750	0,17	2,30
	550-650	0,14	
placas prensadas	450-550	0,12	2,30
	350-450	0,10	2,30
placas extrudadas	550-650	0,16	2,30
compensado	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
	250-350	0,10	2,30
palha (capim Santa Fé)	200	0,12	
<b>Metais</b>			
aço, ferro fundido	7800	55	0,46
Alumínio	2700	230	0,88
Cobre	8900	380	0,38
Zinco	7100	112	0,38
<b>Pedras (incluindo junta de assentamento)</b>			
granito, gneisse	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
<b>Plásticos</b>			
borrachas sintéticas, poliamidas, poliésteres, polietilenos	900-1700	0,40	
polimetacrilicos de metila (acrílicos)			
policloreto de vinila (PVC)	1200-1400	0,20	
<b>Vidro</b>			
chapa de vidro comum	2700	1,10	0,84

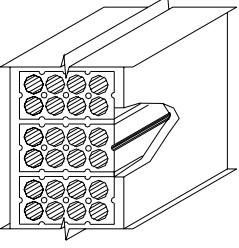
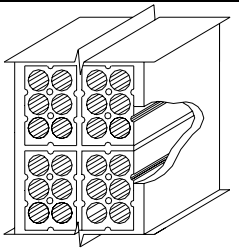
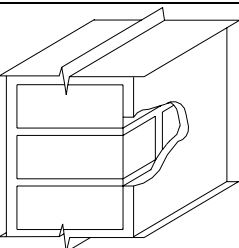
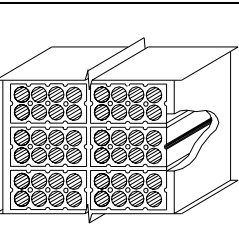
Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005c).

Tabela 2.6 Transmitância (U), capacidade térmica ( $C_T$ ) e atraso térmico ( $\phi$ ) para algumas paredes.

Parede	Descrição	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	$C_T$ [kJ/(m <sup>2</sup> .K)]	$\phi$ [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 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 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
	Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão Dimens. tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm 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

	<p>Parede de tijolos de 8 furos circulares, assentados na menor dimensão</p> <p>Dimens. tijolo: 10,0x20,0x20,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assent.: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 15,0 cm</p>	2,24	167	3,7
	<p>Parede de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão</p> <p>Dimens. tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assent.: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 15,0 cm</p>	2,28	168	3,7
	<p>Parede com 4 furos circulares</p> <p>Dimensões do tijolo: 9,5x9,5x20,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assentamento: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 14,5 cm</p>	2,49	186	3,7
	<p>Parede de tijolos maciços, assentados na menor dimensão</p> <p>Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assentamento: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 15,0 cm</p>	3,13	255	3,8
	<p>Parede de tijolos com 2 furos circulares</p> <p>Dimensões do tijolo: 12,5x6,3x22,5 cm</p> <p>Espessura arg. de assentamento: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p>	2,43	220	4,2

	<p>Parede de tijolos de 6 furos quadrados, assentados na maior dimensão          Dimens. tijolo: 9,0x14,0x19,0 cm          Espessura arg. assentam.: 1,0 cm          Espessura arg. de emboço: 2,5 cm          Espessura total da parede: 19,0 cm</p>	2,02	192	4,5
	<p>Parede de tijolos de 21 furos circulares, assentados na menor dimensão          Dimens. tijolo: 12,0x11,0x25,0 cm          Espessura arg. de assent.: 1,0 cm          Espessura arg. de emboço: 2,5 cm          Espessura total da parede: 17,0 cm</p>	2,31	227	4,5
	<p>Parede de tijolos de 6 furos circulares, assentados na maior dimensão          Dimens. tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm          Espessura arg. de assent.: 1,0 cm          Espessura arg. de emboço: 2,5 cm          Espessura total da parede: 20,0 cm</p>	1,92	202	4,8
	<p>Parede de tijolos de 8 furos quadrados, assentados na maior dimensão          Dimens. tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm          Espessura arg. de assent.: 1,0 cm          Espessura arg. de emboço: 2,5 cm          Espessura total da parede: 24,0 cm</p>	1,80	231	5,5

	<p>Parede de tijolos de 8 furos circulares, assentados na maior dimensão</p> <p>Dimens. tijolo: 10,0x20,0x20,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assent.: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 25,0 cm</p>	1,61	232	5,9
	<p>Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão</p> <p>Dimens. tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assent.: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 26,0 cm</p>	1,52	248	6,5
	<p>Parede de tijolos maciços, assentados na maior dimensão</p> <p>Dimens. tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assent.: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 27,0 cm</p>	2,25	445	6,8
	<p>Parede dupla de tijolos de 8 furos circulares, assentados na maior dimensão</p> <p>Dimens. tijolo: 10,0x20,0x20,0 cm</p> <p>Espessura arg. de assent.: 1,0 cm</p> <p>Espessura arg. de emboço: 2,5 cm</p> <p>Espessura total da parede: 46,0 cm</p>	0,98	368	10,8

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005a).



Tabela 2.7 Propriedades térmicas dos materiais utilizados nos componentes da Tabela 2.6.

<b>Material</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\lambda</math> (W/(m.K))</b>	<b>c (kJ/(kg.K))</b>
Cerâmica	1600	0,90	0,92
Argamassa de emboço ou assentamento	2000	1,15	1,00
Concreto	2400	1,75	1,00

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005a).

Tabela 2.8 Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.

<b>Vedações externas</b>		<b>Transmitância Térmica - U</b> W/m <sup>2</sup> .K	<b>Atraso Térmico - <math>\phi</math></b> Horas	<b>Fator de Calor Solar - FCS</b> %
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	$U \leq 2,30.FT$	$\phi \leq 3,3$	$FCS \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	$FCS \leq 6,5$

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005a).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil e no Laboratório de Mecânica dos Solos, ambos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás - UFG, na Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da UFG em Goiânia – GO e em Furnas Centrais Elétricas S/A em Aparecida de Goiânia.

#### **3.1. MATERIAIS**

##### **3.1.1. Solo**

Foi utilizado um solo predominantemente arenoso classificado como  $A_{4(0)}$  segundo a AASHTO (“American Association of State Highway and Transportation Officials”).

As amostras de solo foram coletadas na região oeste de Goiânia a uma profundidade superior a 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.

##### **3.1.2. Cimento**

Foi utilizado o cimento Portland CP II-F-32 da marca GOIÁS, cujas características físicas, químicas e mecânicas atenderam aos requisitos da norma NBR 5735 (ABNT, 1991). A escolha do cimento CII-F-32 deveu-se à sua maior disponibilidade no comércio sendo adquirido em casa idônea do ramo da construção civil.

##### **3.1.3. Água**

Em todo experimento foi utilizado água tratada fornecida pela rede pública de abastecimento.

### 3.1.4. Resíduos vegetais

Os resíduos vegetais cascas de arroz foram obtidos em usinas de beneficiamento de arroz e da casca da semente do capim braquiária em usinas de beneficiamento do capim da região de Goiânia (Figuras 3.1 e 3.2).



Figura 3.1 Resíduo casca de arroz.



Figura 3.2 Resíduo casca de capim braquiária.

### 3.1.5. Equipamentos de laboratório

#### 3.1.5.1. Caracterização do solo e dos resíduos agroindustriais

Para a realização dos ensaios de caracterização do solo e dos resíduos agroindustriais os seguintes equipamentos do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFG foram empregados:

- Para análise granulométrica conjunta: conjunto de peneiras; agitador de peneiras; escova; destorroador; balança com precisão de 0,01g; cilindros graduados de 1000 cm<sup>3</sup>; densímetro; liquidificador; termômetro; cronômetro e espátula;

- Para determinação da massa específica dos grãos do solo: picnômetro de 500 ml; liquidificador; manta elétrica; estufa; balança com precisão de 0,01g e termômetro;

- Para determinação dos limites de consistência do solo: aparelho de Casagrande; cinzel; espátula; bisnaga; tigela de porcelana; cápsulas; balança com precisão de 0,01g; placas de vidro e estufa;

- Para a realização dos ensaios de compactação de Proctor normal: molde cilíndrico com 942,47 cm<sup>3</sup>, base e colar; soquete de 1,9 kg; extrator de amostras; balança com

capacidade de até 20 kg; balança com precisão 0,01g; régua metálica; cápsulas; espátulas e estufa.

#### 3.1.5.2. Ensaaios mecânicos

Para os ensaios de compressão axial simples dos corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos modulares de solo-cimento-resíduos foi utilizada uma máquina universal de ensaios marca DYNATEST, com dispositivo de controle de velocidade de carregamento e capacidade de 2000 kN do Laboratório de Materiais de Construção da UFG (Figura 3.3).

#### 3.1.5.3. Fabricação dos tijolos

Os tijolos foram moldados no Laboratório de Engenharia Rural da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da UFG com o auxílio de uma máquina de fabricação de tijolos modulares prensados manualmente com capacidade de fabricação de dois tijolos por prensagem com dimensões de 23x11x5 cm<sup>3</sup> da marca GTW de acordo com a Figura 3.4.



Figura 3.3 Máquina universal de ensaios.



Figura 3.4 Máquina para fabricação de tijolos (marca GTW).

#### 3.1.5.4. Ensaaios termofísicos

Para a determinação da resistência e condutividade térmica dos tijolos foi utilizada a Caixa Quente Protegida (Figura 3.5), do Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas

Construtivos, FURNAS S/A. Para a determinação do calor específico dos tijolos foi utilizado o calorímetro do Laboratório do Instituto de Física II da UFG (Figura 3.6).



Figura 3.5 Caixa quente protegida – vista lateral. Figura 3.6 Calorímetro.

## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. Procedimentos aplicados ao solo

Após a coleta do solo, o mesmo foi encaminhado ao Laboratório de Solos da EEC-UFG, onde foi passado na peneira nº 4 (abertura de malha igual a 4,76 mm), e acondicionado em sacos plásticos até o momento de ser utilizado. As amostras do solo foram submetidas aos ensaios de caracterização, a saber:

- Determinação dos seus teores de umidade em estufa a 105 °C, durante 24 h (método gravimétrico);
- 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 6508 (ABNT, 1984b);
- Determinação dos limites de liquidez de acordo com a NBR 06459 (ABNT, 1984c) e de plasticidade dos solos, de acordo com a NBR 07180 (ABNT, 1984d);

- Ensaio de compactação de Proctor, para a determinação da massa específica aparente seca máxima do solo natural e das misturas solo-cimento-resíduo vegetal e da umidade ótima correspondente, de acordo com a norma NBR 07182 (ABNT, 1986);
- Análise química do solo, realizada em laboratório credenciado pelo Ministério da Agricultura e Reforma Agrária.

### 3.2.2. Procedimentos aplicados aos resíduos

Os procedimentos aplicados aos resíduos, constaram das seguintes etapas:

- Trituração em moinho de martelo e peneiramento (fração utilizável das cascas compreendida entre 4,8 mm e 0,42 mm de aberturas de malha) para eliminação dos finos, uniformização e melhoria da adesão das cascas ao sistema solo-cimento;
- Imersa, em solução de cal concentrada a 5% por um período de 24 horas, de acordo com as recomendações de Silva e Freire (2004). Tal procedimento foi necessário a fim de se evitar a incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o aglomerante mineral;
- Determinação da massa unitária de acordo com a NBR 07251 (ABNT, 1982) e análise granulométrica de acordo com a NBR 07217 (ABNT, 1987).

As Figuras 3.7 e 3.8 mostram os resíduos após os tratamentos.



Figura 3.7 Resíduo casca de arroz após o tratamento.



Figura 3.8 Resíduo casca da semente do capim braquiária após tratamento.

### 3.2.3. Determinação dos tratamentos

Foi utilizado o teor de 10% de cimento baseado nas recomendações da ABCP (1972) levando em consideração a massa específica aparente seca máxima e o teor de silte e argila do solo conforme Figura 3.9.

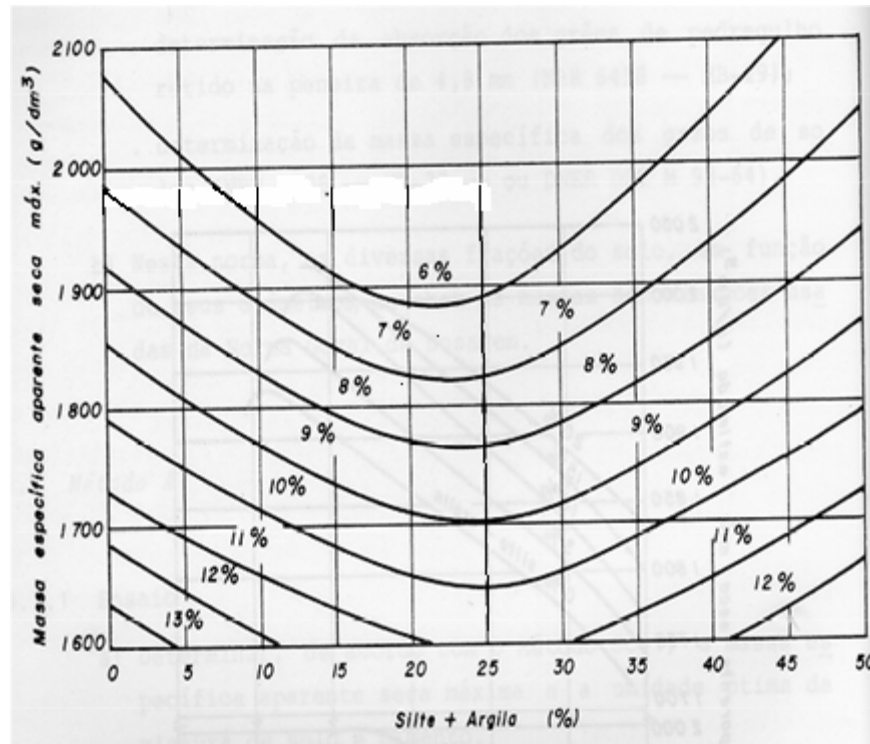


Figura 3.9 Teor de cimento em função da densidade seca e da percentagem de silte e argila (ABCP, 1972).

Os teores de resíduos foram definidos em função daqueles estudados por Silva e Freire (2003). Os resíduos foram adicionados em substituição ao cimento, e assim diminuindo o teor de cimento de 10% até 6%. As cascas de arroz e da semente do capim braquiária constituem material inerte não exercendo atividade pozolânica.

Dessa forma, foram variados os teores de cimento e de resíduo desde 100% de cimento e 0% de resíduo, até 60% de cimento e 40% de resíduo conforme se segue:

- T<sub>1</sub> – solo + 10% de adições (0% de resíduo e 100% de cimento);
- T<sub>2</sub> – solo + 10% de adições (10% de casca de arroz e 90% de cimento);
- T<sub>3</sub> – solo + 10% de adições (20% de casca de arroz e 80% de cimento);
- T<sub>4</sub> – solo + 10% de adições (30% de casca de arroz e 70% de cimento);

- T<sub>5</sub> - solo + 10% de adições (40% de casca de arroz e 60% de cimento);
- T<sub>6</sub> – solo + 10% de adições (10% de casca de braquiária e 90% de cimento);
- T<sub>7</sub> – solo + 10% de adições (20% de casca de braquiária e 80% de cimento);
- T<sub>8</sub> – solo + 10% de adições (30% de casca de braquiária e 70% de cimento);
- T<sub>9</sub> – solo + 10% de adições (40% de casca de braquiária e 60% de cimento).

#### 3.2.4. Aplicação dos tratamentos

O cimento foi aplicado ao solo que correspondeu à fração menor que 4,76 mm (100% passando em peneira nº 4), no seu teor de umidade natural, e a ele foram incorporados os resíduos vegetais. O teor de 10% de adições foi adicionado em relação ao peso do solo seco e misturado até perfeita homogeneização.

#### 3.2.5. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento-resíduo

Os corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cimento-resíduo vegetal foram moldados de acordo com os procedimentos indicados pela norma NBR 12024 (ABNT, 1990a). 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% e não maior que 105% em relação aos valores de massa específica aparente seca máxima obtida nos ensaios de compactação de Proctor normal, de acordo com as recomendações de Bueno e Vilar (1999). Os valores do GC (%) foram obtidos pela Equação 3.1.

$$GC(\%) = \left( \frac{\gamma_c}{\gamma_s} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Em que:

$\gamma_c$  = massa específica aparente seca do corpo-de-prova, em g.cm<sup>-3</sup>;

$\gamma_s$  = massa específica aparente seca máxima do solo obtida pelo ensaio de compactação normal de Proctor, em g.cm<sup>-3</sup>.



Após a moldagem os corpos-de-prova foram curados durante períodos de 7, 28 e 56 dias, após os quais foram rompidos à compressão simples, conforme a NBR 12025 (ABNT, 1990b). A quantidade de corpos-de-prova moldada e ensaiada encontra-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Número total de corpos-de-prova cilíndricos moldados e ensaiados.

TRATAMENTO	Quantidade de corpos-de-prova				Total Geral
	Ensaio de compressão simples			Ensaio de absorção de água	
	7 dias	28 dias	56 dias	Somente aos 7 dias	
T <sub>1</sub> <sup>1</sup>	3	3	3	3	12
T <sub>2</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>3</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>4</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>5</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>6</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>7</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>8</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>9</sub>	3	3	3	3	12
<b>Totais de corpos-de-prova</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>108</b>

### 3.2.6 Ensaio de compressão axial simples dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento-resíduos

A determinação da resistência à compressão simples foi feita de acordo com a NBR 12025 (ABNT, 1990b) A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área de sua seção transversal (Figura 3.10). A resistência média foi determinada pela média aritmética de 03 repetições.



Figura 3.10 Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão.

### 3.2.7 Ensaio de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento-resíduos

Para o ensaio de absorção de água os corpos-de-prova cilíndricos foram imersos totalmente em água durante 24 horas, após um período de cura de 7 dias completos (Figura 3.11).

Os corpos-de-prova foram pesados antes e depois da imersão em água, anotando-se suas massas úmida e saturada. Posteriormente, foram secos em estufa a 105 °C, (Figura 3.12) 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 determinado de acordo com a Equação 3.2.

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} 100 \quad (3.2)$$

Em que:

$M_1$  = massa do tijolo seco em estufa, em gramas

$M_2$  = massa do tijolo saturado, em gramas

A = absorção de água, em percentagem



Figura 3.11 Corpos-de-provas cilíndricos imersos em água por 24 h.



Figura 3.12 Corpos-de-prova cilíndricos secos em estufa a 105° C.

### 3.2.8 Moldagem e cura dos tijolos de solo-cimento-resíduo

Os tijolos referentes a cada tratamento foram moldados de acordo com a norma NBR 10832 (ABNT, 1989). Uma vez preparada a mistura de solo-cimento-resíduo (Figura 3.13), os tijolos foram moldados no teor de umidade ótima de compactação, adicionando-se aos poucos a água de amassamento até se obter uniformidade de mistura para colocação nas fôrmas (Figura 3.14). Após a prensagem, os tijolos foram levados à sombra para cura durante os períodos de 7, 28 e 56 dias (Figura 3.15) e (Figura 3.16).

A fim de garantir que os tijolos fossem submetidos à energia de compactação semelhante à do Proctor normal, procedeu-se a 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 cada período de cura, os tijolos foram rompidos à compressão simples.



Figura 3.13 Mistura manual do solo-cimento-resíduo.



Figura 3.14 Colocação da mistura solo-cimento-resíduo na fôrma.



Figura 3.15 Fabricação dos tijolos.



Figura 3.16 Tijolos após serem prensados submetidos à cura.

A quantidade de tijolos moldados e ensaiados encontra-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Quantidade de tijolos de solo-cimento e de solo-cimento-resíduo moldados e ensaiados.

TRATAMENTO	Quantidade de tijolos				Total Geral
	Ensaio de compressão simples			Ensaio de absorção de água	
	7 dias	28 dias	56 dias	Somente aos 7 dias	
T <sub>1</sub> <sup>1</sup>	3	3	3	3	12
T <sub>2</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>3</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>4</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>5</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>6</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>7</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>8</sub>	3	3	3	3	12
T <sub>9</sub>	3	3	3	3	12
<b>Totais de tijolos</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>108</b>

### 3.2.9 Ensaio de compressão simples dos tijolos modulares de solo-cimento e solo-cimento-resíduo

Os tijolos foram preparados de acordo com os procedimentos indicados pela norma NBR 08492 (ABNT, 1984f). 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 (Figura 3.17). Em seguida, foi feito o capeamento das faces superior e inferior e das reentrâncias dos tijolos, com a mesma pasta de cimento (Figura 3.18). A resistência média foi determinada pela média aritmética de 03 repetições.



Figura 3.17 Tijolo sendo serrado ao meio.



Figura 3.18 Tijolo sob compressão.

### 3.2.10 Ensaio de absorção de água dos tijolos modulares de solo-cimento e solo-cimento-resíduo

O ensaio de absorção de água dos tijolos foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 08492 (ABNT, 1984f). 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 (Figura 3.19). 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 3.20). Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela Equação 3.2.



Figura 3.19 Tijolos secos em estufa.



Figura 3.20 Tijolos imersos em água.

### 3.2.11 Confeção das paredes de solo-cimento e solo-cimento-resíduo para os ensaios de condutividade térmica

Para realização dos ensaios de condutividade térmica foram confeccionadas duas paredes: uma com os tijolos da mistura solo-cimento – Tratamento  $T_1$  (solo + 10% de cimento), e outra com os tijolos da mistura solo-cimento-resíduo - Tratamento  $T_2$  (solo + 10% de adições: 90% de cimento e 10% de casca de arroz), ambas com dimensão 2,39x 2,39 m (Figura 3.21), seguindo às dimensões da caixa quente protegida do laboratório em FURNAS.

Foi empregada argamassa de assentamento de 2 mm de espessura composta de cimento, areia e aditivo para dar maior trabalhabilidade à mistura. Um prumo de pedreiro foi utilizado para garantir a verticalidade das paredes.

Após o assentamento dos tijolos as paredes foram rejuntadas com a mesma argamassa de assentamento a fim de eliminar os espaços vazios entre uma face e outra para não haver passagem de ar durante o ensaio. Em seguida as paredes tiveram sua superfície lixada para remover todo excesso de argamassa (Figura 3.22).

Terminada a confecção das paredes, termopares foram fixados com resina epóxi em cada face da parede para o ensaio termofísico da caixa quente protegida (Figura 3.23).



Figura 3.21 Confeção das paredes.



Figura 3.22 Acabamento na superfície da parede.



Figura 3.23 Fixação dos termopares.

A quantidade de tijolos confeccionados para ensaio das paredes encontra-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Quantidade de tijolos confeccionados para cada parede.

<b>Tratamento</b>	<b>Quantidade de tijolos</b>
$T_1^1$	400
$T_2$	400
<b>Totais de tijolos</b>	800

### 3.2.12 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 realizada 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 (Figura 3.24 e 3.25).





Figura 3.24 Cilindros prontos.



Figura 3.25 Vista superior dos cilindros prontos.

Para tal foram seleccionados tijolos moldados para esse fim. Após a sua escolha os mesmos foram serrados até a obtenção de cubos, a partir dos quais os cilindros foram obtidos. As Figuras 3.26 e 3.27 mostram as etapas para confecção dos cilindros.



Figura 3.26 Tijolo sendo serrado.



Figura 3.27 Acabamento superficial do cilindro.

Pode-se determinar o calor específico de um material com a ajuda de um aparelho denominado calorímetro. Um calorímetro é um recipiente isolado termicamente do meio externo onde se podem colocar líquidos e sólidos para que troquem calor entre si com perda mínima para o meio ambiente.

O calorímetro participa das trocas de calor entre os corpos nele colocados até que todos estejam à mesma temperatura, ou seja, atinjam equilíbrio térmico. Essa participação é determinada através da grandeza física denominada de capacidade térmica “C”.

A capacidade térmica de um corpo é definida como sendo o produto de sua massa pelo seu calor específico (Equação 3.3).

$$C = m.c \quad (3.3)$$

Onde,

C = capacidade térmica em J/k;

m= massa em g;

c = calor específico J/g.k.

A capacidade térmica de um calorímetro é a soma das capacidades térmicas das partes que o constituem, tais como: agitador, resistência elétrica para aquecimento e o próprio termômetro utilizado para medir as temperaturas.

Considere um calorímetro contendo em seu interior certa massa de água e que ambos estejam a temperatura  $T_o$ . Se um corpo à temperatura  $T_c$  ( $T_c > T_o$ ) é imerso na água do calorímetro, ocorrerão trocas de calor até que a água e o corpo atinjam uma mesma temperatura de equilíbrio térmico,  $T_{eq}$ .

Então, o calor específico do corpo pode ser dado pela Equação 3.4.

$$c = \frac{(C_{\text{calorímetro}} + m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}}) \cdot (T_{eq} - T_o)}{m_c \cdot (T_c - T_{eq})} \quad (3.4)$$

Onde:

$m_c$  = massa do corpo em g;

c = calor específico do corpo em J/g.k;

$T_c$  = temperatura inicial do corpo em K;

$T_{eq}$  = temperatura de equilíbrio do sistema em K;

$C_{\text{calorímetro}}$  = capacidade térmica do calorímetro em J/k

$T_o$  = temperatura inicial do calorímetro com água em K;

$m_{\text{água}}$  = massa de água dentro do calorímetro em g;

$C_{\text{água}}$  = calor específico da água, J/g.k;

### 3.2.13 Determinação das propriedades termofísicas

A determinação das propriedades termofísicas dos tijolos foi feita a partir do ensaio de condutividade térmica pelo método da caixa quente protegida, de acordo com as prescrições da norma NBR 6488 (ABNT, 1980); e do ensaio de calor específico, mediante os procedimentos da ASTM C-351-922b (ASTM, 1999).

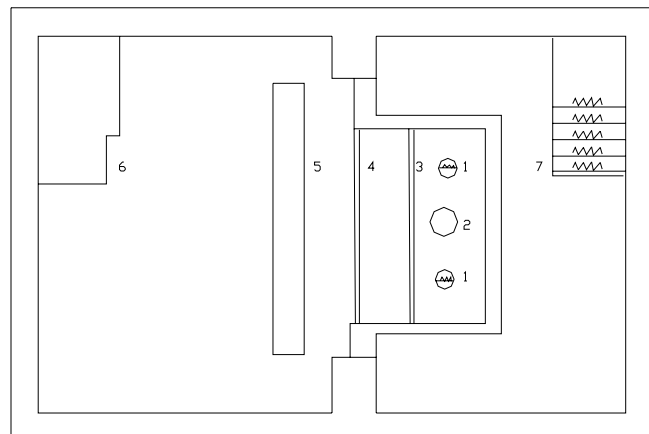
A NBR 6488 descreve o “método da caixa quente protegida” para determinação da condutância e transmitância térmicas, para medições em painéis não homogêneos representativos de construções, tais como paredes, janelas, tetos e pisos de edificações.

O método da caixa quente protegida consiste em essência num arranjo por meio do qual uma diferença de temperatura estacionária desejada pode ser estabelecida e mantida através de um painel-ensaio por um período de tempo no qual se consegue medir o fluxo de calor. O fluxo de calor “q”, contudo, não pode ser diretamente medido. A fim de determinar “q” uma caixa de medidas de cinco lados é colocada com seu lado aberto contra a face aquecida do painel-ensaio.

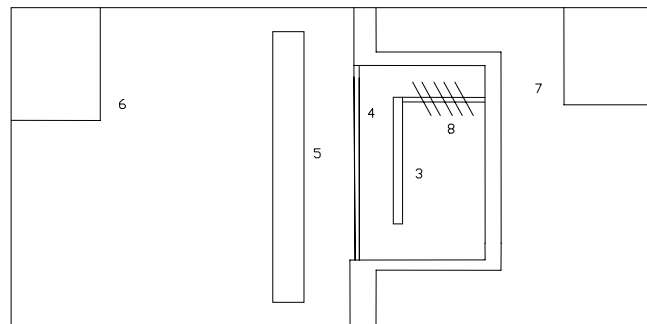
De acordo com NBR 6488, as paredes da caixa de medidas devem possuir uma condutância térmica não maior que  $1,2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . O fornecimento de calor e a circulação de ar devem ser tais que forneçam um movimento de ar brando e uniforme sobre a área de medida do painel. Um termostato foi usado para controlar a temperatura do ar da caixa de medidas e o fornecimento de calor. Por conveniência a ligação do termostato foi ajustada externamente.

Os cantos de contato da caixa de medidas devem manter, por meio de uma gacheta ou outro meio, uma união hermética com a superfície do painel.

Para a determinação da condutância “C” e a transmitância “U” dos painéis, é necessário conhecer a área “A”, o fluxo de calor “q” e as diferenças de temperatura, todas devendo ser determinadas em condições tais que o fluxo de calor seja constante. A Figura 3.28 mostra uma amostragem esquemática do painel-ensaio e dos vários elementos principais da aparelhagem.



(a)



(b)

Onde:

1 – Resistor  
2 – Ventilador  
3 – Chicanas  
4 – Amostra

5 – Chicanas  
6 – Sistema de refrigeração  
7 – Sistema de aquecimento  
8 – Chicanas de tábuas

Figura 3.28 Arranjo esquemático da montagem da caixa quente protegida (adaptado de ABNT, 1980): (a) vista superior; (b) vista lateral.

Se idealmente as temperaturas dentro da caixa de medidas e no espaço vizinho que constitui a câmara quente são as mesmas, então nenhuma troca de calor entre a caixa de medidas e o espaço vizinho pode ocorrer e o calor introduzido na caixa de medidas é uma medida do fluxo de calor através da área conhecida do painel.

Após a construção, os painéis foram mantidos em ambiente de laboratório e em seguida colocados entre as caixas quente e fria com uma orientação correspondente às reais circunstâncias de seu uso. Posteriormente foram fixados os termopares (Figura 3.23).

Foram ensaiados os tijolos correspondentes ao Tratamento T<sub>1</sub> – solo + 10% adições (100% de cimento + 0% de resíduo) e ao Tratamento T<sub>2</sub> – solo + 10% adições (90% de cimento + 10% de casca de arroz), pois foram os tratamentos que obtiveram melhor desempenho mecânico quanto nos ensaios de compressão axial e absorção de água.

A partir dos valores da condutividade térmica e do calor específico obtidos durante os ensaios, e mediante aos procedimentos recomendados pelas NBR 15220-1 (ABNT, 2005 b) e NBR 15220-2 (ABNT, 2005 c) foram determinadas as seguintes propriedades termofísicas dos tijolos:

- resistência térmica, em (m<sup>2</sup>.K)/W (Equação 5.10);
- capacidade térmica, em kJ/kg (Equação 5.13);
- atraso térmico, em horas (Equação 5.15);

A partir da simulação teórica de uma parede de tijolos obtidos dos tratamentos T<sub>1</sub> (solo + 10% de cimento), e outra com os tijolos da mistura solo-cimento-resíduo e T<sub>2</sub> (solo + 10% de adições: 90% de cimento e 10% de casca de arroz) foram determinadas as seguintes propriedades termofísicas:

- resistência térmica total, em (m<sup>2</sup>.K)/W (Equação 3.11);
- transmitância térmica, em W/(m<sup>2</sup>.K) (Equação 3.12);
- capacidade térmica da parede; em kJ/(m<sup>2</sup>.K) (Equação 3.14);
- atraso térmico da parede, em horas (Equação 3.16);
- fator de calor solar, em % (Equação 3.17).

#### **3.2.14. Adequação da alvenaria de solo-cimento-resíduo ao zoneamento bioclimático brasileiro**

A partir dos valores calculados na simulação de uma parede de tijolos de solo-cimento-resíduo (T1 e T2) foi feita a verificação da adequação desses valores àqueles recomendados na Tabela 3.7.

### 3.3 Planejamento experimental

Os resultados experimentais foram analisados por meio de tratamento estatístico, sendo que o planejamento experimental correspondeu a um esquema fatorial  $2 \times 5 \times 3$ , delineado inteiramente casualizado, com três repetições. Os fatores de variação foram os tipos de resíduos, em dois níveis (cascas de arroz e de braquiária), teores de resíduos, em cinco níveis (0%, 10%, 20%, 30% e 40% de resíduo), e as idades de ruptura, em três níveis (7, 28 e 56 dias).

Foi realizada uma análise de variância para avaliar o efeito da interação entre os fatores sobre as variáveis respostas resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água. As médias obtidas foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Em todos os casos, o número de repetições para cada mistura de solo-cimento-resíduo foi igual a três.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos resíduos

#### 4.1.1 Casca de arroz

A casca de arroz em sua condição natural caracterizou-se como sendo um material leve, com massa unitária de  $0,086 \text{ g.cm}^{-3}$ , e de granulometria uniforme (89% compreendida entre as peneiras de 2,00 mm e 1,19 mm).

Depois de passar pelos processos de fracionamento, peneiramento e pré-tratamento, a massa unitária da casca de arroz aumentou para  $0,152 \text{ g.cm}^{-3}$ . Cerca de 90% da sua massa apresentou-se com diâmetro variando de 1,19 mm a 0,42 mm, representando uma melhor distribuição da fração utilizável, a eliminação de finos e o aumento de sua superfície específica, melhorando a adesão ao solo-cimento (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Distribuição granulométrica da casca de casca de arroz.

Natural			Triturada e tratada		
Abertura da malha (mm)	% Retida	% Acumulada	Abertura da malha (mm)	% Retida	% Acumulada
4,76 (# 4) <sup>1</sup>	0,11	0,11	4,76 (# 4)	0	0
2,00 (# 10)	41,17	41,28	2,00 (# 10)	0,51	0,51
1,19 (# 16)	48,70	89,98	1,19 (# 16)	17,28	17,79
0,59 (# 30)	8,74	98,72	0,59 (# 30)	62,17	79,96
0,42 (# 40)	0,57	99,29	0,42 (# 40)	11,14	91,1
Fundo	0,71	100,0	Fundo	8,9	100

<sup>1</sup> Os valores em parênteses se referem à numeração das peneiras de acordo com a NBR 07181 (ABNT, 1984a).

A Figura 4.1 ilustra a distribuição granulométrica da casca de arroz, no seu estado natural, em relação à porcentagem de casca que passa pelas peneiras.

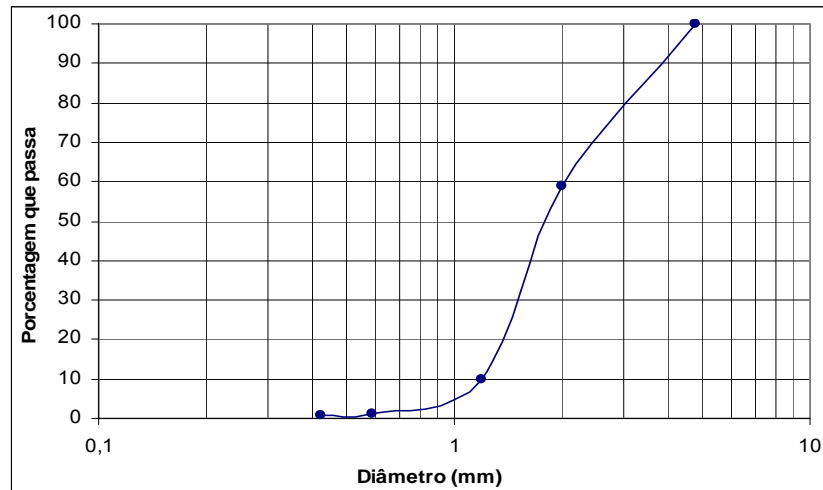


Figura 4.1 Distribuição granulométrica da casca de arroz no estado natural.

A Figura 4.2 ilustra a distribuição granulométrica da casca de arroz, após ser triturada e tratada, em relação à porcentagem de casca que passa pelas peneiras.

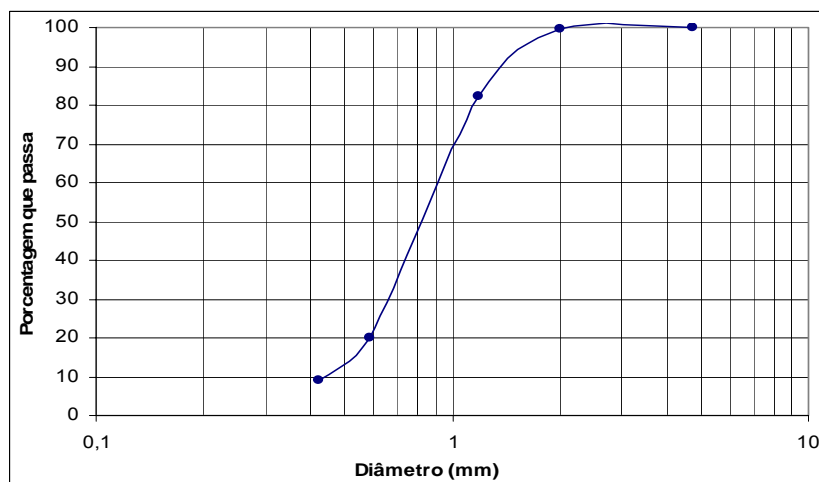


Figura 4.2 Distribuição granulométrica da casca de arroz, após ser triturada e tratada.

#### 4.1.2 Casca da semente do capim braquiária

A casca da semente de braquiária em sua condição natural caracterizou-se como sendo um material leve com massa unitária de  $0,059 \text{ g.cm}^{-3}$ , e de granulometria uniforme (91% compreendido entre as peneiras de 2,00 mm e 1,19 mm).

Depois de passar pelos processos de fracionamento, peneiramento e pré-tratamento, a massa unitária aumentou para  $0,096 \text{ g.cm}^{-3}$ . Cerca de 83% da sua massa



apresentou-se com diâmetro variando de 2,00 mm a 0,105 mm, representando uma melhor distribuição da fração utilizável, e eliminação de finos e o aumento de sua superfície específica, melhorando a adesão ao solo-cimento (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 Distribuição granulométrica do resíduo casca da semente braquiária.

Natural			Triturada e tratada		
Abertura da malha (mm)	% Retida	% Acumulada	Abertura da malha (mm)	% Retida	% Acumulada
4,76 (# 4) <sup>1</sup>	0,05	0,05	4,76 (# 4)	0,0	0,0
2,00 (# 10)	76,09	76,14	2,38 (# 8)	27,31	27,31
1,19 (# 16)	15,35	91,49	1,19 (# 16)	32,34	59,65
0,59 (# 30)	6,76	98,25	0,59 (# 30)	23,41	83,06
0,42 (# 40)	0,95	99,20	0,42 (# 40)	8,42	91,48
Fundo	0,80	100,0	Fundo	8,52	100,0

<sup>1</sup> Os valores em parênteses se referem à numeração das peneiras de acordo com a NBR 07181 (ABNT, 1984a).

A Figura 4.3 ilustra a distribuição granulométrica da casca da semente de braquiária, no seu estado natural, em relação à porcentagem de casca que passa pelas peneiras.



Figura 4.3 Distribuição granulométrica da casca da semente de braquiária no estado natural.

A Figura 4.4 ilustra a distribuição granulométrica da casca da semente de braquiária, após ser triturada e tratada, em relação à porcentagem de casca que passa pelas peneiras.

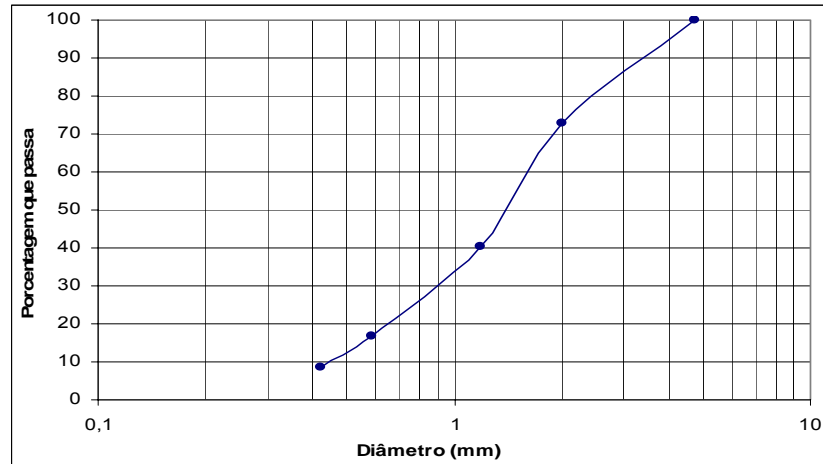


Figura 4.4 Distribuição granulométrica da casca da semente de braquiária, após ser triturada e tratada.

## 4.2 Caracterização do solo

Na Tabela 4.3 encontram-se as características físicas do solo estudado. Após a realização dos ensaios e obtenção dos resultados de granulometria e limites de consistência, o solo foi classificado como A<sub>4</sub>, segundo a AASHTO (“American Association of State Highway and Transportation Officials”). O solo natural apresentou as características preconizadas pela ABCP (1985), para ser utilizado em misturas de solo-cimento. A porcentagem do solo que passou na peneira ABNT 4,8 mm (# 4) foi de 100%, a porcentagem que passou na peneira ABNT 0,075 mm (# 200) ficou entre o intervalo de 10% e 50%; o limite de liquidez ficou abaixo de 45% e o índice de plasticidade ficou abaixo 18%.

Tabela 4.3 Características físicas do solo estudado.

<b>Parâmetros</b>		
Índices físicos	Umidade natural (%)	1,42
	Massa específica dos grãos do solo (g.cm <sup>-3</sup> )	2,91
	Limite de Liquidez (%)	20,10
	Limite de Plasticidade (%)	16,30
	Índice de Plasticidade (%)	3,80
Distribuição granulométrica %	Pedregulho (>2 mm)	0,16
	Areia (0,05 – 2 mm)	54,92
	Silte (0,005 – 0,05 mm)	20,98
	Argila (< 0,005 mm)	22,97
	Porcentagem que passa na peneira 200 (0,074 mm)	43,95
Classificação	Descrição visual do solo	Siltoso
	Classificação AASHTO	A <sub>4</sub>

#### 4.2.1 Massa específica dos sólidos

Esse índice físico foi determinado conforme a NBR 06508 (ABNT, 1984b), encontrando-se o valor de 2,910 g.cm<sup>-3</sup> para o solo em análise (Tabela 4.3).

#### 4.2.2 Limites de consistência

O limite de liquidez foi determinado obedecendo a NBR 06459 (ABNT, 1984c) e o limite de plasticidade obedecendo a NBR 07180 (ABNT, 1984d).

Foram obtidos os valores de 20,1%, para o limite de liquidez, e 16,3% para o limite de plasticidade. O índice de plasticidade foi obtido pela diferença numérica entre os valores do limites de liquidez e de plasticidade, encontrando-se o valor de 3,80%.

### 4.2.3 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).

A Figura 4.5 apresenta a curva de distribuição granulométrica do solo estudado.

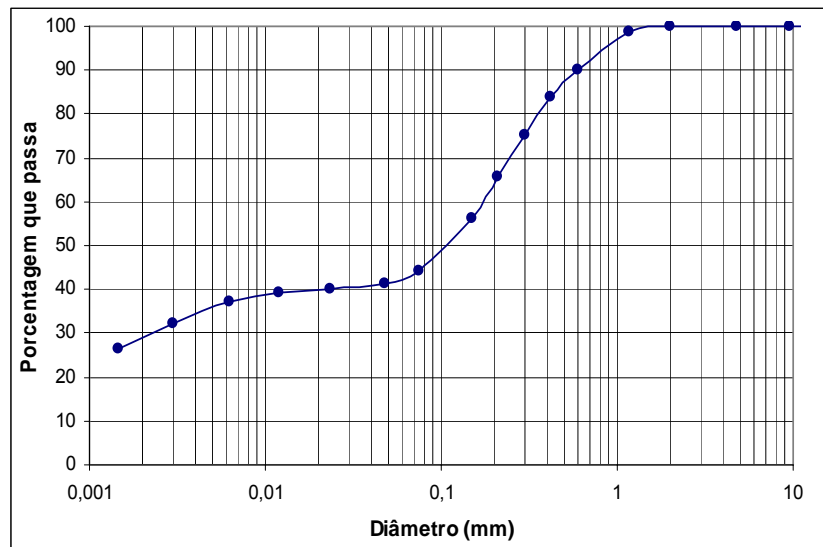


Figura 4.5 Distribuição granulométrica do solo estudado.

### 4.2.4 Ensaio de compactação do solo

Os valores da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima de compactação, fornecidos pelos ensaios de compactação normal de Proctor, encontram-se na Tabela 4.4. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986). As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam a influência da adição dos resíduos, casca de arroz e casca do capim braquiária, à mistura de solo-cimento no comportamento das curvas de compactação do solo.

À medida que houve um acréscimo nos teores de casca de arroz e de braquiária em substituição aos 10% de cimento, o comportamento das curvas de compactação dos tratamentos foi alterado, ocorrendo uma diminuição da massa específica aparente seca máxima do solo e conseqüente aumento das umidades ótimas correspondentes quando

comparadas com o tratamento T1. Isso ocorre porque as massas específicas da casca de arroz ( $0,152 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e de braquiária ( $0,096 \text{ g.cm}^{-3}$ ) são menores do que a massa específica do cimento ( $1,42 \text{ g.cm}^{-3}$ ). E ainda porque esses resíduos vegetais possuem uma maior capacidade de absorção de água do que o solo, necessitando-se, portanto, de uma maior adição de água para a lubrificação das partículas do solo, que sofrerão um rearranjo após a compactação.

Tabela 4.4. Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima do ensaio de compactação das composições de solo-cimento-resíduo.

Tratamentos	Massa específica aparente seca máxima ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Umidade ótima (%)
T <sub>1</sub> <sup>1</sup>	1,89	16,92
T <sub>2</sub>	1,81	17,79
T <sub>3</sub>	1,72	18,84
T <sub>4</sub>	1,71	18,85
T <sub>5</sub>	1,62	19,51
T <sub>6</sub>	1,76	16,91
T <sub>7</sub>	1,71	18,59
T <sub>8</sub>	1,70	19,35
T <sub>9</sub>	1,69	19,81

Tanto nos tratamentos que receberam casca de arroz quanto nos que receberam casca de braquiária em sua composição, à medida em que se aumentou a quantidade dos resíduos vegetais, maior foi a dificuldade de compactar a mistura, o que elevou o volume de vazios no sistema compactado.

Dessa forma, as curvas de compactação ficaram mais achatadas nos tratamentos com maiores teores de resíduos, e mais pronunciadas (pontaguda) no caso da mistura que não continha o resíduo vegetal do tratamento T1. Isso evidenciou o efeito prejudicial da adição de resíduo vegetal ao solo-cimento compactado. Esse comportamento já era esperado, conforme resultados encontrados por Milani (2005).

Além da natureza e do teor de resíduo 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) apud Grande (2003) à medida que se aumenta energia de compactação, cresce a massa específica aparente seca e reduz-se a umidade ótima.

Baixos teores de umidade dificultam 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 teor de umidade ótima.

Na Tabela 4.5 verifica-se que os valores do grau de compactação (GC) estão de acordo com as recomendações de Bueno e Vilar (1999), ou seja, GC não inferior a 95% e não superior a 105%. Desta forma, houve um controle adequado das condições de moldagem, sendo descartada a influência das variações da massa específica aparente seca nos resultados dos ensaios aplicados aos corpos-de-prova.

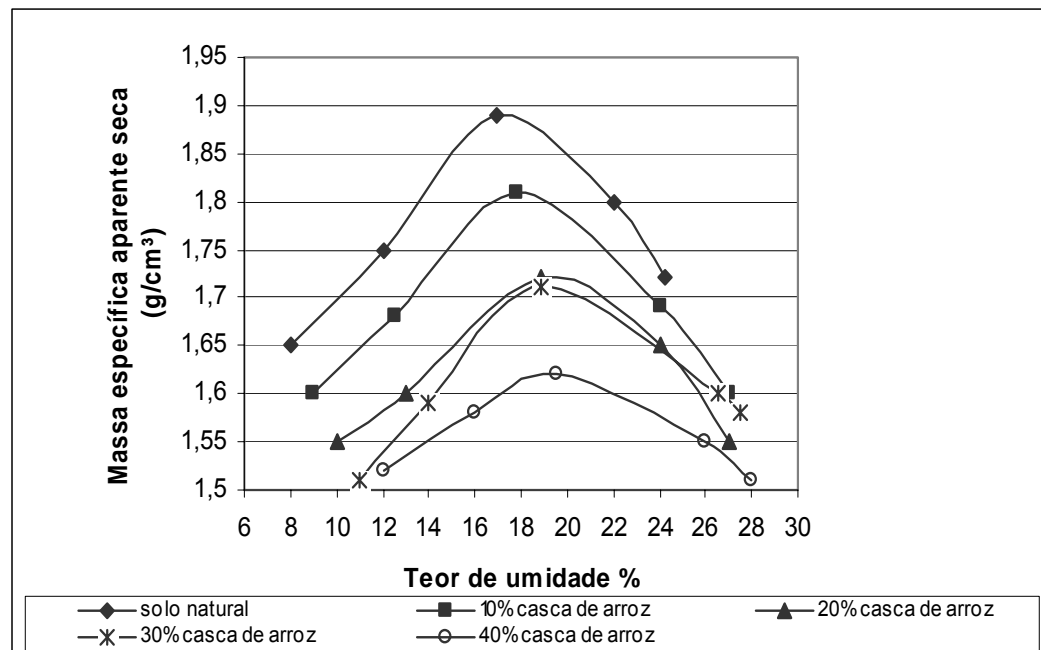


Figura 4.6 Curvas de compactação de solo-cimento-casca de arroz.

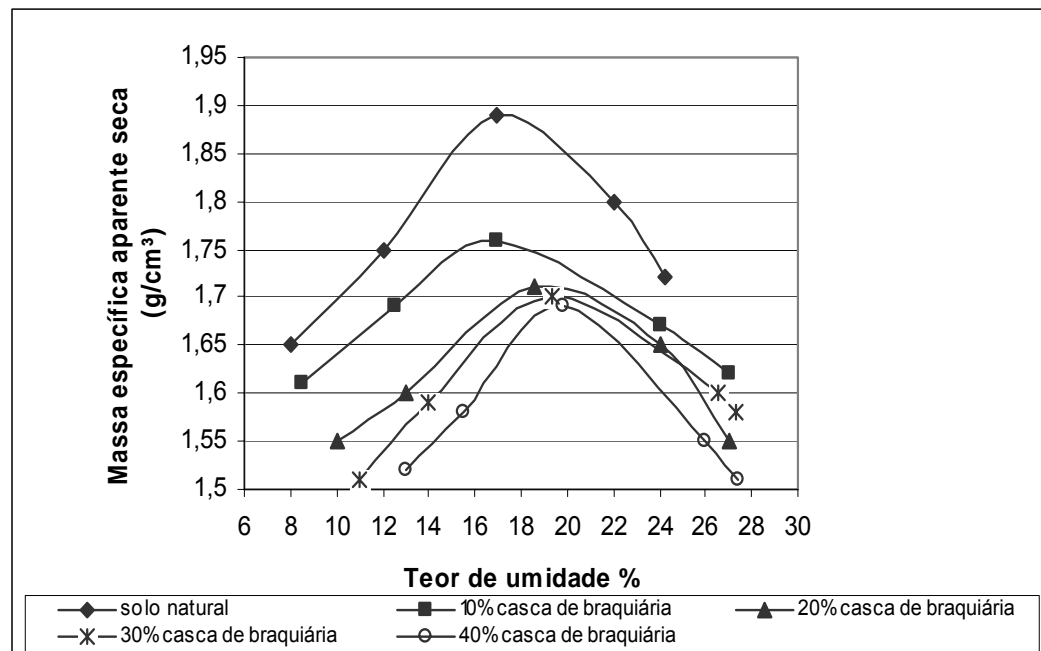


Figura 4.7 Curvas de compactação do solo-cimento-casca de braquiária.

Tabela 4.5. Valores médios do grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos para os três períodos de cura estudados.

Tratamentos	Grau de compactação (%)		
	7 dias	28 dias	56 dias
T <sub>1</sub> <sup>1</sup>	98,5	96,51	95,92
T <sub>2</sub>	99,31	98,83	98,63
T <sub>3</sub>	96,82	98,75	98,54
T <sub>4</sub>	96,87	97,51	96,49
T <sub>5</sub>	97,01	97,19	97,05
T <sub>6</sub>	96,51	96,15	96,42
T <sub>7</sub>	97,11	96,45	95,71
T <sub>8</sub>	97,01	97,61	97,46
T <sub>9</sub>	95,05	95,12	95,01

#### 4.2.5 Análise química do solo

A análise química total do solo foi realizada na Empresa Solocria – Laboratório Agropecuário Ltda. A determinação da matéria orgânica, do pH e dos principais compostos do solo foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo e Foliar – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da UFG.

Tabela 4.6 Análise química total do solo.

Parâmetro	Resultado
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	13,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	12,0
SiO <sub>2</sub> (%)	5,8
TiO <sub>2</sub> (%)	2,4
CaO (%)	0,10
MgO (%)	0,03
Na <sub>2</sub> O ppm	23
K <sub>2</sub> O ppm	140
SO <sub>3</sub> ppm	80

Tabela 4.7 Análise química – determinação dos principais parâmetros compostos do solo.

PROPRIEDADES DETERMINADAS		
Análise química		
M.O.	%	0,1
pH	(CaCl <sub>2</sub> )	6,8
Cu(Mehl)	Mg/dm <sup>3</sup>	1,1
Fe(Mehl)	Mg/dm <sup>3</sup>	86,5
Mn(Mehl)	Mg/dm <sup>3</sup>	15,5
Zn(Mehl)	Mg/dm <sup>3</sup>	2,0
P(Mehl)	Mg/dm <sup>3</sup>	3,2
K	Mg/dm <sup>3</sup>	30
Ca	cmolc/dm <sup>3</sup>	3,6
Mg	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,2
H+Al	cmolc/dm <sup>3</sup>	1,1
CTC	cmolc/dm <sup>3</sup>	5,0
V	%	77,9
Ca/Mg	-	18,0
Mg/K	-	2,6
Ca/K	-	46,9
Ca/CTC	%	72,3
Mg/CTC	%	4,0
K/CTC	%	1,5

M.O.% = matéria orgânica, CTC = capacidade de troca cátion-iônica; V = Saturação de bases.



### 4.3 Procedimentos aplicados aos corpos-de-prova cilíndricos

#### 4.3.1 Análise estatística

Os valores médios de resistência à compressão simples, capacidades total e parcial de absorção de água e módulo dos corpos-de-prova cilíndricos, foram analisados estatisticamente e suas respectivas análises de variância são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta resistência à compressão simples para os corpos-de-prova cilíndricos, em MPa.

<b>FONTES DE VARIAÇÃO</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
<b>Principais efeitos</b>				
A: tipo de resíduo	1	6,724	6,724	254,0874**
B: teor de resíduo	4	65,0214	16,2554	614,2597**
C: idade de cura	2	5,4001	2,7	102,0291**
<b>Interações</b>				
FATOR AXB	4	2,5334	0,6334	23,9331**
FATOR AXC	2	0,8989	0,4495	16,9846**
FATOR BXC	8	2,0614	0,2577	9,7372**
FATOR AXBXC	8	0,9116	0,1139	4,3058**
TRATAMENTO	29	83,5508	2,8811	
RESÍDUO	60	1,5878	0,0265	

\*\* Significativo a 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ).

Tabela 4.9. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta capacidade de absorção de água para os corpos-de-prova cilíndricos, em %.

<b>FONTES DE VARIAÇÃO</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
<b>Principais efeitos</b>				
A: tipo de resíduo	1	27,4563	27,4563	21,5344**
B: teor de resíduo	4	47,358	11,8395	9,2859**
<b>Interações</b>				
FATOR AXB	4	18,8753	4,7188	3,7010*
TRATAMENTO	9	93,6897	10,41	
RESÍDUO	20	25,5	1,275	

\*\* Significativo a 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ).

\* Significativo a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Pelas Tabelas 4.8 e 4.9, pode-se afirmar que os fatores estudados, tipo de resíduo, teor de resíduo e idade de cura, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos ( $p < 0,01$ ) sobre as variáveis resistência à compressão simples e absorção de água.

#### 4.3.2 Resistência à compressão e absorção de água

A Tabela 4.10 apresenta os resultados de absorção de água aos 7 dias e resistência à compressão para os períodos de 07, 28 e 56 dias dos corpos-de-prova.

A Figura 4.8 ilustra o desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos submetidos ao ensaio de compressão simples e a Figura 4.9. ilustra o resultado do ensaio de absorção de água.

Tabela 4.10 Valores médios dos resultados de resistência à compressão simples e absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos.

Trat <sup>o1</sup>	Resistência à compressão (MPa)			Absorção de água %
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
T <sub>1</sub>	3,25 ± 0,25 (7,69) Ba <sup>2</sup>	3,4 ± 0,17 (5,09) Aa	3,52 ± 0,24 (6,91) Aa	11,17 ± 0,83 (7,46) a
T <sub>2</sub>	1,09 ± 0,05 (5,1) Bc	2,58 ± 0,06 (2,68) Ab	2,39 ± 0,28 (11,78) Ab	11,9 ± 1,61 (13,52) ab
T <sub>3</sub>	1,31 ± 0,25 (18,9) Cbc	2,31 ± 0,11 (4,99) Ab	1,9 ± 0,17 (9,11) Bc	15,87 ± 2,11 (13,29) b
T <sub>4</sub>	1,18 ± 0,27 (23,54) Cc	1,98 ± 0,15 (8,01) Ac	1,51 ± 0,24 (16,39) Bd	14,63 ± 1,15 (7,86) b
T <sub>5</sub>	1,09 ± 0,28 (25,83) Bc	1,59 ± 0,07 (4,99) Ad	1,82 ± 0,19 (10,59) Ac	16,03 ± 0,60 (3,76) b
T <sub>6</sub>	1,46 ± 0,26 (17,96) Bb	1,67 ± 0,07 (4,67) Ad	1,86 ± 0,13 (7,65) Ac	11,57 ± 0,68 (5,88) ab
T <sub>7</sub>	0,81 ± 0,08 (10,54) Cde	1,69 ± 0,07 (4,26) Ad	1,09 ± 0,14 (13,70) Be	12,3 ± 1,4 (11,38) ab
T <sub>8</sub>	0,69 ± 0,16 (23,94) Be	0,98 ± 0,10 (10,65) Ae	0,65 ± 0,18 (27,73) Bf	12,8 ± 0,3 (2,96) ab
T <sub>9</sub>	0,39 ± 0,01 (4,44) Bf	0,69 ± 0,10 (15,67) Af	0,57 ± 0,14 (25,84) Af	12,2 ± 0,36 (2,96) ab

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%;

Em cada coluna, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%;

Verifica-se que independentemente do tipo de resíduo utilizado (casca de arroz ou da casca de braquiária), conforme a quantidade de cimento foi sendo substituída pelo resíduo vegetal, a resistência à compressão simples foi diminuindo progressivamente. O melhor resultado foi obtido quando o cimento não foi substituído por resíduo vegetal. O pior resultado ocorreu nos tratamentos onde o cimento teve sua maior substituição.

Aos 56 dias o comportamento dos tratamentos se manteve como aquele observado aos 28 dias, contudo, a resistência alcançada pelos tratamentos foi maior do que aquelas aos sete dias. De acordo com Ferreira e Fernandes (2006), isso pode ter ocorrido pelo fato do cimento contido nos corpos-de-prova aos 28 dias, já ter passado pelo processo de hidratação ou também pela presença de água higroscópica proporcionada pelo maior período de cura.

As exceções ficaram por conta dos tratamentos T<sub>1</sub>, T<sub>5</sub> e T<sub>6</sub> em que houve acréscimo de resistência ao longo do período de cura.

A NBR 08492 (ABNT, 1984e), empregada para tijolos prensados de solo-cimento, estabelece, como mínimo, o valor médio de 2,0 MPa, e nenhum valor inferior a 1,7 MPa aos 7 dias de idade.

Na análise da capacidade de absorção de água o que importa é a absorção total (diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca), que indicará o percentual total de água que o corpo-de-prova poderá conter. Essa quantidade de água absorvida afetará diretamente a sua capacidade de resistir à aplicação de cargas e indiretamente sua durabilidade em longo prazo. Quanto maior for sua absorção total de água, menor será a sua resistência quando submetido a uma carga.

De acordo com Walker (1995), essa redução de resistência será devida, principalmente, ao desenvolvimento de pressões de água nos poros e à liquefação dos minerais de argila não estabilizados na matriz compactada.

Conforme a Tabela 6.10, a menor absorção total de água foi observada no tratamento T1, onde não houve a adição de resíduos vegetais, o que já era de se esperar, devido a maior quantidade de cimento e ausência de resíduos vegetais (que conferem menor massa específica aparente ao solo e maior volume de poros). Os valores mais elevados da absorção ocorreram nos tratamentos T5 e T9 devido à presença de maior quantidade de resíduo vegetal (40% de substituição do cimento, pelo resíduo vegetal).

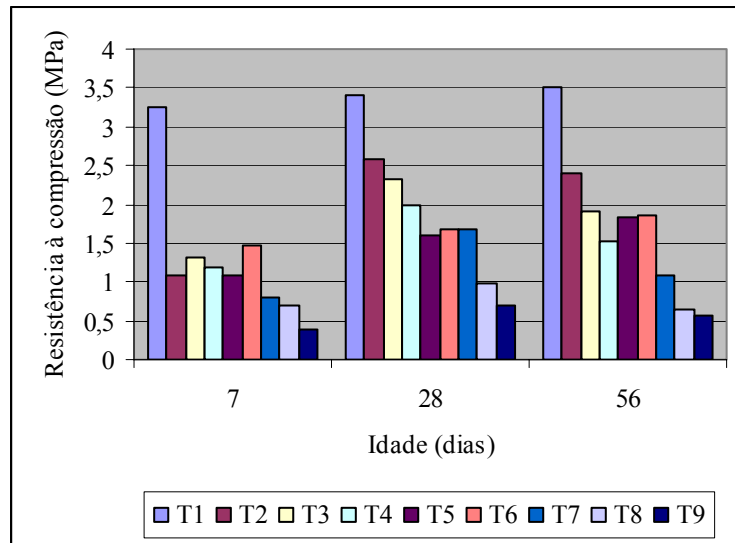


Figura 4.8 Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos em função da idade de cura.

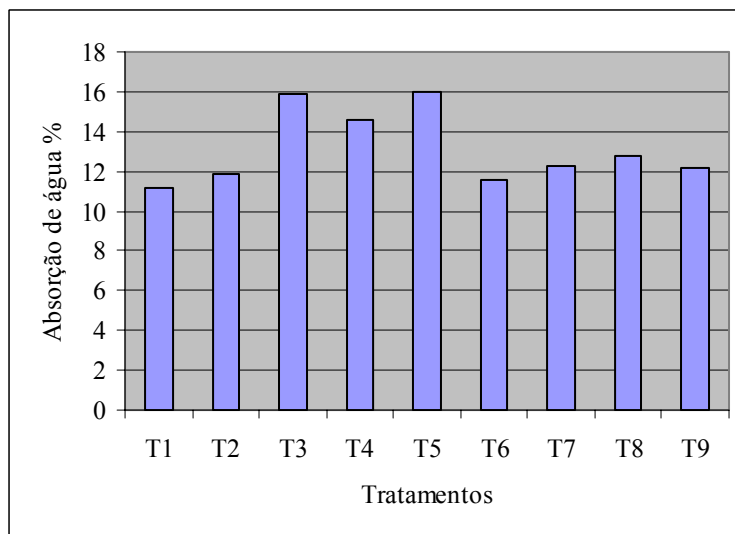


Figura 4.9 Absorção de água em função de cada tipo de tratamento aos 7 dias de idade de cura.

#### 4.4 Procedimentos aplicados aos tijolos de solo-cimento-resíduos

##### 4.4.1 Análise estatística

Os valores médios de resistência à compressão simples, capacidades total e parcial de absorção de água e módulo dos tijolos modulares, foram analisados estatisticamente e suas respectivas análises de variância são apresentadas nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11 Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta resistência à compressão simples para os tijolos modulares, em MPa.

<b>FONTES DE VARIAÇÃO</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
<b>Principais efeitos</b>				
A: tipo de resíduo	1	1	0,9651	63,3523**
B: teor de resíduo	4	33,919	8,4773	556,4544**
C: idade de cura	2	17,1569	8,5785	563,0960**
<b>Interações</b>				
FATOR AXB	4	0,3769	0,942	6,1842**
FATOR AXC	2	0,0078	0,0039	0,2552NS
FATOR BXC	8	10,1503	1,2688	83,2843**
FATOR AXBXC	8	0,3362	0,042	2,7588*
TRATAMENTO	29	62,9023	2,169	
RESÍDUO	60	0,9141	0,0152	

\* significativo a 5% de probabilidade

\*\* significativo a 1% de probabilidade

NS: não significativo

Tabela 4.12. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta capacidade de absorção dos tijolos modulares, em %.

<b>FONTES DE VARIAÇÃO</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>
<b>Principais efeitos</b>				
A: tipo de resíduo	1	18,7704	18,7704	5,074*
B: teor de resíduo	4	226,3997	56,5999	15,3**
<b>Interações</b>				
FATOR AXB	4	19,9814	4,9954	1,3503 NS
TRATAMENTO	9	265,1516	29,4613	
RESÍDUO	20	73,9869	3,6993	

\* significativo a 5% de probabilidade

\*\* significativo a 1% de probabilidade

NS: não significativo

De acordo com a Tabela 4.11, pode-se afirmar que os fatores estudados, tipo de resíduo, teor de resíduo e idade de cura, bem como suas interações (Fator AxBxC), promoveram efeitos significativos ( $p < 0,05$ ) na variável resistência à compressão simples. A interação entre o tipo de resíduo e idade de cura (AxC) promoveu efeito não significativo.

Na variável absorção de água, pela Tabela 4.12, pode-se afirmar que a interação entre o tipo de resíduo e o teor de resíduo promoveu efeito não significativo.

#### 4.5.1 Resistência à compressão e absorção de água

A Tabela 4.13 apresenta os resultados de absorção de água aos 7 dias e resistência à compressão para os períodos de 07, 28 e 56 dias dos tijolos.

A Figura 4.10 ilustra o desempenho mecânico dos tijolos submetidos ao ensaio de compressão simples e a Figura 4.11 ilustra o resultado do ensaio de absorção de água.

Tabela 4.13 Valores médios dos resultados de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos.

Trat. <sup>01</sup>	Resistência à compressão (MPa)			Absorção de água %
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
T <sub>1</sub>	0,62 ± 0,04 (5,88) <sup>2</sup> Ba	2,90± 0,22 (7,70) Aa	2,83 ± 0,04 (1,49) Aa	12,74 ± 2,24 (17,39) a
T <sub>2</sub>	0,68 ± 0,06 (8,18) Ca	2,10±0,11 (5,33) Ab	1,81 ± 0,11 (6,19) Bb	14,22 ± 2,61 (18,32) ab
T <sub>3</sub>	0,63 ± 0,08 (13,32) Ba	1,11±0,17 (14,87) Ad	1,2 ± 0,11 (9,35) Ac	19,12 ± 2,64 (13,80) bc
T <sub>4</sub>	0,39 ± 0,11 (28,64) Bb	0,85±0,11(13,09) Ae	0,57±0,09 (16,06) Bde	19,66 ± 0,31 (1,57) c
T <sub>5</sub>	0,35 ± 0,02 (5,97) Cb	0,79±0,17 (20,81) Aef	0,54 ± 0,11 (20,83) Be	21,94 ± 0,29 (1,33) c
T <sub>6</sub>	0,56 ± 0,06 (9,96) Cab	1,56±0,24 (15,07) Ac	1,29 ± 0,11 (8,65) Bc	14,22 ± 0,67 (4,73) ab
T <sub>7</sub>	0,35 ± 0,06 (15,80) Cb	0,99±0,29 ( 28,93) Ade	0,76 ± 0,11 (14,78) Bd	17,36 ± 3,24 (18,64) b
T <sub>8</sub>	0,11 ± 0,06 (57,74) Bc	0,61±0,08 (13,86) Af	0,52 ± 0,06 (10,66) Ae	17,97 ± 1,30 (7,21) b
T <sub>9</sub>	0,11 ± 0,04 (33,33) Bc	0,54±0,11(20,83) Af	0,52± 0,06 (10,66) Ae	17,48 ± 0,67 (3,81) b

<sup>2</sup> Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação).

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%;

Em cada coluna, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

De acordo com a Tabela 4.13 somente os tratamentos T1 e T2 aos 28 dias e 56 dias de cura apresentaram valores de resistência à compressão simples em conformidade com a NBR 08492 (ABNT, 1984f).

Os valores de resistência à compressão simples foram afetados pela presença dos resíduos vegetais, e também pela diminuição gradativa do teor de cimento nos tratamentos. Isso porque a estabilização do solo é afetada diretamente pelo teor de cimento presente na mistura solo-cimento-resíduo vegetal. Assim, quanto menor a quantidade de cimento presente na mistura, menor será a estabilização química do solo.

Esse comportamento pode ainda ser explicado pela relação existente entre as propriedades físico-mecânicas do sistema solo-cimento, pois quanto menos vazios no sistema,

melhor será a interação entre solo-aditivo e, conseqüentemente, maiores serão as resistências alcançadas (MILANI, 2005).

Mesmo apresentando perdas na resistência, a incorporação do resíduo vegetal casca de arroz nos tratamentos, quando comparada com a incorporação do resíduo vegetal casca de braquiária, apresentou um desempenho melhor, com uma menor perda na resistência à compressão simples. Isso pode ter ocorrido pelo fato da massa específica aparente da casca de arroz ser mais elevada do que a da casca de braquiária.

Em termos de capacidade de absorção de água, a exceção do tratamento T5, todos os tratamentos aplicados aos tijolos atenderam às especificações da NBR 08492, que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor superior a 22% (Tabela 4.13).

A Figura 4.10 ilustra o desempenho mecânico dos tijolos submetidos ao ensaio de compressão simples e a Figura 4.11 ilustra o resultado do ensaio de absorção de água.

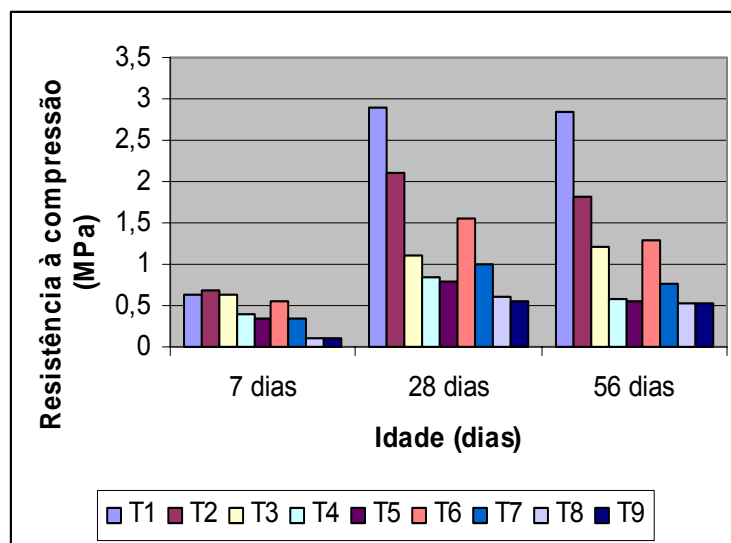


Figura 4.10 Resistência à compressão simples dos tijolos em função da idade de cura.

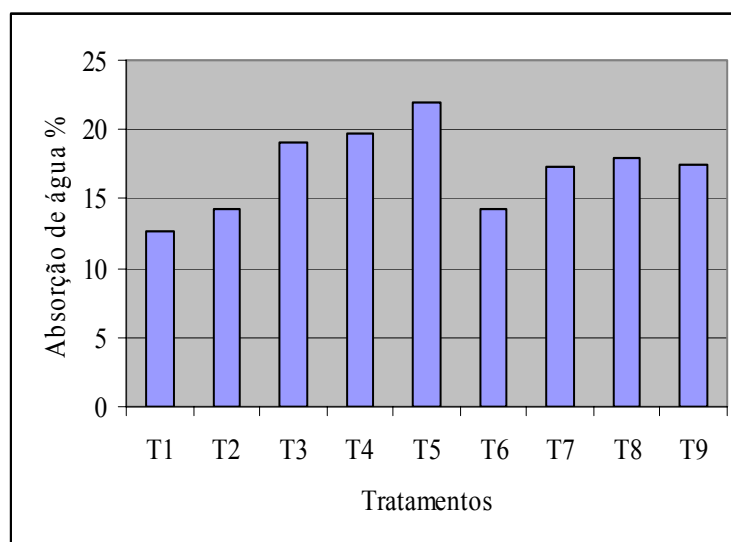


Figura 4.11 Absorção de água em função de cada tipo de tratamento aos 7 dias de idade de cura.

#### 4.6 Ensaios termofísicos

A Tabela 4.14 apresenta as principais propriedades termofísicas dos tijolos modulares de solo-cimento-T<sub>1</sub> e solo-cimento-resíduo-T<sub>2</sub>, calculados a partir das Equações 4.11, 4.12, 4.14, 4.16, 4.17, do ensaio da caixa quente protegida e do calor específico.

Tabela 4.14 Principais propriedades termofísicas do tijolo.

Trat. <sup>o1</sup>	Massa específica aparente $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade térmica $\lambda$ W/(m.K)	Calor específico $c$ kJ/(kg.K)	Resistência térmica superficial $R_t$ (m.K)/W	Capacidade térmica $C_t$ (kJ/m.K)	Atraso térmico $\phi$ (h)
T1	1890	0,66	1,30	0,188	309,31	7,5
T2	1810	0,74	1,84	0,170	419,26	9,0

Quanto maior o teor de umidade maior é o valor encontrado da condutividade térmica. Sendo assim BRE (1984) apud Adam e Jones (1995) sugere a correção dos valores da condutividade térmica em função do teor de umidade, conforme Tabela 4.15.

Para os tijolos do Tratamento T<sub>1</sub> foram encontrados 10,0% de umidade e no Tratamento T<sub>2</sub>, 5,0%.



Tabela 4.15 Fator de umidade.

Teor de umidade %	1,0	3,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
Fator de umidade	1,3	1,6	1,75	2,1	2,35	2,55	2,75

Fonte: BRE (1984).

Assim os valores da condutividade térmica passaram de 0,66 W/(m.K) para 0,38 W/(m.K), no Tratamento T<sub>1</sub>, e de 0,74 W/(m.K) para 0,35 W/(m.K) no Tratamento T<sub>2</sub> (Tabela 4.16)

Tabela 4.16 Correção dos valores da condutividade térmica em função do teor de umidade.

Tratamento <sup>1</sup>	Teor de umidade %	Condutividade térmica $\lambda$ W/(m.K)	Fator de umidade	Condutividade térmica corrigido $\lambda$ W/(m.K)
T1	5,0	0,66	1,75	0,38
T2	10,0	0,74	2,10	0,35

A Tabela 4.17 apresenta os valores das principais propriedades termofísicas da parede construída com os tijolos dos Tratamentos T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>.

Tabela 4.17 Principais valores das propriedades termofísicas da parede.

Tratamento <sup>1</sup>	Resistência térmica total [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Capacidade térmica [kJ/(m <sup>2</sup> .K)]	Transmitância térmica [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Atraso térmico (h)	Fator de calor solar (%)
T1	0,50	317,21	2,00	7,5	5,20
T2	0,53	427,20	1,88	9,0	4,88

A NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) relaciona os valores de 0,70 a 1,05 W/(m.K) para a condutividade 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<sup>-3</sup> a 2000 kg.m<sup>-3</sup> (Tabela 2.5). Comparando o valor da condutividade térmica obtido durante o ensaio (Tabela 4.16) com o valor relacionado na Tabela 2.5 para materiais cerâmicos, verifica-se que essa propriedade térmica da mistura solo-aditivo estudada favorece a um bom desempenho com vistas ao conforto térmico.

Assim como ocorreu para a condutividade térmica, o valor do calor específico obtido durante o ensaio (Tabela 4.14) comparado ao valor relacionado na Tabela 2.5, também

favorece a um bom desempenho térmico. Nesse caso, o material necessitaria de uma maior quantidade de calor para elevar sua temperatura, apresentando maior capacidade térmica, e, portanto, maior inércia térmica.

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 condutividade térmica entre 0,26 W/(m.K) e 0,41 W/(m.K) com uma massa específica aparente seca de 1540 kg.m<sup>-3</sup> a 1860 kg.m<sup>-3</sup>, para tijolos estabilizados com cal. Para tijolos estabilizados com cimento, os valores de condutividade térmica ficaram entre 0,41 W/(m.K) e 0,55 W/(m.K), com uma massa específica aparente seca de 1820 kg.m<sup>-3</sup> a 1920 kg.m<sup>-3</sup>. 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 condutividade térmica e calor específico para tijolos com massa específica aparente de 1920 kg.m<sup>-3</sup>.

A adição da casca de arroz reduziu o valor da condutividade térmica em relação à mistura solo-cimento devido ao menor valor da sua massa específica aparente. Khedari et al (2005) utilizando fibra da casca de coco na confecção de tijolos prensados de solo-cimento nas dimensões de 12,5x 25,0x 10,0 cm encontraram os valores de transmitância térmica de 0,6510 W/(m.K), e massa específica aparente seca de 1586,77 kg.m<sup>-3</sup>.

Devido às suas excelentes características de isolamento térmico, a construção com terra é mais indicada para aquelas situações em que se necessita uma alta inércia térmica, ou seja, uso de paredes pesadas. Os valores de transmitância térmica  $\leq 1,88$  W/(m<sup>2</sup>.K), de atraso térmico  $\geq 9,0$  horas e de fator de calor solar de 4,88% obtidos do Tratamento T2, que foram os melhores resultados, estão em conformidade com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005a) que recomenda para vedações externas pesadas os valores de transmitância térmica  $\leq 2,20$  W/(m<sup>2</sup>.K), de atraso térmico  $\geq 6,5$  horas e de fator de calor solar 3,5% (Tabela 2.8). Verificam-se que as propriedades térmicas da mistura solo-cimento-resíduo casca de arroz estudada favorecem a um bom desempenho térmico de paredes com este tipo de material.

## **5 CONCLUSÕES**

De acordo com as condições em que o trabalho foi realizado e após análise e interpretação dos dados experimentais obtidos, os resultados permitiram concluir que:

### **5.1 Caracterização físico-mecânica das misturas de solo-cimento-resíduo agroindustrial**

- Os valores de resistência à compressão simples dos tratamentos com solo-cimento-casca de arroz foram sempre maiores em relação aos dos tratamentos com solo-cimento-braquiária;

- A melhor idade de cura ocorreu aos 28 dias;

- Os tratamentos T1 aos 28 e 56 dias de cura, 2,90 MPa e 2,83 MPa, e o Tratamento T2 também aos 28 e 56 dias de cura, 2,10 MPa e 1,81MPa, apresentaram maior resistência à compressão simples, estando em conformidade com a NBR 08491;

- Os menores valores de capacidade de absorção d'água aos 7 dias foram alcançados para os tratamentos T1 com 12,74% e T2 com 14,22%, os quais atenderam às especificações da NBR 8492;

- O melhor teor de substituição de cimento pelo resíduo agroindustrial foi o do tratamento T2: solo + 10% de adições (10% de casca de arroz e 90% de cimento).

### **5.2 Propriedades termofísicas**

- Os valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar, obtidos pelos tratamentos T1 e T2 estão em consonância com aqueles recomendados pela NBR 15220-4 (ABNT, 2005);

- A incorporação da casca de arroz à mistura solo-cimento proporcionou melhores resultados das propriedades termofísicas para os tijolos modulares de solo cimento estudados.

### **5.3 Conclusões gerais**

A incorporação da casca de arroz no teor de 10% em substituição ao cimento revelou-se como boa alternativa à adequada destinação desse resíduo agroindustrial na confecção de tijolos modulares de solo-cimento, obtendo-se, assim, materiais mais leves e, portanto, de menor condutividade térmica sem o comprometimento de seu desempenho mecânico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIKO, A. K. Tecnologias apropriadas: **tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

ABIKO, A.K. Solo cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas. In: **Construção**, São Paulo, 1983.

ABIKO, A. K. **Estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza da casca de arroz e de resíduos cerâmicos**. Tese de Doutorado São Paulo: EPUSP, 1987.

ADAM, E.A.; JONES, P.J. Thermophysical properties of stabilized soil building blocks. **Building and Environment**. v.30, n. 2, p. 245-253, 1995.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para construção civil nos países em desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. 204 p. Tese (Livre Docência em Engenharia da Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AKASAKI, J.L. SILVA, A.P. Estudo de composições do solo estabilizado com cal e resíduos agroindustriais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30, 2001, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. Cd Rom.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE 55/2004: **thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2004.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIAL. ASTM C-351-92B. **Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation**. 1999.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento**. São Paulo. ABCP, 1960.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **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 5735: **Cimento Portland de Alto Forno**. Rio de Janeiro, 1991. 10 p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 6459: **Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984c. 6p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 6488: **Componentes de Construção – Determinação da condutância e transmitância térmica - método da caixa quente protegida**. Rio de Janeiro, 1984c. 6p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 6508: **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984b. 8p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 7180: **Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984d. 3p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 7181: **Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984a. 13p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 7182: **Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986b. 10p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 7182: **Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986b. 10p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 7217: **Agregados: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 8491 - **Tijolo maciço de solo-cimento**. Rio de Janeiro, 1984e. 4 p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 8492 - **Tijolo maciço de solo-cimento: Determinação da Resistência à Compressão e Absorção de Água**. Rio de Janeiro, 1984f. 5p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 10004 – **Classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco humano e ambiental**. Rio de Janeiro, 2004. 15p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 10832 - **Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual**. Rio de Janeiro, 1989. 3 p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 12024 – **Solo-cimento: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1989. 3 p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 12025 - **Solo-Cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1990b. 3 p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 15220-1. Desempenho térmico de edificações. Parte I: **Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005b. 10p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 15220-2. Desempenho térmico de edificações. Parte 2: **Métodos de cálculo da transmitância, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005c. 27p.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro. NBR 15220-3. Desempenho térmico de edificações. Parte 3: **Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005a. 28p.

AZAMBUJA, M. A.: Geologia aplicada a solo-cimento. **Publicações ABCP**, São Paulo, 1979.

BALSALOBRE, M. A. A., NUSSIO, L. G., MARTHA Jr., G. B. Controle de perdas na produção de silagens de gramíneas tropicais. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA. 38, 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBZ, p. 890-911. 2001.

BARBOSA, N.P.; **Construção com terra crua do material a estrutura.** Monografia apresentada ao DTCC/UFPb no concurso para Professor Titular. Campina Grande, p.118,1996.

BARBOSA, N.P., TOLÊDO FILHO, R.D., GHAVANNI, K.; Construção com terra crua. In: TOLÊDO FILHO, R.D., NASCIMENTO, J.W.B., GHAVAMI, K. (ed.) – **Materiais não convencionais para construções rurais.** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, cap. 4, p. 113-144, 1997.

BELL, F. G.; Lime stabilization of clay minerals and soils. In: **Engineering Geology** 42. Elsevier Science, 1996.

BELL, F. G.; COULTHARD, J. M.; **Stabilization of clay soils with lime.** Mun. Engr., 7: p. 125-140. 1990.

BERALDO, A. L. Compósito biomassa vegetal-cimento. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. **Materiais não convencionais para construções rurais.** Campina Grande: UFPB/SBEA, cap.1, p. 1-43, 1997 a.

BERALDO, A. L. Compósitos de biomassa vegetal-cimento. Manuscrito da disciplina Ap 399. **Tópicos Especiais em Construções. Edições internas.** Feagri/Unicamp 1997b.

BERALDO, A. L.; LOPES, W. G. R; CARVALHO, J. V.; ARZOLLA, J. A. P. R.; SEVEGNANI, K.; SOUZA, P. Efeito da espécie vegetal do tipo de cimento e do tratamento utilizado sobre a resistência à compressão de compósitos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, 2000b, Salvador. **Anais...**Salvador: [s.n], 2000b. 1 CD-ROM.

BERALDO, A. L.; ZUCCO, L. L. Compósitos à base de cimento Portland: estudos efetuados para viabilizar o uso da casca de arroz. In: BALBUENA, R. H.; BENEZ, S. H.; JORAJURIA, **D. Ingeniería rural y mecanización agraria en el ambito latino americano**. La Plata: [s.n.], p. 479-88, 1998.

BOTREL, M. de A., NOVAES, L. P. N., ALVIM, M. J. Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais. Juiz de Fora: **EMBRAPA-CNPGL**, 35p. (EMBRAPA-CNPGL. Documentos, 66) 1998.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos Solos**. v. 1. São Carlos: Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1999. 131p.

CACHIONE, J. **Climatologia e meteorologia: que relação é esta?** Londrina: UEL, 2005. Disponível em: <[http://geocities.yahoo.com.br/uel\\_climatologia/textobasico.htm](http://geocities.yahoo.com.br/uel_climatologia/textobasico.htm)>. Acesso em: 10 dez. 2006.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, vol. 1 Rio de Janeiro, 2003.

CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S., CASSA, J.C.S. Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção, **EDUFBA, Caixa Econômica Federal**, Salvador, 2001.

CARVALHO, A.R.O.; POROCA, J.S. **Como fazer e usar tijolos prensados de solo estabilizado**. Brasília. IBICT.p 38, 2001.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO CAMAÇARI - CEPED. **Manual de construção com solo-cimento**. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1978. 147 p.

CIPRIANO, C. J. **Simulação termo energética de um sistema de ar condicionado para comparação dos resultados medidos e simulados**. 2003. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.



CONSELHO DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Reciclagem dos resíduos agropecuários. In: \_\_\_\_\_. **Reciclagem dos resíduos urbanos, agropecuários, industriais e minerários**. Brasília: Secretaria Executiva, 1985. p. 57-81.

COSTA, E. C. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. São Paulo: Blücher, 1982.

CUNHA, E. G. et al. **Elementos de arquitetura de climatização natural**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2004.

CUNHA, U. V. L. **Terra-cimento: contribuição para o estudo da casa de baixo custo**. São Carlos. EESC-USP Dissertação de Mestrado, 1978.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. **High. Res. Board, bull.** 262, Washington, DC, 51-63., 1960.

EVANS, M.; SCHILLER, S. **Diseño bioambiental y arquitectura solar**. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 1994.

FANGER, P. **Thermal comfort: analysis in environmental engineering**. Kingsport: McGraw-Hill, 1970.

FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. Tese de Doutorado Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

FERREIRA, R. de C; FERNANDES, M. O. Incorporação de resíduos vegetais e seus efeitos sobre o desempenho físico-mecânico de solo-cimento. **In: Congresso Latino Americano y del Caribe de Ingeniería Agrícola**, 7, 2006, Chillán. Proceedings ... Ciudad del México: ALIA, 2006. Cd Rom.

GIVONI, B. **Comfort, climate analysis and building design guidelines: energy and Buildings**. Lausanne: [s.n.], 1992. v.18.

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

GRILLO, J.C.S. **Reabilitação Ambiental de Edifício Público Moderno: Caso do Palácio do Itamaraty**. Dissertação Mestrado Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Brasília, 2005. 162p.

GUIMARÃES, J.E.P. **A cal – fundamentos e aplicações na construção civil**. São Paulo, Pini, 1998.

HALL, M B. Recent advanced in non-ndf carbohydrates for the nutrition of lactating cows, In: Simpósio Internacional em bovinos de leite. 2, Lavras. **Anais...** Lavras:UFLA-FAEPE, 2001, p.139-148. 2001.

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.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K.; Reactions accompanying stabilization of clay with cement. In: **HIGHWAY RESEARCH BOARD**. Bulletin 36, Washington, DC, p.146 -170, 1963.

INGLÊS, O.G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization: principles and practice**. Butter Worths, Sydney – Melbourne –Brisbane, 1972.

INGLES, O. G. Soil stabilization. In: F. G. Bell (Editor) **Ground Engineer's Reference Book** – chapter 38. London. Butterworths. p. 38/1 – 38/26. 1987.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola -2004**. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola](http://www.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola). Acesso em : 03maio 2006.

KHEDARI, J.; WATSNASATHAOIRN, P.; HIRUNLABH, J. Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity. **Cement and Concrete Composites**, 27, p. 111-116, 2005.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: AU editores, 1997.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus spp.* na produção de painéis de cimento-madeira**. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LINDLEY, J. A.; WHITAKER, J. H. **Agricultural Buildings and Structures**. Saint Joseph: ASAE, 636p, 1997.

LINS, A. H. P. Comportamento tensão-deformação-resistência dos solos não saturados. In: 21º Reunião Anual de Pavimentação. Salvador. **Anais**. P. 160-175, set., 1994.

MACEDO, M. C. M. Pastagens no ecossistema cerrados: Pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In Simpósio sobre Pastagens nos Ecossistemas Brasileiros. Brasília - DF. **Anais**. p. 28 - 62.1995.

MANZANARES, K.; VELASQUEZ D.; ALFONSO E. **Algunos aspectos economicos acerca del bloque machihembrado de madera-cemento**. v. 18, n. 2, , p. 105-113, 1988.

MARTINS, S. A. C. F. **Pisos de argamassa reforçada com partículas de bambu**. 83 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MEDEIROS, S. R. R.; ROLIM, M. R.; BRITO, F. L.; SIQUEIRA, B. B. Estabilização de solo com misturas de cinza de bagaço de cana de açúcar e cimento. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 31, 2002, Salvador, BA. **Anais...**, Salvador: SBEA, 2002. Cd Rom.

MERCADO, M.C. **Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MESA- VALENCIANO, M. C .; FREIRE, W. J. Tijolos de solo melhorado com cimento e fibras de bagaço de cana-de-açúcar: características físico-mecânicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28. 1999, Pelotas. **Anais...**Pelotas: [s.n], 1999. 1 CD-ROM.

MILANI, A. P. da S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambientação) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005. 113p.

MONTORO, P.; SAWAYA, S.B. Arquitetura com terra: uma porta para o futuro. In: **Revista Crea-SP**, ano II, nº 5 , São Paulo, 2002.

MUKERJI, K. Soil block presses. **German Appropriate Technology Exchange**, Eschborn, Alemanha, 1988.

NUNES S.G.; A. BOOK M. I. O.; PENTEADO. G. Braquiária brizantha cv. Marandu. Campo Grande: **Embrapa - CNPQC**, p. 31, 1984.

NUSSIO, L. G., CAMPOS, F. P., PAZIANI, S. de F., SANTOS, F. A. P. Volumosos suplementares – estratégia de decisão e utilização. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS. 3, 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2002a, p. 193-232.

NUSSIO, L. G., PAZIANI, S.F., NUSSIO, C. M. B. Ensilagem de capins tropicais. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, **Anais...** Recife: SBZ, p. 60-99. 2002b.

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 condutividade térmica para uso em edificações rurais. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.1, p.1-11, 2001.

PINTO, C. S. Propriedades dos solos, In: Fundações: teoria e prática - Waldemar Hachich .et al. São Paulo, **Pini**, 1998.

RASHWAN, M. S.; HATZINIKOLAS, M.; ZMAVC, R. Development of a lightweight, lowcost concrete block using wood residue. **Forest Products Journal, Madison**, EUA, v. 42, n.5, p. 57-64, 1992.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1986.

ROCHA, G. L. Perspectivas e problemas de adubação de pastagens no Brasil. In Simpósio sobre Calagem e Adubação de Pastagens, 1. Nova Odessa. **Anais**. Potafos, Piracicaba, SP. p. 1-30. 2005.

ROCHA, A. F. **Estudo experimental sobre misturas de solo cimento para a região de Campo Novo dos Percis**, Mato Grosso. Dissertação Mestrado. EESC-USP, São Carlos, 1996.

SARMIENTO, C. R. **Argamassa de cimento reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e sua utilização como material de construção**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) - Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SHALDERS NETO, A. **Regulamentação de desempenho térmico e energético de edificações** (Dissertação de Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SHERWOOD, P.T. **Soil stabilization with cement and lime: state of the art review**. London: HMSO, 153p, 1993.

SILVA, A.P.; FREIRE, W. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 33, 2004, São Pedro, SP. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2004. Cd Rom.

SILVA, M. **A terra crua como alternativa sustentável para a produção de habitação social**. Dissertação Mestrado. EESC-USP, São Carlos, 2001.

SILVA, D. J. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 2 ed. Viçosa: UFV, 166p., 1995.

SILVEIRA, A.; FERREIRA, A. A.; DALMOLIN, D. C. C. A cinza da casca de arroz como adição mineral. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], p.39-45, 1996.

SOUSA, S. M. T.; BARBOSA, N. P. Estabilização granulométrica de solos para a confecção de tijolos prensados de terra crua. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: [s.n], 2000. 1 CD-ROM.

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

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Rio de Janeiro, Sedegra, 16p., 1961.

ZHENG TIAN, L.; MOSLEMI, A. A. Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water mixtures. **Forest Products Journal**, Madison, EUA. v. 35, n. 7, p. 37-43, 1985.

ZUCCO, L. L.; **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 118 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

WALKER, P. J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks. **Cement & Concrete Composites**, New York, EUA. , n. 17, p. 301-10, 1995.

**ANEXO A****DETALHES CONSTRUTIVOS DE UMA EDIFICAÇÃO REALIZADA COM O SISTEMA CONSTRUTIVO MODULAR**

Figura 1. Concretagem do contrapiso.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 2. Concretagem dos pilares.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 3. Respaldo da alvenaria e passagem das tubulações.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 4. Colocação das treliças da laje.

Fonte: SAHARA (2001).





Figura 5. Colocação das lajotas da laje.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 6. Concretagem da laje.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 7. Vista dos pilares da varanda.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 8. Vista da edificação.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 9. Estrutura de contenção de uma piscina.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 10. Revestimento da piscina.

Fonte: SAHARA (2001).



Figura 11. Piscina acabada.

Fonte: SAHARA (2001).

**ANEXO B****CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE UMA PAREDE DE TIJOLOS MACIÇOS APARENTE**

Os resultados abaixo são referentes aos tijolos do tratamento T2 que obteve melhor desempenho termofísico em comparação com o tratamento T1.

Dados:

Dimensões do tijolo = 25,0 x 12,5 x 6,0 cm

$\rho = 1810 \text{ kg/m}^3$

$\lambda = 0,35 \text{ W/(m.K)}$

$c = 1,84 \text{ kJ/(kg.K)}$

$e = 12,98 \text{ cm}$

$\rho \text{ argamassa} = 2000 \text{ kg/m}^3$

$\lambda \text{ argamassa} = 1,15 \text{ W/(m.K)}$

$c \text{ argamassa} = 1,00 \text{ kJ/(kg.K)}$

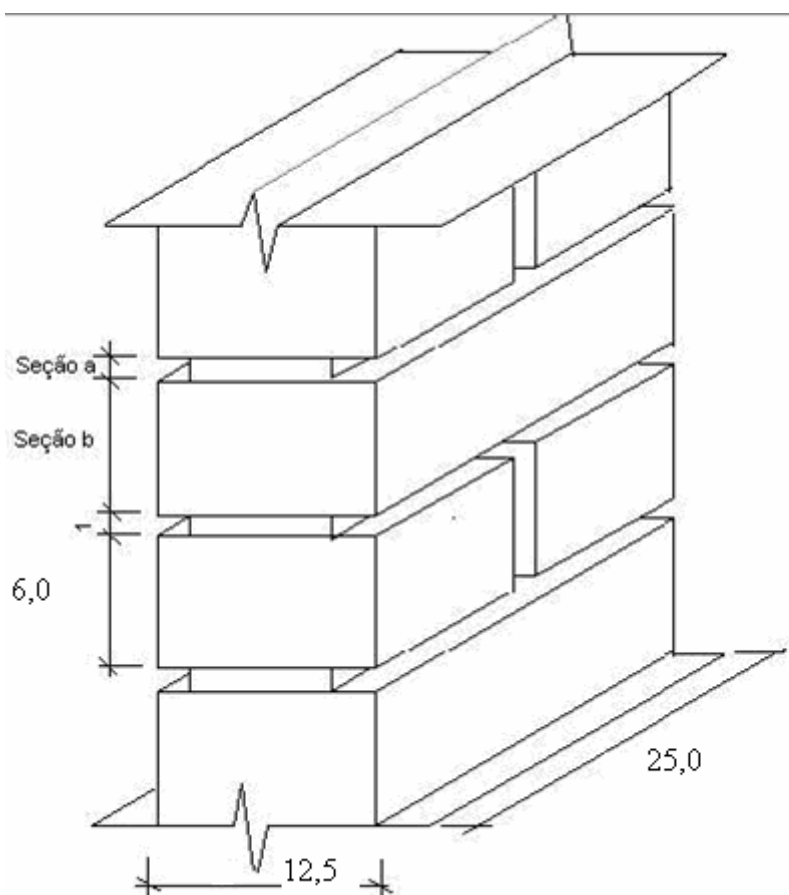


Figura 12. Parede de tijolos modulares de solo-simento-resíduo.

**a) Resistência térmica da parede (Rt)**

$$R = e / \lambda = 0,125/035 = 0,36 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

**b) resistência térmica total (RT):**

$$RT = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,36 + 0,04 = 0,53 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

**c) transmitância térmica (U):**

$$U = 1/R = 1 / 0,53 = 1,88 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

**d) capacidade térmica da parede (CT):**

Seção A (argamassa):

$$A_a = 0,0025 \text{ m}^2$$

$$CT_a = e \cdot c \cdot \rho = 0,126 \times 1,00 \times 2000 = 252 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Seção B (tijolo):

$$A_b = 0,0125 \text{ m}^2$$

$$CT_b = e \cdot c \cdot \rho = 0,126 \times 1,84 \times 1810 = 419,26 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$CT = \frac{0,0025 + 0,0125}{\frac{0,0025}{220} + \frac{0,0125}{366,34}} = 427,20 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

**e) atraso térmico da parede ( $\varphi$ ):**

$$R_t = 0,36 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

$$CT = 427,20 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot CT}$$

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{0,36 \cdot 427,2} = 9,03 \text{ horas}$$

**f) fator de calor solar (FS):**

$$FS = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

Utilizando tijolo aparente ( $\alpha = 0,65$ ), teremos:

$$FS = 4 \times 1,88 \times 0,65 = 4,88\%$$

## ANEXO C

## COMPARAÇÃO DOS CUSTOS PARA EXECUÇÃO DA ALVENARIA

Tabela 1. Comparação dos custos entre alvenaria de tijolo solo-cimento com outros tipos de tijolos.

<b>Tijolo-solo cimento</b>	<b>Quant.</b>	<b>Valor</b>	<b>Blc. Cimento 14x40</b>	<b>Quant.</b>	<b>Valor</b>	<b>Tijolo baiano</b>	<b>Quant.</b>	<b>valor</b>
mão-de-obra	174	R\$ 2.086,00	Mão de obra	174	R\$ 4.346,25	Mão de obra	174	R\$ 4.346,25
tijolos	7.467	R\$ 4.650,00	bloco	2173	R\$ 2.173,13	tijolo	10431	R\$ 2.712,06
colunas	0	R\$ 0,00	colunas	10	R\$ 802,46	colunas	10	R\$ 802,46
cantos	0	R\$ 0,00	massa	174	R\$ 1.328,67	massa	174	R\$ 1.328,67
cintamento	56	R\$ 130,00	reboco	348	R\$ 1.427,93	reboco	348	R\$ 1.427,63
grouts	46	R\$ 380,00	cintas	56	R\$ 323,64	cintas	56	R\$ 323,64
mão-de-obra resina	348	R\$ 525,00	massa corrida	348	R\$ 1.062,42	massa corrida	348	R\$ 1.062,42
silicone/resina	11,59	R\$ 500,00	tinta	695	R\$ 3.000,00	tinta	695	R\$ 3.000,00
			Mão de obra	348	R\$ 1.500,00	Mão de obra	348	R\$ 1.500,00
sub-total		R\$ 8.271,00	sub-total		R\$ 15.964,50	sub-total		R\$ 16.503,13
contigência	10%	R\$ 827,10	contigência	10%	R\$ 1.596,45	contigência	10%	R\$ 1.650,31
m <sup>2</sup> de parede final	52,29	R\$ 9.098,10	m <sup>2</sup> de parede final	100,92	R\$ 17.560,95	m <sup>2</sup> de parede final	104,33	R\$ 18.153,44

Fonte: Sinduscon – SP, em dezembro de 2005.

Se a construção foi feita com tijolo de solo-cimento a parede pronta custará apenas R\$ 52,29/m<sup>2</sup> contra R\$ 100,92/m<sup>2</sup> do bloco de cimento, ou seja, apenas 59,32%. De modo análogo, comparado ao tijolo baiano, R\$ 104,33/m<sup>2</sup>, será uma redução de 57,39%.

Fatores considerados na formação do custo comparativo:

- Comum a todos: mão de obra, material de alvenaria e pintura (material e mão-de-obra);
- Paredes de solo-cimento: frete de tijolos, cintamento com tijolo tipo canaleta ferro 5/16", grouts (concreto com pedrisco, ferro 3/8");
- Outras alvenarias: colunas e cintas: madeira, concreto, ferro 3/8", estribos;
- Nota 1: no cálculo foi adicionada uma contingência de 10%;
- Nota 2: Valores calculados com base nos preços de materiais e serviços nas cidades de Piracicaba e São Pedro.

Comentários:

- O valor a mão-de-obra é menos da metade quando usamos o tijolo de solo-cimento;
- Não é usada massa para assentamento dos tijolos – cola somente nas vergas;
- Nas colunas de concreto (grouts) usa-se apenas 25% do ferro se comparado as colunas de concreto convencionais e apenas 10% do volume de concreto;
- Não se usa madeira para na execução de colunas.



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)